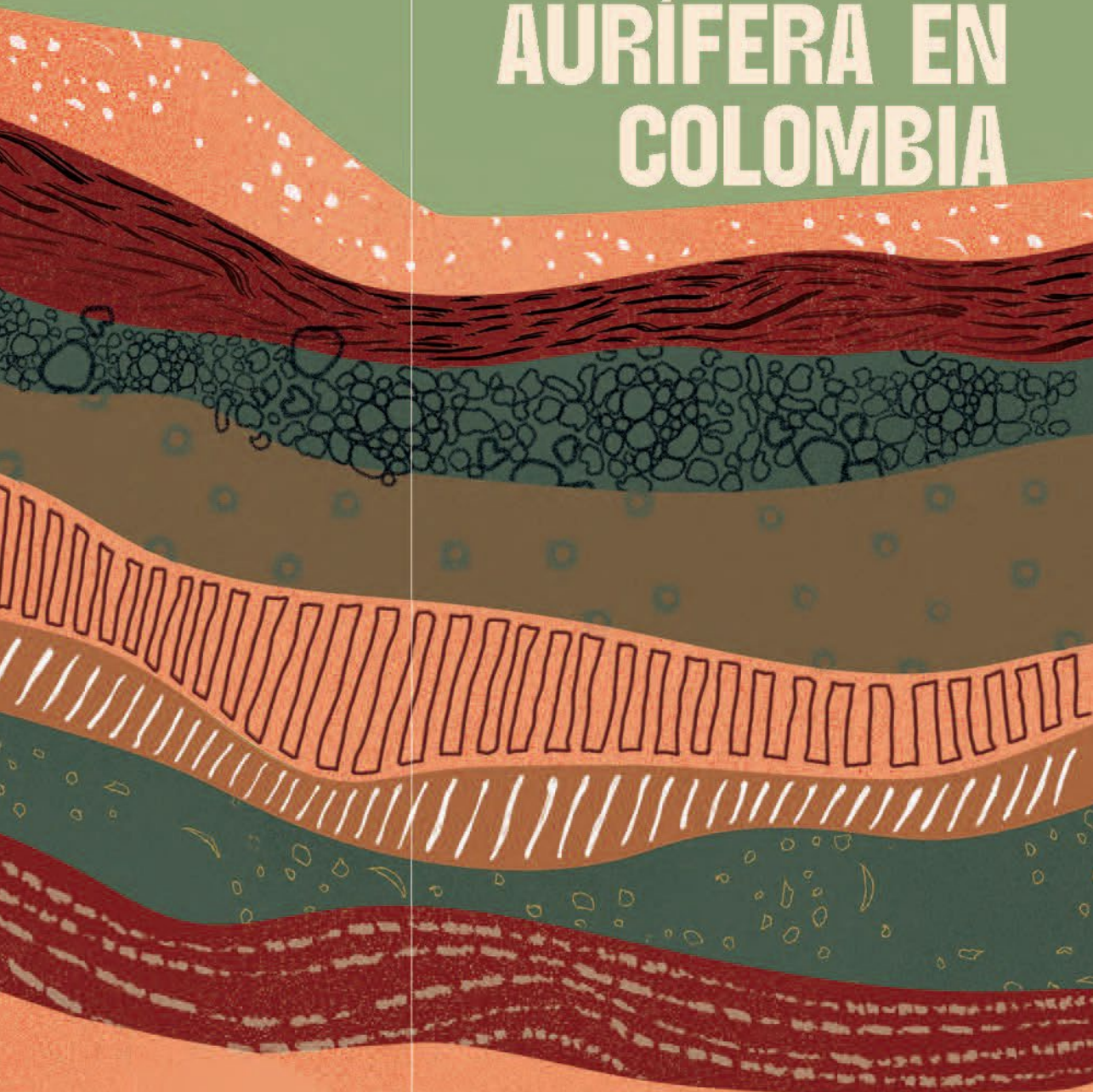


MITOS Y REALIDADES DE LA MINERÍA AURÍFERA EN COLOMBIA



EDUARDO CHAPARRO ÁVILA Y LEONARDO GÜIZA SUÁREZ
EDITORES ACADÉMICOS

Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia

Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia

Resumen

De la mano de expertos nacionales, este libro analiza nueve de los mitos en torno a este tema en el país, relacionados con temas ambientales, sociales, jurídicos y económicos y, desde ahí, el libro explora la bibliografía existente que se encuentra en revistas científicas indexadas, estudios internacionales, documentos oficiales, normatividad y jurisprudencia, y lo complementa con la revisión de estudios de impacto ambiental, entrevistas a funcionarios y visitas de campo a proyectos mineros. Se espera que este aporte de la academia sea una oportunidad para generar una discusión respetuosa, imparcial y crítica sobre los argumentos a favor y en contra de la minería de oro en el país, que sin duda será un referente fundamental para todos aquellos interesados en conocer más sobre este sector.

Palabras clave: Derecho ambiental, legislación colombiana, minería aurífera, protección del medio ambiente, recursos hídricos, recursos subterráneos, mecanismos de participación ciudadana.

Myths and Realities of Gold Mining in Colombia

Abstract

With the help of national experts, this book analyzes nine of the myths around this topic in the country, regarding environmental, social, legal, and economic issues; based on this, the book explores the existing bibliography of indexed scientific journals, international studies, official documents, regulations, and jurisprudence, and complements it with a review of environmental impact studies, interviews with public servants, and field visits to mining projects. This contribution from the academy is expected to be an opportunity to generate a respectful, impartial, and critical discussion of the arguments in favor and against gold mining in the country, which will undoubtedly become an important reference for all those interested in knowing more about this sector.

Keywords: Environmental law, Colombian legislation, gold mining, environmental protection, water resources, underground resources, citizen participation mechanisms.

Citación sugerida / Suggested citation

Chaparro-Ávila, E. y Güiza-Suárez, L. (eds.) (2020). *Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia*. Bogotá, D. C.: Editorial Universidad del Rosario.
<https://doi.org/10.12804/tj9789587844887>

Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia

Eduardo Chaparro-Ávila
Leonardo Güiza-Suárez
—*Editores académicos*—

Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia / Eduardo Chaparro-Ávila, Leonardo Güiza-Suárez, editores académicos. – Bogotá: Editorial Universidad del Rosario, 2020.

xviii, 444 páginas: ilustraciones
Incluye referencias bibliográficas.

1. Minas de oro – Colombia. 2. Industria minera – Colombia. 3. Minería – Aspectos ambientales. 4. Residuos mineros. 5. Política minera – Colombia. I. Aristizabal-González, Juan David. II. Salazar-Giraldo, Juan Pablo. III. Güiza-González, Sonia. IV. Ordóñez-Carmona, Oswaldo. V. Rivera-Pulido, Viviana. VI. Giraldo-Villada, Omar. VII. León-Castillo, John Alexander. VIII. Vargas C., Héctor Raúl. IX. Vargas C., Germán. X. Bolívar-Herrera, Lorena. XI. Mateus, Rafael. XII. Vergara, Algemiro. XIII. González, Tomás. XIV. Ponce-Muriel, Álvaro. XV. Escobar, Daniela. VI. Gamba, Patricia. XVII. Universidad del Rosario. XVIII. Título.

622.342 SCDD 20

Catalogación en la fuente – Universidad del Rosario. CRAI

JAGH

Septiembre 09 de 2020

Hecho el depósito legal que marca el Decreto 460 de 1995



Universidad del
Rosario

© Editorial Universidad del Rosario
© Universidad del Rosario
© Varios autores

Editorial Universidad del Rosario
Carrera 7 No. 12B-41, of. 501
Tel: 2970200 Ext. 3112
editorial.urosario.edu.co

Primera edición: Bogotá D. C., 2020

ISBN: 978-958-784-487-0 (impreso)
ISBN: 978-958-784-488-7 (ePub)
ISBN: 978-958-784-489-4 (pdf)
<https://doi.org/10.12804/tj9789587844887>

Coordinación editorial: Editorial Universidad del Rosario
Corrección de estilo: Ludwing Cepeda Aparicio
Diseño de cubierta: Adán Farías Forero
Diagramación: Precolombi EU-David Reyes
Impresión: Xpress. Estudio Gráfico y Digital, S. A. S.

Impreso y hecho en Colombia
Printed and made in Colombia

Los conceptos y opiniones de esta obra son responsabilidad de sus autores y no comprometen a la Universidad ni sus políticas institucionales.

El contenido de este libro fue sometido al proceso de evaluación de pares, para garantizar los altos estándares académicos. Para conocer las políticas completas visitar: editorial.urosario.edu.co

Todos los derechos reservados. Esta obra no puede ser reproducida sin el permiso previo escrito de la Editorial de la Universidad del Rosario.

Contenido

Introducción.....	xv
<i>Eduardo Chaparro-Ávila</i>	
<i>Leonardo Güiza-Suárez</i>	
 Capítulo 1. Identificación de áreas de importancia ecológica y proyectos de minería: el caso de los páramos	 1
<i>Leonardo Güiza-Suárez</i>	
<i>Juan David Aristizabal-González</i>	
 Introducción	2
1. Ecosistemas prioritarios para la conservación y la minería	4
2. Ecosistemas de importancia en Colombia	6
3. Áreas de importancia ecológica y áreas protegidas	8
4. Zonas de exclusión minera.....	10
5. Conflictos entre las áreas de importancia ecológica y la minería.....	13
6. Ecosistemas de páramo: características y atributos	16
7. Protección de los páramos.....	18
8. Páramo de Santurbán.....	20
9. Delimitación del páramo de Santurbán.....	21
10. Caso de estudio: proyecto Soto Norte	22
11. El conflicto ambiental del proyecto Soto Norte.....	23
Conclusiones.....	25
Referencias.....	27

Capítulo 2. Manejo de aguas residuales en los procesos mineros 33

Juan Pablo Salazar-Giraldo

Sonia Güiza-González

Introducción	34
1. Parámetros fisicoquímicos del agua de un vertimiento minero	38
2. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales mineras	45
2.1. Tratamientos activos.....	46
2.2. Tratamientos pasivos (fisicoquímicos y biológicos)	59
2.3. Tratamientos para degradación del cianuro	66
3. Modelo de tratamiento de aguas mineras	67
3.1. Proyecto Soto Norte	67
3.2. Mina Yanacocha, Perú	70
3.3. Mina Casposo, Argentina	71
3.4. Proyecto minero Cerro Casale, Chile	71
3.5. Proyecto minero Buriticá, Colombia	72
3.6. Explotación minera en Segovia, Colombia	72
Conclusiones.....	73
Referencias.....	75

Capítulo 3. Vertimientos tóxicos relacionados con la minería aurífera 85

Eduardo Chaparro-Ávila

Sonia Güiza-González

Introducción	86
1. Los recursos minerales son fundamentales para mantener el progreso y desarrollo actual.....	90
1.1. La caracterización mineralógica del oro determina cuál debe ser el método de beneficio minero	92
1.2. Tipos de productos generados en un proceso mineral e indicadores minero-ambientales como estrategia de control	93
2. Estudios de factibilidad, fundamento de procedimientos operativos normalizados.....	97
2.1. Evaluación del procesamiento mineral para seleccionar el que proporciona la máxima recuperación del metal	100
2.2. Sofisticados ensayos metalúrgicos previenen el drenaje químico	102

2.3. Monitoreo de los componentes naturales circundantes a una mina y el depósito de colas y estériles.....	105
3. Extracción del oro “invisible” se fundamenta en la mineralogía.....	108
4. La minería aurífera convencional utiliza métodos imprecisos y poco tecnificados.....	112
4.1. Proceso de cianuración: todos lo utilizan y conocen	113
4.2. El peligro del mercurio en la amalgamación erradicado por las compañías mineras y en proceso de erradicación en la minería artesanal y pequeña.....	116
5. Procesos de remediación, oportunidad de reducir la afectación por pasivos mineros huérfanos	122
5.1. Biorremediación con base en los procesos biológicos de los organismos que cohabitan con la afectación	125
5.2. Remediación del arsénico por cianuración.....	127
Conclusiones.....	129
Referencias.....	131

**Capítulo 4. Riesgos de la minería aurífera subterránea
en cuanto a los recursos hídricos subterráneos
y la estabilidad física del terreno**

141

Oswaldo Ordóñez-Carmona

Viviana Rivera-Pulido

Introducción	142
1. Metodología.....	145
2. Riesgos por la alteración hídrica subterránea y técnicas manejo ambiental.....	146
3. Riesgos por la alteración geoestructural del terreno	152
3.1. Subsistencia o hundimiento del terreno.....	152
3.2. Colapso de las excavaciones subterráneas	156
4. Técnicas y tecnologías para la prevención de riesgos geomecánicos.....	161
4.1. Fotogrametría	161
4.2. Sensores de fibra óptica (FOS).....	161
4.3. Monitoreo microsísmico.....	162
4.4. Estructuras dinámicas de soporte.....	162
4.5. Hormigón proyectado.....	163

4.6 Refugios mineros.....	165
4.7. Hidrofractura.....	165
4.8 Congelamiento (<i>freezing</i>)	166
Conclusiones.....	167
Referencias.....	171

Capítulo 5. Empleo de explosivos en proyectos de minería aurífera 183

Omar Giraldo-Villada

John Alexander León-Castillo

Introducción	184
1. Metodología.....	185
2. ¿Qué son los explosivos?.....	186
3. Los explosivos industriales.....	187
4. Propiedades y características de los explosivos.....	190
5. Sistemas de iniciación	194
6. Tipos de detonadores	195
6.1. Detonador no eléctrico	195
6.2. Detonador electrónico	196
6.3. Criterios de selección de explosivo.....	197
7. Variables geométricas que intervienen en el diseño de las voladuras	199
8. El uso de los explosivos.....	204
9. Distribución de explosivos en el barreno	205
10. Consumo específico de explosivos.....	206
11. Iniciación y cebado de cargas	207
12. Tiempos de retardo y secuencias de encendido.....	208
13. Perforación específica (ps)	208
14. Calidad de la perforación	208
15. Impactos ambientales asociados al uso de explosivos.....	209
16. Vibraciones	212
17. Onda aérea.....	214
18. Medidas de seguridad en el empleo de explosivos	215
19. Normatividad.....	217
20. Normas de seguridad en el manejo de explosivos	221
21. Almacenamiento de explosivos	222
22. Transporte en interiores	222
23. Estudio de caso	223

Conclusiones.....	227
Referencias.....	230

Capítulo 6. Análisis de los depósitos de colas y estériles

por minería de oro en Colombia.....	233
--	------------

Héctor Raúl Vargas C.

Germán Vargas C.

Introducción	234
1. Características de los depósitos de colas, estériles o relaves	235
2. Métodos y técnicas.....	236
3. Depósitos de colas y estériles en la minería colombiana.....	237
4. Depósitos en la minería aluvial	238
4.1. El Bagre, Antioquia.....	240
5. Depósitos de colas y estériles asociados a minería subterránea	242
5.1. Marmato.....	242
5.2. Segovia Remedios.....	244
6. Depósitos de colas asociados a niveles o escalas de la minería en Colombia.....	244
6.1. Proyectos de pequeña e informal minería	245
6.2. Proyectos de mediana minería.....	247
6.3. Proyectos de gran minería	250
6.4. Depósitos de colas de la minería en otros países de Latinoamérica	251
7. Ejemplos de éxito en recuperación de depósitos de colas	253
8. Desastres asociados a depósitos de colas y estériles	254
Conclusiones.....	255
Referencias.....	256

Capítulo 7. Mecanismos de participación ciudadana en el sector

minero: una mirada desde el derecho constitucional	263
---	------------

Lorena Bolívar-Herrera

Leonardo Güiza-Suárez

Introducción	264
1. Fundamentos constitucionales del carácter democrático, participativo y pluralista del Estado colombiano	267

2. Principios constitucionales de Estado unitario y autonomía territorial, coordinación, concurrencia y principales mecanismos de participación ciudadana previos a la titulación minera	272
2.1. Programa de relacionamiento con el territorio de la Agencia Nacional de Minería (C. C. s. su-095 de 2018).....	281
3. El derecho fundamental a la consulta previa como mecanismo de participación ciudadana previo a las operaciones del sector minero.....	286
4. La protección ambiental y los principales mecanismos de participación ciudadana para las operaciones del sector minero.....	290
4.1. El licenciamiento ambiental y los mecanismos de participación ciudadana previos y en las operaciones del sector minero	292
5. Las obligaciones sociales de los contratos mineros: Plan de Gestión Social y principales mecanismos de participación ciudadana previos y a las operaciones del sector minero.....	298
6. El marco de derechos humanos y empresa: la debida diligencia en la aplicación de los mecanismos de participación ciudadana en las operaciones del sector minero.....	301
6.1. Algunos estándares internacionales relevantes que incluyen como referente relevante mecanismos de participación ciudadana	302
6.2. Disposiciones en Colombia	306
Conclusiones.....	309
Referencias.....	312
 Capítulo 8. Reasentamiento y proyectos mineros: una decisión de última instancia	 321
<i>Rafael Mateus</i> <i>Algemiرو Vergara</i>	
Introducción	322
1. Metodología.....	326

2. La nominación del mecanismo.....	327
3. El marco normativo	337
4. Normas constitucionales	341
5. Normas legales.....	342
6. Normas internacionales generales	343
7. Normas y guías internacionales sobre reasentamiento involuntario	345
8. La evaluación del reasentamiento.....	351
9. Casos de reasentamiento en Colombia	360
9.1. Gramalote: reasentamiento por eventos naturales catastróficos	360
9.2. Corredor minero del Cesar: reasentamiento <i>ex post</i>	364
9.3. Plan Bonito.....	366
9.4. El Hatillo	367
9.5. Boquerón	368
9.6. Lecciones aprendidas de estos procesos	370
10. Proyecto de reasentamiento: proyecto Soto Norte	371
Conclusiones.....	375
Referencias.....	376

Capítulo 9. Beneficios económicos de la minería

de oro en Colombia	383
--------------------------	-----

Tomás González

Álvaro Ponce-Muriel

Daniela Escobar

Patricia Gamba

Introducción	384
1. Etapas y beneficios de un proyecto minero de oro	386
2. Contribuciones actuales de la minería aurífera.....	392
2.1. Evolución y procedencia de la producción aurífera durante la última década	393
2.2. Reseña de los principales indicadores del aporte a la economía nacional	396
2.3. Aportes de la minería aurífera a la economía nacional.....	397
2.4. Pagos y otros aportes de los productores de oro	400
3. Responsabilidad social y transparencia en la industria minera.....	411
3.1. Iniciativa de Reporte Global (GRI)	412

3.2. Estándares de desempeño del ICMM	412
3.3. Iniciativa para la Transparencia de las Industrias Extractivas (EITI)	413
4. La producción aurífera colombiana a nivel industrial	415
4.1. Proyectos actualmente en producción	416
4.2. Proyectos programados para entrar en producción en el mediano plazo.....	420
5. Beneficios futuros	422
5.1. Metodología.....	423
5.2. Resultados	429
Conclusiones.....	437
Referencias.....	439

Introducción

Eduardo Chaparro-Ávila
Leonardo Güiza-Suárez

A comienzos del siglo pasado, el mundo miraba asombrado el despertar de China, un gigante que, cumpliendo la profecía napoleónica, estremecía al mundo con su espectacular crecimiento económico y social, el cual devoraba minerales y metales, ocasionando con ello el último superciclo de precios para la industria y los países que los producían.

Este hecho fue aprovechado por naciones ricas en depósitos minerales y que se habían preparado para ello, en América: Canadá, México, Perú, Brasil y Chile encabezaron el grupo de países que iniciaron una radical transformación en la manera tradicional de producir esos recursos. Cambios en la regulación económica, minera y social introdujeron conceptos de obligatorio cumplimiento, alrededor de la remesa de utilidades, las condiciones de inversión extranjera, el manejo ambiental y el relacionamiento con comunidades, que ocuparon la atención de los operadores mineros, quienes no estuvieron exentos de enfrentar conflictos, frente a las nuevas expectativas ciudadanas.

Como una consecuencia de esta nueva condición, surgen entonces aglomeraciones industriales encargadas de proveer los bienes y servicios que la actividad demandaba. El país que más invirtió en la región fue Canadá, acompañado de Australia, además de inversiones del Reino Unido, de Sudáfrica, de los Estados Unidos y Japón. Ese momento vio el surgimiento de organizaciones mineras latinoamericanas: como, por

ejemplo: Codelco y el Grupo Luksic de Chile, Grupo Peñoles y Grupo México, y Vale do Rio Doce de Brasil.

En Colombia se dio un proceso diferente, en el que, salvo por el Grupo Mineros (que hoy en día tiene una inversión extranjera), la inversión en el sector aurífero ha sido principalmente extranjera con arribo directo en las zonas rurales del país, muchas de ellas, con grandes brechas de desarrollo y atención estatal, lo que ha suscitado una serie de conflictos socioambientales que podríamos agrupar en dos grandes paradigmas: el primero, el rechazo a la minería industrial motivada por el temor a la erradicación de la minería en pequeña escala, casi siempre que se lleva a cabo con altas tasas de informalidad y en municipios con tradición minera, y el segundo, el rechazo a la minería industrial motivada por el temor a los impactos socioambientales en los municipios sin tradición minera.

Lo paradójico de ambos casos es que se utilizan los mismos argumentos socioambientales para rechazar la actividad, como lo son la amenaza a los modos de producción tradicional y a los medios de vida, tales como el agua, lo cual ha motivado la configuración de diversos movimientos sociales que adoptaron discursos “ambientalistas” centrados en la protección de los recursos naturales como discurso articulador de la politización antiminera. Este discurso ha trascendido a través de la mediatización desde las regiones hasta llegar a la vida cotidiana de aquellos que incluso no tienen una relación directa con los proyectos mineros.

Cabe señalar que estos movimientos se han fortalecido, sobre todo después de la adopción de algunas de sus demandas antimineras por parte de los jueces y altas cortes del Estado, que, si bien poco a poco se han ido moderando o corrigiendo, han fracturado la credibilidad de las empresas en los territorios.

Entonces, la pregunta que surge es ¿cómo logró permear tan profundamente en la sociedad este discurso antiminero que muchas veces está fundado en la irracionalidad y la tergiversación de la verdad? Para dar una respuesta, debemos adentrarnos en el estudio del fenómeno de los mitos y la capacidad que tienen para generar ideologías que pueden terminar en la adopción de posiciones políticas.

Desde la antigua Grecia, existe el concepto de *mythos*, que fue acuñado para significar el conjunto de respuestas del hombre para explicar una realidad que se le presentaba de manera irracional; razón por la cual el

mito, en su concepción original, se refiere a la concepción de todo aquello que rodeaba al ser humano y que le resultaba inexplicable a través de la teoría o la lógica. Por ende, es un error pensar que los mitos son producto de una invención caprichosa de la imaginación, pues en su mayoría han sido inspirados por el temor y respeto del hombre hacia lo desconocido. En este sentido, el mito en la antigüedad fue concebido como una forma de llegar a la teoría, puesto que era concebido como una percepción *a priori* de un fenómeno que posteriormente podría ser explicado por la razón.

Hoy en día, el concepto de mito ha tenido una resignificación dependiendo de si precede a la teoría y por tanto no meramente “irracional” o “antirracional” que han sido llamados “prerracionales”, y los mitos de la misma teoría, que se constituyen en mitificaciones de la realidad o “irracionales” que han sido llamados “posracionales” puesto que se fijan después del logos o producto de la racionalidad (Pérez-Tapias, 1988).

Lo que ocurre es que en las mitificaciones de la realidad llevadas a cabo por la racionalidad menguada “posracionales”, bajo la apariencia del discurso lógico, se deja de tratar al individuo como un fin, para convertirlo en un medio. Las mitificaciones de nuestro tiempo están, pues, en estrecha conexión con las ideologías, a las cuales prolongan y condensan. Es decir, no hay ideología sin mitificaciones posracionales.

Las ideologías son construcciones complejas que, como tales, tienen su ámbito propio entre los “expertos”, aunque desde ahí se difundan al resto de la sociedad. En ello, los mitos juegan un papel fundamental, ya que, al condensar y dar concreción a los componentes más elementales de las ideologías, facilitan su penetración en la conciencia colectiva a través del inconsciente social (Pérez-Tapias, 1988).

Ante el peligroso poder de los nuevos mitos —como lo que ocurre entre los discursos antimineros, que fundan su argumentación no en la razón sino en el corazón, puesto que, como anotamos, fundan sus banderas en el ambientalismo irracional—, la tarea de desmitificación es más urgente que nunca, puesto que mediante lo mitificado llega la ideología a la mayoría de la población, hasta ganar su homogeneidad en la que quedan subsumidos los intereses reales de la multiplicidad de individuos atomizados. Se puede hablar, entonces, de los mitos posracionalistas en los que se fundan los discursos ambientalistas antimineros, como núcleos de las ideologías cargados emocionalmente, lo que les genera la capacidad de

realizar adhesiones irracionales, puesto que se basan en una fe que sumerge aún más a los individuos en un estado de alienación que los convierte en piezas bien acopladas a los engranajes de intereses políticos de quienes están detrás de las ideologías.

Si el éxito de los mitos se ve garantizado porque son (falsas) respuestas a necesidades humanas, *vr. gr.*, “sin la minería voy a tener agua”, tal éxito se ve incrementado gracias a la potente capacidad de las redes sociales y su papel en la recreación continua de la mitología y en la multiplicación de sus efectos.

En razón de lo expuesto, en este libro hemos reunido a los más versados y prestigiosos expertos nacionales para ponernos en la tarea de desmitificación de algunos mitos en torno a la minería aurífera del país, para que la sociedad civil, la comunidad académica y científica y todos aquellos interesados en conocer más de este sector tengan un referente teórico, racional y objetivo, frente a lo que proponen los mitos, que es precisamente lo contrario: mítico, irracional y subjetivo.

Para cumplir con lo anterior, seleccionamos los nueve mitos más reiterados en la industria minera aurífera, relacionados con temas ambientales, sociales, jurídicos y económicos. A partir de allí, a través de varios autores por mito, cada uno con profesiones o experticias diferentes, se analizó principalmente la bibliografía existente en revistas científicas indexadas internacionalmente, estudios internacionales, documentos oficiales, la normatividad y la jurisprudencia, lo que se complementó con la revisión del estudio de impacto ambiental, entrevistas a funcionarios y la visita de campo al proyecto Soto Norte en inmediaciones de Suratá y California, Santander.

Con lo anterior, los autores entregamos al público este documento con el único ánimo de contribuir a un debate, que requiere seriedad, medida analítica y planteamientos asociados a las realidades técnico científicas y a las cifras. Por ende, lo que se quiere es tener un punto de partida para abrir una discusión constructiva en la que se despejen dudas y desmitifiquen algunas ideas que damos por ciertas en el sector minero, pero que pueden estar alejadas de la realidad y del avance de la técnica y la ciencia.

Referencias

Pérez-Tapias, J. (1988). Mito, ideología y utopía. Posibilidad y necesidad de una utopía no mitificada. *Gazeta de Antropología*, 6, artículo 4. <http://hdl.handle.net/10481/13747>

Capítulo 1

Identificación de áreas de importancia ecológica y proyectos de minería: el caso de los páramos

Leonardo Güiza-Suárez^{*}
Juan David Aristizabal-González^{**}

Resumen

Se estima que en Colombia la producción de oro aumentará en la próxima década y llegará a ser de más de 60 toneladas anuales, lo cual seguirá potenciando el crecimiento del país. Para que esto ocurra, el Estado colombiano debe identificar cuáles son las Áreas de Importancia Ecológica (AIE) del país, áreas en las que no se pueden adelantar explotaciones mineras, ya que este asunto ha generado incertidumbre en las empresas para la ejecución de sus proyectos. Para abordar este problema, se efectuó una revisión de literatura científica en bases de datos, así como documentos de entidades públicas y

* Abogado, licenciado en Biología y tecnólogo en Saneamiento Ambiental. Máster en Derecho Ambiental Industrial de la Universidad de Poitiers, Francia. Máster (título propio) en Derechos Humanos, Estado de Derecho y Democracia en Iberoamérica de la Universidad de Alcalá, España. Actualmente es director del Centro de Innovación para la Minería y el Ambiente (CIMA) y miembro del Grupo de Investigación en Derecho Público de la Facultad de Jurisprudencia de la Universidad del Rosario. Correo electrónico: leonardo.guiza@urosario.edu.co

** Biólogo de la Universidad Javeriana. Especialista en Derecho Ambiental de la Universidad del Rosario. Consultor en sostenibilidad. Correo electrónico: aristi.juand@gmail.com

privadas, y de la legislación nacional. Se documentaron las características de las AIE en el contexto nacional e internacional, y se encontró que no existe claridad sobre lo que constituyen estas áreas en el país. Por ello, se presentó una interpretación conforme a las aproximaciones jurídicas que se han hecho sobre ellas. Así mismo, se pone en evidencia el problema que ha ocasionado la titulación minera en estas áreas. Al tomarse como caso de estudio la situación de los páramos, se realizó una descripción de estos ecosistemas y las medidas que se han adoptado para su protección en los últimos años. Se encontró que la delimitación de ellos ha generado grandes controversias con las comunidades, lo cual ha retrasado este proceso. Finalmente, se documentó la discusión que al respecto ha suscitado el proyecto aurífero Soto Norte, que, aunque los estudios técnicos indican que se encuentra por fuera del páramo de Santurbán, en algunas regiones distantes a la zona de incidencia del proyecto se ha configurado el mito de que el proyecto se adelantaría en este ecosistema, lo que ha llevado a su rechazo por la ciudadanía. Con este capítulo se evidencia que el Estado está llamado a aprovechar el potencial aurífero del país recuperando la confianza de las empresas y las comunidades, y el primer paso para ello es establecer con claridad en cuáles áreas está restringida la explotación de oro.

Palabras clave: minería aurífera, áreas de protección ecológica, páramo de Santurbán, conflicto ambiental, zonas de exclusión minera.

Introducción

La producción de oro a nivel mundial se ha incrementado en los últimos años en cerca de un 25%, pasando de 2.793 toneladas en 2010 a 3.502 en 2018, y se estima que la producción seguirá aumentando en esta década (World Gold Council, 2019). En Colombia, la producción de oro en 2018 se estimó en 43 toneladas, ubicándolo en la posición núm. 21 a nivel mundial y en el cuarto productor en Latinoamérica, por debajo de Perú, Brasil y Argentina (World Gold Council, 2019). Se estima que la producción en Colombia crecerá a 65 toneladas para el 2027 (BMI Research, 2018), lo que indica que la minería de oro seguirá siendo una industria creciente en el país.

Betancur-Corredor et al. (2019) identificaron los retos de la minería aurífera en Colombia, al ser esta una actividad industrial en crecimiento y de alto potencial para contribuir al desarrollo del país. Parte de estos retos se encuentran en la mitigación de los impactos ambientales (como la contaminación), la recuperación ambiental de las áreas afectadas por la extracción minera y la creación de redes de confianza con las comunidades para evitar los conflictos socioambientales con los proyectos extractivos.

No obstante, existen áreas de alto valor ambiental o de sensibilidad social en las que se considera que la minería no debería realizarse (Miranda et al., 2005) y esto ha sido un factor que poco se ha analizado en el contexto colombiano, en el que persiste el problema de que estas áreas aún no se encuentran claramente definidas, lo cual ha generado fuertes conflictos entre las empresas, que no tienen certeza jurídica sobre en cuáles áreas no se deben realizar actividades mineras, y las comunidades interesadas en la protección de estas zonas.

Por esta razón, a través de este capítulo, se plantea la necesidad de tener una definición clara sobre lo que constituyen las áreas de importancia ecológica como factor fundamental para el desarrollo de proyectos de minería aurífera en Colombia.

Para la elaboración del capítulo, se procedió a realizar la revisión de literatura según los lineamientos propuestos por Snyder (2019) consistentes en cuatro fases: diseñar la revisión, realizar la revisión, analizar la información recopilada y, finalmente, redactar el texto. En la primera fase, se definieron las preguntas de investigación que orientaron la revisión para comprender la necesidad de definir las áreas de importancia ecológica para la exclusión de actividades mineras en Colombia y su importancia para evitar los conflictos socioambientales que se presentan con las compañías mineras, las comunidades y el mismo Estado. Las preguntas que se plantearon fueron: ¿cuál es la definición de un área de importancia ecológica?, ¿cuáles son sus características y su relación con la industria minera?

De los resultados obtenidos, se realizó una selección de los artículos más relevantes, los cuales estaban más relacionados con el tema de estudio. Para el caso de estudio del proyecto minero de Soto Norte, se realizó la revisión del Estudio de Impacto Ambiental del proyecto, así como una visita al lugar en febrero de 2020.

Para abordar el objeto planteado, se iniciará con la mención de las características de las áreas de importancia ecológica y se hará un análisis de cómo se encuentran definidas en la legislación colombiana y su relación con las actividades mineras. Posteriormente se analizará el contexto actual de los ecosistemas de páramo, como áreas de alto valor ambiental y algunos conflictos que han ocurrido allí con respecto a su delimitación. Finalmente, se estudiará el caso del proyecto aurífero de Soto Norte, el cual presenta un claro ejemplo de cómo no tener delimitado este ecosistema durante mucho tiempo ha generado conflictos entre las comunidades, el Estado y las empresas.

1. Ecosistemas prioritarios para la conservación y la minería

En 1993 entró en vigor el Convenio de Diversidad Biológica de las Naciones Unidas presentado en la conferencia sobre medio ambiente de Río de Janeiro. El principal objetivo de este convenio internacional es el de la conservación de la diversidad biológica y el uso sostenible de esta. Allí se insta a las partes (los países), entre otras, a identificar los componentes de la diversidad que sean importantes para la conservación, teniendo en cuenta una serie de criterios para identificar ecosistemas que sean representativos o únicos, que alberguen gran diversidad, que contengan especies amenazadas, endémicas y migratorias; y que en ellos se desarrollen importantes procesos biológicos (UN, 1992).

El Convenio adoptó algunas herramientas para la protección de la diversidad, alentando a que los países protegieran ecosistemas en entornos naturales y crearan un sistema de áreas protegidas basado en criterios técnicos (UN, 1992). Posteriormente, en el marco de esta Convención se adoptaron las metas de Aichi, de las cuales la número 11 tiene como fin la de conservar a 2020 al menos el 17% del área de los ecosistemas terrestres y el 10% de las áreas marinas (CBD, 2010).

Los ecosistemas, además de albergar la fauna y la flora, también se caracterizan por los servicios que prestan. Este concepto hace referencia a la utilidad (directa o indirecta) que presta la naturaleza para satisfacer las necesidades del hombre, generalmente expresados en alimento, agua, regulación del clima, medicinas, entre otros (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Estos servicios se agrupan en cuatro categorías: servicios de provisión, servicios de regulación, servicios culturales y servicios de soporte.

Las relaciones entre la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y los beneficiarios de estos deben ser estudiadas con detalle para fortalecer las políticas de conservación y manejo de la diversidad (Bennett et al., 2015). Debido a su importancia, los servicios ecosistémicos también son tenidos en cuenta a la hora de priorizar las áreas de conservación. De esta manera, se han adelantado algunos ejercicios de identificación de *hotspots* de servicios ecosistémicos, por ejemplo, el realizado por Delgado-Aguilar et al. (2017), en el que se identificaron los servicios que presta la selva tropical a una comunidad en Ecuador.

Atendiendo a los objetivos para la conservación de la biodiversidad, algunas organizaciones no gubernamentales han identificado ecosistemas de importancia para la conservación. Por ejemplo, wwf ha identificado algunas ecorregiones de importancia ecológica, basado en su valor biológico, estado de conservación y grado de amenaza (Olson et al., 2001). Por otro lado, Conservation International identificó los *hotspots* de conservación, los cuales corresponden a los remanentes de hábitats que podrían desaparecer en los próximos años si no se adelantan medidas contundentes de conservación y restauración (Myers et al., 2000). Para el caso de Colombia, se identificaron dos *hotspots*: el de los Andes tropicales, que abarca toda la cordillera de los Andes, y el de Tumbes-Chocó-Magdalena, que abarca todo el Pacífico colombiano y parte de la costa Caribe.

Otras iniciativas han empleado criterios biológicos, ecológicos, económicos y sociales para identificar estas áreas, siendo los dos primeros los más usados. Así mismo, los objetivos de conservación varían en los estudios, pues algunos se enfocan en la conservación de un único grupo biológico (p. ej., aves), de varios grupos biológicos, de hábitats específicos (como los humedales) o con un enfoque regional de conservación (Dunn et al., 2014).

Debido a la cantidad de criterios utilizados para la identificación de los ecosistemas prioritarios para la conservación, Asaad et al. (2017) analizaron 15 trabajos realizados con diversos enfoques de varias organizaciones y a partir de estos propusieron varios criterios que recogían los planteados en las diferentes propuestas. De esta manera, este estudio recopila los criterios biológicos para tener en cuenta para la definición de estas áreas.

La principal medida adoptada por los países para enfrentar la pérdida de biodiversidad es la designación de áreas protegidas, las cuales

disminuyen la pérdida de hábitat, mantienen los servicios ecosistémicos y ayudan a la conservación de las especies amenazadas (Asaad et al., 2017). Sin embargo, algunos académicos han manifestado que cuando se analiza a menor escala, la mayoría de los ecosistemas terrestres no se encuentran representados en las áreas protegidas, lo cual se suma a la evidencia de que los ecosistemas y las especies no se están conservando lo suficiente (Sayre et al., 2020). En Chile, por ejemplo, las áreas protegidas se concentran en la zona austral (al sur), mientras que las áreas de mayor biodiversidad están en la zona central. Por esta razón, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos no se encuentran bien representados en la red de áreas protegidas de dicho país (Durán et al., 2013).

2. Ecosistemas de importancia en Colombia

En el contexto colombiano, los ecosistemas prioritarios para la conservación fueron designados bajo el término de Área de Importancia Ecológica (AIE), el cual fue incorporado por primera vez en la legislación colombiana a través de la Constitución Política de Colombia de 1991, cuyo artículo 79 reza: “[...] Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las *áreas de especial importancia ecológica* y fomentar la educación para el logro de estos fines”.

En desarrollo de este mandato, la normativa ambiental ha realizado algunas aproximaciones sobre algunos ecosistemas que hacen parte de las AIE. El Decreto 1076 de 2015, el cual compila todas las normas ambientales expedidas en Colombia, en su artículo 2.2.2.1.3.8, designó las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos como áreas de especial importancia ecológica. Por otro lado, en el artículo 2.2.2.3.2.4. del citado decreto, se limitan las AIE a los humedales de importancia internacional incluidos en el listado RAMSAR, los páramos y los manglares.

Finalmente, en el artículo 2.2.3.1.5.2. correspondiente a la ordenación de cuencas hidrográficas, se diferencian a las AIE de otros ecosistemas y zonas que “la legislación ha priorizado para su protección”. Allí se incluyen áreas de páramos, subpáramos, nacimientos de agua, humedales, rondas hídricas, zonas de recargas de acuíferos, zonas costeras, manglares, estuarios, meandros, ciénagas. En la tabla 1 se presenta lo que la normativa ambiental, a lo largo de los años, expresamente ha designado como AIE.

Tabla 1. Áreas de Importancia Ecológica expresamente designadas en la normatividad colombiana

Normativa	Temática	Elementos
Artículo 2.2.2.1.3.8 del Decreto 1076 de 2015	Áreas protegidas	Páramos, subpáramos, nacimientos de agua y zonas de recarga de acuíferos.
Artículo 2.2.2.3.2.4 del Decreto 1076 de 2015	Licencias ambientales	Humedales Ramsar, páramos y manglares.
Artículo 2.2.3.1.5.2 del Decreto 1076 de 2015	Ordenación de cuencas hidrográficas	El artículo diferencia a las áreas de importancia ecológica con otras zonas prioritarias de protección como: páramos, subpáramos, nacimientos de aguas, humedales, rondas hídricas, zonas de recarga de acuíferos, zonas costeras, manglares, estuarios, meandros, ciénagas.

Fuente: elaboración propia.

A pesar de que no existe una definición jurídica sobre lo que constituye un AIE, la jurisprudencia ha dado algunas precisiones sobre ello en tanto que se ha dispuesto que, a diferencia de las demás áreas ambientales, los ecosistemas que conforman las AIE no están “sometidos a la obligación de garantizar un desarrollo sostenible, sino a procurar su intangibilidad”, es decir, no está permitida la explotación de ellos, pues el único uso posible es el de la conservación (Corte Constitucional, 2002).

Así mismo, la Corte dispuso que las AIE tienen una protección jurídica superior, ya que dichas áreas deben ser tenidas en cuenta para la aplicación de normas que la puedan afectar, además de que los ciudadanos pueden disfrutar de ellas mediante actividades de recreación pasiva. Adicionalmente, la Corte interpretó, a partir del Decreto 2372 del 2010, que las AIE tienen tres finalidades (Corte Constitucional, 2016):

1. Asegurar la continuidad de los procesos ecológicos y evolutivos naturales para mantener la diversidad biológica.
2. Garantizar la oferta de bienes y servicios ambientales esenciales para el bienestar humano.
3. Garantizar la permanencia del medio natural, o de alguno de sus componentes, como fundamento para el mantenimiento de la diversidad cultural del país y de la valoración social de la naturaleza.

A partir de los elementos descritos anteriormente, se puede inferir que las AIE tienen las siguientes características:

1. Está prohibida cualquier actividad de explotación al interior de ellas.
2. Son áreas que tienen la condición de ser determinantes ambientales de rango superior para efectos de planeación y uso del suelo.
3. Su único uso permitido es el de conservación y de actividades de recreación pasiva.
4. Deben mantener los valores naturales, los servicios ecosistémicos y los valores culturales.

Respecto a la definición de cuáles son las áreas de importancia ecológica, es importante mencionar lo conceptualizado por la Corte Constitucional (2016):

La determinación de cuáles son dichas áreas no es exclusivamente una tarea del legislativo o del ejecutivo, en la medida en que la importancia de las mismas radique en la preservación de recursos o servicios ambientales necesarios para garantizar derechos constitucionales, o proteger bienes jurídicos de raigambre constitucional. En tales casos, los ecosistemas pueden ser objeto de una protección constitucional directa, entre otras, por vía del control de constitucionalidad.

De esta manera, la protección de las AIE es una prioridad del Estado (como lo ordenó la Constitución) y por ello la Corte manifestó que dichas áreas pueden llegar a ser designadas por el Gobierno, por el Congreso de la República y por la Corte Constitucional, cuando normalmente estos asuntos solo competen al órgano ejecutivo.

3. Áreas de importancia ecológica y áreas protegidas

En el análisis de la categoría jurídica, surge la pregunta de si las AIE son equivalentes a las áreas protegidas. La respuesta corta de ello es no ya que las AIE y las áreas protegidas, a pesar de ser conceptos similares (que

suelen confundirse), en realidad son diferentes. Es importante recordar que las áreas protegidas son un mecanismo que implementaron los gobiernos para la conservación de la biodiversidad, el cual está contemplado en el Convenio de Diversidad Biológica. A pesar de ello y como se expuso anteriormente, estas no representan a los ecosistemas ni la diversidad que albergan.

La Corte Constitucional (2016) hace la diferenciación entre estos dos conceptos. Al referirse a los ecosistemas de páramo, reconoció que, a pesar de la protección especial que requieren estas áreas, esto no los convierte en áreas protegidas, ya que esta figura de conservación requiere de una declaratoria por parte de las autoridades ambientales. Debido a esto, en el país existen áreas de páramo declaradas como áreas protegidas y otras que no lo están. Incluso, el artículo 2.2.2.1.3.8 del Decreto 1076 de 2015 establece que las autoridades ambientales pueden declarar áreas protegidas las zonas de páramos, subpáramos, nacimientos de agua y zonas de recarga de acuíferos, como una de las medidas para garantizar su protección.

Otra diferencia radica en que en las áreas protegidas no siempre se restringen las actividades productivas, pues el uso y zonificación depende del objeto de conservación particular de cada área. En este sentido, se considera que las AIE tienen una categoría de protección superior (y, por ende, mayor importancia), debido a las restricciones de uso que tienen, pues, como se mencionó anteriormente, en ellas no se puede realizar intervención alguna.

Conforme a la información presentada en la tabla 1 y en las características definidas por la jurisprudencia, se puede inferir que las Áreas de Importancia Ecológica que a la fecha están incluidas en el marco jurídico colombiano son las que se muestran en la figura 1. Para el caso de las áreas categorizadas dentro de los ecosistemas terrestres y acuáticos no se pueden realizar actividades de alto impacto que transformen estos ecosistemas, como minería, extracción de hidrocarburos, urbanización, agricultura, etc. En el caso de la categoría de áreas protegidas y como se mencionó anteriormente, las actividades están restringidas de acuerdo con la zonificación de cada área, pero algunas actividades de impacto sí se pueden realizar en estas.

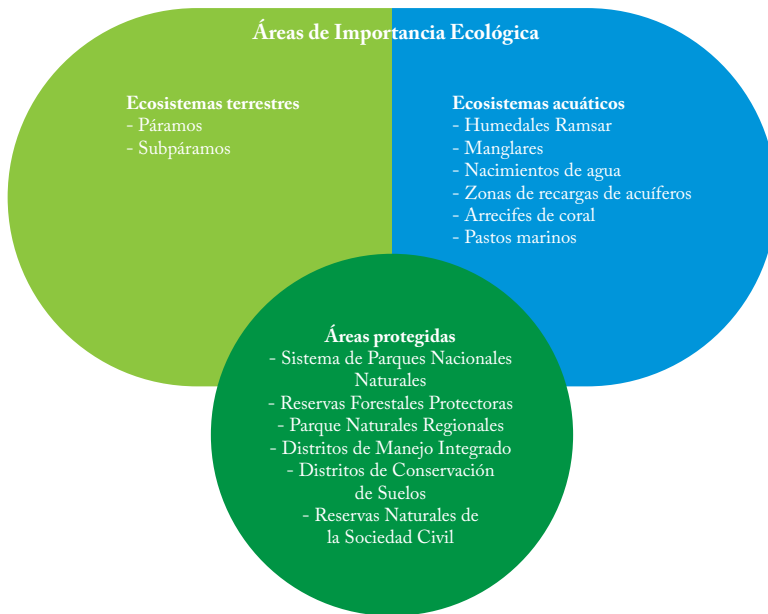


Figura 1. Conformación de las áreas de importancia ecológica en Colombia

Fuente: elaboración propia.

4. Zonas de exclusión minera

El término de áreas de exclusión minera se encuentra asociado al de áreas de importancia ecológica y, al igual que el de áreas protegidas, en muchos contextos se asumen como sinónimos, a pesar de que no es así. En el marco internacional se ha empleado el término de *No-Go zones*, o áreas intangibles, para referirse a aquellas áreas con potencial minero que son ambiental y socialmente muy sensibles a los impactos que genera la explotación minera (Miranda et al., 2005).

Desde el principio, este concepto fue acogido por las principales compañías mineras internacionales, quienes reconocieron la importancia de que la minería no afecte a los ecosistemas valiosos para la humanidad. De esta manera, fue aceptado que los sitios declarados como Patrimonio de la Humanidad por las Naciones Unidas serían excluidos para realizar actividades de explotación minera. No obstante, algunos sectores de la sociedad civil han instado a los gobiernos y a las compañías a incluir dentro de esta lista a los humedales Ramsar, a las áreas protegidas de categorías I-IV, según la clasificación de la Unión Internacional para la

Conservación de la Naturaleza (UICN), y a zonas de alto valor ecológico que no están incluidas en alguna figura de protección ambiental (Miranda et al., 2005). Sin embargo, la definición de estas áreas ha sido objeto de debate entre comunidades, ambientalistas y empresas, y por este motivo no se ha alcanzado un consenso general.

No obstante, también se ha planteado que, aunque algunas áreas tengan un alto valor ambiental, no necesariamente se deba descartar el potencial minero que hay en ellas, pues podría darse la viabilidad de explotación de los minerales allí en caso de que se demuestre que después del proyecto estas áreas mantengan sus valores de biodiversidad y los servicios ecosistémicos que ofrecen. En últimas, las decisiones sobre las zonas de exclusión minera deben hacerse con información detallada y evaluando cada caso particular (WRI, 2003).

En Colombia, la posibilidad de declarar zonas de exclusión minera quedó contemplada desde el 2001 en el Código de Minas (Ley 685 de 2001). Allí, el artículo 34 estipuló que dichas zonas deben ser declaradas y delimitadas de acuerdo con estudios técnicos, sociales y ambientales. Así mismo, se estableció que dichas áreas, en principio, correspondían a “áreas que integran el sistema de parques nacionales naturales, parques naturales de carácter regional y zonas de reserva forestales”. De acuerdo con esto, el Código estableció las primeras zonas de exclusión minera a las áreas protegidas de conservación, permitiendo además la declaratoria de nuevas zonas, siempre y cuando se encuentren claramente delimitadas.

Por otro lado, el segundo inciso del citado artículo permite que, a solicitud del interesado, se puedan autorizar actividades mineras de forma restringida o bajo ciertos métodos de extracción, siempre y cuando no se afecten los objetivos de la zona de exclusión y previamente sea decretada la sustracción del área. Sin embargo, se excluye de esta autorización las áreas de parques naturales nacionales o regionales. Esto brinda un poco de flexibilidad sobre la figura de las zonas de exclusión minera, pues abre la posibilidad de que se pueda sustraer la totalidad o una parte de ellas para realizar actividades mineras, siempre y cuando con ello no se afecte el fin de protección de dicha zona.

Al final, lo que se puede establecer es que las zonas de exclusión minera pueden hacer parte de las Áreas de Importancia Ecológica identificadas previamente, pero no son equiparables a estas en el sentido en que existe

la posibilidad de que en ellas se desarrollen proyectos mineros bajo ciertos parámetros restrictivos. En cambio, como se ha mencionado a lo largo del capítulo, la condición principal para que se declare un AIE es que en ella esté totalmente restringida el desarrollo de cualquier actividad productiva.

Para dar mayor claridad entre las semejanzas y diferencias entre Áreas de Importancia Ecológica, Áreas Protegidas y Zonas de Exclusión Minera, se presenta la siguiente tabla.

Tabla 2. Diferencias y semejanzas entre las Áreas de Importancia Ecológica, las Áreas Protegidas y las zonas de exclusión minera

Variable	Área de Importancia Ecológica	Área Protegida	Zona de Exclusión Minera
Fuente normativa	Art. 79 Constitución Política, normativa mencionada en la tabla 1.	Art. 2.2.2.1.1.1. del Decreto 1076 de 2015 (Decreto 2372 de 2010).	Artículo 34 del Código de Minas (Ley 685 de 2001).
Función	Protección y conservación de recursos naturales.	En general, protección y conservación de recursos naturales, pero varía según el objeto del área.	Protección de recursos naturales, culturales y arqueológicos.
Limite o restricción que impone	Actividades productivas prohibidas. No se permite la sustracción de estas áreas.	Actividades restringidas de acuerdo con el objeto de conservación del área. (algunas actividades productivas son permitidas). Algunas áreas protegidas se pueden sustraer.	Actividades de extracción minera prohibidas, pero se pueden permitir bajo ciertas restricciones. Se pueden sustraer.
Autoridad que las declara	Ministerio de Ambiente las precisa y la delimitación se hace con ayuda de las autoridades ambientales. También las pueden precisar el Congreso y la Corte Constitucional.	Ministerio de Ambiente, Unidad de Parques Nacionales, Autoridades Ambientales.	Autoridades Ambientales con colaboración de la autoridad minera.
¿Se permite la minería?	No.	En algunos casos.	Sí, a solicitud del interesado y con algunas restricciones.
Relación con los ecosistemas de páramos	Todos los páramos son AIE.	No todos los páramos son áreas protegidas.	No todos los páramos están declarados como zona de exclusión minera.

Fuente: elaboración propia.

5. Conflictos entre las áreas de importancia ecológica y la minería

El solapamiento de algunas áreas que ocupa la industria minera con las áreas de importancia ecológica se ha dado a diferentes escalas, en las que han estado involucrados mineros pequeños, artesanales y grandes empresas, así como las comunidades que luchan por la protección de estos ecosistemas. Por este motivo surge la necesidad de analizar lo que ha sucedido en Colombia y cómo esto ha frenado el desarrollo de la industria minera del país.

Como se mencionó anteriormente, el Estado es el responsable de la designación y delimitación de las AIE, así como también de otorgar los títulos mineros y las licencias ambientales, instrumentos requeridos para la extracción de los minerales. Por ello, las entidades del Estado son las primeras llamadas a respetar la naturaleza proteccionista de estas áreas. Sin embargo, esto no se ha cumplido, lo que ha ocasionado las actuales tensiones que se dan entre estas áreas y el desarrollo de proyectos productivos.

Un ejemplo de este conflicto se presenta en los ecosistemas de páramo, de los cuales se profundizará más adelante. La explotación minera en los ecosistemas de páramo quedó prohibida desde el 2010 con la reforma al Código Minero (Ley 1382 de 2010), pero la Corte Constitucional declaró la inexecutable de la totalidad de esta Ley. Entonces, a través del artículo 202 de la Ley 1450 del 2011 se retomó la prohibición de la explotación en los páramos. En este entendido, cualquier solicitud de título minero o licencia ambiental con posterioridad a dicha Ley debía ser rechazada por las respectivas entidades del Estado. No obstante, quedó una incertidumbre sobre los títulos otorgados con anterioridad a dicha Ley, pues no era claro si los propietarios de estos títulos podían seguir explotando los minerales en los páramos o debían suspender todas las actividades.

Para brindar mayor claridad, la Ley 1753 de 2015, en el parágrafo primero del artículo 173, otorgó un periodo de transición a las explotaciones mineras en páramos que poseían el título minero del 2010 o antes, permitiendo que ellas continuaran la operación durante la vigencia de los títulos, pero sin que estos pudieran ser renovados. Sin embargo, a través de la Sentencia C-035 de 2016, la Corte Constitucional declaró inexecutable la transitoriedad que existía con el fin de proteger estos ecosistemas de los impactos que pudieran ocasionar durante el periodo de transición.

Al respecto, la Agencia Nacional de Minería (2018), manifestó que con el fallo “quedó vigente sin excepción alguna, la prohibición general de desarrollar actividades de minería en las áreas delimitadas como páramos” y por ello todas las actividades mineras en páramos debían suspenderse de manera inmediata.

Como consecuencia de la decisión de la Corte, se estimó que aproximadamente 473 títulos mineros que abarcaban 125.800 hectáreas de áreas de páramo quedaron sin efecto. En 284 de estos títulos se realizaban actividades mineras (El Colombiano, 2016). Esta situación generó un conflicto entre las empresas y el Estado, pues ante la prohibición de explotar las áreas que ya les habían sido tituladas, algunas empresas como Eco Oro Minerals Corp., Red Eagle y Galway, presentaron demandas contra el Estado colombiano por los ingresos que dejaron de percibir con la suspensión de sus operaciones, teniendo en cuenta que ya les habían sido otorgados títulos mineros (Semana Sostenible, 2018). Otras empresas como AngloGold Ashanti decidieron devolver al Estado los títulos mineros que poseían en los ecosistemas de páramo y otras áreas protegidas (Revistadinero.com, 2011).

Una situación similar ocurrió al interior del Sistema de Parques Nacionales, pertenecientes a la categoría de áreas protegidas definida anteriormente, ya que al 2015 se habían otorgado 44 títulos mineros que abarcaban un área de 45.175 hectáreas de estas áreas protegidas (Betancur y Pérez, 2016).

Es importante mencionar que los conflictos que se generan con la incertidumbre en las AIE trascienden a las explotaciones mineras y se dan en otros sectores productivos. Un ejemplo de ello ocurrió cuando el Ministerio de Ambiente expidió el Decreto 356 de 2018 mediante el cual se declaró el complejo cenagoso de Ayapel como humedal Ramsar, ya que al momento de esta declaratoria existía en esta área un contrato de exploración y producción de hidrocarburos. Ante esta situación, dicho contrato perdió vigencia debido a que está prohibida la explotación de hidrocarburos en estas áreas y con ello se perjudicó a la empresa poseedora del título.

Otro caso ocurrió durante la declaratoria del complejo cenagoso de la Zapatosa como humedal Ramsar. Durante el proceso, la Agencia Nacional Minera, mediante Radicado n.º 20182200289851, manifestó al

Ministerio de Ambiente la existencia de tres títulos mineros al interior del área que se pretendía declarar. Así mismo, la Agencia Nacional de Hidrocarburos, a través del Radicado n.º 20184310100961, manifestó que el complejo se superponía con las áreas disponibles Magdalena, VIM 4 y VIM 19 y con el contrato de exploración La Loma. Ante esta situación, el Ministerio de Ambiente realizó mesas conjuntas con dichas Entidades y, como resultado de ello, se sustrajeron las áreas de superposición en la declaratoria del complejo como humedal Ramsar realizada a través del Decreto 1190 de 2018.

Sin embargo, el camino para evitar estos conflictos no es el de delimitar las áreas acordes a los proyectos extractivos concesionados. Dado que las AIE tienen una categoría de protección superior a cualquier otra área de conservación, la delimitación de ellas debe hacerse conforme a lo establecido en los estudios técnicos, sociales y ambientales, como bien lo ha mencionado la jurisprudencia.

Este choque institucional entre la autoridad ambiental y la autoridad minera termina afectando a las empresas, a las comunidades, a los ecosistemas y, en últimas, al mismo Estado al verse sometido a millonarias demandas por la incoherencia que existe en el desarrollo de la política minera del país.

Es importante destacar que, si bien en Colombia se presentan conflictos entre la minería y las AIE por la falta de claridad sobre estas, a nivel regional es un país que ha avanzado en la definición de la política ambiental, la cual ha logrado situar restricciones a las áreas de mayor valor ambiental para evitar su deterioro y por ende la de la biodiversidad que habita en ellas.

En el caso de Chile, los conflictos son aún más severos teniendo en cuenta que su economía está basada en la minería y por ello el código minero de dicho país puede llegar a ser más predominante que la normativa ambiental. Por ello, en su artículo 17 se señala que es posible realizar actividades mineras al interior de los parques nacionales, reservas nacionales o monumentos naturales, siempre y cuando se tenga la autorización del intendente regional. Incluso, en ese país se han superpuesto la declaratoria de Parques Nacionales con lugares de interés minero, generando un choque al no saber cuál declaratoria prevalece sobre la otra (Praus et al., 2011).

Algo similar ocurre con los glaciares de Chile, los cuales son áreas en donde nacen los ríos y por ello importantes para el abastecimiento hídrico de varias poblaciones. Sin embargo, ellos se encuentran desprotegidos y se estima que solamente el 48% de su área se encuentra al interior de un área protegida declarada (Segovia, 2015). Se ha llegado a considerar que una de las principales amenazas de los glaciares son las actividades mineras, pues esta actividad se encuentra permitida por la normativa chilena. Esta situación se ha generado en parte por la falta de coherencia entre los cuerpos legislativos, que han sido incapaces de reglamentar este recurso y por la falta de criterios que permitan su definición y delimitación (Fernández y Ferrando, 2018).

En otros países como Perú y Honduras, la minería se realiza al interior de las áreas protegidas teniendo como justificación la preeminencia de los derechos adquiridos sobre el subsuelo. Incluso, a pesar de ello, existen casos en donde no se dan compensaciones a favor del área protegida (Dourojeanni y Quiroga, 2006).

6. Ecosistemas de páramo: características y atributos

Los páramos son tal vez las áreas de importancia ecológica más reconocidas en Colombia debido a sus singulares condiciones. En términos generales, estos se definen como “ecosistema de alta montaña del trópico húmedo, dominado por vegetación abierta y ubicado entre el límite del bosque cerrado y las nieves perpetuas” (Hofstede et al., 2014, p. 14). Esta definición es bastante amplia debido a las condiciones particulares de los páramos en cada país. Para Colombia, una definición más específica fue dada por el Ministerio de Ambiente y corresponde a

Ecosistema de alta montaña, ubicado entre el límite superior del bosque andino y, si se da el caso, con el límite inferior de los glaciares o nieves perpetuas, en el cual domina una vegetación herbácea y de pajonales, frecuentemente frailejones y puede haber formaciones de bosques bajos y arbustivos y presentar humedales como los ríos, quebradas, arroyos, turberas, pantanos, lagos y lagunas. (Ministerio de Ambiente, 2002)

A nivel biológico, los páramos en Colombia albergan alrededor de 3.380 especies de plantas agrupadas en 118 familias, siendo las más conocidas los frailejones (Rangel, 2000). Adicional a ello, se ha documentado que en los páramos habitan alrededor de 70 especies de mamíferos y 154 especies de aves, siendo quizás las más importantes el oso de anteojos (*Tremarctos ornatus*), el cóndor andino (*Vultur gryphus*) y la danta de montaña (*Tapirus pinchaque*). Además de su diversidad, también se ha reconocido en los páramos una alta presencia de especies endémicas, lo que los hacen áreas de gran valor biológico.

Los páramos son fundamentales en la regulación hídrica, al ser este su principal servicio ecosistémico. Se ha reconocido la importancia de los páramos para proveer agua (Duarte-Abadía y Boelens, 2016). Por un lado, la precipitación en estos lugares es relativamente alta, la evapotranspiración es baja y la humedad relativa del aire es alta. Así mismo, las características del suelo otorgan a estos ecosistemas la capacidad de retener el agua por largos períodos y liberarla lentamente. Se ha llegado a estimar que los páramos aportan el 70% del agua que se consume en Colombia (Hofstede et al., 2014).

Los suelos de los páramos también dependen de las condiciones climáticas y de la ubicación geográfica del páramo que se considere. Las fluctuaciones del clima en las diferentes escalas temporales, actualmente influenciadas por el calentamiento global, hacen que el límite bosque-páramo sea muy dinámico. La vegetación es otro de los factores en la formación de los suelos, a través del proceso de acumulación de la materia orgánica, la cobertura de vegetación continua y completa permite una buena protección de los suelos y evita la desecación, aún en los periodos secos (Hofstede et al., 2014).

Los páramos en Colombia se localizan en las tres cordilleras y en la Sierra Nevada de Santa Marta, ocupan un área de 14.434 km², equivalente al 49% de los páramos del mundo y al 1,3% de la extensión continental del país.

Contiguo a la zona de páramo, se encuentra el denominado bosque altoandino, su límite superior no es claro y más bien hay un cinturón altitudinal de varios centenares de metros donde el bosque da lugar a una vegetación arbustiva y luego a una vegetación herbácea. En esta franja (llamada subpáramo) existe un mosaico de bosques con arbustos y plantas

herbáceas. Generalmente, la transición entre el bosque altoandino y el páramo tiende a ser gradual, desde el bosque cerrado hacia un mosaico de fragmentos de bosque y arbustos (Hofstede, 2013).

La sociedad y la naturaleza interactúan permanentemente y a diferentes ritmos, lo que implica trabajar simultáneamente aspectos biológicos y sociales. Rivera y Rodríguez (2011) han propuesto abordar los páramos como socioecosistemas, término que se asocia a la idea de gestión de la resiliencia, entendiéndola como la relación compleja e interdependiente entre la sociedad y la naturaleza en permanente movimiento y evolución.

7. Protección de los páramos

Reconociendo la importancia de los páramos y su vulnerabilidad, a lo largo de los últimos años, las entidades públicas se han manifestado sobre la necesidad de proteger estas áreas. Es así como el Ministerio de Ambiente expidió la Resolución 769 de 2002, instando a las autoridades ambientales a realizar un estudio sobre el estado actual de los páramos en su jurisdicción, a formular los planes de manejo de estos y a adoptar las medidas necesarias para su protección y recuperación de las áreas degradadas.

Posteriormente, la Corte Constitucional hizo un llamado al Ministerio de Ambiente y a las autoridades ambientales a que delimitaran y declararan las zonas excluibles de la minería y a adoptar las medidas necesarias para la protección de las áreas de importancia ecológica, como los páramos (Corte Constitucional, 2009).

En el mismo sentido, la Contraloría General de la República expidió una advertencia a las entidades públicas del sector ambiental con el fin de alertarlas sobre los riesgos que tienen los ecosistemas de páramo ante la falta de delimitación y adopción de los planes de manejo. Esto con el objetivo de instar a que dichas entidades agilicen estos procesos a fin de prevenir los riesgos que conllevarían al deterioro de estos ecosistemas (Contraloría General de la República, 2013).

Como medida para fortalecer la protección de los páramos, en la última década el Estado colombiano avanzó en la delimitación de estos ecosistemas. La delimitación de los páramos es un proceso complejo que obedece a la aplicación de diversos criterios como vegetación, altitud, clima, estado de conservación y distribución geográfica. En Colombia,

la metodología fue desarrollada por el Instituto de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), aplicando estos criterios agrupados en tres grandes componentes: biogeofísicos, socioculturales y de integridad ecológica (Rivera y Rodríguez, 2011).

En un principio, el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 (Ley 1450 de 2011) estableció como uno de los proyectos prioritarios la delimitación de los páramos. El artículo 202 de esta Ley estableció que la delimitación de los páramos debe estar basada en estudios técnicos, económicos, sociales y ambientales, a una escala de 1:25.000, y esta delimitación debe ser adoptada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) mediante acto administrativo. Posteriormente, el artículo 173 de la Ley 1753 de 2015 amplió los lineamientos para la delimitación de los páramos, permitiendo que esta se pudiera hacer a una escala de 1:100.000 y basándose en la cartografía generada por el IAvH. No obstante, le otorgó al MADS la discrecionalidad de tomar como referencia el área definida por dicho instituto para adoptar la delimitación final de las áreas de páramo. En otras palabras, el MADS no estaba obligado a adoptar los límites definidos por el IAvH.

Esta situación fue revisada por la Corte Constitucional en Sentencia C-035 de 2016, quien consideró que, ante la fragilidad de los ecosistemas de páramo, se debía fortalecer su protección. Por lo tanto, condicionó la discrecionalidad otorgada al MADS a que, en caso de apartarse de las áreas de referencia del IAvH, las razones deberán estar sustentadas en criterios técnicos. Adicional a ello, la Corte estableció que la delimitación debe obedecer al área que mayor protección garantice al ecosistema, por lo cual el MADS no puede reducir el área definida por dicho instituto. Esta disposición quedó contemplada en la Ley 1930 de 2018, conocida como la Ley de Páramos.

Actualmente se encuentran delimitados 35 de los 36 complejos de páramos que hay en el país, faltando únicamente el páramo de Pisba. El proceso de delimitación de este páramo fue suspendido por el Juzgado de Duitama al tutelar los derechos de los demandantes a la participación ciudadana y en el 2018 el Consejo de Estado ordenó al Ministerio de Ambiente culminar el proceso en el término de 12 meses.

A pesar del gran avance que se dio en términos de delimitación de páramos, la ciudadanía está reclamando por la falta de participación

de las comunidades en estos procesos, pues los afecta directamente al restringirles el desarrollo de actividades mineras, agrícolas y ganaderas que tradicionalmente hacían en estos ecosistemas (Méndez, 2019). De esta forma, han surgido demandas como la del páramo de Pisba y como consecuencia de ello se han expedido sentencias que dejan sin efectos las delimitaciones que se habían establecido para los páramos de Almorzadero, Sumapaz y Santurbán. Sobre este último se brindará mayor detalle al ser el caso de estudio seleccionado.

8. Páramo de Santurbán

Quizás el páramo que mayor conflicto tiene con la actividad minera es el de Santurbán. Este se localiza en el noreste del departamento de Santander y al sudoeste del departamento de Norte de Santander. Tiene una extensión de 142.608 hectáreas y se divide en tres subregiones (Sarmiento y Ungar, 2014):

- La subregión nororiental corresponde a la cuenca de río Zulía, en Norte de Santander. Esta es la menos habitada y su actividad principal es la ganadería.
- La subregión suroccidental comprende la cuenca del río Lebrija, ubicada en la provincia de Soto Norte, Santander. Su vocación principal es la minería.
- La subregión sur o de Berlín, conformada por los municipios de Tona (Santander) y Silos (Norte de Santander). Su principal actividad productiva es el cultivo de papa y de cebolla.

El páramo de Santurbán alberga a 30 municipios de Santander y Norte de Santander. Este páramo está bajo la jurisdicción de tres autoridades ambientales: la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (Corponor) y la Corporación Autónoma de Santander (CAS). El municipio con mayor porcentaje de cobertura superficial dentro del páramo es Vetás (75,9%) (Sarmiento y Ungar, 2014).

En la zona de Soto Norte se explota oro desde los años anteriores a la colonia. Sin embargo, en 1830 la compañía inglesa Colombian Mining Association inició operaciones en la zona en donde actualmente

se encuentra el municipio de California. La minería artesanal se empezó a realizar desde la segunda mitad del siglo xx con la conformación de sociedades familiares (Osego y Ugar, 2017).

9. Delimitación del páramo de Santurbán

En un principio, el páramo de Santurbán se encontraba definido y delimitado en el Atlas de Páramos de Colombia, elaborado por el IAvH a una escala 1:250.000. Este instrumento fue adoptado por el MADS mediante Resolución 937 de 2011. No obstante, y con la posterior expedición de la Ley 1450 de 2011, dicha delimitación debió ser modificada debido a que esta Ley estipuló que los ecosistemas de páramo deben delimitarse como mínimo con cartografía a escala 1:25.000.

Atendiendo a los nuevos lineamientos, el IAvH, en el 2014, realizó los estudios técnicos para la delimitación del páramo de Santurbán, basándose en criterios biogeofísicos, sociales y de integridad ecológica (evaluando ecosistemas aledaños). Este estudio se realizó a una escala 1:25.000, tal como lo establecía la Ley. Allí se concluyó que la franja inferior del páramo, conocida como subpáramo, se ubica a los 3.100 metros de altura en la mayor parte del complejo (Sarmiento y Ungar, 2014).

Basándose en dicho estudio, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) procedió a expedir la Resolución 2090 de 2014, adoptando la delimitación del páramo, y dando algunos lineamientos generales sobre el régimen de usos y la zonificación de este. El área delimitada abarcó una extensión de 98.994 hectáreas, cobijando varios municipios de los departamentos de Santander y Norte de Santander.

No obstante, dicha Resolución fue demandada por la comunidad bajo el argumento de que el MADS no garantizó la participación ciudadana en el proceso de delimitación. El caso fue revisado por la Corte Constitucional, la cual concluyó que el Ministerio de Ambiente vulneró el principio de participación de la comunidad afectada por la decisión y por ello dejó sin efecto la Resolución 2090 de 2014. Por este motivo, ordenó al MADS adoptar una nueva delimitación, garantizando previamente la participación ciudadana (Corte Constitucional, 2017). A pesar de que se dio un plazo inicial de un año para que se surtiera el proceso de participación ciudadana para la delimitación del páramo, el Ministerio de Ambiente ha solicitado mayores plazos. Actualmente, más de dos años después de haber

sido proferida la sentencia, el Ministerio de Ambiente aún se encuentra realizando la socialización de la nueva delimitación con las comunidades en los diferentes municipios que se encuentran en el área de influencia del páramo. Es importante mencionar que el Tribunal Administrativo de Cundinamarca mantuvo transitoriamente los límites del páramo establecidos en la Resolución 2090 hasta tanto se defina la nueva delimitación del páramo de Santurbán, como medida para garantizar la protección de este ecosistema.

Con la delimitación planteada en el 2014, varios municipios de Santander y Norte de Santander quedaron con partes de su territorio dentro del páramo de Santurbán, y con ello varios hogares rurales que basan su sustento económico en el desarrollo de actividades agropecuarias y mineras.

La delimitación del páramo de Santurbán también afecta a los campesinos que desarrollan actividades agropecuarias en esta zona. Si bien no se ordena la suspensión inmediata de estas actividades, la Ley 1930 de 2018 establece que estas se deben reemplazar gradualmente a través de procesos de reconversión y sustitución de actividades agropecuarias. Por ende, cualquier campesino que desarrolle su producción dentro del páramo deberá suspenderla en algunos años y buscar nuevas alternativas económicas para su sustento.

En últimas, el proceso de delimitación de los páramos genera tensiones entre los movimientos ambientalistas que luchan por su protección y las comunidades que habitan en ellos y los utilizan para obtener un sustento económico (Méndez, 2019).

10. Caso de estudio: proyecto Soto Norte

A lo largo del capítulo se ha expuesto la incertidumbre que existe en la definición de las áreas de importancia ecológica y cómo se ha abordado este tema en el marco normativo colombiano. Esto ha generado diversos conflictos socioambientales con los proyectos mineros que se pretenden adelantar a nivel nacional y tal vez el caso que más ilustra esto corresponde al conflicto que se presenta en cercanías al páramo de Santurbán, por el potencial minero que hay allí. Por esta razón, se tomó como ejemplo de estudio el proyecto aurífero Soto Norte de la compañía Minesa en el departamento de Santander y cómo está relacionado con el área de importancia ecológica correspondiente al páramo de Santurbán.

11. El conflicto ambiental del proyecto Soto Norte

Las compañías mineras de oro han identificado una cadena de montañas en el departamento de Santander como una de las zonas más grandes de reservas de oro en el mundo. Sin embargo, las ONG y los ciudadanos están preocupados por la posibilidad de una operación minera industrial en esta zona debido a que allí se encuentra el páramo de Santurbán, que incluye cerca de 100.000 hectáreas de tierra en las que no se permite ninguna actividad económica (Ochoa, 2017).

La empresa Minesa ha manifestado su interés en adelantar el proyecto de explotación subterránea de oro Soto Norte en los municipios de Suratá y California, ubicados al noreste del departamento de Santander. El proceso para obtener la licencia ambiental se desarrollaría de forma normal (con los conflictos socioambientales inherentes a estos proyectos), de no ser por la cercanía del proyecto con el páramo de Santurbán. Por esta circunstancia se ha generado un debate acerca de si el proyecto va a destruir dicho páramo.

A partir de esto, una de las principales razones que los movimientos ciudadanos invocaron para rechazar el proyecto minero consiste en que este se pretende adelantar al interior del páramo de Santurbán, lo cual generaría grandes impactos ambientales y afectaría de manera grave a este ecosistema, las fuentes hídricas que nacen allí y la diversidad de especies que habitan en él.

Al respecto, es preciso mencionar que, si bien el título minero abarca un área amplia, toda la operación del proyecto y la infraestructura proyectada se encuentra por fuera del área identificada en los estudios técnicos del IAvH como páramo. Incluso, el punto más cercano al páramo correspondiente a la entrada del túnel para la explotación se ubicará a una altura de 2.640 msnm y la excavación se irá desarrollando en dirección opuesta al área ecológica, es decir, alejándose del páramo (Minesa, 2019). Conforme a esto, se puede inferir que la operación no se realizará al interior del ecosistema de páramo, pues, como se describió anteriormente, este es un ecosistema andino de alta montaña y usualmente se encuentra a una altura mayor a los 3.200 msnm, con la variación de algunos metros dependiendo de la región en donde se encuentre.

De cualquier manera, la delimitación realizada por el IAvH estimó el límite inferior del páramo de Santurbán a una altura de 3.100 msnm (con

algunas variaciones en algunos sectores de este complejo), pero en todo caso lejos de la cota en donde se pretende desarrollar el proyecto minero (ver figura 2). Por este motivo se debe esperar a que se surta el proceso de participación ciudadana para que se expida la delimitación definitiva y se pueda determinar si efectivamente el proyecto está al interior del páramo, como aseguran las comunidades, o por fuera de este.

No obstante, hay que resaltar que los estudios técnicos ya fueron adelantados por el IAvH, y, como se mencionó anteriormente, la nulidad se debió a la falta de un proceso participativo con la comunidad. De mantenerse la delimitación vigente, el proyecto se desarrollaría en el ecosistema de bosque altoandino, el cual posee características completamente distintas al páramo y el cual abarca amplias áreas en las cordilleras de Colombia. Justamente el área que ocupa la ciudad de Bogotá (ubicada a 2.600 metros de altura) y su respectiva sabana, pertenece al ecosistema de Bosque Altoandino.

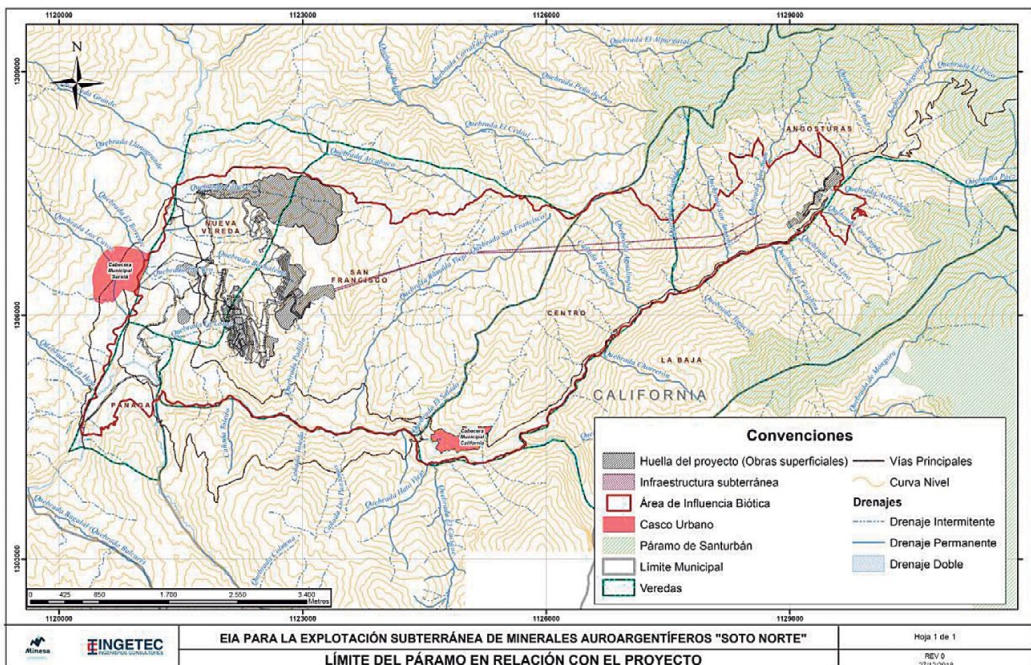


Figura 2. Ubicación del proyecto Soto Norte con relación al páramo de Santurbán

Fuente: Minesa (2019).

El conflicto que se presenta con el proyecto Soto Norte es un ejemplo de la incertidumbre que existe en el país por la falta de delimitación de las áreas de importancia ecológica. Para el caso de los páramos, el gobierno tardó casi una década en delimitarlos, labor que se hizo para cumplir con las órdenes judiciales y requerimientos de entes de control. A pesar de ello, el proceso aún no ha culminado debido a las nuevas demandas que han surgido contra las delimitaciones adoptadas por la falta de participación ciudadana en estos procesos.

Conclusiones

Las Áreas de Importancia Ecológica no se encuentran definidas de manera clara en la normatividad ambiental colombiana, a pesar de que este concepto fue adoptado desde la Constitución Política de 1991. Algunas normas y decisiones de la Corte Constitucional han dado algunas aproximaciones sobre las particularidades de estas áreas y con base en esto se logró estructurar un análisis sobre lo que actualmente conforman las AIE.

Con este estudio se presentó un primer paso para ilustrar el concepto de AIE como áreas de alto valor ambiental en donde no está permitido realizar actividades productivas. Estas áreas difieren de las áreas protegidas y de las zonas de exclusión minera en cuanto a que en ellas no se permite el desarrollo de actividades productivas, como agricultura, minería o ganadería, mientras que, en las otras áreas mencionadas, en algunos casos estas actividades se podrían hacer bajo ciertas restricciones. Sin embargo, es necesario que se aborde a profundidad este tema en la legislación colombiana ya que la falta de clarificación sobre ello ha generado incertidumbre en los actores económicos al no tener la certeza de realmente en qué lugares están restringidos para el aprovechamiento de los recursos naturales. Como consecuencia de la falta de definición y delimitación de las AIE, han surgido litigios internacionales en contra del Estado, lo que podría ocasionar millonarias indemnizaciones a favor de las empresas a las que se les restringió tardíamente la explotación de los recursos naturales.

De acuerdo con la información revisada, se encontró que las AIE que gozan de mayor desarrollo normativo son los páramos, ya que la defensa de estos ecosistemas por parte de las comunidades ha tenido como resultado la expedición de decisiones judiciales que garantizan su protección

ambiental. Se documentó que la delimitación de estos ecosistemas ha sido un proceso que no ha estado exento de conflictos ambientales y en algunas ocasiones ha terminado por involucrar a entidades judiciales para su resolución. Mientras tanto, las empresas poseedoras de títulos mineros han estado a la espera de la delimitación de estos ecosistemas, lo cual ha generado incertidumbre sobre las áreas en donde pueden adelantar los proyectos extractivos.

El páramo de Santurbán fue el primero de estos ecosistemas que se delimitaron en el país. Sin embargo, por el potencial minero que hay en él y en sus zonas aledañas, el proceso de su delimitación ha tomado casi una década de conflicto entre las comunidades y el Estado, por lo que ha quedado entre los únicos que no cuentan con una delimitación en firme. Ante las decisiones que ha tomado el estado respecto al páramo, las empresas han instaurado millonarias demandas contra el Estado por haberles otorgado títulos mineros en estas áreas, permitido millonarias inversiones previas a la explotación y posteriormente restringirles el aprovechamiento de los recursos naturales allí.

El Estado debe apostarle a un programa de definición de las AIE y con ello dejar en firme la imposibilidad de aprovechar los recursos naturales al interior de estas áreas, ya sea por pequeños, medianos o grandes empresarios y en diversos sectores económicos, bien sea agricultura, ganadería o explotación minera. La delimitación de estas áreas contribuye a reducir los conflictos ambientales que ocurren entre las empresas y las comunidades que habitan en estas áreas y que buscan protegerlas.

El proyecto aurífero Soto Norte en cercanías al páramo de Santurbán fue tomado como ejemplo para evidenciar la problemática planteada en este capítulo. Si la delimitación del páramo se hubiera realizado desde un principio con la participación ciudadana de quienes se relacionan con este ecosistema de manera directa o indirecta (los mayores opositores al proyecto son ciudadanos que no residen en el área de influencia del páramo), se habría evitado el conflicto social que actualmente ocurre allí, en donde las comunidades rechazan el proyecto minero ante la insistencia de que este se encuentra dentro del páramo (y que por ello este va a ser destruido), a pesar de que los estudios técnicos evidencian que no es así.

Esto ha generado un desgaste a la empresa que tiene que contrarrestar estos argumentos ante la opinión pública y la ciudadanía, a la vez que se

encuentra a la espera de que el Estado resuelva el problema del límite, aspecto fundamental para la obtención de la licencia ambiental.

En últimas, para que se pueda potenciar a la industria del oro en Colombia, exigiendo que se realice de forma sostenible, se requiere contar con reglas claras que deben brindar las instituciones públicas, como la definición de las AIE sustentado en criterios técnicos. Ello ayudará a reducir los conflictos ambientales que surgen a partir de esta situación en varios proyectos del país.

Referencias

- Agencia Nacional de Minería (ANM). (2018). *Títulos mineros en áreas de páramo*. Radicado n.º 20181200267181. Disponible en https://www.anm.gov.co/sites/default/files/NormativaConceptosJuridicos/concepto_20181200267181.pdf
- Asaad, I., Lundquist, C., Erdmann, M. y Costello, M. (2017). Ecological criteria to identify areas for biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 213, 309-316.
- Bennett, E., Cramer, W., Begossi, A., Cundill, G., Díaz, S., Egoh, B. et al. (2015). Linking biodiversity, ecosystem services, and human well-being: three challenges for designing research for sustainability. *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 14, 76-85.
- Betancur-Corredor, B., Loaiza-Usuga, J., Denich, M. y Borgemeister, C. (2018). Gold mining as a potential driver of development in Colombia: challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 199, 538-553.
- Betancur, A. y Pérez, M. (2016). Parques y Páramos Naturales de Colombia como zonas de Importancia para el desarrollo minero energético del país. *Revista del Cesla*, 19, 33-56.
- BMI Research. (2018). Colombia Mining Report Q2. 2018.
- CBD. (2010). Strategic Plan for Biodiversity 2011-2020, Including the Aichi Biodiversity Targets. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Canada.
- Constitución Política de Colombia. (1991). Disponible en http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html
- Contraloría General de la República. (2013). Función de advertencia respecto a los riesgos de daño ambiental y pérdida de recursos naturales de la nación con ocasión a las deficiencias y la delimitación en los ecosistemas

- de páramo en Colombia. Contralora General de la República: Sandra Morelli Rico.
- Corte Constitucional. (2002). Sentencia T-666. Expediente T-577130. Magistrado ponente: Eduardo Montealegre Lynett.
- Corte Constitucional. (2009). Sentencia C-443. Expediente D-7419. Magistrado ponente: Humberto Antonio Sierra Porto.
- Corte Constitucional. (2016). Sentencia C-035. Expediente D-10864. Magistrada ponente: Gloria Stella Ortiz Delgado.
- Corte Constitucional. (2017). Sentencia T-361. Expediente T-5.315.942. Magistrado ponente: Alberto Rojas Ríos.
- Cortés, A. (1996). *El páramo: ecosistema de alta montaña*. Fundación Ecosistemas Andinos, Gobernación de Boyacá.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto 1076 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. 26 de mayo de 2015. Disponible en <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Delgado-Aguilar, M., Konold, W. y Schmitt, C. (2017). Community mapping of ecosystem services in tropical rainforest of Ecuador. *Ecological Indicators*, 73, 460-471.
- Diazgranados, M. (2013). Aportes a la delimitación de los páramos desde el estudio de los frailejones. En J. Cortés y C. Sarmiento (Eds.), *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana. Memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos* (pp. 23-37). Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Dourojeanni, M. y Quiroga, R. (2006). *Gestión de áreas protegidas para la conservación de la biodiversidad: evidencias de Brasil, Honduras y Perú*. Washington: Banco Interamericano de Desarrollo. Departamento de Desarrollo Sostenible. División Medio Ambiente.
- Duarte-Abadía, B. y Boelens, R. (2016). Disputes over territorial boundaries and diverging valuation languages. The Santurban hydrosocial highlands territory in Colombia. *Water Int.*, 41, 15-36.
- Dunn, D., Ardrón, J., Bax, N., Bernal, P., Cleary, J., Cresswell, I. et al. (2014). The convention on biological diversity's ecologically or biologically

- significant areas: origins, development, and current status. *Marine Policy*, 49, 137-145.
- Durán, A. Casalegno, S. Marquet, P. y Gaston, K. (2013). Representation of Ecosystem Services by Terrestrial Protected Areas: Chile as a Case Study. *Plos One* 8(12), e82643. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082643>
- El Colombiano. (2016). El Gobierno deberá suspender 473 títulos mineros en páramos. Disponible en línea: <https://www.elcolombiano.com/colombia/el-gobierno-debera-suspender-473-titulos-mineros-en-paramos-CY3573501>
- Fernández, H. y Ferrando, F. (2018). Glaciares rocosos en la zona semiárida de Chile: relevancia de un recurso hídrico sin protección normativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 27(2), 338-355. doi: 10.15446/rcdg.v27n2.63370.
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., y Ulloa, J. et al. (2014). *Los páramos andinos. ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. Quito, Ecuador: UICN.
- Jaramillo C. (2012). Historia geológica del bosque húmedo neotropical. *Rev Academia Col Ciencias Fis Exact*, 36(138), 57-77.
- Ley 1450 de 2011, por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014. *Diario Oficial* n.º 48.102 del 16 de junio de 2011.
- Ley 1753 de 2015, por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 “Todos por un nuevo país”. *Diario Oficial* n.º 49.538 del 9 de junio de 2015.
- Ley 1930 de 2018, por medio de la cual se dictan disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia. *Diario Oficial* n.º 50.667 del 27 de julio de 2018. Disponible en http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1930_2018.html
- Ley 685 de 2001, por la cual se expide el Código de Minas [C.M.] y se dictan otras disposiciones, 15 de agosto de 2001, *Diario Oficial* n.º 44.545 del 8 de septiembre de 2001.
- Méndez, O. (2019). Los intereses emergentes sobre la alta montaña y la vida campesina: tensiones y contradicciones de la delimitación de páramos en Colombia. *Cuadernos de Geografía. Revista Colombiana de Geografía* 28(2), 322-339. doi: 10.15446/rcdg.v28n2.70549

- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press, Washington, D. C.
- Minesa. (2019). Estudio de Impacto Ambiental —EIA— Proyecto de explotación subterránea de minerales Auroargentíferos “Soto Norte”.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Programa para el manejo Sostenible y restauración de ecosistemas de la alta montaña colombiana*. 1.^a ed., Bogotá D. C., Colombia.
- Miranda, M. Chambers, D. y Coumans, C. (2005). Framework for Responsible Mining: A Guide to Evolving Standards. Canada: MiningWatch.
- Myers, N., Mittermeier, R. y Mittermeier, C. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858.
- Ochoa, C. (2017). “Generating Conflict: Gold, Water and Vulnerable Communities in the Colombian Highlands”. En C. Tan y J. Faundez (Eds.), *Natural Resources and Sustainable Development International Economic Law Perspectives* (pp. 142-164). Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing.
- Olson, D., Dinerstein, E., Wikramanayake, E., Burgess, N., Powell, G., Kassem, K. et al. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth. *Bioscience*, 51(11), 933-938.
- Osejo, A. y Ungar, P. (2017). ¿Agua sí, oro no? Anclajes del extractivismo y el ambientalismo en el páramo de Santurbán. *Universitas Humanística*, 84, 143-166. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.uh84.ason>
- Revista Dinero.com (2011). AngloGold devolverá 38 títulos mineros en zonas de páramo. Disponible en <https://www.dinero.com/negocios/articulo/anglogold-devolvera-38-titulos-mineros-zonas-paramo/141303>
- Praus, S., Palma, M. y Domínguez, R. (2011). La situación jurídica de las actuales áreas Protegidas de Chile. Proyecto GEF-PNUD-MMA. “Creación de un Sistema Nacional Integral de Áreas Protegidas para Chile: Estructura Financiera y Operacional”. 478 p.
- Pulido, C. (1988). Génesis y evolución de los suelos de los páramos de Sumapaz, Chingaza y Guerrero. *Suelos Ecuatoriales*, XVII(2), 160-170.
- Rangel-Ch., J. O. (2000). *Colombia Diversidad Biótica III. La región de vida paramuna*. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Ciencias Naturales, Instituto Alexander von Humboldt.

- Resolución 2090 de 2014. Por medio de la cual se delimita el Páramo Jurisdicciones - Santurbán - Berlín, y se adoptan otras determinaciones. 19 de diciembre de 2014.
- Resolución 769 de 2002, por la cual se dictan disposiciones para contribuir a la protección, conservación y sostenibilidad de los páramos. 5 de agosto de 2002.
- Rivera, D. y Rodríguez, C. (2011). Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Sarmiento, C. y P. Ungar (Eds.). (2014). *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*. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Sayre, R., Karagulle, D., Frye, C., Boucher, T., Wolff, N., Possingham, H. et al. (2020). An assessment of the representation of ecosystems in global protected areas using new maps of World Climate Regions and World Ecosystems. *Global Ecology and Conservation*, 21, 1-21.
- Segovia, A. (2015). Glaciares en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE). *Investigaciones Geográficas*, 49, 51-68.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339.
- Sostenibilidad.semana.com, “764 millones de dólares vale demanda de Eco Oro contra Colombia por Santurbán”. Demanda de Eco Oro contra Colombia por delimitación de Santurbán. Disponible en <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/demanda-de-eco-oro-contra-colombia-por-delimitacion-de-santurban/41874>
- United Nations (UN). (1992) United Nations conference on environment and development, Convention on Biological Diversity. Río de Janeiro, Brasil.
- World Gold Council. (2019). Gold Mine Production. Disponible en <https://www.gold.org/goldhub/data/historical-mine-production>
- World Resources Institute (WRI). (2003). *Mining and Critical Ecosystems: Mapping the Risks*. Washington, D. C.

Capítulo 2

Manejo de aguas residuales en los procesos mineros

Juan Pablo Salazar-Giraldo*
Sonia Güiza-González**

Resumen

La actividad minera es fundamental para el desarrollo de cualquier país, y en el caso de Colombia, la extracción y beneficio mineral de oro, plata y cobre, entre otros metales, son necesarios como materias primas en otros sectores económicos, además de la generación de divisas. La minería, como la industria y la agricultura, puede generar afecciones medioambientales, debido al requerimiento de agua como parte del beneficio minero, por lo que se generan aguas residuales que deben ser tratadas para recuperar su calidad antes de llevar a cabo cualquier vertimiento. A pesar de que existen plantas de tratamiento y procedimientos de recobro de calidad de agua mediante tecnologías fisicoquímicas y biológicas, como es explicado en

* Geólogo, Universidad de Caldas. Especialista en EIA UJTL, Universidad Jorge Tadeo Lozano, *Ph.D.* en Ingeniería, Universidad de Antioquia. Instructor del SENA, Centro de Recursos Naturales Renovables, La Salada. Líder del Grupo de Investigación La Salada. Docente universitario en Geoquímica Ambiental, Biorremediación y Evaluación del Impacto Ambiental. Consultor externo. Correo electrónico: jpsalazar@sena.edu.co

** Geoquímica. Titulada de Geología de la Universidad Nacional de Colombia y licenciada en Química con especialización en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad Distrital. Entrenamiento intensivo en estadística y espectroscopia aplicada a recursos minerales. Consultora. Correo electrónico: syguizag@unal.edu.co

este capítulo, hay un desconocimiento generalizado de que estos mismos son llevados a cabo por empresas mineras actualmente.

A nivel internacional y nacional se tienen experiencias positivas, investigación permanente y desarrollo tecnológico que demuestran la efectividad de los diferentes métodos utilizados para controlar y disminuir las cargas contaminantes, y, por lo tanto, los riesgos ambientales asociados. Se muestran claros ejemplos de proyectos e inversiones por parte de las empresas mineras en sistemas de tratamiento especialmente fisicoquímico para dar cumplimiento a lo exigido por las autoridades ambientales, demostrando así que los procesos de extracción y beneficio de oro (Au) y otros metales sí pueden realizarse bajo el concepto de minería ambientalmente responsable. El desarrollo de este capítulo plantea como objetivos: analizar el tipo de aguas residuales generadas por la actividad de explotación y beneficio de oro, presentar la exigencia por parte de la autoridad ambiental en Colombia en cuanto a la calidad de este tipo de aguas, identificar los diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales mineras a nivel mundial y nacional, y presentar ejemplos de empresas mineras que están diseñando y llevando a cabo sistemas de control de sus vertimientos, en lo posible previniendo cualquier afectación.

Palabras clave: vertimientos mineros, contaminación del agua por minería, elementos potencialmente tóxicos, drenaje ácido, tratamientos fisicoquímicos, tratamientos biológicos.

Introducción

Las fuentes hídricas son un recurso vital en la conservación de los ecosistemas y del suministro de agua potable para el consumo humano. Actividades antrópicas como la minería son consideradas un riesgo de contaminación para las aguas superficiales y subterráneas. El vertimiento de aguas residuales mineras sin ser tratadas a los recursos hídricos es una de las principales preocupaciones de la comunidad y sociedad respecto a la industria minera.

En Colombia las explotaciones aluviales de Au generan contaminación del agua especialmente por sólidos suspendidos, turbiedad y contaminación por mercurio (Hg) en procesos de beneficio, especialmente en los

departamentos de Chocó, Valle del Cauca y Antioquia. Las aguas residuales mineras asociadas a explotaciones de veta o filones de oro y plata (Au-Ag) y otros metales se caracterizan por contener minerales ganga, generalmente sulfuros con concentraciones de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) (metales y metaloides) que pueden ser liberados, al ser productos de la oxidación natural o acelerada, en las etapas de extracción-beneficio-cierre-post-cierre de la operación minera.

Estos sulfuros son de hierro (Fe) y otros metales (pirita $[\text{FeS}_2]$, marcassita $[\text{FeS}_2]$, pirrotita $[\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}]$, arsenopirita $[\text{FeAsS}]$, enargita $[\text{Cu}_3\text{AsS}_4]$, esfalerita $[\text{ZnS}]$, galena $[\text{PbS}]$ y calcopirita $[\text{CuFeS}_2]$, entre otros), entre otros). Los elementos liberados y movilizados en estos vertimientos sumados a la acidez asociada en algunos casos causada por la oxidación de los sulfuros, así como concentraciones elevadas de aniones tales como sulfatos (SO_4^{2-}) y cianuro (CN^-), utilizados en el proceso de beneficio, generan un rechazo social a las actividades extractivas de oro y plata (Au-Ag), quienes considera que se llevan a cabo sin control técnico, ni legal de las aguas residuales generadas.

Lo anterior constituye uno de los principales mitos que existen alrededor de la minería en Colombia, en el que se afirma que las aguas residuales o vertidos generados en todas las operaciones mineras de oro y plata (Au-Ag) y otros metales llegan a los cuerpos de agua naturales sin ningún tratamiento, contaminando y degradando las condiciones ambientales, intoxicando fauna y flora, y dejando sin posibilidades de uso los recursos hídricos alrededor de las labores mineras, sin embargo, para nuestro país diversas entidades han elaborado manuales técnicos para el manejo de aguas residuales mineras y su aplicación en pequeña minería aurífera tanto de veta como aluvial (UPME, 2007; ONUDI-Corantioquia 2012; PNUMA-Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012; Corantioquia-CNPML, 2016). Además, una empresa minera para poseer un título minero tiene como requisito contar con una licencia ambiental de estricto cumplimiento legal que debe incluir el tratamiento de aguas utilizadas en la operación minera.

El proceso de degradación ambiental se presenta generalmente en aquellas explotaciones ilícitas no formalizadas que sin estar obligados a cumplir con ninguna exigencia de carácter técnico y legal, es decir, que no cuentan con un sistema de manejo y tratamiento de aguas residuales

para sus explotaciones —haciendo caso omiso a las exigencias normativas nacionales de vertimientos ni participar en planes de capacitación gubernamental para obtener los permisos estatales que les permitiría desarrollar actividades mineras obligados a contar con licencias ambientales—, se convierten en marcos de referencia para que la población considere que este es el normal proceder del sector minero.

A pesar de que las personas conocen y aceptan que el agua de uso diario corresponde a aguas potabilizadas en las empresas de acueducto municipales, desconocen que muchas de las prácticas y tecnologías de tratamiento de aguas residuales mineras y de beneficio existentes a nivel mundial siguen procedimientos similares. Las empresas con títulos mineros tienen la obligación de llevar a cabo el control de la prevención y mitigación de cualquier riesgo hacia la calidad del agua que implique su operación, cumpliendo para ello con las reglamentaciones gubernamentales establecidas, como por ejemplo el erradicar el mercurio de sus prácticas mineras.

Las operaciones mineras de oro requieren utilizar sustancias químicas, una de las cuales de amplio uso es el cianuro que hace parte del proceso de beneficio del oro, los riesgos asociados a esta sustancia toxica son: derrames de cianuro en donde no corresponde, accidentes en su transporte, incendios de tanques con soluciones cianuradas, rompimiento de las estructuras que contienen residuos cianurados, y pérdidas en los depósitos de colas y estériles (Lottermoser, 2010). Este agente químico de amplio uso desde hace más de una centuria actualmente puede ser remplazado o combinado por otras sustancias químicas con menos riesgos. Sin embargo, las empresas que usan el proceso de cianuración establecen protocolos adecuados durante su uso para evitar un accidente y conocen muy bien sus reacciones químicas que incluyen su degradación en compuestos de carbono y nitrógeno.

En este orden de ideas, se tienen los siguientes mitos alrededor del manejo del agua en la minería aurífera en Colombia: 1) “Las aguas residuales mineras son las más tóxicas en la actividad humana”; 2) “Ninguna empresa minera de oro trata sus aguas residuales en Colombia, ni respeta las normas y comunidades” y 3) “Todas las empresas mineras usan mercurio (Hg) y cianuro para extraer oro”.

Entre los países en donde el sector minero es la base fundamental de su economía para mantener el bienestar y progreso de sus habitantes con una amplia producción de cobre y oro entre otros, Australia (oeste australiano), Canadá (Columbia Británica), Chile, China, Perú, Filipinas, Suráfrica y los Estados Unidos (Alaska, Arizona, Nevada y Nuevo México) cuentan con marcos legales de obligatoriedad gubernamental respecto al manejo del agua que permiten a sus inversionistas proveer los alcances y planear las operaciones seguras (Thomashaussen et al., 2018). Los tópicos que estos países manejan son: la distribución de agua, la descarga y la calidad del agua, la ejecución o cumplimiento de la normatividad.

Teniendo en cuenta lo anterior, a través de este capítulo se busca presentar la norma de vertimientos de la minería aurífera vigente para Colombia, analizar los sistemas de tratamiento de aguas mineras que son aplicados en la actualidad y mostrar los modelos y experiencias exitosas de tratamiento de aguas mineras en explotaciones auríferas que tienen Colombia y otros países.

Para desarrollar estos objetivos, se realizó una búsqueda bibliográfica, a través de la revisión de artículos, libros, manuales e informes relacionados con el tema de tratamiento de aguas residuales mineras, considerando especialmente los editados entre los años 2015 y 2020. Así mismo, se realizó una visita de campo al proyecto Soto Norte (Santander) y se revisó el plan de manejo ambiental que se presentó ante la ANLA.

Con lo anterior, los autores han decidido plantear los siguientes apartados:

Parámetros fisicoquímicos del agua de un vertimiento minero: se indica la norma que deben cumplir las empresas mineras, así como los valores máximos permisibles que pueden ser vertidos tras un tratamiento.

¿Cómo se hace el manejo de aguas residuales para minería? Los tratamientos activos y pasivos: se parte del reconocimiento de la importancia del agua como recurso vital, para luego presentar una revisión de los principales sistemas de tratamiento de aguas residuales mineras, basado en procesos fisicoquímicos y procesos biológicos, como producto de experiencias exitosas a nivel nacional y mundial, investigación, innovación y desarrollo tecnológico. La documentación analizada (manuales técnicos, guías y resultados de investigación) muestra al lector los desarrollos que existen

para tratar las aguas residuales mineras. Es importante anotar que son más conocidos los tratamientos activos, o tratamientos fisicoquímicos, sin embargo, tanto los activos como los pasivos hacen uso de procesos físicos, químicos y biológicos para disminuir las cargas contaminantes de los vertimientos.

Modelos y experiencias exitosas de tratamiento de aguas mineras en Colombia y en otros países a nivel latinoamericano: se obtuvo información directa de algunas de las principales empresas tanto productoras como explotadoras de oro en Colombia (proyecto Soto Norte), se muestran casos prácticos de tratamiento de vertidos mineros, señalando así que en el país sí están siendo tratados y manejados conforme a las normas legales los vertimientos de explotaciones mineras auríferas. Se incluyen también otras empresas a nivel de Latinoamérica y Colombia.

1. Parámetros fisicoquímicos del agua de un vertimiento minero

Las aguas residuales mineras se generan en las actividades de preparación, explotación y procesamiento del mineral. A nivel fisicoquímico estas aguas se caracterizan por condiciones de pH desde bajo (drenaje ácido de minas), pasando por neutro o llegando a ser alcalino, concentraciones elevadas de metales y metaloides, sulfatos y turbiedad. Autores como Bustamante et al. (2016) indican que la minería aurífera requiere altos volúmenes de agua para obtener el metal y, de no ser recirculada, su liberación lleva a alterar los niveles de cuerpos de agua superficiales y subterráneas.

Los metales pesados y metaloides se conocen ahora como Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), y corresponden al conjunto de metales pesados y metaloides (As, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb y Zn, entre otros), que a pesar de que se presentan en los suelos, sus concentraciones normales (en total no más del 1% de la corteza) no generan daño ambiental; sin embargo, las actividades industriales incrementan las concentraciones tanto en suelo como en el agua, afectando de forma severa sus condiciones y generando riesgos ambientales y a la salud (Masciandaro et al., 2013; Pourret y Hursthouse, 2019).

En caso de explotaciones ilegales en la minería aluvial de oro, el uso de motobombas de alta potencia, monitores de agua y retroexcavadoras,

utilizados para el desmorone de material donde se encuentra el mineral de oro, moviliza cantidades importantes de suelos residuales y aluviales que van directamente a las fuentes de agua, aumentando los sólidos totales, turbiedad y color, contaminando las fuentes hídricas (PNUMA-Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012), se suma también el daño ambiental por el uso del elemento tóxico Hg en la amalgamación luego de la separación de las partículas que contienen oro (OPT y CRPC, 2018).

La gestión del agua en un proyecto minero no puede ser visto solo como el cumplimiento de una exigencia de calidad basada un sistema de tratamiento de aguas. Los procesos extractivos, al modificar el balance hídrico donde se asientan, deben gestionar el manejo del agua bajo la siguiente jerarquía de cuatro principios para la toma de decisiones y la planeación (Punkkinen et al., 2016): 1) prevención y minimización de la contaminación del agua en la mina; 2) tratamiento de aguas residuales mineras; 3) reutilización de aguas tratadas; y 4) vertimiento de aguas tratadas.

A nivel de prevención y minimización de la contaminación del agua en la explotación minera se sugieren sistemas de drenaje y captación que puedan realizar lo siguiente (Wolkersdorfer, 2008): evitar el contacto del material que produce acidez con el agua; minimizar las corrientes de agua de la mina en minas a cielo abierto y subterráneas; y minimizar la cantidad de agua que debe tratarse.

Los empresarios mineros legales en Colombia comprometidos con realizar una adecuada gestión ambiental minera conocen y son conscientes de la importancia y exigencia por parte de las autoridades nacionales: Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible y locales, corporaciones autónomas, alcaldías municipales, de realizar el debido control a sus vertimientos.

Para todas las actividades mineras con potencial generador de metales solubles y drenajes ácidos, se hace necesario una evaluación previa de las condiciones geológico-ambientales; esto incluye un análisis detallado de la mineralogía, condiciones estructurales, geoquímica y evaluación de los riesgos asociados a los elementos potencialmente tóxicos (EPT), junto a los métodos de explotación, métodos de disposición de estériles y colas o relaves de beneficio, hidrología, hidrogeología y clima (figura 1). Dicho

modelo o guía se conoce como GEMTEC (Guía para el manejo de desechos mineros sólidos y líquidos en las fases de preminería y postminería, por sus siglas en inglés), y es una adaptación y actualización de lo propuesto por GARD (*Global Acid Rock Drainage*); su aplicación en los proyectos auríferos en Colombia puede permitir seleccionar previamente métodos preventivos y correctivos para efluentes mineros auríferos (Anawar, 2015).

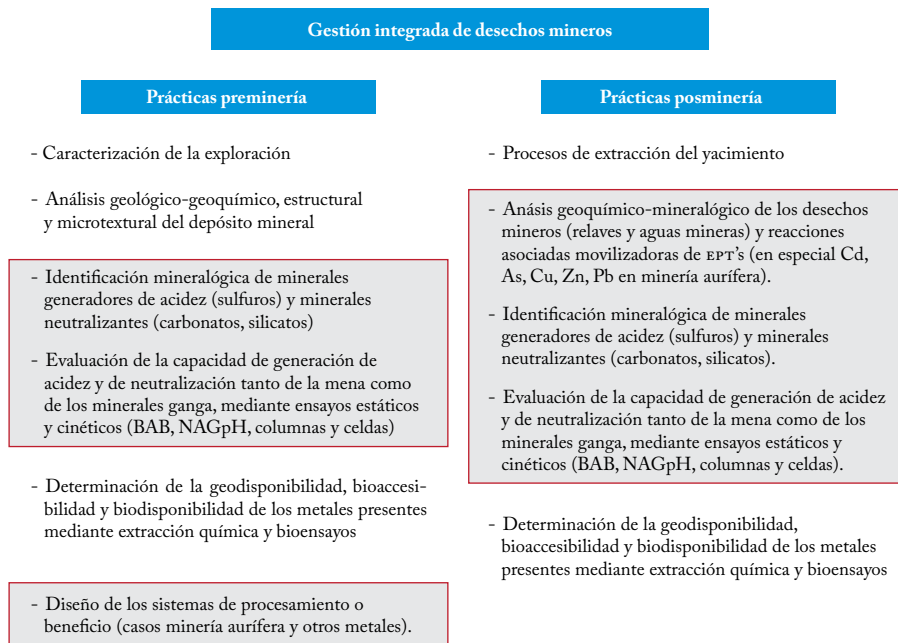


Figura 1. Aspectos técnicos y científicos del modelo GEMTEC. Se resalta aquellos análisis que permiten preestablecer sistemas de tratamiento de aguas mineras

Fuente: adaptado y modificado de Anawar (2015).

Las aguas residuales mineras o vertimientos mineros producto de procesos como drenaje minero tanto bajo tierra como cielo abierto, beneficio, presas de lodos o estériles, y campamentos, entre otros, requieren que sean tratadas cumpliendo la normativa nacional. En Colombia, los vertimientos de las actividades extractivas hacen parte de los denominadas: Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) y las compañías mineras deberán obtener antes de su operación el permiso de vertimientos (artículo 3, Resolución

631 de 2015, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), como parte de su licencia ambiental (Resolución 2206 de 2016). El tratamiento de aguas residuales mineras, el cual debe estar diseñado en los Estudios de Impacto Ambiental, debe cumplir con una serie de sistemas de tratamiento que garanticen una calidad de agua adecuada para ser vertida. El proceso de gestión del agua inicia desde el análisis de las operaciones mineras para identificar causas y consecuencias en la calidad, pasando por muestreos y evaluación contra las normas legales y finalizando con el establecimiento de sistemas de control y monitoreo (figura 2).

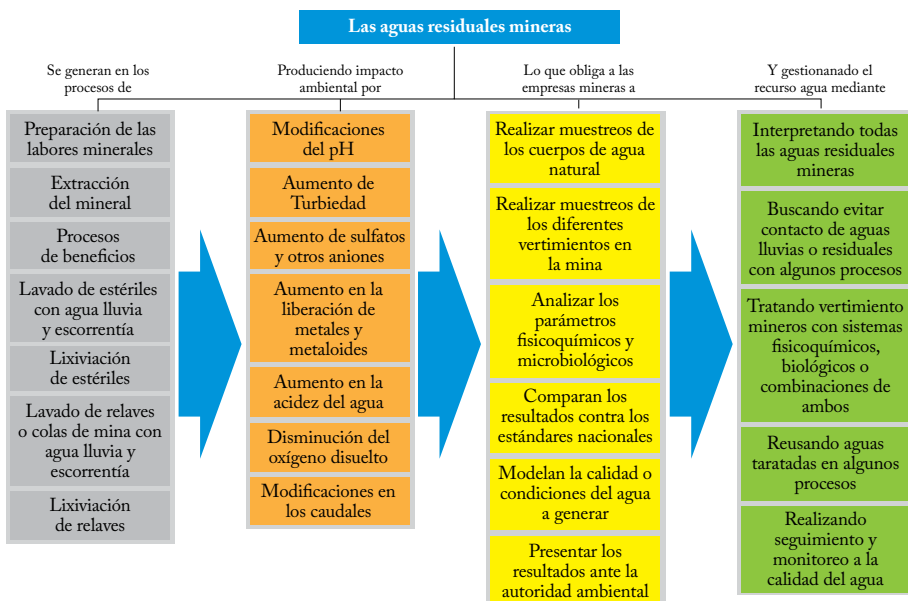


Figura 2. Modelo conceptual de la gestión de las aguas mineras

Fuente: elaboración de los autores, 2020.

En Colombia, los valores máximos permisibles de sustancias que pueden ser vertidas a cuerpos de aguas superficiales, luego de ser tratadas por métodos fisicoquímicos o biológicos por la empresa minera están regulados según el artículo 10 de la Resolución 631 del 2015, y se establecen una serie de valores límites para el diseño, operación y monitoreo de los sistemas de tratamiento de este tipo de aguas residuales (tabla 1).

**Tabla 1. Valores máximos permisibles para vertimientos
en extracción de oro y otros metales preciosos**

Parámetro	Unidades	Valores máximos
Generales		
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	150,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	50,00
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	2,00
Grasas y aceites	mg/L	10,00
Fenoles	mg/L	0,20
Sustancias Activas al azul de Metileno (SAAM)		Análisis y reporte
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	10,00
Compuestos de fósforo		
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Fósforo total (P)	mg/L	Análisis y reporte
Compuestos de nitrógeno		
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno total (N)	mg/L	Análisis y reporte
Iones		
Cianuro total (CN ⁻)	mg/L	1,00
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	250,00
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	1.200,00
Sulfuros (S ²⁻)	mg/L	1,00
Metales y metaloides		
Arsénico (As)	mg/L	0,10
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05
Cinc (Zn)	mg/L	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50
Hierro (Fe)	mg/L	2,00
Mercurio (Hg)	mg/L	0,002
Níquel (Ni)	mg/L	0,5
Plomo (Pb)	mg/L	0,2
Otros parámetros para análisis y reporte		
Acidez total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Dureza total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Color real	m ⁻¹	Análisis y reporte

Fuente: modificado de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 631 del 2015.

Como se puede analizar de la tabla 1, en algunos casos se tienen valores máximos definidos que son la base del diseño y operación de los sistemas de tratamiento, sin embargo, algunos parámetros, tales como compuestos de nitrógeno y fósforo, acidez, alcalinidad y dureza, solo exigen análisis y reporte, pudiendo ser un vacío importante en la reglamentación sobre la calidad de este tipo de aguas residuales.

Para dar cumplimiento a las exigencias de calidad del vertimiento, las empresas mineras usualmente contratan servicios de laboratorio acreditados para sus análisis. Los laboratorios que ofrecen servicios para cumplir con los requerimientos de calidad del agua utilizan la técnica instrumental de absorción atómica (AA), siendo la más conocida y utilizada junto a rutinas de titulación química; sin embargo, estos métodos requieren curvas de calibración para cada elemento químico y no todos los laboratorios cuentan con las lámparas para los elementos solicitados. Los análisis por plasma ICP-masas con menores límites de detección posibles (trazas en contenidos de partes por trillón) y cuantificación de una amplia gama de elementos químicos con alta precisión y exactitud hacen que este análisis químico sea el más recomendable para muestras de agua. La tecnología del plasma óptico (ICP-OES) es una alternativa intermedia respecto a costo, y debido al conjunto de elementos que detecta y cuantifica desde contenidos traza en partes por billón ppb, ha obligado a que los laboratorios la estén implementando e, incluso, reemplazando la tecnología de absorción atómica.

Es importante anotar que recientemente hay una nueva técnica instrumental basada en fluorescencia de rayos X por reflexión total (en inglés, *Total Reflection X-ray Fluorescence Analysis-TXRF*), la cual alcanza contenidos traza en unidad de partes por billón ppb, capaz de detectar y cuantificar una amplia gama serie de elementos desde el número atómico 11 el sodio (Na) hasta el 92 el uranio (U), determina la composición química elemental tanto de aguas como los sedimentos en suspensión al ser separados por filtración, e incluso puede llevar a cabo análisis del material biótico (Borgese et al., 2016).

Esta nueva técnica analítica (TXRF) es de fácil operación y requiere poca cantidad de muestra, que en minutos permite obtener el resultado químico que, en comparación con las otras técnicas instrumentales mencionadas anteriormente (absorción atómica, plasma masas y OES), el TXRF, es más fácil de implementar, tiene un menor costo y presupuesto de operación,

lo cual lleva a que actualmente sea factible llevar a cabo un monitoreo constante identificando cualquier riesgo y que este pueda ser mitigado a tiempo. La técnica analiza una serie importante de elementos de la tabla periódica, de igual forma, se indican otros análisis elementales (figura 3).

Luego del análisis de sus aguas residuales en un laboratorio debidamente acreditado, una empresa minera debe definir y diseñar un sistema de captación y tratamiento para sus aguas residuales en el plan de manejo ambiental (PMA) y así obtener el debido permiso de vertimientos. Además del tratamiento, la empresa minera no debe olvidar la posibilidad de reusar el agua tratada en procesos tales como mitigación de emisión de material particulado, sea en vías y patios de la mina o en las fuentes puntuales en procesos de beneficio mediante técnicas de aspersión. Los objetivos de un sistema de tratamiento de aguas residuales mineras, en general, consisten en regular el pH, bajar la acidez, disminuir los metales y metaloides solubles, así como aniones tales como sulfato (SO_4^{2-}) y, en algunos casos, cianuro (EPA, 2014).

H																	He				
Li 1	Be 0.1															B 10	C 12	N 14	O 16	F 19	Ne
Na 23	Mg 24															Al 27	Si 28	P 31	S 32	Cl 35	Ar
K 39	Ca 40	Sc 45	Ti 48	V 51	Cr 52	Mn 55	Fe 56	Co 59	Ni 59	Cu 63	Zn 65	Ga 70	Ge 73	As 75	Se 79	Br 80	Kr				
Rb 85	Sr 88	Y 89	Zr 91	Nb 93	Mo 96	Tc 98	Ru 101	Rh 103	Pd 106	Ag 108	Cd 112	In 115	Sn 119	Sb 122	Te 128	I 127	Xe				
Cs 133	Ba 137	La 139	Hf 178	Ta 181	W 184	Re 187	Os 190	Ir 192	Pt 195	Au 197	Hg 201	Tl 204	Pb 207	Bi 209	Po	At	Rn				
Fr	Ra	Ac	Ku	Ha																	
La		Ce 0.002	Pr 0.001	Nd 0.004	Pm	Sm 0.002	Eu 0.001	Gd 0.002	Tb 0.001	Dy 0.002	Ho 0.001	Er 0.001	Tm 0.001	Yb 0.001	Lu 0.001						
Ac		Tb 0.001	Pu	U 0.001	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw						

Análisis de aguas por ICP-Masas

■ X Símbolo del elemento

Límite de detección en ppb

Análisis de calidad del agua

■ Absorción atómica, generador de hidruros

■ Cationes por métodos de titulación

T-XRF

■ Configuración estándar

■ Se pueden adicionar

Figura 3. Tipos de análisis de aguas

Fuente: elaboración de los autores.

Es importante considerar para el empresario minero que la selección de las técnicas para el control de aguas residuales dependerá no solo de las posibles cargas contaminantes (concentraciones y caudales promedio),

sino de factores tales como disponibilidad del terreno, relieve, tiempo de operación del proyecto minero, vías de acceso, sistemas de conducción de las aguas residuales, cercanía a sitios poblados o de interés ambiental, costos operativos, madurez de la tecnología, contaminantes objetivo, criterios de calidad y eficiencia del proceso de tratamiento, entre otros (EPA, 2014; Water Research Comission, 2017; Dipti y Deepak, 2017; Matveeva et al., 2019).

2. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales mineras

El agua es un recurso vital debido a sus características químicas especiales, como su carácter polar, su tendencia a formar enlaces de hidrógeno y su capacidad para formar hidratos de iones metálicos y disolver sales, su alta tensión superficial y la elevada capacidad calorífica (Manahan, 2005), de ahí su importancia de ser manejada como recurso esencial en cualquier proyecto.

No todos los vertimientos de las empresas mineras de Au-Ag y otros metales tienen un pH menor a 4,5 o producen una alta acidez en el agua (puede ser que el depósito mineral contenga minerales neutralizadores, o su capacidad generadora de acidez sea baja o los responsables de la mina estén aplicando metodologías de prevención); sin embargo, la presencia de los EPT, así sus concentraciones estén por debajo de las normas de calidad, hace necesario que los sistemas de tratamiento del agua residual minera realicen un control del pH y la acidez asociada, mediante mecanismos de neutralización para remover los sólidos disueltos a través de la formación de minerales insolubles sedimentables o por medio de procesos de adsorción.

Un tratamiento de aguas residuales comprende una serie de etapas o fases en las que se realizan procesos fisicoquímicos diferentes que van modificando las condiciones del vertimiento hasta lograr un cumplimiento de los estándares nacionales o internacionales en cuanto a la calidad del agua. En la actualidad, los sistemas de tratamiento de aguas residuales mineras se pueden dividir en dos grupos: *tratamientos activos*, que requieren operación, mantenimiento y monitoreo por parte de personal adscrito a la empresa, y *tratamientos pasivos*, en donde la intervención del personal es mucho menor y se hace uso de factores tales como la fuerza de la gravedad, radiación solar y los organismos biológicos (Kefeni et al., 2017). En ambos sistemas de tratamiento (activos y pasivos), la carga contaminante de las

aguas residuales es controlada por la suma de procesos físicos, químicos y biológicos (Johnson y Hallberg, 2005; EPA, 2014). La guía GARD (*Global Acid Rock Drainage*) presenta los sistemas de tratamiento de agua residual minera en cuatro categorías (figura 4), algunas de las cuales son explicadas en el propósito de verificar la validez del mito. Al final se presenta una breve revisión de las tecnologías de tratamiento de compuestos de cianuro.

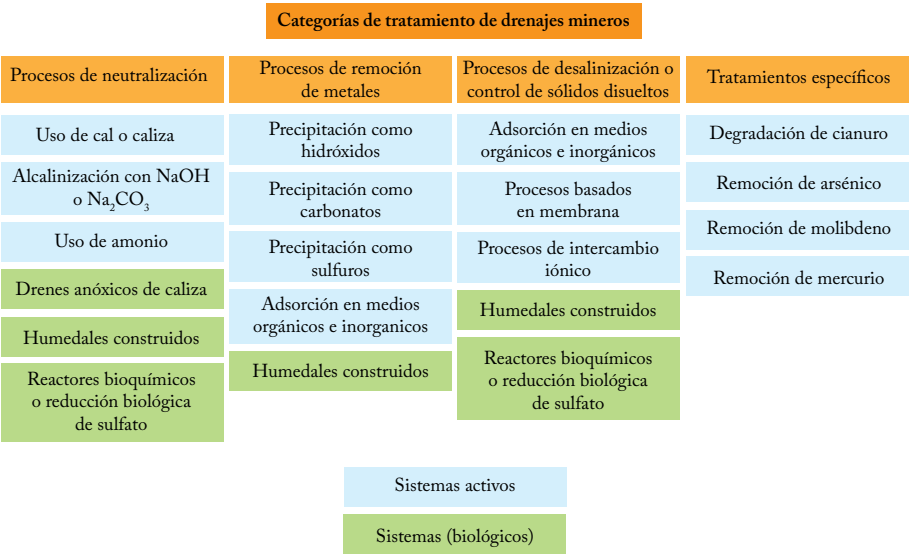


Figura 4. Principales categorías de tratamiento de drenajes mineros

Fuente: adaptado y modificado de INAP (2009).

2.1. Tratamientos activos

Los tratamientos activos corresponden a los métodos más empleados y más conocidos, ya que parten de los sistemas de tratamiento convencionales de aguas residuales, con las etapas de pretratamiento, tratamientos primarios, secundarios y terciarios; el modelo general del sistema de tratamiento de aguas residuales comprende tamizado, homogenización, sedimentación, coagulación-floculación, sedimentación, filtración, digestión anaerobia, aireación, oxidación (Spellman, 2014), para el caso de las cargas metálicas los principales procesos son ultrafiltración, electrodiálisis, uso de reactivos específicos, la adsorción y el intercambio iónico (Matveeva et al., 2019), sin embargo, se incluyen también procesos de filtración por membrana (Kefeni et al., 2017). Para el caso de las aguas residuales

mineras, los sistemas activos buscan principalmente la regulación del pH, la disminución de la carga de metales y de sulfatos (Johnson y Hallberg, 2005). Los tratamientos activos se refieren a las tecnologías que requieren continuidad de las operaciones humanas, mantenimiento y vigilancia con base en fuentes externas de energía (energía eléctrica), utilizando la infraestructura y sistemas de ingeniería. Las tecnologías de tratamiento activo incluyen principalmente: aireación, neutralización química, pedimentación o clarificación, precipitación de metales o eliminación de los metales, y electrocoagulación.

2.1.1. Aireación

Proceso fisicoquímico consistente en aumentar el oxígeno disuelto en el vertimiento haciendo uso de cascadas en forma de escalera (cuando hay desniveles topográficos importantes) o bombeando el agua desde la mina o el patio de la mina hacia un punto alto y dejándola caer entre bandejas metálicas perforadas (figura 5). El proceso puede ser el inicial de un sistema de tratamiento del agua o puede ser luego de un tanque de sedimentación o neutralización (INAP, 2009).

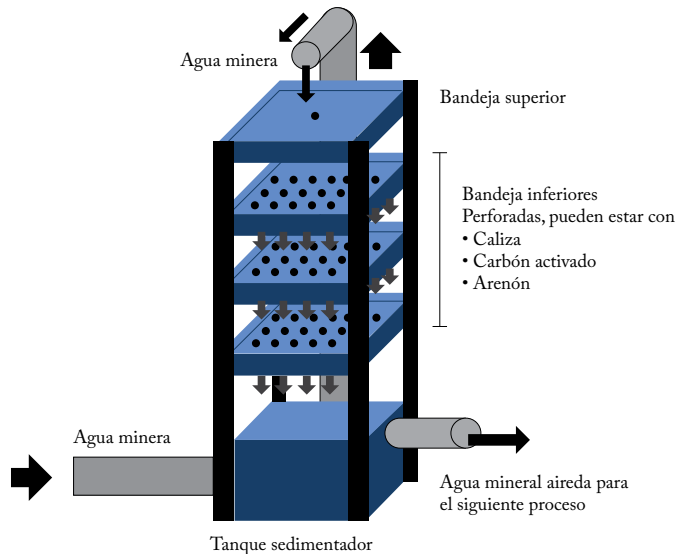


Figura 5. Esquema de una torre de aireación para aguas residuales mineras

Fuente: adaptado y modificado de Calderón et al. (2012).

Aunque en las empresas no es muy usual “airear” u “oxigenar” el agua antes de usar los tanques de sedimentación, se recomienda para aquellos efluentes que tengan una carga superior a 50 mg/L de Fe^{2+} (en Colombia, se plantea como máximo 2,0 mg/L de Fe total (artículo 10, resolución 631, del 2015)). La aireación puede ser también mecánica, mediante la agitación rotatoria del agua en tanques circulares e inyección de oxígeno, sin embargo, los costos son mayores.

Un ejemplo de aireación mediante cascada se encuentra en la mina didáctica del Centro Minero del Sena Regional Boyacá, construida para el entrenamiento y formación de los técnicos que trabajaran en la industria minera del oro. Allí se montó una torre de aireación en su sistema de tratamiento del agua para aumentar la oxidación de metales tales como el Fe^{2+} y mejorar luego el proceso de sedimentación.

2.1.2. Neutralización química

Los procesos de neutralización química se realizan cuando el pH del vertimiento está por debajo de 6, o presenta acidez elevada, sin importar si proviene directamente de la mina o del proceso de beneficio, botadero o presa de relaves; el nivel de acidez que tenga el efluente, sumado a la composición y concentraciones de los iones solubles (metales, metaloides, aniones), depende del tipo y la cantidad de minerales sulfuros presentes y minerales neutralizadores (carbonatos) contenidos en el yacimiento (Skousen, 2017).

Aunque no en todas las explotaciones auríferas filonianas a nivel mundial o en Colombia son generadoras de drenajes ácidos, es importante considerar los tratamientos activos necesarios para el control del pH y la disminución de la acidez. Se ha registrado en el caso de Antioquia que el 60% de las unidades mineras informales presentan vertimientos con valores de pH menor al 6,0 indicando la presencia de drenajes ácidos de mina, también se reporta este problema en Caldas y Cauca (Ministerio del Medio Ambiente et al., 2019).

La elevación del pH se logra mediante la adición controlada de sustancias alcalinas tales como cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), soda cáustica y caliza (Johnson y Hallberg 2005). La neutralización con caliza no modificada y modificada puede eliminación y remover del efluente minero metales como Fe^{3+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} (Lakovleva et al., 2015). Además de la caliza, se pueden

adicionar otros productos químicos alcalinos como NaOH , Na_2CO_3 y NH_3 , pero el tratamiento mediante estas adiciones no solo es costoso, sino que necesita de equipos de dosificación e instalaciones que algunas empresas no asumen. El sistema de neutralización puede comprender un tubo o conducto de entrada a partir un tanque de almacenamiento (con mezclas de cal, caliza a granel, soda cáustica), sumado a una válvula dosificadora sobre un tanque de neutralización-sedimentación para lograr contener los oxihidróxidos generados. El tipo y tamaño de un sistema de tratamiento químico se basa en el caudal, el pH, el estado de oxidación del agua y las concentraciones de metales en el vertimiento minero (Skousen et al., 2019).

2.1.3. Sedimentación o clarificación

Por lo general, luego de la neutralización química, se procede con los tanques de sedimentación o clarificadores para la remoción de los lodos formados tanto por la aireación como por la neutralización, y consiste en tanques circulares o rectangulares con diferentes dimensiones (con profundidades no más de 1,5 m), con el fin de remover turbiedad, sólidos suspendidos y parte de la carga orgánica. Los tanques o pozos de sedimentación también se conocen como “desarenadores”.

Este proceso hace uso de la fuerza de la gravedad para lograr asentar las partículas finas, sin embargo, su eficiencia es limitada. El tiempo de retención del agua en el tanque por lo general debe ser de 3 a 4 horas; para lograr una mayor efectividad en la clarificación se sugiere usar un dispositivo giratorio que “raspe” o dirija los lodos hacia un tanque de lodos (figura 6). Se estima que el proceso en tanques circulares o rectangulares mecanizados elimina entre el 60 al 70% de los sólidos suspendidos y entre 20 y 30% de la DBO (Pote, 2017). La principal dificultad de este proceso físico es que las partículas coloidales no se pueden eliminar de manera eficiente por la fuerza de la gravedad y es necesario agregar reactivos químicos denominados floculantes¹ o coagulantes que aceleren el proceso.

¹ “El proceso de floculación consiste en desestabilizar las partículas coloidales mediante la adición del floculante. Este neutraliza las cargas electrostáticas de los compuestos en disolución, reduciendo así las fuerzas de repulsión entre ellos. Por este motivo, las partículas tienden a unirse entre sí formando flóculos cada vez más grandes. Su habitual aplicación es en purificación de aguas en el cual se forman los flóculos a fin de que los procesos de filtración puedan

Los floculantes pueden ser inorgánicos (químicos sintéticos), tales como sulfato de aluminio (alumbre) y sales de Fe (Pote, 2017), también se ha usado sulfato de cobre y orgánicos a base de sacarosa y glucosa, que han demostrado una alta efectividad para precipitar metales solubles de aguas residuales mineras (Ayangbenro et al., 2019).

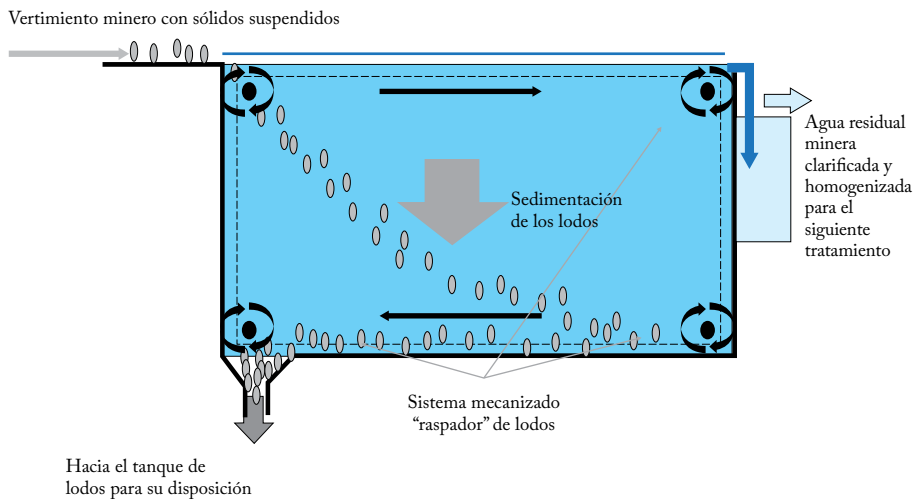


Figura 6. Esquema de un tanque sedimentador o clarificador vertical mecanizado

Fuente: adaptado y modificado de Pote (2017).

2.1.4. Precipitación de metales y eliminación de los metales

En cuanto a la carga de metales, muy propia de los vertimientos de minería aurífera y de metales (inclusive algunas veces carbón), se pueden tratar de diversas formas. En primer lugar, se podrían remover a través de las etapas anteriormente mencionadas: aireación + neutralización + floculación + sedimentación. Sin embargo, para aquellos metales, metaloides y aniones que no pueden ser removidos de esta forma se plantean otros sistemas.

Dos factores son claves para el control de la contaminación de los EPT e inclusive azufre (en formas de especies de sulfuros o de sulfato): el pH y el potencial redox (Eh en voltios o milivoltios), y se tienen establecidas

eliminarlos con mayor facilidad. Los floculantes más usados son el sulfato de alúmina, sulfato férrico o cloruro férrico" (Vadequímica, s. f., <https://www.vadequimica.com/quimipedia/f/floculante/>).

las condiciones de estas dos variables geoquímicas para ambientes y aguas como las mineras (figura 7).

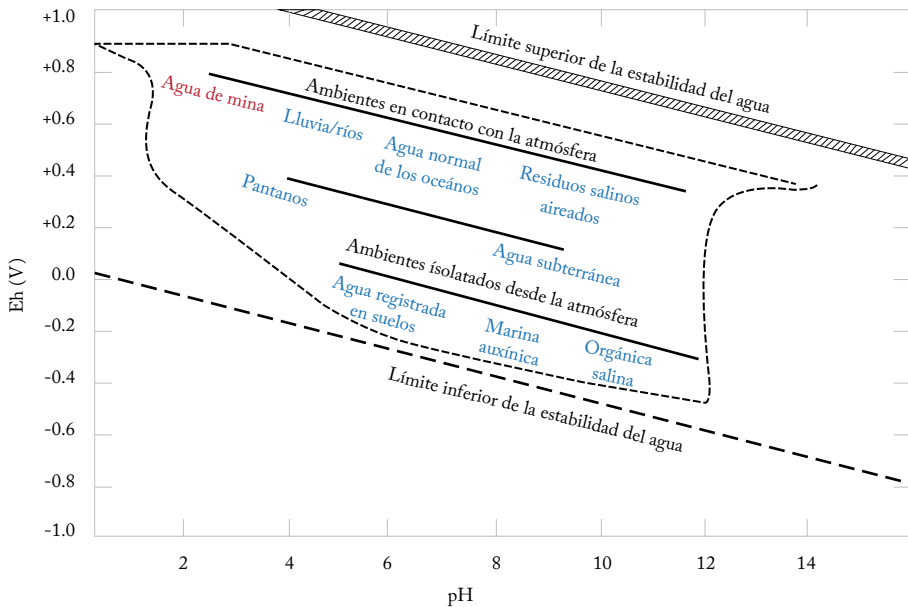


Figura 7. Posiciones aproximadas de los ambientes naturales en términos de pH vs. Eh

Fuente: adaptado y modificado de EPA (2007).

Se han identificado especies solubles e insolubles de la mayoría de metales y metaloides bajo distintas condiciones de pH y potencial Redox. Con el uso de los diagramas Pourbaix o diagramas pH-Eh, se pueden identificar las probables especies (solubles e insolubles) de un EPT específico que quiera ser removido o controlado, por ejemplo, en la figura 8 se muestra el diagrama Pourbaix para el Cu, y se indica que a medida que se aumenta el pH se puede lograr la precipitación en forma de óxidos e hidróxidos (tenorita $[\text{CuO}]$, cuprita $[\text{Cu}_2\text{O}]$ y cobre nativo $[\text{Cu}]$), en función del pH y potencial redox (Eh en voltios o milovoltios) del agua residual; en este sentido, bajo condiciones de pH mayores a 9 se puede formar tenorita, que es una especie insoluble del Cu (en este caso, el Eh puede ser desde oxidante hasta reductor). Aunque los diagramas se han establecido para condiciones estándar de 25°C y 1 atmósfera de presión, se pueden usar para analizar las condiciones de precipitación o detoxificación de EPT.

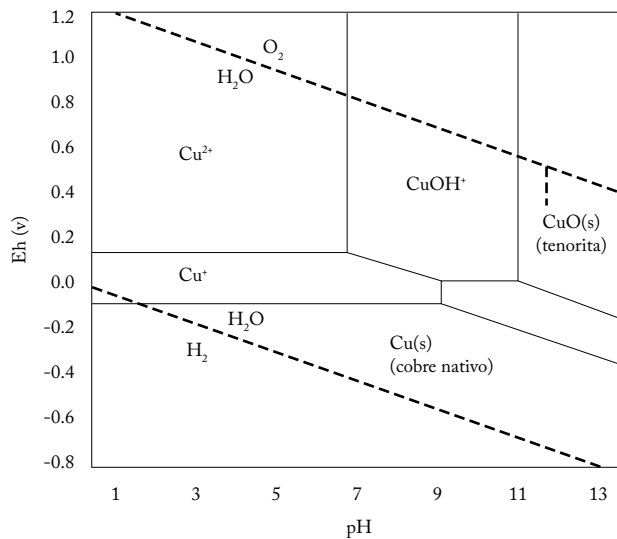


Figura 8. Diagrama de Pourbaix o pH-Eh para el cobre

Fuente: adaptado de National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (2005).

Los sistemas de tratamiento activos para aguas mineras, llamados por algunos tratamientos fisicoquímicos, hacen remoción de los metales a través de los siguientes procesos: sorción, ósmosis inversa y filtración, entre otros; por lo general, se sugiere inicialmente la sorción seguido luego por la ósmosis inversa y si los costos lo permiten, procesos de filtración (filtración por membranas) o ultrafiltración. A continuación, se explica brevemente cada uno.

Precipitación selectiva de metales

La precipitación selectiva se basa en diferencias de solubilidad entre los compuestos metálicos. Los agentes reactivos más comunes para la precipitación de metales son hidróxido de sodio o sulfuro de sodio. Las principales ventajas de este método son la reducción del volumen de los lodos resultantes y la posible valorización (reciclaje) de los metales (Rodríguez-Galán et al., 2019). La precipitación puede combinar la neutralización con otros sistemas tales como la adición de peróxido para acelerar la oxidación o con sulfito de Na para favorecer la precipitación de Fe, Al, Cu y Zn (Chen et al., 2014; Seo et al., 2017).

Procesos de sorción o absorción

El primer sistema para la remoción de metales pesados es hacer pasar el agua residual a través de sistemas de lechos filtrantes los cuales pueden contener diferentes materiales adsorbentes, este proceso de adsorción se considera que juega un papel importante para controlar las concentraciones de metales en las aguas subterráneas contaminadas por las actividades mineras (Bhattacharya et al., 2012).

Los materiales sorbentes se clasifican en dos tipos: carbono y materiales sin carbono. Los primeros son carbones activos tales como: carbón activado (CA), carbón activado granular (CAG) y carbón activado en polvo (CAP), que difieren en sus tamaños de partículas (Ashane et al., 2018). Bajo este grupo de adsorbentes carbonados se incluye también a los producidos a base de turba y otros materiales, que se obtienen a partir de materiales orgánicos, mientras los sorbentes no carbonados se hacen a partir de materiales naturales y artificiales (arcilla, zeolitas, y otros), por ejemplo, las arcillas y el compuesto arcilla-polianilina presentan eficiencia en la remoción de Cu (Soltani et al., 2019). De igual forma, uno de los materiales que ha mostrado alta eficiencia en retención de metales (88%) es la vermiculita (Matveeva et al., 2019).

Materiales absorbentes carbonados tales como los biorresiduos (salvado de trigo, mazorca de maíz y residuos de aceituna) son una fuente para la adsorción de metales pesados de aguas residuales con elevada eficiencia. Estudios han mostrado que la adsorción de metales mediante residuos de aceituna, en comparación con salvado de trigo y mazorca de maíz, es más efectiva debido a diferentes superficies, capacidades de adsorción, sitios activos de poros de adsorbentes y naturaleza de los iones. El orden de remoción de los elementos fue: $Pb^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+} > Cd^{2+} > Co^{2+} > Mn^{2+}$ (Bashkim y Salih, 2019).

Otra forma de precipitar metales luego de la neutralización es mediante la aplicación de la nanotecnología, agregando nanopartículas de hierro metálico (Fe cero valente, conocido ZVI, en inglés), donde se logra una remoción importante luego de 24 horas de neutralización, especialmente de arsénico (Kim et al., 2012). Entre las principales características que presenta el uso de nanopartículas para vertimientos mineros están sus propiedades magnéticas y su capacidad de eliminación de metales (Kefeni et al., 2015).

Una variante importante de los mecanismos de adsorción es el uso de ferrihidrita como material adsorbente, dicho proceso se conoce como coprecipitación de hierro. En aguas con bajo contenido de hierro, se puede añadir la ferrihidrita para adsorber ciertos metales en precipitados de hidróxido férrico, el proceso consiste en añadir sales férricas (por ejemplo, cloruro férrico) para generar hidróxido férrico y ferrihidrita en forma de lodos. Es importante controlar previamente el pH del efluente minero (EPA, 2014).

Autores como Shabalala y Ekolú (2019) proponen que los tanques de sedimentación luego de la neutralización química puedan ser revestidos con concreto permeable (PERVC, por sus siglas en inglés), el cual presenta una capacidad de absorción elevada para aguas ácidas de minas tanto de oro como de carbón; el concreto PERVC está conformado por un agregado de granito y cemento Portland ordinario CEM I 52.5R (CEM I) o CEM I con cenizas clase F 30% (30% FA) como material de reemplazo de cemento, y encontraron altos niveles de remoción de Al, Fe, Ni, Co, Pb y Zn.

Se han evaluado mezclas de turba natural con sorbentes minerales (óxidos y carbonatos de Mg) con éxito a nivel experimental para la remoción de efluentes con cargas de metales. En este sistema se propone inicialmente un reactor mecanizado mezclador y dosificador donde para un caudal del efluente de 1,1 L/min se agregaron 0,15 g/L del adsorbente mineral y 0,5 g/L de la turba, y esto se pasa luego al tanque sedimentador (figura 9), con el fin de precipitar la mezcla de los adsorbentes con los metales removidos y permitir salir un agua no solo clarificada, sino con baja concentración de metales (Heiderscheidt et al., 2020).

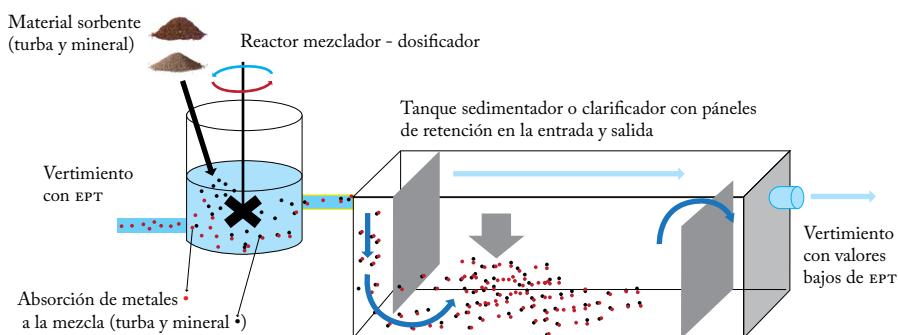


Figura 9. Sistema de adsorción-sedimentación

Fuente: adaptado y modificado de Heiderscheidt et al. (2020).

Samaniego y Tanchuling (2019) hacen una interesante propuesta en el uso de residuos biológicos para adsorber metales productos de la pequeña minería aurífera que aún beneficia mediante el uso de Hg. El sistema de tratamiento propuesto está conformado por un lecho filtrante el cual inicialmente es un tanque de sedimentación y luego un reactor de filtro con sustratos de grava, arena y turba o cortezas de coco (Cocopeat). Los metales solubles fueron adsorbidos en el lecho filtrante (figura 10), especialmente en la turba de coco, que contribuyó en la reducción de metales pesados de las aguas residuales con eficiencias del 97,11% As, 74,24% Cd, 97,02% Hg, 97% Pb.

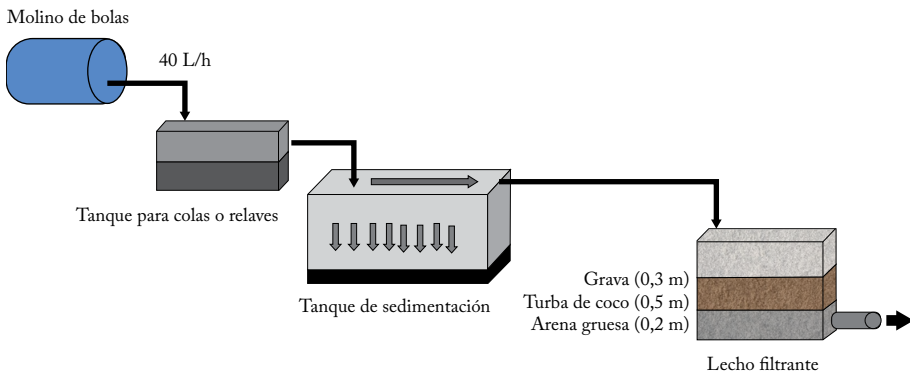


Figura 10. Sistema de sedimentación y lechos filtrantes con el uso de residuos o turba de coco para remoción mediante adsorción de metales de una mina de oro

Fuente: adaptado y modificado de Samaniego y Tanchuling (2019).

Se están probando materiales inorgánicos sintéticos y nanomateriales con excelentes resultados para remover algunos EPT: zeolitas modificadas con Fe tienen capacidad de retener As^{5+} , carbón activado modificado para la adsorción de iones de sulfato, compuestos orgánicos e inorgánicos de amida para remover iones de Cu, nanotubos de carbono conocidos como nanotubos de carbono multipareados doblemente oxidados (MWCNTs, por sus siglas en inglés), para la adsorción de cationes metálicos divalentes (Wei et al., 2018; Rodríguez y Leiva, 2019).

Sin embargo, el proceso de remoción de metales a través de diferentes adsorbentes orgánicos e inorgánicos tiene sus problemas, el principal es la variabilidad que se puede encontrar en la calidad del vertimiento de la mina, así mismo, costos tanto del material como de su mantenimiento

y la posibilidad de lixiviación de sustancias peligrosas de los materiales filtrantes (Westholm et al., 2014).

Procesos de membranas a través de ósmosis inversa, intercambio iónico y filtración por membrana

Los procesos de separación por membranas (MSP, por sus siglas en inglés) son las tecnologías utilizadas para reducir la carga contaminante de efluentes de uso industrial y minero, presentan alta eficiencia, confiabilidad, facilidad de operación, adaptabilidad a los cambios en el flujo de alimentación, bajos tiempos operativos y diseño en partes separables (Fornarelli et al., 2013). Se dividen básicamente en nanofiltración y ósmosis inversa.

Un problema asociado a estos procesos es su elevada susceptibilidad de deposición de materia orgánica e inorgánica en las membranas, generando biopelículas en su superficie; aunque el fenómeno es inevitable, se puede controlar mediante un manejo óptimo de velocidad y condiciones de alimentación, y las propiedades de las membranas (Wei et al., 2010). Se evaluó la eficiencia de la nanofiltración y la ósmosis inversa para tratar aguas mineras residuales de oro, y los resultados arrojaron un potencial más alto en la primera (nanofiltración) para tratar los efluentes mineros (Aguilar et al., 2016).

Ósmosis inversa

La ósmosis inversa consiste en separar a presión sustancias solubles a través de una membrana semipermeable que permite el paso del agua mientras se retienen los contaminantes (figura 11). Los iones disueltos (EPT y otros compuestos) se concentran en una solución que debe ser luego tratada (EPA, 2014). En esta tecnología de remoción de metales las membranas utilizadas son permeables al agua, pero muy poco permeables a las sales disueltas (metales, metaloides y aniones solubles); usada para separar especies iónicas, metales disueltos y moléculas orgánicas de baja masa molar (Baker, 2012).

Para garantizar que el sistema dure como mínimo cinco años, es necesario un pretratamiento para aguas duras o con niveles elevados de sólidos suspendidos totales, los costos asociados especialmente a la energía

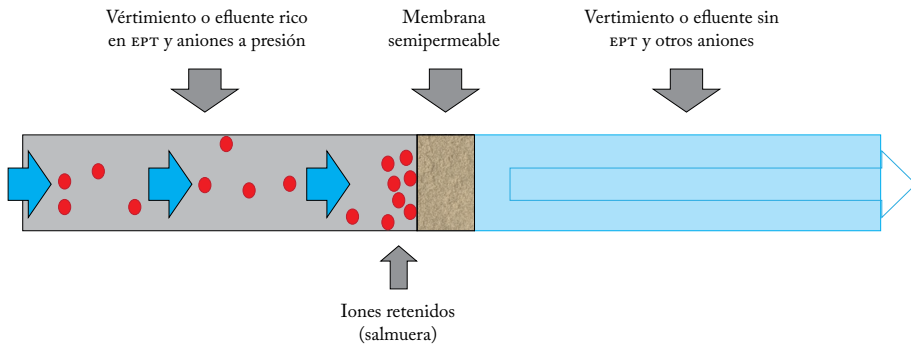


Figura 11. Esquema del sistema de ósmosis inversa

Fuente: adaptado y modificado de EPA (2014).

son una limitante (EPA, 2014); para optimizar el proceso de ósmosis (inversa y que se remuevan con alta eficiencia los sólidos disueltos totales SDT), es necesario un pretratamiento de aireación y neutralización con caliza, seguido de filtración utilizando capas de arena, o ultrafiltración (UF) antes del proceso de ósmosis (Dama-Fakir et al., 2017). A nivel de laboratorio se evaluaron ambos sistemas para tratar aguas residuales sintéticas de minas auríferas en Brasil, mediante nanofiltración con el uso de cinco membranas (cuatro de poliamida y una de polipiperazina) y ósmosis inversa con cinco membranas referenciadas (TFC-HR, BW30, MFP34, NF90 y NF270); el control y ajuste del pH fue realizado previamente. Los resultados mostraron que las membranas de compuesto de poliamida (nanofiltración) y TFC-HR (osmosis inversa) mostraron las mayores eficiencias para el control de sólidos disueltos totales, sulfatos, cloruros, magnesio y calcio y menos del 60% para el arsénico (Andrade et al., 2017).

Intercambio iónico

El intercambio de iónico es el intercambio reversible de iones contaminantes con iones menos contaminantes (por ejemplo, bases) de una carga similar adsorbida a superficies sólidas conocidas como resinas de intercambio iónico. El proceso activo proporciona eliminación de dureza, desalinización, eliminación de alcalinidad, eliminación de residuos radiactivos, eliminación de amoníaco y eliminación de metales; en las columnas de intercambio, una vez que los sitios de intercambio iónico en la resina

están completamente llenos, la resina debe ser regenerada para poder ser utilizada de nuevo (EPA, 2014).

Filtración por membrana

Se trata de un proceso de tratamiento fisicoquímico basado en el paso de agua contaminada a través de membranas con diferentes tamaños de poro, donde la turbiedad y en especial sólidos disueltos (metales, metaloides, aniones y compuestos orgánicos) son retenidos, ya sea por el tamaño de la molécula o por algún otro mecanismo de adsorción. Entre los diferentes sistemas de filtración están la ultrafiltración y la nanofiltración, sin embargo, a pesar de su aplicación no siempre son efectivos y presentan costos elevados; se está optando por combinar la ultrafiltración por medio de polímeros (PAUF, por sus siglas en inglés), que no solo separa iones, sino que procesa volúmenes del vertimiento minero o industrial a través de la nanofiltración, extracción líquido-líquido e intercambio iónico. Los iones metálicos son complejados por medio de polímeros a base de polisacáridos tales como el quitosano (poli-D-glucosamina), el cual presenta propiedades de complejación, floculación, quelación, separación y adsorción de toda de contaminantes, inclusive trazas (iones metálicos tales como Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} Hg^{2+}); este es un material que se puede utilizar como sólido en procesos de quelación o adsorción, o en forma de solución en procesos de coagulación/floculación (Crini et al., 2017).

Los procesos de membranas son una tecnología potencial para separar mezclas de materiales, como aguas residuales como las de minería de oro, ofrecen ventajas bastante significativas: simple en funcionamiento, flexible y compatible con configuraciones integradas, se considera una alternativa prometedora para tratar aguas mineras con cargas importantes de metales, sin embargo, estos procesos de membrana necesitan más investigación, incluso en combinación con otras tecnologías (Rodríguez-Galán et al., 2019).

2.1.5. Electrocoagulación

Para aguas mineras con niveles importantes de sólidos sedimentables y metales solubles, la electrocoagulación es una técnica fisicoquímica bastante usada. Los electrodos utilizados en este proceso en general son de aluminio y de hierro (Touahria et al., 2016), entre sus ventajas están la

simplicidad de los equipos, bajos costos, facilidad de operación, tiempo de retención más corto, altas velocidades de sedimentación y una cantidad reducida de lodos generados (Ulu et al., 2014). El proceso de electrocoagulación consiste en hacer pasar las aguas residuales bajo una corriente eléctrica entre dos electrodos adicionando sales tales como Na_2SO_4 , CaCl_2 , Na_2CO_3 , KCl y NaCl , para que sustancias solubles puedan ser precipitadas. La electrocoagulación se basa en los siguientes procesos: reacción electrolítica en superficies de electrodos, producción de coagulantes en fase acuosa, adsorción de contaminantes solubles o coloidales en coagulantes y sedimentación para la remoción de lodos (Merzouk et al., 2009).

A nivel experimental, se evaluó la aplicación del proceso de electrocoagulación en aguas residuales mineras encontrándose del 95 al 99% de eficiencia en la remoción de la turbiedad bajo voltajes de 5 y 25 mA/cm^2 ; de igual forma, el SO_4^{2-} pudo disminuirse en un 80,5%, As en un 76,3% (de 0,55 a 0,13 mg/L), Pb en un 91% y Cd en 86% (Touahria et al., 2016).

2.2. Tratamientos pasivos (físicoquímicos y biológicos)

Los sistemas de tratamiento pasivo se enfocan en la neutralización química y la eliminación de metales y metaloides, pueden ser de tipo físicoquímico como los subdrenajes anóxicos de caliza o los canales abiertos de caliza; también se incluyen los humedales artificiales considerados sistemas pasivos de tipo biológico. Por la naturaleza y variedad de las cargas contaminantes, los efluentes mineros pueden requerir diversos métodos de tratamiento, integrando diferentes varias tecnologías de tratamiento pasivos (Doshi, 2006).

2.2.1. Subdrenes anóxicos de caliza (anoxic limestone drain, ALD)

Los drenajes de roca caliza anóxica (ALD, por sus siglas en inglés) están conformadas por trincheras, revestidas con geomembrana dentro de la cual se deposita caliza (de alta pureza, más del 90% de CaCO_3 y entre 1,5 a 4 pulgadas de diámetro promedio), cubiertas por encima con suelo, arcilla compactada (figura 12). Son considerados sistemas pasivos de tipo físicoquímico.

El agua minera con alta acidez y metales solubles, al atravesar el subdrén recubierto, evita al máximo la entrada de O_2 y la fuga de CO_2

y se controla la formación de hidróxidos de Fe^{2+} (se presenta cuando el pH se eleva por encima de 8,0), además la caliza en el subdrén aumenta la alcalinidad. Una condición para su uso es determinar la presencia y concentración del ion Fe^{2+} (fe ferroso) y tratar de oxidarlo antes de la entrada al sistema, con un pH por encima de 5 el Fe soluble es el ferroso (Skousen et al., 2017).

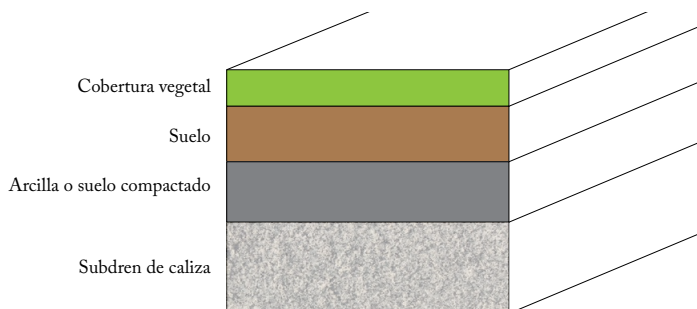


Figura 12. Esquema de un subdrén (adimensional)

Fuente: adaptado y modificado de EPA (2014).

La precipitación excesiva de hierro y aluminio reducirá la vida útil efectiva en el subdrén, lo que resulta en una reducción de la permeabilidad y las tasas de disolución de calcita, por lo tanto, se recomiendan otros métodos para precipitar estos metales antes del uso de esta tecnología. El tiempo de contacto entre el efluente minero y la trinchera debe ser de al menos 15 horas, así, se requiere $2,8 \text{ tn}^2$ caliza/min de flujo del efluente minero. Una vez el agua sale del subdrenaje, se debe proporcionar un área suficiente para la oxidación de los metales, hidrólisis y precipitación, para ello se pueden utilizar tanques sedimentadores o humedales de flujo superficial (EPA, 2014).

2.2.2. Humedales artificiales (constructed or artificial wetlands)

Los humedales artificiales (o construidos) son un sistema de tratamiento de aguas de tipo secundario o terciario y están conformados por una depresión en el suelo e impermeabilizada (por medio de geomembranas o capas de arcilla compactada), en donde se introducen capas de caliza,

² tn = tonelada métrica.

suelo (compost) y agua, así como siembra de plantas. Se tienen dos variantes principales, los del flujo superficial (figura 13), en donde se ve a simple vista la lámina de agua (similar a una laguna de oxidación) y los de flujo subsuperficial (figura 14), en este caso el nivel del agua está por debajo del nivel del suelo. Las plantas usadas para los humedales pueden ser acuáticas emergentes (para sistemas de flujo superficial) o plantas terrestres que soporten terrenos con altas humedades (para humedales de flujo subsuperficial). Son considerados sistemas pasivos de tipo biológico.

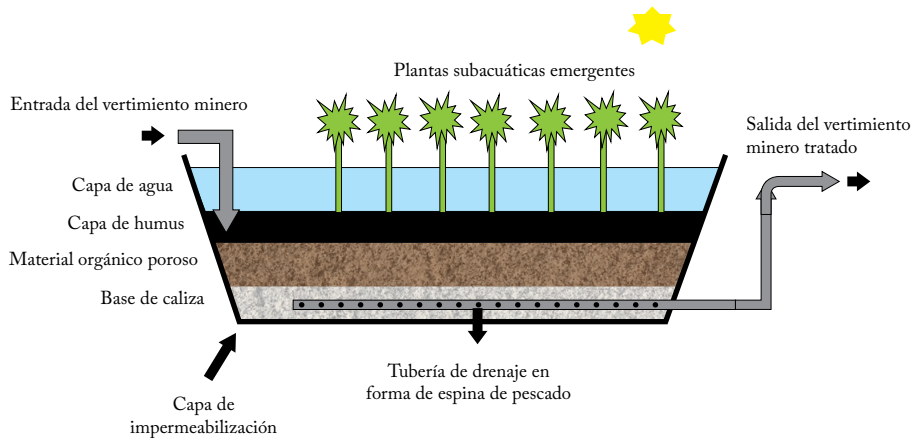


Figura 13. Esquema de un humedal artificial de flujo superficial. Adimensional

Fuente: adaptado y modificado de EPA (2014).

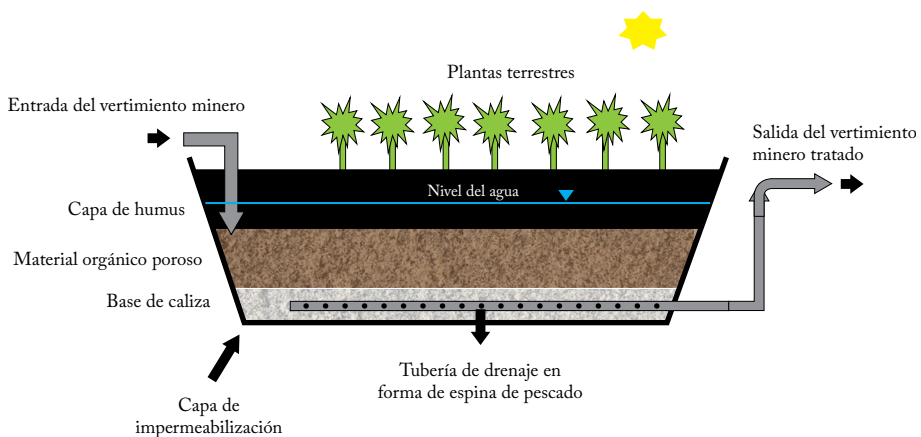


Figura 14. Esquema de un humedal artificial de flujo subsuperficial. Adimensional

Fuente: adaptado y modificado de EPA (2014).

En minería aurífera los metales, acidez asociada y especialmente sulfatos son removidos o controlados a través de consumo por parte de las plantas, la volatilización y la reducción biológica. La comunidad bacteriana del suelo y el agua eliminan los metales disueltos y suspendidos del drenaje minero. Este sistema sirve para efluentes mineros desde ácidos (que requieren procesos previos de neutralización química o el uso de subdrenes anóxicos) hasta alcalinos. Las principales ventajas del tratamiento de los humedales son los bajos costos de capital y operación y mantenimiento (EPA, 2014). A nivel de laboratorio se ha demostrado que el uso de *Phragmites australis* en humedales de flujo superficial tienen alta capacidad para remover metales tales como Al, B, Cd, Cu, Fe, Mg, Mn y Zn, a través de procesos como sedimentación, adsorción biológica, precipitación, intercambio catiónico, fotodegradación, degradación biológica, procesos microbianos y consumo por parte de las plantas (Abed et al., 2019).

El diseño y dimensiones del sistema dependerán de las características del vertimiento minero, así como la extensión de terreno disponible, sumado a las exigencias de calidad por parte de la autoridad ambiental (EPA, 2014).

Una de las principales ventajas de los humedales artificiales o contruidos para tratar vertimientos mineros auríferos con carga de EPT es la adsorción a través de materiales inorgánicos, o biosorción, la cual es la fijación de los metales solubles a medios orgánicos a través de diversos grupos funcionales tales como carboxilo, hidroxilo, sulfato, carbonato, grupos amida y amina, entre otros, alrededor de microorganismos o en el sistema radicular de las plantas usadas en los humedales; la biosorción en los humedales elimina rápidamente los metales disueltos de la solución con alta eficiencia, y se ha demostrado que el sistema de flujo descendente es un sistema ideal para la eliminación simultánea de metales pesados de efluentes mineros de baja concentración (Acheampong y Okwaning, 2017).

2.2.3. Sistemas productores de alcalinidad (successive alkalinity producing systems, SAPS)

Estos sistemas de humedales de flujo superficial combinan un drenaje anóxico de caliza con un sustrato orgánico permeable para generar

condiciones anaeróbicas o parcialmente anaerobias en el fondo del sistema. Los humedales contienen una combinación de caliza en la base (se sugiere 0,5 a 1 m), seguido por una capa de compost (1 a 2 m) y finalmente en la parte superior (tope) una capa de algunos cm (0,8 m a 0,9 m) de agua en contacto con el aire (figura 15). Son considerados sistemas pasivos de tipo biológico.

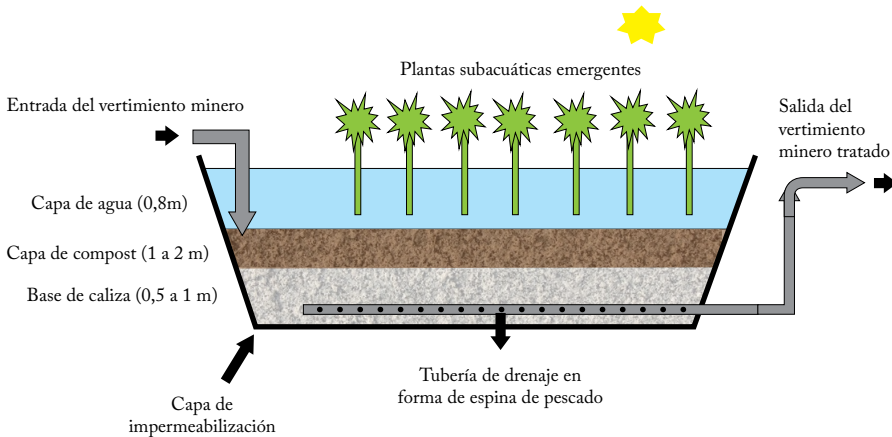


Figura 15. Esquema de un sistema productor de alcalinidad

Fuente: adaptado y modificado de EPA (2014).

El vertimiento minero (que puede provenir de un dren anóxico de caliza o de un sistema de neutralización-sedimentación) entra en la parte superior del humedal, fluye a través del compost donde las condiciones reductoras generadas por la oxidación de la materia orgánica (compost), sumado a la alcalinidad generadora por la caliza en su base, permiten no solo elevar la alcalinidad y el pH, sino lograr un control de metales mediante la formación de sulfuros metálicos, especialmente de Al, Cu y de Fe. Esta formación de sulfuros se logra mediante bacterias sulfato reductoras (EPA, 2014).

Como todo sistema de humedales, se debe durante la construcción ubicar en la base un sistema de filtros en PVC tipo espina de pescado. El sistema requiere mantenimiento cuando ocurran condiciones tales como no cambio en la calidad del agua al entrar y salir del sistema, o interrupciones en la salida, lo que genera desborde del agua del humedal.

2.2.4. Reactores bioquímicos o bioreactores (biochemical reactors, BRC)

Los reactores bioquímicos (BCR) o biorreactores usan microorganismos para eliminar acidez, cargas metálicas y aniónicas (sulfatos) de los drenajes mineros. Son sistemas biológicos similares a los humedales artificiales, su construcción es similar (sistemas pasivos) aunque también pueden usarse tanques (sistema biológico activo). Los BCR se pueden construir en varios diseños, incluyendo en estanques abiertos o enterrados, en tanques o en trincheras entre los desechos de la mina y un cuerpo de agua superficial. Los biorreactores pasivos usan dentro del sustrato anaerobio bacterias sulfatos reductoras (géneros *Desulfovibrio* o *Desulfobacterium*) para permitir la formación de sulfuros y controlar las concentraciones de sulfatos y EPT solubles (Zn, Pb, Cu, Cd, Co, Ni, As, Cr, Se, Ta, U).

En los biorreactores activos se incluye una entrada externa de sustratos orgánicos como glucosa para servir de fuente de carbono a las bacterias, en los pasivos se utilizan capas de compost, etanol líquido, estiércol y astillas de madera, así como otros materiales como huesos de pescado, quitina, fluidos de residuos biosólidos y biosólidos en su construcción (EPA, 2014). Se ha reportado que el uso de lactato de Na como fuente de carbono para bacterias del género *Desulfovibrio* es más eficiente en el proceso de reducción del sulfato que usar acetato (Luptáková et al., 2016). Cepas como *Desulfurella*, *Desulfosarcina*, *Desulfococcus*, *Desulfovibrio*, *Desulfomonile* y *Desulfosporosinus*, entre otras, como son usadas en los sistemas BRC como reductoras de sulfato y generadoras de alcalinidad, lo que permite la remoción de metales en efluentes mineros de oro (Nancucheo et al., 2017), y través de la formación de sulfuros insolubles de metales como Zn, Cu y Pb (Sun et al., 2020).

Al igual que en los humedales y los sistemas productores de alcalinidad, se debe garantizar no solo un desnivel entre la entrada y salida del efluente, sino una muy baja inclinación de la base de los sistemas para evitar que el agua quede estancada (tiempos de retención de al menos 24 horas). El diseño es muy similar a los sistemas productores de alcalinidad, y las profundidades sugeridas no superan 1,0 m. Luego del tratamiento se puede optar por procesos finales de oxigenación y sedimentación. El diseño del sistema se basa en los parámetros y características específicos

del vertimiento minero, especialmente pH, caudales promedio, el tipo y concentración de metales, así como el espacio disponible para el sistema de tratamiento (EPA, 2014).

Autores como Hou et al., (2019) definieron un sistema de tratamiento tipo reactor bioquímico (BRC) compuesto de las siguientes fases: unidad de remoción de Fe, unidad de remoción de sulfato, unidad de remoción de sulfuros, unidad de remoción de manganeso y unidad de purificación con tanques de floculación y sedimentación intermedias entre las unidades.

En la tabla 2, se muestran las diferentes aplicaciones de los sistemas pasivos tanto para acidez como para EPT.

Tabla 2. Sistemas de tratamiento pasivo y sus aplicaciones a las aguas residuales mineras

Parámetro/ compuesto o elemento	Dren anóxico de caliza	Humedal de flujo superficial	Humedal de flujo subsuperficial	Sistema productor de alcalinidad	Biorreactor
pH	X			X	X
Oxígeno Disuelto		X			
Amonio (NH ₃)		X			
Cianuro (CN)		X			X
Nitrato (NO ₃)					X
Nitrito (NO ₂)					X
Sulfato (SO ₄ ²⁻)			X		
Sulfuro (S ²⁻)			X		
Aluminio (Al)	X			X	X
Arsénico (As)		X	X		X
Cadmio (Cd)			X		X
Cromo (Cr)					X
Cobalto (Co)					X
Cobre (Cu)			X		X
Hierro (Fe)			X		X
Plomo (Pb)			X		X
Mercurio (Hg)			X		X
Molibdeno (Mo)			X		X
Niquel (Ni)			X		X
Selenio (Se)			X		X
Plata (Ag)			X		X
Cinc (Zn)			X		X

Fuente: adaptado y modificado de Lottermoser (2010).

2.3. Tratamientos para degradación del cianuro

Los vertimientos mineros luego del proceso de beneficio de Au que contengan compuestos de cianuro deben ser tratados para dar cumplimiento de la Resolución 631 del 2015 (máximo 1 mg/L CN^- total, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

Se tienen tecnologías que incluyen métodos químicos, biológicos, electroquímicos y fotoquímicos para eliminar los compuestos de cianuro y el CN^- ; dependiendo del pH del vertimiento, el “cianuro libre” puede estar en forma de anión cianuro (CN^-) o cianuro de hidrógeno, HCN, en aguas con un pH inferior a 8,5 (Kuyucak y Akcil, 2013). Los compuestos de cianuro se pueden degradar de forma natural, a través de procesos tales como la complejación (quelación), precipitación en sales de cianuro, adsorción, oxidación al cianato, volatilización, biodegradación, formación de tiocianato e hidrólisis/saponificación de cianuro libre (ICMI, 2012).

A nivel biológico las bacterias usan los compuestos de carbono y nitrógeno en sus procesos metabólicos mediante enzimas como nitrógenasas, hidratasas e hidrolasas, entre otras, y generando productos como nitrógeno, ion amonio, amoniaco, formato, formamida, sulfito y sulfuro de hidrógeno; a nivel experimental se ha demostrado la efectividad de la cepa *Pseudomonas pseudoalcaligenes*, degradando el tiocianato en un 88%, se generó ion amonio como producto (Razanamahandry et al., 2019). La tecnología usada para la degradación biológica consiste básicamente de humedales de flujo superficial, pues bajo condiciones aeróbicas, la actividad microbiana puede degradar el cianuro al amoníaco, que luego se oxida a nitrato. Este proceso se ha demostrado eficaz con concentraciones de cianuro de hasta 200 partes por millón (ICMI, 2012).

Al igual que con los demás contaminantes, los tratamientos de compuestos de cianuro son de dos tipos: fisicoquímicos como cloración alcalina (figura 16), oxidación con peróxido de hidrógeno, oxidación Inco SO_2 /aire, aplicación de sulfato de cobre y hierro, precipitación y acidificación-volatilización-regeneración, electrocoagulación, activación ultravioleta (uvc) del persulfato y los tratamientos biológicos basados en oxidación microbiana bajo condiciones aerobias (Kuyucak y Akcil, 2013; Yu et al., 2016; Mamelkina et al., 2020).

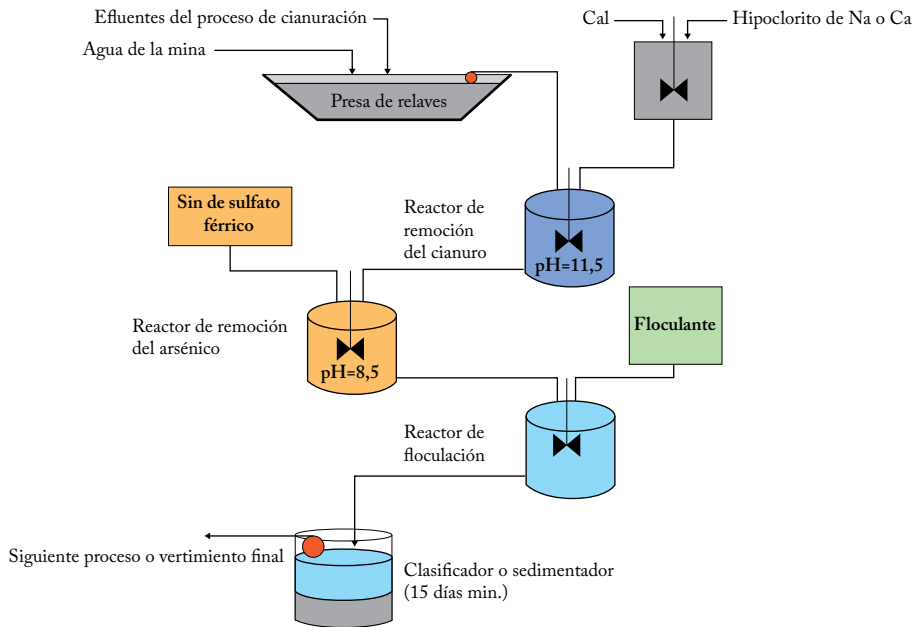


Figura 16. Flujograma del proceso de cloración alcalina

Fuente: adaptado y modificado de Kuyucak y Akcil (2013).

3. Modelo de tratamiento de aguas mineras

A continuación, se presentan de forma breve algunas empresas mineras de oro a nivel nacional y latinoamericano que llevan a cabo la gestión de los vertimientos. En general, las compañías mineras realizan beneficio del oro mediante cianuración y los tratamientos de agua a través de métodos fisicoquímicos, en este caso se resaltan los procesos de intercambio iónico en resinas, ósmosis inversa y ultrafiltración, no siempre hacen uso de los pretratamientos de aireación-neutralización-floculación-sedimentación (clarificación). Solo si las aguas generadas presentan acidez importante las empresas realizan neutralización, como el caso de Yanacocha (Perú).

3.1. Proyecto Soto Norte

Como se mencionó inicialmente, para dar mayor claridad a esta discusión, se tomó como estudio de caso el proyecto Soto Norte (Santander), a partir de la información contenida en el Estudio de Impacto Ambiental (capítulo 10.1.1.2 Minesa – Ingetec, 2020). De aquí se revisó lo correspondiente al

sistema de gestión de aguas residuales que se encuentra en la descripción del proceso denominado “Programa de Manejo de Aguas Residuales no Domésticas”, que tiene como objetivo controlar el cambio en la calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua superficial, cumpliendo los estándares de la Resolución 0631 del 2015, capítulo VI, artículo 10. Cabe señalar que aquí los orígenes de ese tipo de aguas son drenaje minero, agua de escorrentía proveniente del depósito de relaves secos (DRS) y agua residual de la planta de beneficio. Durante la operación del proyecto se prevén los siguientes tratamientos:

Tratamiento con lodo de alta densidad (HDS): compuesto de las fases de neutralización, floculación y clarificación; el lodo generado es recirculado a la entrada del sistema, se le adiciona cal y se mezcla con el afluente para permitir una formación más efectiva de los sólidos precipitados.

En este primer caso, se puede deducir que de no tratarse los vertimientos provenientes de los lodos, el agua residual tendría un carácter ácido y con una alta concentración en sólidos suspendidos, por lo tanto se proponen las etapas de neutralización con cal, floculación y luego clarificación (explicados en los numerales 2.1.2 y 2.1.3 de este capítulo). Lo novedoso en este caso es que el lodo formado servirá para como medio de soporte para la formación de minerales secundarios y permitir así la precipitación de metales de mayor tamaño. Esta primera parte usa el principio químico de la precipitación alcalina para remover carga metálica, optimizado mediante el uso de floculantes químicos.

Intercambio Iónico mediante Resinas (IEX): corresponde al tratamiento del agua que viene de la fase anterior (HDS), en primer lugar, el efluente atraviesa un intercambiador catiónico para la remoción de metales y luego un intercambiador aniónico; las resinas gastadas serán regeneradas mediante ácido sulfúrico para las catiónicas y soda cáustica para las resinas aniónicas. Los lodos de baja densidad ricos en los iones metálicos serán tratados fuera de la empresa cumpliendo exigencias ambientales legales.

En el proyecto Soto Norte se usarán resinas para los iones que no pudieron ser eliminados mediante el tratamiento de precipitación química en forma de lodos de alta densidad (HDS) y les permitirá cumplir los estándares respecto a metales totales y aniones para sus aguas residuales.

Contactores biológicos rotatorios (CBR): el último sistema de tratamiento consiste en la instalación de un sistema de biorremediación activo (bio-discos), en donde los consorcios bacterianos adheridos a los discos se alimentarán del nitrógeno amoniacal que provenga de los dos sistemas anteriores, luego el agua pasará a sedimentadores y de ahí a dos puntos finales de vertimiento sobre el río Surata y quebrada La Baja, cumpliendo todas las exigencias del capítulo VI de la Resolución 631 del 2015. Los lodos generados en el sistema serán tratados fuera de la empresa cumpliendo exigencias ambientales legales. Este proceso de tratamiento biológico activo tiene como propósito fundamental el control de residuos nitrogenados que puedan quedar en el agua como producto del uso de emulsiones en las voladuras.

A pesar de que en este capítulo no fue comentado el uso de biodiscos para remover cargas de nitrógeno, el proyecto Soto Norte establece un sistema biológico activo para controlar el nitrógeno amoniacal (NH_3); este proceso se basa en los siguientes principios: la oxidación aerobia de compuestos del ion amonio y amoniaco (NH_4^+ y NH_3) transformándolos inicialmente en nitrito (NO_2^-) y finalmente en nitrato (NO_3^-) y el uso de los compuestos reducidos del nitrógeno en la generación de biomasa bacteriana. Se considera un proceso biológico porque el consumo del nitrógeno es realizado por bacterias autótrofas aerobias nitrificantes, las cuales forman la biopelícula de los contactores. Esta tecnología es de uso común en sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales y su costo se debe a la necesidad de energía para mantener en constante movimiento los discos o contactores, de ahí que sea un sistema biológico activo. No es usual identificar empresas mineras que usen biodiscos para remover carga contaminante y se resalta al proyecto Soto Norte por su propuesta en la fase final del tratamiento del agua.

Las aguas residuales no domésticas generadas en el proyecto Soto Norte serán vertidas en el río Surata y quebrada La Baja (el vertimiento 1, no se incluye en este capítulo, pues es para aguas residuales domésticas).

Vertimiento 2. Proveniente de los túneles gemelos, se tendrá piscina de sedimentación, destino río Surata.

Vertimiento 3. Proveniente del depósito de relaves secos, tendrá piscina de sedimentación y luego pasará por la Planta de Tratamiento Caneyes, destino río Suratá.

Vertimientos 4 y 5. Provenientes de la mina subterránea, serán llevados a la Planta de Tratamiento Emboque, destino quebrada La Baja.

Todos los vertimientos pasarán por los tres sistemas de tratamiento mencionados. Se garantizan porcentajes de remoción mayores al 80% en general, cumpliendo las exigencias de la Resolución 631 del 2015.

Cabe mencionar que los anteriores procesos exigen el cumplimiento de las normas de seguridad industrial y salud ocupacional por parte de los operarios y responsables.

3.2. Mina Yanacocha, Perú

Considerada la mayor explotación de oro en Sudamérica, ubicada en la provincia y departamento de Cajamarca, a unos 800 km al noreste de Lima, es una explotación a cielo abierto de Au y Ag, y su beneficio es a través de lixiviación en pilas con una solución cianurada.

Las aguas residuales del proceso minero son de dos tipos: las aguas ácidas se neutralizan con el uso de cal y luego se le agregan floculantes y coagulantes para precipitar los metales, luego de este proceso es vertida al ambiente. Por otro lado, las aguas sobrantes del proceso de lixiviación en pilas con cianuro son tratadas inicialmente mediante cloro gaseoso para romper el cianuro y permitir la precipitación de metales, finalmente está el proceso de ósmosis inversa para remover los metales restantes y las aguas pueden ser reutilizadas o vertidas al ambiente (Minera Yanacocha, 2006).

En esta importante empresa minera peruana, se estableció para sus aguas residuales los tres procesos comunes en proyectos mineros: neutralización con cal + floculación + clarificación, similar al propuesto por el proyecto Soto Norte en la formación de lodos de alta densidad (HDS), sin embargo, según la Minera Yanacocha, es suficiente para precipitar la carga de metales.

En el caso de las aguas cianuradas, Yanacocha opta por degradar compuestos de cianuro mediante cloración, aunque no se especifica si se

realiza bajo condiciones alcalinas, muy probablemente siguen un modelo similar al de la figura 14, puesto que solo bajo condiciones de alto pH es posible la remoción de metales. Finalmente luego de la ósmosis inversa como tratamiento final optan por el reúso del agua tratada, y siguen así lo sugerido por Punkkinen et al. (2016) para la gestión de los vertimientos mineros.

3.3. Mina Casposo, Argentina

Explotación auro-argentífera inicialmente a cielo abierto y en la actualidad explotación minera bajo tierra, ubicada en la localidad de Calingasta en la provincia de San Juan (Argentina), perteneciente a la compañía minera Troy Resources Limited; el proceso de beneficio es mediante lixiviación en tanques. Una vez obtenidos los metales, la solución cianurada es destruida mediante el método INCO (degradación de compuestos de cianuro mediante el uso de SO_2 y aire), para luego reutilizar el agua en el proceso (Editorial RN, 2009).

La información encontrada sobre el tratamiento del agua de esta empresa argentina solo indica la degradación de los compuestos de cianuro, pero no hay mayor información disponible sobre el tratamiento de sus aguas residuales. Se resalta, al igual que Yanacocha, la reutilización del agua luego de la eliminación de cianuro.

3.4. Proyecto minero Cerro Casale, Chile

Explotación a cielo abierto ubicado en Antofagasta (Chile), provincia de Capiapó, en donde se explota oro y cobre, el beneficio se logra a través de proceso de lixiviación de relaves por cianuración, con agitación y adsorción por carbón activado (proceso CIP –“*Carbon in Pulp*”). En los diferentes sectores en la mina se procede a tratar el agua mediante ósmosis inversa, mientras que la destrucción del cianuro se logrará mediante oxidación con SO_2 gaseoso, aire y cal, destruyendo las especies de cianuro presentes en la pulpa (MHW, 2011).

Para el caso de esta empresa minera, aunque no se especifican los tratamientos primarios, las cargas metálicas hicieron que la empresa invirtiera en el sistema de ósmosis inversa para su eliminación, mientras que para el caso de las aguas con cianuro usan la misma técnica de la mina Casposo.

3.5. Proyecto minero Buriticá, Colombia

Corresponde a una explotación minera de oro bajo tierra, propiedad de Continental Gold, en el municipio de Buriticá (departamento de Antioquia), el proceso de beneficio incluye concentración gravimétrica, precipitación Merrill Crowe y cianuración. El tratamiento del agua de la planta usa la tecnología de membranas, e incluye: sistemas de ultrafiltración, ósmosis inversa, clarificador, concentración de salmuera entre otros. Para el caso del cianuro se usa la oxidación mediante metabisulfito de Na y oxígeno, con sulfato de Cu como catalizador (Continental Gold, 2019).

En este caso, se resaltan tecnologías para la remoción de metales tales como ultrafiltración y ósmosis inversa, además el uso de la tecnología de clarificador supone la formación y precipitación de lodos ricos en metales. En el caso de la ultrafiltración y la ósmosis inversa presentan inicialmente prefiltración y en el caso del clarificador un sistema de prensado. No se especifica si se realizará neutralización inicial, lo que haría suponer que no se están generando aguas ácidas y que el principal énfasis es la eliminación y remoción de metales.

3.6. Explotación minera en Segovia, Colombia

Operación perteneciente a Grancolombia Gold en el nordeste de Antioquia, incluye las minas El Silencio, Providencia, Sandra K, Carla y Las Verticales en los municipios de Segovia y Remedios, correspondientes a explotaciones subterráneas donde se extrae oro y plata. Para el beneficio se realizan los procesos de trituración, molienda, concentración de gravedad, flotación de oro, cianuración, precipitación de cinc Merrill-Crowe, refinación y concentración por gravedad. El sistema de tratamiento de aguas residuales industriales incluye pretratamiento, oxidación avanzada, electrocoagulación, sedimentación avanzada, flotación de aire disuelto, filtración, procesos de ultrafiltración y ósmosis inversa (SRK Consulting, 2018).

Finalmente, en esta otra importante empresa minera en Colombia, se destaca la serie de procesos fisicoquímicos de tratamiento de aguas, en donde se parte de la oxidación u oxigenación del agua por procesos mecánicos (oxidación avanzada) pasando luego a la electrocoagulación hasta llegar a la ósmosis inversa; supone lo anterior que el énfasis en el tratamiento es la remoción de metales y que probablemente no hay problemas de acidez.

Conclusiones

La minería aurífera, especialmente la asociada a extracciones mineras subterráneas (minería de veta o filón) e inclusive las extracciones de polimetálicos requieren agua, la cual genera desechos líquidos con sustancias químicas y minerales que pueden tener elementos pesados potencialmente tóxicos (EPT), que al ser vertidos indiscriminadamente a drenajes superficiales o en suelos, por lixiviación, podrían terminar contaminando niveles freáticos y, por ende, acuíferos subterráneos, los cuales dependen de sus formas inorgánicas y orgánicas, serán solubles e insolubles.

Se consideran principalmente ocho elementos de riesgo ambiental que deben ser monitoreados permanentemente, los cuales son: arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), mercurio (Hg), selenio (Se) y plata (Ag). Los elementos que deben ser vigilados y que son elementos asociados (*pathfinder*) al oro son: antimonio (Sb), telurio (Te), cobre (Cu), plomo (Pb) y cinc (Zn), estos tres últimos pueden acompañar al oro junto con la plata, los cuales pueden ser extraídos y también ser beneficiados, como es el caso de los depósitos polimetálicos.

Si se suma a los anteriores elementos el aporte del mercurio (Hg) proveniente de aquellas extracciones mineras que aún lo usan en sus procesos de amalgamación, los impactos ambientales en el ecosistema y en la salud humana pueden ser especialmente severos. Las características de las asociaciones minerales de oro en Colombia, sumado a condiciones climáticas tropicales de alta pluviosidad, hacen que los procesos de alteración geoquímica superficial sean acelerados y que se pueden liberar con relativa facilidad cargas contaminantes con niveles altos de EPT, acidez, sulfatos, turbiedad y DQO, entre otros, que llegan a cuerpos de agua afectando su calidad y generando problemas de contaminación.

Si se entiende la toxicidad como la capacidad de una sustancia o elemento en causar daños desde el nivel celular hasta poblaciones y comunidades, en el caso de los vertimientos mineros auríferos sin tratamiento, la toxicidad no necesariamente será igual en todas las operaciones mineras, ni en todos los lugares en donde se realice tanto la extracción como el beneficio minero, estos están intrínsecamente definidos por el tipo de depósito mineral y el proceso utilizado, el cual en ningún caso es universal, a pesar del uso extensivo del cianuro.

Factores tales como pH, Eh, temperatura, presencia de sólidos sedimentables, variabilidad en caudales y trayecto del vertimiento, entre otros, podrá influir en la especiación de los EPT dando lugar a especies químicas que pueden ser tóxicas como la precipitación de metales, debido a la formación de fases insolubles (minerales secundarios) o por su adsorción a arcillas, y óxidos de Fe y Mn, lo cual influye en su biodisponibilidad. Es falsa por tanto la aseveración de que las aguas residuales mineras sean las más peligrosas de todas las actividades humanas, se hace necesario un análisis mucho más detallado del marco geológico, mineralogía, hidrología, geoquímica, hidroquímica y microbiología de los vertimientos minería aurífero antes de considerarlas como las de mayor toxicidad. Además, las plantas de tratamiento de aguas hacen que estas puedan ser reutilizadas conociendo sus características.

En Colombia, al igual que en la mayoría de los países donde se realizan operaciones mineras de oro, se cuenta con normatividad ambiental asociada a la calidad del agua residual minera, basada en límites máximos de la mayoría de elementos y sustancias, que debe ser cumplida para poder realizar la extracción y beneficio (Resolución 631 de 2015); esta norma debe ser considerada la base para definir, diseñar, implementar y monitorear sistemas de tratamiento de agua residual, así mismo, no se puede seguir usando el mercurio (Hg) en minería (Ley 1658 de 2013). De esta forma se desmitifica la idea generalizada de que en Colombia no se cuenta con una normatividad para aguas residuales de explotaciones auríferas.

A nivel mundial se presenta un gran desarrollo en cuanto a las tecnologías y procesos de tratamientos activos y pasivos para aguas residuales mineras, los avances se centran en el desarrollo de nuevos materiales adsorbentes, materiales para membranas en procesos de nanofiltración y ósmosis inversa, floculantes y reactores. En general, los avances en los modelos de tratamiento físicoquímico para aguas residuales mineras se centran en aumentar la eficiencia en la remoción de las cargas contaminantes, especialmente control de acidez y los metales.

En cuanto a los sistemas biológicos, se presentan avances especialmente en reactores bioquímicos y tratamiento de compuestos de cianuro, sin embargo, los tratamientos biológicos no son aún de uso común en la minería aurífera en Colombia. No obstante, dadas las condiciones de alta

biodiversidad del país, se tiene una gran oportunidad en investigación en aspectos como los siguientes: nuevos materiales biológicos para procesos de biosorción de EPT, bacterias con capacidad reductora de sulfatos, degradadoras de compuestos de cianuro, y elaboración de biofloculantes. Se desvirtúa por tanto el mito de que no hay sistemas de tratamiento eficientes para las aguas residuales auríferas.

Los grandes proyectos mineros en Colombia están realizando propuestas y en algunos casos operando procesos de tratamiento fisicoquímico para sus aguas residuales, garantizando la calidad del agua y el cumplimiento legal en sus operaciones, de igual forma el reúso del agua tratada. Estas empresas, tanto en minería de veta como aluvial, han entendido que es posible lograr una minería responsable, conociendo y evaluando las propiedades fisicoquímicas de sus aguas residuales, diseñando los sistemas de tratamiento con todos los criterios de la ingeniería, capacitando a los operadores y responsables de estos sistemas y monitoreando continuamente la calidad del agua, con el fin de cumplir todas las exigencias legales.

Por otro lado, las explotaciones mineras ilícitas no formalizadas, que se caracterizan por carecer de diseños y controles de ingeniería tanto desde la extracción hasta el beneficio y la gestión ambiental, son realmente las causantes de los problemas de contaminación fisicoquímica de las aguas, pues no hacen control de la calidad de sus vertimientos y usan elementos químicos prohibidos como el mercurio (Hg) en procesos de amalgamación.

El mito de que todas las explotaciones auríferas en Colombia, especialmente las asociadas a inversiones de la gran y mediana minería, terminarán por destruir y acabar la calidad del agua y la posibilidad del uso de los recursos hídricos en otras actividades, se cae y se desvirtúa en su totalidad. Puesto que, efectivamente, las empresas citadas y otras más utilizan tecnologías reconocidas a nivel mundial, aplican conceptos, técnicas, metodologías y principios fisicoquímicos que les permite cumplir a cabalidad la normatividad asociada a las aguas residuales mineras auríferas del país.

Referencias

Abed, S. N., Almuktar, S. A. y Scholz, M. (2019). Phytoremediation performance of floating treatment wetlands with pelletized mine water

- sludge for synthetic greywater treatment. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 17, 581-608. <https://doi.org/10.1007/s40201-019-00372-z>
- Acheampong, M. A. y Okwaning, A. E. D. (2017). Low-Cost Technologies for Mining Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Science and Engineering*, B 6, 391-405.
- Aguiar, A. O., Andrade, L. H., Ricci, B. C., Pires, W. L., Miranda G. A. y Amaral M. C. S. (2016). *Gold Acid Mine Drainage Treatment by Membrane Separation Processes: An Evaluation of the Main Operational Conditions. Separation and Purification Technology*. Brasil: Department of sanitary and environmental Engineering – Federal University of Minas Gerais P.O.
- Anawar, H. M. (2015). Sustainable rehabilitation of mining waste and acid mine drainage using geochemistry, mine type, mineralogy, texture, ore Extraction and climate knowledge. Review. *Journal of Environmental Management*, 158, 111-121.
- Andrade, H. L., Aguiar, A. O., Pires, W. L., Miranda, G. A., Texeira, L. P. T., Almeida, G. C. C. et al. (2017). Nanofiltration and reverse osmosis Applied to gold mining effluent Treatment and Reuse. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 34(1), 93-107. [dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20170341s20150082](https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170341s20150082)
- Ashane, M. F. W., Ilankoon I. M. S. K., Syed, T. H. y Yellishetty, M. (2018). Challenges and opportunities in the removal of sulphate ions in contaminated mine water: A review. *Minerals Engineering*, 117, 74-90. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.12.004>
- Ayangbenro, A. S., Babalola, O. O. y Aremu, O. S. (2019). Biofloculant production and heavy metal sorption by metal resistant bacterial isolates from gold mining soil. *Chemosphere*, 231, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.092>
- Baker, R. W. (Ed.) (2012). *Membrane Technology and Applications* (2ª ed.), Newark: Wiley.
- Bashkim, S. T. y Salih, T. G (2019). Reverse Osmosis Removal of Heavy Metals from Wastewater Effluents Using Biowaste Materials Pretreatment. *Pol. J. Environ. Stud.*, 28(1), 337-341. DOI: 10.15244/pjoes/81268.

- Bhattacharya, P., Sracek, O., Eldvall, B., Asklund, R., Barmen G., et al. (2012). Hydrogeochemical study on the contamination of water resources in a part of Tarkwa mining area, Western Ghana. *J Afr Earth Sci.*, 66-67, 72-84.
- Borgese, L., Dalipi, R., Riboldi, A., Bilo, F., Bontempi, E., Zacco, A. y Depero, L.E. (2016). Comprehensive Approach to the Validation of the Method TXRF Analysis of Water Samples. *Talanta*, 182, 165-171. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.12.087>
- Bustamante, N., Danoucaras, N., McIntyre, N., Díaz-Martínez, J. C. y Restrepo-Baena, O. J. (2016). Review of improving the water management for the informal gold mining in Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería*, (79), 174-184.
- Calderón, M. R. F., Forero, P. S. del P. y Suárez C. A. (2012). Implementación de un diseño piloto de bandejas de aireación para aguas, potencializado con microorganismos eficientes. Sección Ciencia e Ingeniería. *Revista Científica*, 16, 22-35.
- Chen, T., Yan, B., Lei, C. y Xiao, X. (2014). Pollution control and metal resource recovery for acid mine drainage. *Hydrometallurgy*, 147, 112-119. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.429>
- Continental Gold. (2019). NI 43-101 Buriticá Mineral Resource 2019-01. Antioquia, Colombia.
- Corantioquia y Centro Nacional de Producción Más Limpia (2016). *Manual de Producción y Consumo Sostenible, Gestión del Recurso Hídrico, Minería de Oro*. Convenio 1506-93.
- Crini, G., Morin-Crini, N., Fatin-Rouge, N., Deón, S. y Fievet, P. (2017). Metal removal from aqueous media by polymer-assisted ultrafiltration with chitosan. Review. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3826-S3839. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.05.020>
- Dama-Fakir, P., Sithole, Z., Niekerk, A. M. V., Dateling, J., Maree, J. P., Rukuni, T., Mtombeni T., Ruto S., Zikalala N., Hughes C., Wurster A. y Saunders, B. (2017). Mine water treatment technology selection tool: Users' Guide. Report to the Water Research Commission. WRC Report n.º TT 711/17. ISBN 978-0-6392-0032-3. 1-100 pp.

- Dipti, P. M. y Deepka, M. K (2017). Process effluents and mine tailings: sources, effects and management and role of nanotechnology. *Nanotechnol. Environ. Eng.* 2:1, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s41204-016-0011-6>
- Doshi, S. M. (2006). Bioremediation of Acid Mine Drainage Using Sulfate-Reducing Bacteria. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response-Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Washington, D. C. Disponible en https://clu-in.org/download/techdrct/s_doshi-srb.pdf
- Editorial RN (2009). *Como es el manejo en Casposo y Gualcamayo. El Pregón Minero*. Disponible en http://www.editorialrn.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=3485:como-es-el-manejo-en-casposo-y-gualcamayo&catid=14:nacional&Itemid=599
- Environmental Protection Agency (EPA). (2007b). Framework for Metals Risk Assessment. Disponible en <https://www.epa.gov/sites/production/files/2013-09/documents/metals-risk-assessment-final.pdf>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2014). Reference guide to Treatment technologies for Mining-Influenced Water. Environmental Protection Agency Office of Superfund Remediation and Technology Innovation.
- Fornarelli, R., Mullett, M. y Ralph, D. (2013). "Factors influencing nanofiltration of acid mine drainage". En C. Wolkersdorfer, A. Brown y L. A. Figueroa (Eds.), *Reliable Mine Water Technology* (pp. 563-568). Golden CO; USA IMWA.
- Heiderscheidt, E., Postila, H. y Leiviskä, T. (2020). Removal of metals from wastewaters by mineral and biomass-based sorbents applied in continuous-flow continuous stirred tank reactors followed by sedimentation. *Science of the Total Environment*, 700, 135079. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135079>
- Hou, S. T., Cai, J. Y., Tan, K. Y., Hong, Y., Hu, X., Wang, Z. y Yuan X. (2019). A mine drainage treatment system for AMD in remediation of metal sulfide mines. *China Geology*, 3, 396-397. doi: 10.31035/cg20181122096-5192.
- International Cyanide Management Code (ICMI). (2012). <http://www.cyanidecode.org>
- International Network for Acid Prevention (INAP). (2009). The Global Acid Rock Drainage Guide. Disponible en <http://www.gardguide.com>

- Johnson, D. B. y Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment*, 338, 3-14. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.09.002
- Kefeni, K. K., Msagati, T. M. y Mamba, B. B. (2015). Synthesis and characterization of magnetic nanoparticles and study their removal capacity of metals from acid mine drainage. *Chem Eng.*, 6(2).
- Kefeni, K. K., Msagati, T. M. y Mamba, B. B. (2017). Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, 151, 475-493. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.082.
- Kim, K. R., Lee, B. T. y Kim, K. W. (2012). Arsenic stabilization in mine tailings using nano-sized magnetite and zero valent iron with the enhancement of mobility by surface coating. *J Geochem Explor*, 113, 124-129. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.07.002>
- Kuyucak, N. y Akcil, A. (2013). Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. *Minerals Engineering*, 50-51, 13-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.027>
- Lakovleva, E., Makila, E., Salonen, J., Sitarz, M., Wang, S. y Sillanpaa, M. (2015). Acid mine drainage (AMD) treatment: neutralization and toxic elements removal with unmodified and modified limestone. *Ecol. Eng.*, 81, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.046>
- Lottermoser, B. G. (2010). "Mine water". En *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts* (3.^a ed). Nueva York: Springer.
- Luptáková, A., Mačingová, E., Kotuličová, I. y Rudzanová, D. (2016). *Sulphates Removal from Acid Mine Drainage*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 44, 052040. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMES 2016). IOP Publishing.
- Mamelkina, M. A., Herraiz-Carbonéb, M., Cotillas, S., Lacasa, E., Sáez, C., Tuunila, R. Sillanpää, M., Häkkinen, A. y Rodrigo M. A. (2020). Treatment of mining wastewater polluted with cyanide by coagulation processes: A mechanistic study. *Separation and Purification Technology*, 237, 116345. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116345>
- Manahan, S. E. (2005). *Environmental Chemistry*. (8.^a ed.). Nueva York: CRC Press LLC.
- Masciandaro, G., Macci, C., Peruzzi, E., Ceccanti, B. y Doni, S. (2013). Organic matter–microorganism–plant in soil bioremediation: a synergic

- approach. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 12, 399-419.
- Matveeva, V. A., Chukaeva, M. A. y Sverchkov, I. P. (2019). Low-cost sorption technologies for large-tonnage wastewater treatment in mining industries. *Journal of Physics: Conference Series* 1384. International Conference "Complex equipment of quality control laboratories". Disponible en https://www.researchgate.net/publication/337615295_Low-cost_sorption_technologies_for_large-tonnage_wastewater_treatment_in_mining_industries
- Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K. y Chibane, M. (2009). Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique, A case study. *Journal of Hazardous Materials*, 164, 215-222. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.07.144
- Minera Yanacocha, S. R. L. (2006). *Proyecto Suplementario Yanacocha Oeste. Estudio de impacto ambiental*. Disponible en <http://www.minem.gob.pe/descripcion.php?idSector=4&idTitular=1194>
- Minesa-INGETEC (2020). *Estudio de Impacto Ambiental para el proyecto de Explotación Subterránea de Minerales Auroargentíferos "Soto Norte". Sociedad Minera de Santander*.
- Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015). Resolución 631 de 2015 (marzo 17). *Diario Oficial* n.º 49.486 de 18 de abril de 2015. 1-73 pp.
- Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019). Diagnóstico de la información ambiental y social respecto a la actividad minera y la extracción ilícita de minerales en el país. Documento 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. Sentencia T 445. 1-372 pp.
- MWH (2011). Estudio de Impacto Ambiental. - Optimización Proyecto Minero Cerro Casale-MWH Chile. Casale Compañía Minera.
- Nancucheo, I., Bitencourt, J. A. P., Sahoo, P. K., Alves, J. O., Siquiera, J. O. y Oliveira G. (2017). Recent Developments for Remediating Acidic Mine Waters Using Sulfidogenic Bacteria. *Hindawi BioMed Research International*. 17 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/7256582>
- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (2005). Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases.

- Geological Survey of Japan Open File Report No. 419. Research Center for Deep Geological Environments. Naoto Takeno.
- Observatorio Pacífico y Territorio (OPT) y Coordinación Regional del Pacífico Colombiano (CRPC) (2018). *Impactos de la minería en el pacífico colombiano*. Disponible en https://pacificocolombia.org/wp-content/uploads/2018/09/Impactos-de-la-mineri_a-en-el-paci_fico-colombiano-web.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (Onudi) y la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia). (2012). Proyecto Mercurio Global GMP-2. Introducción de tecnologías más limpias en la minería y extracción del oro artesanales.
- Ortiz, R. H. M. (2014). Actualización del Programa de Trabajo e Inversiones de la Mina Didáctica del Centro Nacional Minero Sena – Regional Boyacá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Sede seccional Sogamoso. Escuela de ingeniería de Minas. Octubre de 2014, 94 p.
- Pote, N. S. (2017). Waste water treatment and management techniques in mines. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. IJESRT, 178-191. doi: 10.5281/zenodo.557144.
- Pourret, O. y Hursthouse, A. (2019). It's Time to Replace the Term "Heavy Metals" with "Potentially Toxic Elements" When Reporting Environmental Research. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Letter. Int. J. Environ. Res. Public Health 2019, 16, 4446. doi: 10.3390/ijerph16224446.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (2012). Proyecto: Contribución a la construcción de un Plan estratégico regional para la reducción del uso de Mercurio en la minería aurífera artesanal y de pequeña escala (ASGM). Acuerdo n.º MC/4030-09-04-2203. Bogotá D. C., 1-72 pp.
- Punkkinen, H., Rasanen, L., Mroueh, U. y Korkealaakso, J. (2016). *Guidelines for mine water management*. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. Disponible en <http://www.vttresearch.com/impact/publications>.
- Razanamahandry, L. C., Onwordi, C. T., Saban, W., Bashir, A. K. H., Mekuto, L., Malenga, E., Manikandan, E., Fosso-Kankeu, E., Maazaa, M. y Ntwampe, S. K. O. (2019). Performance of various cyanide degrading

- bacteria on the biodegradation of free cyanide in water. *Journal of Hazardous Materials*, 380, 120900, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120900>
- Rodríguez, C. y Leiva, E. (2020). Enhanced Heavy Metal Removal from Acid Mine Drainage Wastewater Using Double-Oxidized Multiwalled Carbon Nanotubes. *Molecules*, 25, 111. doi: 10.3390/molecules25010111.
- Rodríguez-Galán, M., Baena-Moreno, F., Vázquez, S., Arroyo-Torralvo, F., Vilches, L.F., y Samaniego, J. O. y Tanchuling, M. A. N. (2019). Treatment of small scale gold mining wastewater using pilot-scale sedimentation and Copeat filter bed system. *Global J. Environ. Sci. Manage*, 5(4), 461-470. doi: 10.22034/gjesm.2019.04.06.
- Seo, E. Y., Cheong, Y. W. y Yim, G. J. (2017). Recovery of Fe, Al and Mn in acid coal mine drainage by sequential selective precipitation with control of pH. *Catena*, 148, 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.022>
- Shabalala, A. y Eklou, S. (2019). Quality of water recovered by treating acid mine drainage using pervious concrete adsorbent. *Water SA*, 45(4), 638-647. <https://doi.org/10.17159/wsa/2019.v45.i4.7545>
- Skousen, J., Zipper, C. E., Roses, A., Ziemkiewicz, P. F., Narin, R., Louis, M., McDonald, L. M. y Kleinmann, R. L. (2017). *Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment*. *Mine Water Environ* 36, 133-153. <https://doi.org/10.1007/s10230-016-0417-1>
- Skousen, J. G., Ziemkiewicz, F. P. y McDonald, M. L. (2019). Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. Review article, *The Extractive Industries and Society*, 6, 241-249. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.09.008>
- Skousen, J. G. (2017) A methodology for geologic testing for land disturbance: acid-base accounting for surface mines. *Geoderma* 308, 302-311.
- Soltani, H., Belmokhtar, A., Zeggai, F. Z., Benyoucef, A., Bousalem, S. y Bachari. (2019). Copper (II). Removal from Aqueous Solutions by PANI-Clay Hybrid Material: Fabrication, Characterization, Adsorption and Kinetics Study. *J Inorg Organomet Polym*, 29, 841-850. <https://doi.org/10.1007/s10904-018-01058-z>
- Spellman, F. R. (2014). *Water and Wastewater Treatment Plant Operations*. CRC Press Taylor & Francis Group. International Standard Book Number-13: 978-1-4665-5338-5 (eBook - pdf). 1-924 pp.

- SRK Consulting (2018). Amended NI 43-101. Technical Report Prefeasibility Study Update Segovia Project Colombia. Gran Colombia Gold. SRK Project Number: 461800.200. 384 pp.
- Sun, R., Li, Y., Lin, N., Ou, Ch., Wang, X., Zhang, L. y Jiang F. (2020). Removal of heavy metals using a novel sulfidogenic AMD treatment system with sulfur reduction: Configuration, performance, critical parameters and economic analysis. *Environment International*, 136, 105457. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105457>
- Thomashaussen, S., Maennling, N. y Mebratu-Tsegaye, T. (2018). A comparative overview of legal frameworks governing water use and waste water discharge in the mining sector. *Resources Policy*, 55, 143-151. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.11.012>
- Touahria, S., Hazourli, S., Touahria, K., Eulmi, A. y Aitbara, A. (2016). Clarification of Industrial Mining Wastewater Using Electrocoagulation. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 11, 5710-5723, doi: 10.20964/2016.07.51.
- Ulu, F., Barisci, S., Kobya, M., Sarkka, H. y Sillanpaa, M. (2014). Removal of humic substances by electrocoagulation (EC) process and characterization of floc size growth mechanism under optimum conditions. *Sep. Purif. Technol.* 133, 246-253. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.07.003>
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2007). Producción más limpia en la minería del oro en Colombia. Mercurio, cianuro y otras sustancias. Subdirección de Planeación Minera. ISBN: 978-958-98138-7-4, 65 pp.
- Water Research Commission (2017). Mine water treatment technology selection tool: Users' Guide. WRC Report n.º TT 711/17. ISBN 978-0-6392-0032-3, Printed in the Republic of South Africa. 1-100 pp.
- Wei, X., Wang, Z., Fan, F., Wang, J. y Wang, S. (2010). Advanced treatment of a complex pharmaceutical wastewater by nanofiltration: Membrane foulant identification and cleaning, 251(1-3), 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.08.005>
- Wei, X., Zhang, S., Han, Y. y Wolfe, A. F. (2018). Characterization and Treatment of Mine Drainage. *Water Environment Research*, 90(10). Water Environment Federation. 1899-1922 pp. doi: 10.2175/106143017X15131012188042.

- Westholm, L. N., Repo, E. y Sillanpää, M. (2014). Filter materials for metal removal from mine. L. N. & Drainag, A review. *Environ Sci Pollut Res*, 21, 9109-9128.
- Wolkersdorfer, C. (2008). Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines Fundamentals, Tracer Tests, Modelling, Water Treatment. International Mine Water Association Bob Kleinmann (Editor-in-Chief). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. e-ISBN 978-3-540-77331-3.
- Yu, X., Xu, R., Wei, Ch. y Wu, H. (2016). Removal of cyanide compounds from coking wastewater by ferroussulfate: Improvement of biodegradability. *Journal of Hazardous Materials*, 302, 468-474 pp. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.013>

Capítulo 3

Vertimientos tóxicos relacionados con la minería aurífera

Eduardo Chaparro-Ávila*
Sonia Güiza-González**

Resumen

Este capítulo se ocupa de uno de los mitos más mencionados, el de una inevitable y permanente contaminación por causa de la minería del oro y sus vertimientos con severos daños a la salud y al ambiente. Este texto revisa el continuado y complejo desarrollo del manejo y procesamiento de los componentes químicos del mineral del oro, que requiere, de un completo y profundo conocimiento químico y geológico, para aplicarlo en el laboreo de un depósito mineral y en la tarea de seleccionar el método adecuado de beneficio. Los proyectos de gran y mediana minería llevan a cabo estudios de factibilidad que además de considerar la recuperación del metal abarcan la prevención de cualquier riesgo de afectación medioambiental.

* Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia con estudios en Pequeña Empresa, Ciencias Políticas, especializaciones en Gestión y en Ingeniería Ambiental y una maestría en Gestión Ambiental. Correo electrónico: edshorter@gmail.com

** Geoquímica, titulada de geología por la Universidad Nacional de Colombia y licenciada en Química con especialización en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad Distrital. Entrenamiento intensivo en estadística y espectroscopia aplicada a recursos minerales. Consultora. Correo electrónico: sguizag@gmail.com y syguizag@unal.edu.co

Los métodos que funcionan para una mineralización aurífera específica se adoptan después de realizar un minucioso estudio mineralógico, que define las medidas precisas y exactas de las sustancias químicas requeridas en los procesos, tales como la flotación y lixiviación reduciendo el grado de exposición. Uno de esos procesos es la cianuración, hoy muy conocido y cuyo riesgo se encuentra en prácticas descuidadas cuya secuela son los pasivos mineros huérfanos. Con respecto del mercurio, es preciso recordar que la ley ha prohibido de forma gradual su uso industrial y la minería fue la primera actividad en estar sujeta a esa disposición, prohibición que se complementa con campañas de sustitución de métodos de concentración y de enseñanza de métodos alternativos que acompañen su erradicación. El mito establece que, de manera fatal, no hay remediación posible en sitios afectados por el abandono de depósitos de colas y estériles, desconociendo que existen los protocolos para el depósito de estos que cumplen con la normatividad y que se usan biotecnologías basadas en la acción bacteriana y la selección de plantas como indicadores y absorbentes del mercurio y arsénico, entre otros. En vista de que los procesos de cianuración son utilizados desde hace más de una centuria, son bien conocidos y resulta fácil determinar el procedimiento de remediación para reducir las consecuencias por prácticas sin control alguno realizadas en el pasado.

Palabras clave: mineralogía, extracción, beneficio, monitoreo, mitigación, remediación.

Introducción

El oro es el metal máspreciado a lo largo de la historia humana. Su extracción, metalurgia y comercialización han generado hitos que no siempre permitieron manejos adecuados desde el punto de vista ambiental y dejaron sin control alguno desechos mineros Por completo indeseables y que hoy son referente de quienes se oponen a su producción alegando que se repetiría la misma situación.

Esta situación no es un mito. Lo que lo constituye es la negación de la existencia de quienes trabajan bien, evitan las emisiones contaminantes, utilizan productos permitidos y usan la ciencia y la tecnología en la industria aurífera, como se verá a lo largo de este capítulo. En realidad,

nadie se quiere envenenar ni desea envenenar su entorno y con esa premisa trabaja actualmente la industria aurífera formal.

El uso del cinabrio (HgS) como fuente de mercurio se conoce desde antes de Cristo en antiguas minas en España. El mercurio, también conocido como el azogue, al parecer se usó en México hace 1000 a. C. Se describen los detalles de la utilización de la retorta de mercurio en las vasijas de cerámica. Los incas peruanos desde épocas remotas utilizaban el método de la amalgamación, empleando para ello el azogue que lograban obtener del cinabrio, cuyas menas existían en Buldibuyo. Forma parte del quimbaite como un procesamiento del oro en rocas alteradas y ocurrencias vetiformes que contenían oro de grano fino. Este se ponía en contacto el oro y el mercurio en una amalgama en forma de una perla o pepita que luego era refogada o quemada para volatizar el mercurio y extraer el oro como charpita (Brooks et al., 2013).

A lo largo de la historia colombiana, el oro ha sido minado en aluviones, terrazas en los ríos, y en menor volumen, en algunas operaciones subterráneas para oro vetiforme¹ principalmente. Antioquia ha sido considerada la región más rica de oro en Colombia. Otros departamentos con recursos auríferos son Cauca, Chocó, Tolima y Bolívar (Restrepo, 1952). Extraer el oro sin suficiente soporte técnico y mineralógico lleva a que hasta nuestros días se encuentren casos como el descrito en la carta al Virrey en 1762:

Llego el caso de que un fulano Lauterio, que trabajó esta mina, se ejercitará únicamente en sacar el metal, quemarlo y tirarlo al río, solo por aprovecharse de aquella corta porción de oro que le dejaría cada carga, y me han informado que este sujeto desperdiciaría más de mil cargas de metal en la forma dicha. ¡Así han desaprovechado tantos millares de cargas, labrando por una pequeña cantidad de cobre o de oro el que tan manifiestamente dada a conocer su rica ley de oro y plata! (Restrepo, 1952)

¹ El oro de tipo vetiforme, además de oro y cuarzo, puede tener sulfuros por procesos de remplazo o metasomatismo (Ortiz, 1991).

La solubilidad del oro en soluciones cianuradas fue identificada hacia 1783 por Scheele (Suiza) y fue estudiada en 1840 y 1850 por Elkington y Bagration (Rusia), Eñesner (Alemania) y Faraday (Inglaterra). Elkington obtuvo una patente para la utilización de soluciones cianuradas de potasio para la galvanización del oro y la plata (Fernández-Pérez, 2007). Este proceso fue muy utilizado en las minas de Suráfrica (1890), Utah y California en Estados Unidos (1891), México (1900) y Francia (1904). Se reportó que la recuperación del oro pasó del 70 al 95%. En la actualidad es ampliamente utilizado por su alta eficiencia incluso en mineralizaciones auríferas de baja ley², en otras palabras, el proceso de cianuración es usado para extraer oro de sus minerales sin tener en cuenta su contenido (Marsden y House, 2006). Desde siempre, los profesionales mineros colombianos han urgido y demandado el conocimiento mineralógico para el laboreo del oro, prueba de ello es un documento en el que se señala que “la minería científica no es más contingente que las otras industrias” (Restrepo, 1952), en el que se hace la siguiente afirmación, válida en nuestros días:

Nuestras observaciones durante treinta años nos permiten formular con entera confianza esta conclusión: los fracasos y las decepciones que registra la historia de nuestras minas son menos numerosas de lo que comúnmente se cree, y deben imputarse en el mayor número de los casos a la falta de conocimiento y de experiencia de los mineros.

Si es cierto que la geología no ha llegado todavía a formular reglas fijas para la explotación de yacimientos metalíferos, sí ha asentado principios positivos que pueden servir de base para las operaciones industriales. Solo que se necesita de un estudio muy detenido, científico y práctico a la vez de cada formación

² Ley es, por definición, la cantidad de oro o plata finos en las ligas de moneda, lingotes, barras o muestras de oro y plata. En términos mineros, ley es la proporción de oro o plata en mil partes o unidades; de tal forma que al decir que una muestra o barra de oro sometida a ensayo químico o por densidad dio por resultado ley 700, se refiere a que en 1000 partes de la muestra 700 son partes de oro puro y el resto son otros metales o impurezas. Tomado del texto guía *Geología minera del oro de veta* (Ortiz, 1991).

mineralógica y de todas sus circunstancias locales para interpretar exactamente los principios y descubrir las reglas que deben tener aplicación en cada caso. Nuestras observaciones constantes han llevado a nuestro ánimo el convencimiento de que en multitud de casos particulares que pudiéramos enumerar, la falta de éxito ha dependido de la ineptitud, o la negligencia en interpretar estas leyes con el fin de darles la aplicación conveniente. (Restrepo, 1952)

Es claro que en el presente, a la par con la expansión de la producción de la explotación informal producida por la recuperación del precio internacional del metal, el gobierno ha promovido la inversión extranjera, por compañías con el conocimiento necesario para un correcto manejo ambiental, que adelantan proyectos de exploración, con rigor y dedicación de años, a la evaluación de potenciales operaciones mineras, algunas de las cuales están *ad portas* de iniciar producción, mientras que otras esperan la aprobación de las licencias ambientales respectivas y aportar a la sostenibilidad económica del país.

El compromiso de la sociedad colombiana con la protección del medio implica desafíos sociales que a la vez son oportunidades para mejorar las finanzas gubernamentales e incrementar las oportunidades laborales, pero deben ser llevadas a cabo con perspectiva ambiental y social, exigiendo la parte civil las acciones que sean necesarias para evitar cualquier afectación y de manera imparcial. El cumplimiento de las normativas medioambientales tiene que ser también exigidas a quienes realizan minería artesanal y pequeña así sea ancestral. Así mismo, el Estado colombiano debe estar obligado a impedir el avance indiscriminado de la minería no formalizada e ilícita. Es importante reconocer las oportunidades que conllevarán las nuevas operaciones mineras de gran envergadura que están obligadas a ser sostenibles ambientalmente (Betancur-Corredor et al., 2018).

Hay un alto conocimiento mundial de las mineralizaciones de oro, así como de su complejo procesamiento, eso permite realizar sin afectaciones ambientales su producción. Un ejemplo de ello es el avance de la espectroscopia que permite de inmediato el seguimiento constante de los cambios en la composición química y mineralógica de los materiales producidos a lo largo del proceso de una operación mineral, así como el cuidado de las cuencas hidrográficas del entorno de una operación minera,

con acompañamiento de entes gubernamentales e incluso la academia y universidades a tiempo.

1. Los recursos minerales son fundamentales para mantener el progreso y desarrollo actual

La actual condición de la población, urbana y rural, se basa en el aprovechamiento de materias primas minerales, este y su procesamiento manufacturero garantizan la generación de los bienes y servicios que se requieren para mantener y mejorar su condición socioeconómica. Pese a la creencia de que el oro es solo usado para la joyería, este metal está presente en la vida diaria de las personas y su producción y abastecimiento es un proceso que combina el proceso de extracción con su beneficio³ y se resume en la figura 1, la cual se basa en los siguientes procesos y materiales generados:

1. Acceso a la mineralización con la construcción de obras de excavación, que pasan por rocas sin valores del mineral denominadas *estériles*. Esta actividad puede ser comparable a los sustratos rocosos removidos durante la ejecución de cualquier obra civil como túneles viales o cimentaciones de estructuras como grandes edificios.
2. Procesamiento físico y químico de la mineralización, en función de la manera como el metal está presente en el cuerpo mineralizado que conforma la mena⁴. Los residuos obtenidos durante la separación de minerales de mena y estériles son conocidos como colas.
3. Por último, en el procesamiento metalúrgico para la producción del metal o aleación se obtiene un concentrado y escorias.

³ En la industria minera, la expresión *beneficio* resume los procesos mediante los cuales con métodos físico-químicos industriales se separa, tritura, muele y pulveriza el producto de la mina, y con los cuales se lava, concentra y recupera el mineral objeto del interés económico.

⁴ La expresión *mena* hace referencia al mineral objeto de interés económico y que al ser procesado libera un metal específico, ese mineral de un yacimiento y luego mediante metalurgia obtener el metal de ese mineral. El procesamiento de la mena arroja minerales sin valor económico llamados de forma genérica. Es necesario separarla de la mena, como primera etapa en la concentración.

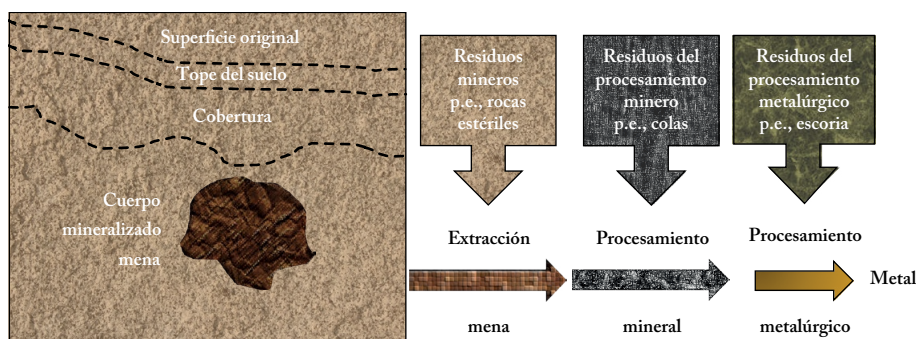


Figura 1. Esquema de los productos de una mina

Fuente: tomado y adaptado de *Mine waste: Characteristics, Treatment and Environmental impact* (Lottermoser, 2010, p. 4).

El diseño del proceso adecuado en la extracción de un recurso⁵ como el del oro debe asegurar la prevención de cualquier vertimiento tóxico, a partir del conocimiento exhaustivo de la génesis del yacimiento y las asociaciones minerales que allí se encuentran y la presentación del mineral: oro invisible o encriptado en otros minerales; libre y asociado a sulfuros en vetas cuarzosas y oro libre de placer extraído de laderas y terrazas de ríos.

Los principales tipos de menas auríferas, desde el más fácil de procesar al más difícil de hacerlo, son: placeres u oro aluvial (tamaño > 100 μm); oro grueso (gravimetría); oro fino libre (cianuración); rico en plata o *electrum* (cianuración). El oro encapsulado o refractario, cuyo tamaño puede ser < 1 μm , puede estar alojado en otros minerales y requiere procesos de mayor complejidad a los mencionados como pretratamientos, flotación además de cianuración (Zhou et al., 2004).

⁵ Un recurso mineral es una concentración u ocurrencia de material natural, sólido o líquido, inorgánico u orgánico fosilizado en o sobre la corteza terrestre en forma y calidad tal, cantidad y calidad, con posibilidades razonables de extracción económica por medios mecánicos o mineralúrgicos. Su localización, cantidad, y calidad, características geológicas se conocen, estiman e interpretan por un proceso de evidencia y conocimiento geológico específico (modificado de Ministerio de Minas y Energía, 2003).

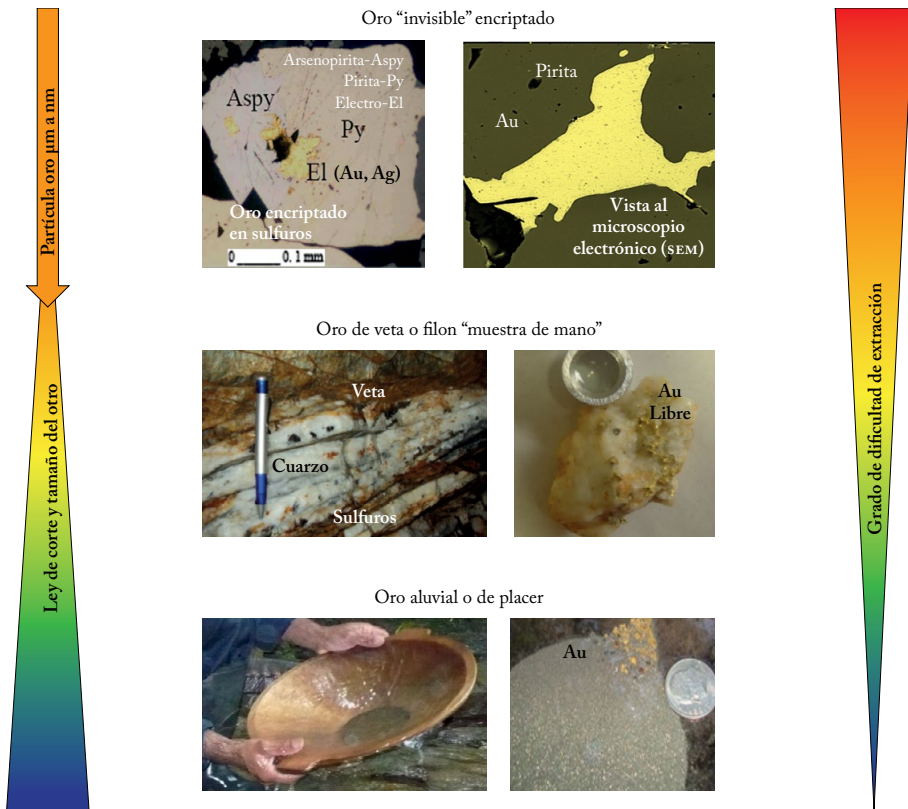


Figura 2. Tipos de manifestaciones del oro

Fuente: tomado y adaptado de *Handheld XRF application with emphasis on mining operation* (Güiza, 2018).

1.1. La caracterización mineralógica del oro determina cuál debe ser el método de beneficio minero

El mito de un método universal del procesamiento de oro y la producción y vertimiento de elementos tóxicos desconoce que las técnicas base o convencionales son muy conocidas, por ejemplo: concentración gravimétrica; flotación y lixiviación por cianuración. Estas técnicas están determinadas por la génesis del yacimiento y por su manera de presentarse en la naturaleza, esto define la forma de su procesamiento (figura 3), lo cual no descarta dificultades como pérdidas de oro fino, por lo que se hace necesario la utilización de otros métodos basados en los estudios geomineralógicos previos (Carrasco, 2016).

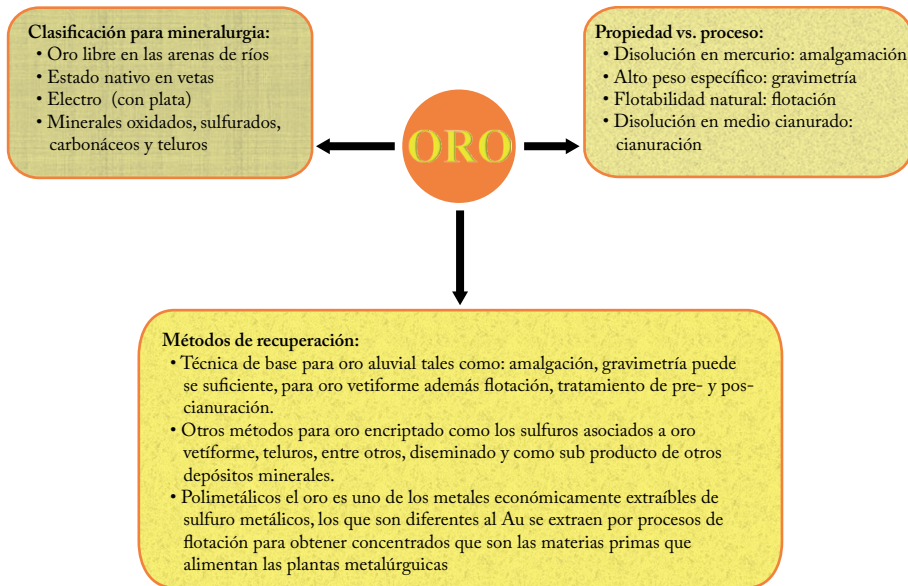


Figura 3. Características de oro en la definición del proceso mineral

Nota: la utilización del mercurio está prohibida por ley en Colombia.

Fuente: elaboración propia.

Los factores mineralógicos considerados para establecer el procesamiento del material aurífero son: presentación mineralógica del oro, las propiedades asociadas a los minerales metálicos; sulfuros y telurios, entre otros, y a los no metálicos como los de alteración mineral; arcillas como clorita, illita, pirofilita, entre otras, distribución del tamaño del oro con otros minerales hospedantes y de ganga, así como las respectivas texturas (Otsuki et al., 2014).

1.2. Tipos de productos generados en un proceso mineral e indicadores minero-ambientales como estrategia de control

El mismo mito de la disposición caótica en la minería formal, de colas y estériles no considera que en un proyecto hay especial dedicación a la predicción, prevención y evaluación de impactos ambientales y sus efectos sobre el medio y la vida humana, a partir del conocimiento previo del riesgo asociado a cada proceso y etapa, tanto del minado como del beneficio.

Los riesgos asociados y los agentes vinculados a cada proceso y tipo de minera se resumen en la tabla 1. Agréguese que esta labor indica el mecanismo de remoción segura de los materiales y productos químicos empleados.

Tabla 1. Residuos asociados a procesos de minería aurífera

Proceso	Tipo de minería				Tipo de riesgo	Gas líquido sólido				
	G	M	P	A		Emisiones	Agentes químicos	Ripios	Colas	Estériles
Estudios de factibilidad	X	X			Ninguno					
Drenaje ácido de mina por presencia de sulfuros	X	X	X		Incremento de la acidez al ser vertidos en drenajes	X	X		X	X
Flotación	X	X	X	X	Depósitos de residuos sin tratamiento		X		X	X
Cianuración	X	X	X		Se puede liberar arsénico (As)		X	X	X	
Gravimetría	X	X	X	X	Remoción de material					X
Amalgamación			X	X	Mercurio	X	X		X	

Nota: tipo de minería se refiere: G, gran minería; M, mediana minería; P, pequeña minería; y A, minería artesanal.

Fuente: modificado de Cáceres (2001) y Betancur-Corredor et al., (2018). Tomado antes de UPME, 2007. Producción más limpia en la minería del oro en Colombia. Mercurio, cianuro y otras sustancias (http://www.upme.gov.co/Docs/Mineria_limpiar.pdf).

Es común y justificado que se reclamen buenas prácticas en la minería, mas no siempre se admite que ellas incluyen los estudios mineralógicos y ensayos para previsión de drenaje ácido de mina, utilización con protocolos en manejo de agentes químicos en la flotación y la precianuración; el diseño apropiado de los patios de cianuración con capas impermeabilizadas, los planes de manejo de materiales movilizados y el acatamiento inexcusable de la prohibición del uso del mercurio.

En minería formal, se emplean indicadores ambientales inteligentes (por sus siglas en inglés *sophisticated, measurable, accessible, rapid, thorough* que en su conjunto conforma la palabra en inglés de *SMART*, que significa “inteligente” en español, es decir, sofisticadas, medibles, accesibles, rápidas y constantes (Lottermoser, 2017).

1. *Sofisticado*, indicadores que tienen que estar bien soportados por análisis científicos, la mayoría de sus componentes tienen que formar parte de un objetivo propuesto.
2. *Medible*, son indicadores basados en la producción de datos cuantitativos utilizando analizadores espectroscópicos, que, bajo las mejores prácticas posibles aplicadas tanto en el campo y laboratorio, son fácilmente reproducibles.
3. *Accesible*, la instrumentación necesaria para la consecución de datos debe ser de fácil acceso y de comprobada eficiencia.
4. *Rápidos*, la experiencia en la industria minera ha demostrado que el éxito está en la rapidez y el costo efectivo en la adquisición de información.
5. *Constantes*, los indicadores tienen que poder ser validados para un amplio rango de materiales y contextos mineros.

Los procesos de extracción y beneficio del oro de manera convencional pueden llegar a convertirse en eventuales causas de contaminación a las fuentes hidrográficas o alcanzar niveles freáticos de suelos. Para evitar y prevenir estas afectaciones y determinar el proceso adecuado, con la utilización de agentes químicos en proporciones precisas y exactas sin generar ningún tipo de afectación, se requiere de un planeamiento minero y su ejecución desde el comienzo mismo de la operación, para que no se configuren daños ni costos innecesarios.

La tabla 2 resume los indicadores ambientales definidos para las actividades mineras entre las interacciones dadas por la fuente mineral, procesamiento y medioambiente (Lottermoser 2017), llamadas como impulsores, presión, estado, impacto y respuesta, tomadas de DPSIR, por sus siglas en inglés (*driving, forces, pressures, states, impactos, responses*).

Tabla 2. Interacciones entre el desarrollo de recursos minerales y el medio ambiente

Indicadores ambientales en minería		Estados de la vida útil de mina	Actividades de la vida útil de mina
Indicadores por fuerzas impulsadores	Beneficios económicos. Independencia económica. Consumo y demanda de recursos. Ocupación. Estatus social.	Prospección, exploración y descubrimiento	Planeamiento conceptual. Encuestas. Evaluación de objetivos.
Indicadores por presión	Producción de colas y estériles. Polvo mineral liberado a la atmósfera. Vertimiento de agua liberado al ambiente. Dióxido de carbono. Desechos con potencial para producción de acidez.	Desarrollo y construcción. Operación de mina	Evaluación de la etapa de perforación. Ensayos de laboratorio mineros. Procesamiento mineral y estudios metalúrgicos. Desarrollo minero.
Indicador de estado	Concentración de metales en suelos, sedimentos o agua superficial. Caracterización química del polvo mineral decantado alrededor del sitio. Promedio del nivel de ruido en la periferia de las instalaciones de la planta.		Extracción minera Procesamiento minero Producción de desechos.
Indicadores de impacto	Acumulación de metales en plantas y animales Biomonitores en tiempo real (almejas). Indicadores microbiológicos (algas, diatomeas, bacterias). Afectación del hábitat de la vida silvestre. Biodiversidad de macro invertebrados acuáticos. Impactos en la salud humana. Susceptibilidad de suelos a la erosión.		
Indicadores de respuesta	Supresión de polvo. Condición superficial del suelo. Estabilidad en el relieve. Cambios en los nutrientes del suelo con el tiempo. Acumulación de biomasa y masa microbacterial. Cobertura vegetal en mina alquilada. Vegetación y complejidad del hábitat y dinámica. Utilización porcentual del total de desechos sólidos. Principio de “quien contamina, paga”. Limitación en las emisiones.	Cierre y rehabilitación	Facilidades de desmantelamiento. Cierre de trabajos mineros. Clausura de depósitos de desechos. Revegetación.

Fuente: *Environmental indicators in metal mining* (Lottermoser, 2017, p. 10).

2. Estudios de factibilidad, fundamento de procedimientos operativos normalizados

Debido al agotamiento de las menas auríferas de fácil extracción como el oro aluvial e incluso las de tipo vetiforme, prácticamente todas conocidas, para mantener la sostenibilidad de fuentes de oro se hace necesario el beneficio efectivo de menas complejas, bajo el soporte de la caracterización mineralógica de estas (Otsuki et al., 2014). Para lo cual se necesita buscar depósitos minerales auríferos que se encuentran a cierta distancia del subsuelo y requieren inversión de alto riesgo por la falta de garantía de su hallazgo.

Son pocos los proyectos que logran avanzar en la exploración después de ser concluida la costosa etapa de perforación, la cual permite establecer sus reservas (figura 4) sin garantía de que estos nuevos depósitos minerales descubiertos lleguen a ser extraídos.

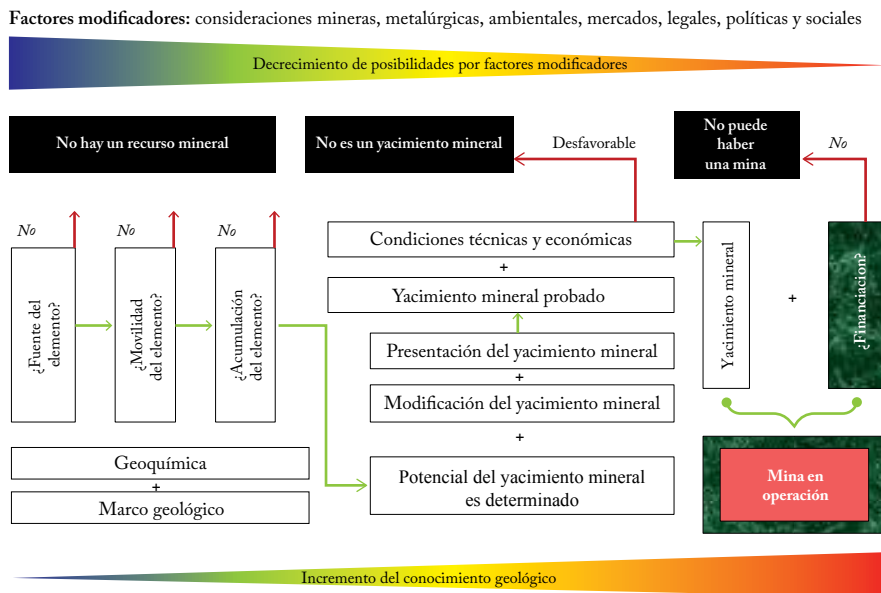


Figura 4. Desarrollo del hallazgo de un yacimiento mineral

Fuente: tomado y adaptado de Westerhof (2003).

Durante el desarrollo de estos proyectos de exploración, la información requerida para caracterizar un posible depósito mineral corresponde a la caracterización geológica, a la línea base geoquímica: composición

elemental de aguas, suelos, sedimentos y los distintos sustratos rocosos, acompañada de levantamientos geofísicos para establecer el tamaño y geometría de cuerpo mineralizado (Westerhof, 2003). Dependiendo del potencial encontrado, se pasa a una etapa de exploración avanzada con perforaciones corazonadas que entregan núcleos de roca del subsuelo, los cuales enseñan las rocas características y permiten afinar el cálculo de reservas minerales (Stevens, 2010).

Cabe mencionar la existencia de estudios en este campo, como por ejemplo los basados en exploración avanzada de los proyectos de minería de gran envergadura (Betancur-Corredor et al., 2018), que sirven de fundamento en el desarrollo académico tanto de maestría y doctorado. Algunos ejemplos de estudios traducidos al español son los siguientes: “Geocronología, petrografía, geoquímica y caracterización de fluidos del depósito de Buriticá” (Lesage, 2011), “Petrología ígnea del sistema porfirítico rico en oro del depósito de la Colosa” (Gil-Rodríguez, 2010) y “Paragénesis mineral del depósito de oro de Gramalote” (Novoa, 2009). Una aproximación empírica del nivel de éxito de la exploración minera dice que de cada mil prospectos uno se vuelve proyecto y de cada cien proyectos uno se convierte en mina, lo cual indica el alto riesgo que significa invertir en esta actividad.

Durante la etapa de factibilidad, los requerimientos a que da lugar son sistemáticos (figura 5), comienzan con la caracterización de una mineralización determinada como un recurso que eventualmente puede ser extraído y procesado, por lo que es necesario contestar varios cuestionamientos que permitan establecer su viabilidad a nivel financiero, social y ambiental. Estos deben responder a la caracterización detallada del depósito mineral, el por qué lo es, qué tiene, cuánto hay, dónde está, cómo es, etc., siendo los ensayos de laboratorio los que permiten llegar a las respectivas respuestas de estas preguntas (Westerhof, 2003).

La entrada en operación de una mina depende de los resultados de la caracterización mineralógica de los distintos componentes rocosos y de las pruebas metalúrgicas, que deben dar cuenta de si el depósito permite un recobro con una relación entre la ley de corte⁶ y el volumen de desechos

⁶ “Ley de corte: corresponde a la ley más baja que puede tener un cuerpo mineralizado para ser extraído con beneficio económico. Todo el material que tiene un contenido de metal

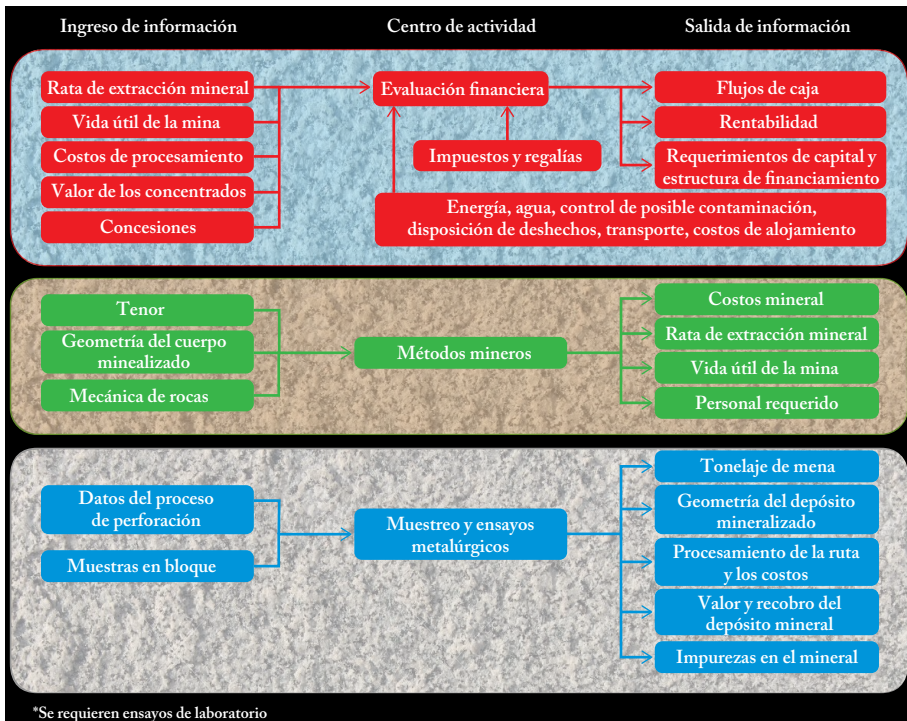


Figura 5. Etapas de los estudios de factibilidad

Fuente: tomado y adaptado de Westerhof (2003).

mineros >90 como razonablemente rentable (Wellmer et al., 2008). Esto lleva a considerar que los desechos mineros deben ser prácticamente estériles y del menor volumen posible, para que una mina pueda ser construida. A manera de resumen de este concepto, se dice que un estudio del modelo de recobro geometalúrgico cubre temáticas como la caracterización geológica y mineralógica del depósito, la caracterización de la mineralización aurífera y el modelo predictivo de recobro geometalúrgico (Leichliter, 2013).

La información de los estudios de factibilidad es útil, como elemento básico para establecer índices de *viabilidad ambiental*. Esos estudios y trabajos aportan: el modelo geológico; las descripciones geoquímicas,

sobre la ley de corte se clasifica como mineral y es enviado a la planta para ser procesado. El resto, que tiene un contenido de metal más bajo, se considera estéril o lastre y debe ser enviado a botaderos” (Ministerio de Minería, s. f., <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-l/ley-de-corte/>).

mineralógicas y petrológicas; ensayos estáticos y cinéticos; y modelos del movimiento del oxígeno y procesos geoquímicos. Entregan datos significativos para el control de la oxidación de sulfuros, como control del pH, control de la generación de Fe^{-3} , control de la acción de las bacterias y la remoción y aislamiento de sulfatos precipitados durante el proceso, datos sin los cuales no se puede modelar la retención de minerales liberados por procesos de meteorización en la pila de residuos de roca tanto colas como estériles (Muniruzzaman et al., 2018).

Antes de llevar a cabo cualquier operación minera y establecer su viabilidad, se requieren ensayos metalúrgicos para determinar el proceso que proporcione el mejor rendimiento en la recuperación del oro y otros metales que pudieran ser concentrados, factor que determinará la construcción o a parálisis del proyecto. En este conjunto de trabajos estudios y análisis, es determinante la evaluación de la viabilidad ambiental del proyecto a partir de ensayos que permiten prevenir afectaciones como drenaje-ácido-de roca, cuya prevención y control evitará afectaciones futuras.

2.1. Evaluación del procesamiento mineral para seleccionar el que proporciona la máxima recuperación del metal

La evaluación detallada que determinará la manera adecuada de extraer los metales de la mineralización y el rendimiento a partir de ensayos que determinen la optimización se resume en la tabla 3. Los minerales de sulfuros metálicos tipo epitermal oro-plata, mesotermiales y los intrusivos relacionados con metales bases son bien conocidos y caracterizados, entre los minerales de sulfuros informados en los depósitos auríferos vetiformes colombianos donde aparecen sulfuros con oro invisible encriptado, correspondientes a los de hierro (pirita), arsénico (arsenopirita), de cobre (calcopirita), entre otros (Lozano y Pulido, 1986).

Estos resultados, junto con la evaluación financiera, definen tanto los métodos mineros como el manejo de los materiales requeridos; la mena extraída del depósito mineral y el agua y los que serán producidos (figura 6), siguiendo dos tipos de procesos de beneficio de los minerales, como los siguientes: mecánicos (separación gravimétrica y magnética) y químicos (flotación), generando un material de alta concentración del mineral buscado y que será enviado a plantas metalúrgicas para ser procesados.

Tabla 3. Caracterización del procesamiento mineral de sulfuros metálicos

Proceso	Minerales	Parámetros de optimización	Evaluación
Lixiviación en pilas de cianuración	Óxidos, sulfuros intermedios y transiciones.	Reducción del tamaño, concentración del cianuro, etc.	Variabilidad de minerales, pruebas geotécnicas y ambientales.
Molienda/cianuración	Sulfuros de intermedio a alto grado.	Proceso trituración (tamaño de grano).	Variabilidad de minerales
Flotación	Sulfuros de alto grado.	Tamaño de grano, reagentes, masa de atracción, etc.	Procesamiento de colas (lixiviación agitada o residual).
Bio oxidación/cianuración	Sulfuros intermedios		Viabilidad
Características de molienda		Tipos de roca que conforman los compuestos (<i>composites*</i>)	
Caracterización ambiental		Materiales residuales de las pruebas metalúrgicas.	

* La expresión *composite* a un producto que alude a un producto conformado por dos o más elementos heterogéneos para obtener propiedades no existentes en los elementos originales individuales.

Fuente: tomado y adaptado de Stevens (2010).

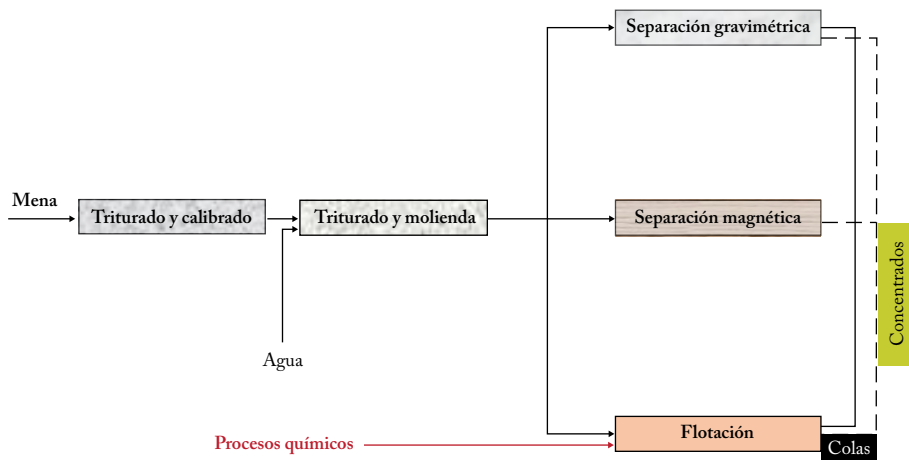


Figura 6. Diagrama del procesamiento mineral cuyos productos son los concentrados y colas

Fuente: tomado y adaptado de *Mine waste: Characteristics, Treatment and Environmental impact* (Lottermoser, 2010, p. 6).

Estos resultados también definen las colas, que pueden ser consideradas los desechos de la extracción, que deben contener la menor composición elemental posible, lo cual es verificado antes de estas ser llevadas al sitio de depósito predeterminado (The Northern Miner, 2012).

Las plantas metalúrgicas son instalaciones industriales, emplazadas en un distrito minero; reciben como insumo concentrados procedentes de diversos sitios de extracción minera. En dichas plantas, se adelantan procesos normalizados y muy bien conocidos como pirometalúrgico (calcinación, fundación y reconversión) e hidrometalúrgico (lixiviación, preparación de la solución y recobro). Las plantas metalúrgicas utilizan concentrados como materia prima (insumo) compuestas por metales que deben ser extraídos. Estos procesos, además de aportar insumos para producir las aleaciones, pueden dar lugar a escorias y emisiones atmosféricas (The Northern Miner, 2012). Si el proceso metalúrgico se produce en un sitio distinto al de la mina, esto deja de ser fuente de afectación básica y sus concentrados son enviados a una lejana planta metalúrgica.

Es importante resaltar que actualmente las operaciones mineras cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales son recirculadas y reutilizadas durante la operación minera, antes de ser vertidas tienen que cumplir con parámetros de calidad regulados por la autoridad correspondiente. A manera de resumen, se puede indicar que los tratamientos de aguas residuales con los alcances en manejo de elementos, compuestos y parámetros fisicoquímicos son: drenaje anóxico calcáreo (aluminio y pH), canal abierto calcáreo (Al, Fe, pH), sistemas sucesivos de generación alcalina (Al, Fe, pH), pantano aeróbico (Al, Fe, NH_4^- , CN^- , PO_4^{-3} , pH), pantano anaeróbico (Al), biorreactor (Al, As, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Mg, Mn, Hg, Mo, Ni, Ra, Se, Ag, Tl, U, V, Zn, NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{-3} , pH), estanque de aireación (Fe, demanda de oxígeno bioquímico -BOD y disuelto DO), filtro rocoso llenado de algas (Mn, S⁻, DO) (Lottermoser, 2010).

2.2. Sofisticados ensayos metalúrgicos previenen el drenaje químico

Pese a lo que el citado mito postula sobre el desconocimiento de asuntos como el drenaje ácido de rocas, este riesgo es quizás el mejor estudiado en los procesos mineros. En la actualidad y antes de iniciar un proceso minero responsable y como parte de los estudios de factibilidad, se hace

una detallada evaluación que permita predecir el comportamiento de los desechos por tratamiento de sulfuros (Myagkaya et al., 2019).

Una predicción de la generación de aguas ácidas requiere la identificación y el entendimiento de las características físicas, geológicas, geoquímicas y mineralógicas de los desechos sulfídicos. La adquisición de datos (figura 7) para la predicción incluye: modelamiento geológico; descripciones geológicas, geoquímicas, mineralógicas y petrográficas; ensayos estáticos y cinéticos; y el uso de modelos informáticos para determinar el movimiento del oxígeno y procesos geoquímicos (Chopard et al., 2019).

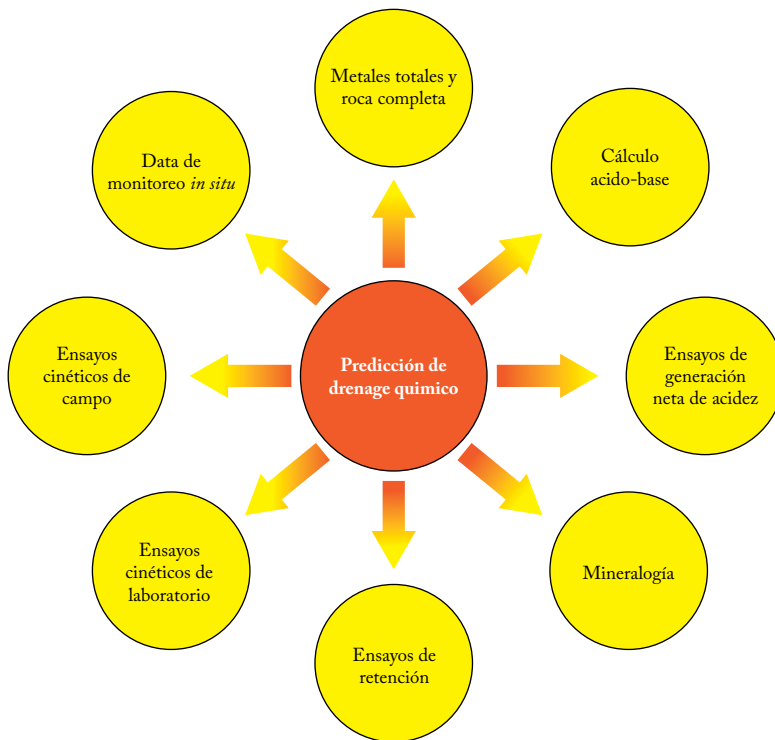


Figura 7. Ensayos de laboratorio requeridos para prevenir drenaje químico

Tomado, adaptado y traducido de *Environmental indicators in metal mining* (Parbhakar-Fox y Lottermoser, 2016, p. 36).

La información útil para predecir el potencial de formación de drenaje ácido de mina se obtiene a partir del registro lito-ambiental de núcleos de perforación, que corresponde a realizar ensayos químicos estáticos, técnicas mineralógicas hiperspectrales y cálculos mineralógicos que permitan

establecer un plan de efectivo de manejo de los desechos producidos y que minimice los riesgos que estos pueden tener (Parbhakar-Fox, 2018).

Hoy, por regulación legal mandatoria, las empresas mineras están obligadas a llevar a cabo los trabajos y estudios que permitan identificar los riesgos y las acciones por llevar a cabo para evitarlos (figura 8). Los modelamientos se hacen con base en análisis estadísticos que permiten identificar aquellos factores que deben ser cambiados durante la fase de planeación minera, para evitar cualquier efecto adverso (Muniruzzaman et al., 2018).

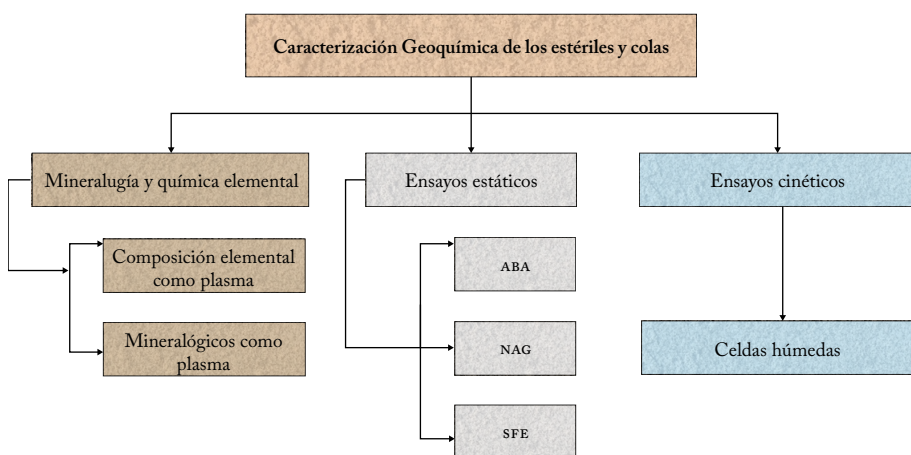


Figura 8. Proceso de predicción de riesgos por contaminación

Nota: siglas en inglés traducidas al español: ABA, conteo ácido-base; NAG, generación neta de acidez; y SFE, extracción por agitación. El texto incluye el significado en inglés literal.

Fuente: Minesa. Informe interno presentado para obtener la licencia ambiental (2020).

Los ensayos que se utilizan para la clasificación de desechos minerales incluyen el ácido-base, se recomienda combinar con otros como el potencial neto de producción ácida NAPP (*net acid production potential*) y la generación neta de acidez NAG (*net acid generation*) los cuales son métodos que permiten evaluar si una muestra puede o no generar acidez entre otros (Olds et al., 2019). Otro ensayo adicional como el SFE (*shake flask extraction*) es utilizado para determinar la composición de los lixiviados a corto plazo (escorrentía).

Para llegar a la viabilidad ambiental y económica aplicable a futuros escenarios de una mina, se utilizan sistemas que almacenan y analizan en

un trabajo estadístico la información de los ensayos de predicción química junto a la geológica, geoquímica y mineralógica, con el objetivo de contar con un modelo predictivo sustentable, que genere alertas tempranas. Al tiempo que esos sistemas retroalimentan la información producida durante la supervisión de los desechos producidos a lo largo del proceso minero.

2.3. Monitoreo de los componentes naturales circundantes a una mina y el depósito de colas y estériles

Para llevar a cabo estudios de monitoreo de actividades mineras circundantes a un drenaje que forma parte de una cuenca (figura 9), cuyos sedimentos pueden mostrar la distribución de los elementos químicos, que permite comparar los aportes antes de iniciarse, durante la operación minera e incluso después de ser finalizada, a partir del estudio del contenido de metales pesados, Cu, Cd, Fe, Pb, Zn, As y Hg, en los que se puede determinar sus patrones de enriquecimiento, movilización y especiación en aguas (Myagkaya et al., 2019).

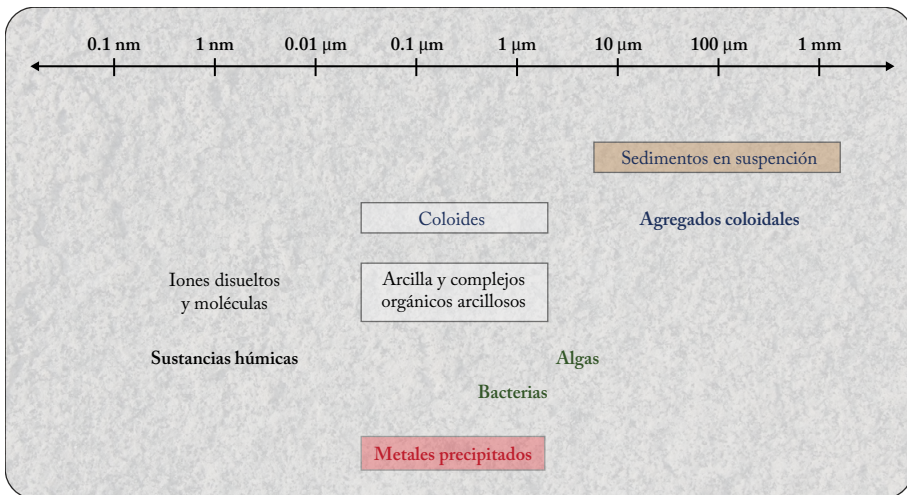


Figura 9. Componentes de un sistema acuoso

Fuente: tomado y adaptado de *Mine waste: Characteristics, Treatment and Environmental impact* (Lottermoser, 2010, p. 145).

La técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total (en inglés, *total reflection X-ray fluorescence analysis, TXRF*) determina la composición química elemental con capacidad de medir contenidos de ultra-trazas en

drenajes hídricos y la de todos sus componentes tanto de aguas como de los sedimentos en suspensión si son separados por filtración, e incluye análisis de material biótico⁷ al igual que muestras humanas corporales. Este analizador es de fácil operación, requiere poca cantidad de muestra y en minutos se obtiene el resultado químico (Borgese et al., 2013).

Los analizadores portátiles de fluorescencia de rayos X actualmente son una herramienta obligatoria en cualquier actividad que conlleve el ciclo mineral, con una amplia aplicación documentada para cualquier actividad minera como la exploración, extracción y beneficio minero, respecto al control y monitoreo de los diversos materiales que conforman parte de una operación minera, al igual que los generados a lo largo del proceso de beneficio minero e incluso durante los procesos metalúrgicos a que dé lugar, siendo prácticamente de uso obligatorio en todas las actividades que conlleva el manejo de aleaciones metálicas (ICAM, 2015; Güiza, 2018).

Entre estas aplicaciones se encuentra hacer un control del contenido de elementos químicos a los desechos mineros tales como estériles y colas que permiten ser comparados con los de los concentrados (figura 10) para estar seguros de los bajos contenidos que deben tener y que está reglamentado antes de su deposición final.

La configuración de los analizadores portátiles de FRX puede contar con más de 30 elementos químicos con calibraciones para diversos materiales como son metales, minerales y suelos a partir de estándares certificados en el caso de materiales geológicos como NIST y OREAS, entre otros. Está en capacidad de cumplir la norma dada para los 26 elementos (EPA, 2007) que incluye todos los metales pesados anteriormente mencionados (EPA, 2005). Es importante anotar que los elementos liviados (Mg, Al, Si, P, y Cl)

⁷ Actualmente, los estudios de impacto ambiental tienen amplia cobertura hacia los componentes bióticos de la cadena trópica tales como plancton, algas, peces, y humanos, a quienes se ha ido extendiendo análisis del cabello o barba, además de sangre y orina para establecer niveles de toxicidad por exposición. Aquí se presentan algunos casos que forman parte del monitoreo de mercurio.

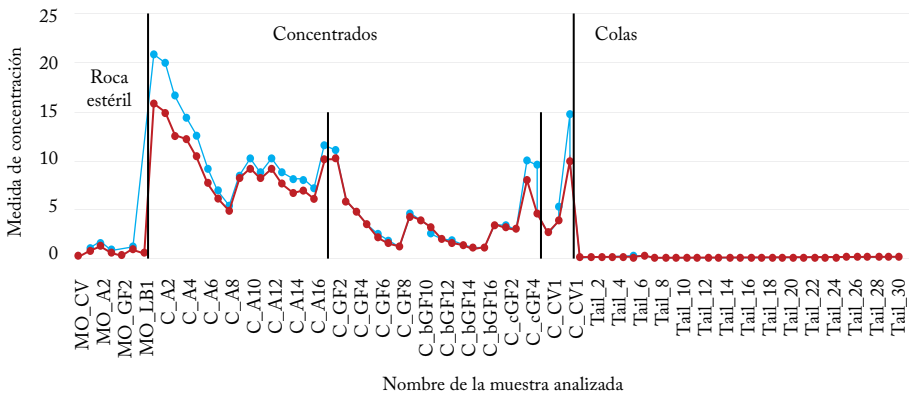


Figura 10. Diagrama de la comparación de composición química ideal por elemento en materiales de una mina

Fuente: tomado y adaptado de *Handheld XRF application with emphasis on mining operation* (Güiza, 2018).

pueden ser importantes en los estudios de la evaluación ambiental de suelos, los cuales también son incluidos en su configuración teniendo en cuenta el tipo de detector. Además, está diseñado para ser puesto en operación inmediatamente es adquirido, puede ser manejado por cualquier persona con una sencilla capacitación y ser llevado *in situ* a cualquier lugar del laboreo minero (Güiza, 2018).

La microscopía electrónica de barrido que llega a nanoescalas de resolución y Quemscan es utilizada (ICAM, 2015). Los pequeños instrumentos de micro μ -XRF son capaces de hacer mapas elementales de la estructura mineralógica de las partículas. A manera de ejemplo, se puede mencionar su uso en estudios mineralógicos que comparan la proveniencia y caracterización de oro entre depósitos de Colombia y Brasil (Murussi et al., 2018) y la aplicación llevada a cabo en escorias de una mina australiana, determinando que con el incremento del tamaño de las partículas ($-3350 + 2000 \mu\text{m}$) cerca del 80% contenía las fases mineralógicas del Pb, al igual que otros metales pesados (Morrison et al., 2016).

Cabe la pena mencionar que cualquier emisión iónica que pueda generarse desde el material rocoso (por ejemplo, minerales uraníferos presentes en algunos depósitos minerales de oro) al ser identificada desde etapas tempranas de exploración (prospección geoquímica en superficie basada en muestreo de sedimentos activos en ríos y analizado un set de más de 40 elementos químicos incluido este), será monitoreada de manera

constante (Bell, 1996). Para esto se utilizan analizadores bien conocidos, de fácil uso y portabilidad, como el contador Geiger, centilómetro o gama-espectrómetro, que permiten identificar un amplio campo de radiación⁸, así como la discriminación de otros elementos que pueden acompañar al uranio, como potasio, torio y radón. En caso de ser identificado un elemento con emisión radioactiva, como anomalía geoquímica, será estudiada y se determina la necesidad de utilizar el dosímetro por parte de sus trabajadores, así como el llevar a cabo un procedimiento adicional, si este es requerido por el Grupo de Licenciamiento y Control adscrito a la Dirección de Asuntos Nucleares del Servicio Geológico Colombiano.

Previo a cualquier operación minera y de establecer su viabilidad, los estudios de factibilidad incluyen ensayos metalúrgicos para determinar el proceso de mejor rendimiento en la recuperación del oro y otros metales que pudieran ser concentrados en paralelo con los ensayos para determinar la viabilidad ambiental. Actualmente, la premisa es que una operación minera bien planeada evitará afectaciones futuras.

3. Extracción del oro “invisible” se fundamenta en la mineralogía

Las mineralizaciones auríferas están divididas en dos categorías: el oro que se libera por molienda y que puede ser recuperado hasta en un 90 % por procesos gravimétricos y cianuración y el oro refractario o “invisible” (Zhou, 2004). A pesar del supuesto éxito de la cianuración como líder en la extracción del oro, esta puede resultar limitada para algunas mineralizaciones de oro “invisible” o encriptado en otros minerales, por lo que se hace necesario utilizar técnicas microscópicas para identificar y caracterizar el set de minerales que contienen el oro. Este estudio permite establecer la manera adecuada de ser extraído e incluye diversos procedimientos (figura 11).

La concentración de minerales se obtiene de aquellos que se encuentran junto a los que tienen el oro, pueden ser valiosos, por ejemplo, depósitos

⁸ Dosímetro. Es un medidor que registra la emisión de una fuente de radiación iónica a que pueda dar lugar cualquier material y que se utiliza en la evaluación de las tasas de exposición de un organismo en un área de trabajo o en zonas aledañas a esta. Tomado y adaptado del curso de protección radiológica y gestión ambiental del Servicio Geológico Colombiano (2002).

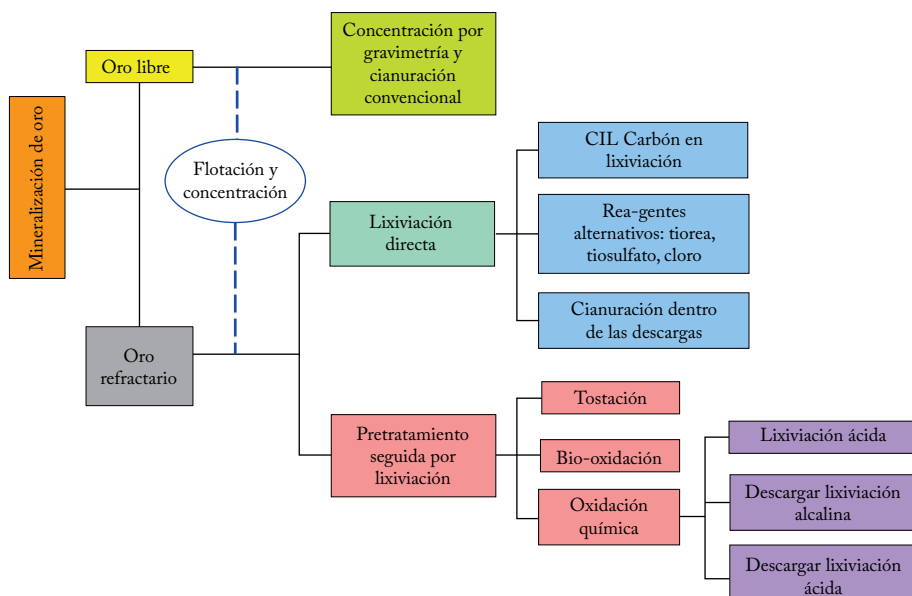


Figura 11. Tipos de procesos de oxidación

Fuente: tomado y adaptado de Zhou (2004) y Otsuki (2014), entre otras fuentes.

polimetálicos como concentrados⁹ o no ser valiosos, es el caso de los depósitos vetiformes denominados ganga. Por lo que el proceso de flotación separa los minerales valiosos de mayor densidad que la ganga (The Nothern Miner, 2012). Téngase presente que los procesos de flotación¹⁰ y concentración¹¹ pueden ser requeridos para la extracción de minerales más livianos y, en muchos casos, ser descartados.

⁹ El concentrado es el producto enriquecido de las operaciones de concentración de minerales y concentrado *bulk* es el concentrado que contiene más de un metal con valor comercial (Ministerio de Minas y Energía, 2003).

¹⁰ La flotación es el proceso de concentración mediante el cual las partículas de un mineral son inducidas a adherirse a las burbujas creadas por un agente espumante presente en la pulpa, que las hace flotar. La flotación *bulk*, por su parte, es la recuperación de todas las especies valiosas (oro, plomo, plata, cinc, cobre, etc.) en un solo producto llamado concentrado *bulk*, por ejemplo, concentrado de plata-plomo-oro-cobre, concentrado de plata-plomo (Ministerio de Minas y Energía, 2003).

¹¹ La concentración (beneficio) es la operación unitaria en la cual se busca eliminar el material que no es de interés económico con el fin de disminuir el volumen de mineral por procesar. Para esta separación se pueden utilizar propiedades físicas (diferencia de densidad,

Dependiendo de la manera como se encuentra el oro mineralógicamente, es decir, acompañado de otros elementos, pueden ser necesarios otros procesos tales como preaireación, oxidación a alta presión y temperatura en medio alcalino, clorinación, oxidación biológica, nítrica y pirometalúrgica (Azañero et al., 2009). Métodos que incluyen procesos relacionados con la cianuración¹², debido a la versatilidad de este ion, cuyos procesos además son útiles para remediación (Young y Jordan, 1998).

Es importante anotar que una de las técnicas utilizadas para recuperar el metal es la denominada hidrometalurgia¹³, empleada en los procesos de beneficio de minerales¹⁴ de depósitos auríferos de baja ley y permitir incrementar su rentabilidad; el cianuro también es adicionado como un modificador en los procesos de flotación de metales básicos (Lottermoser, 2010).

Tanto los agentes químicos como el cianuro y otros que pueden ser combinados o incluso remplazados son determinados por ensayos de laboratorio como son pruebas (test) exploratorias, diagnóstico de la lixiviación, optimización y planta piloto; todos ellos tienen como objetivo establecer las condiciones óptimas, tanto físicas como químicas, que garanticen una eficaz extracción del oro obteniendo ganancias, sin correr riesgos que lleven a costosos accidentes y responsabilidades legales (Aylmore, 2016).

En la actualidad, se han desarrollado nuevos métodos de extracción del oro a partir de los minerales asociados en forma de óxidos o sulfuros, reemplazando, según el caso la cianuración. *Grosso modo*, en la actualidad se cuenta con métodos alternativos al cianuro con el uso de otras sustancias,

atracción de campos magnéticos, eléctricos) o físico-químicas de los minerales (Ministerio de Minas y Energía, 2003).

¹² La cianuración es el método para extraer oro o plata a partir de un mineral triturado o molido, mediante disolución en una solución de cianuro de sodio o potasio (Ministerio de Minas y Energía, 2003).

¹³ La hidrometalurgia es la rama de la metalurgia extractiva que estudia la obtención de metales o compuestos a partir de minerales o fuentes secundarias mediante procesos que tienen lugar a bajas temperaturas en medio acuoso u orgánico (Ministerio de Minas y Energía, 2003).

¹⁴ El beneficio de minerales es el conjunto de operaciones empleadas para el tratamiento de menas y minerales por medios físicos y mecánicos con el fin de separar los componentes valiosos de los constituyentes no deseados con el uso de las diferencias en sus propiedades (Ministerio de Minas y Energía, 2003).

tales como el tiosulfato, tiourea, tiocianato, ácido nítrico, e incluso de origen orgánico como resinas de pulpas vegetales y microorganismos, entre otros (Acosta et al., 2015). Sin ser aplicables a todos los casos, requieren necesariamente de estudios mineralógicos al menos de microscopía óptica. La evaluación mineralógica (figura 12) puede utilizar varios métodos siendo el Quemscan el de mayor credibilidad y utilización por su sofisticada tecnología y experticia requerida. Razón por la cual la difracción de rayos X es una técnica muy versátil que da información mineralógica a un costo razonable (ICAM, 2015).

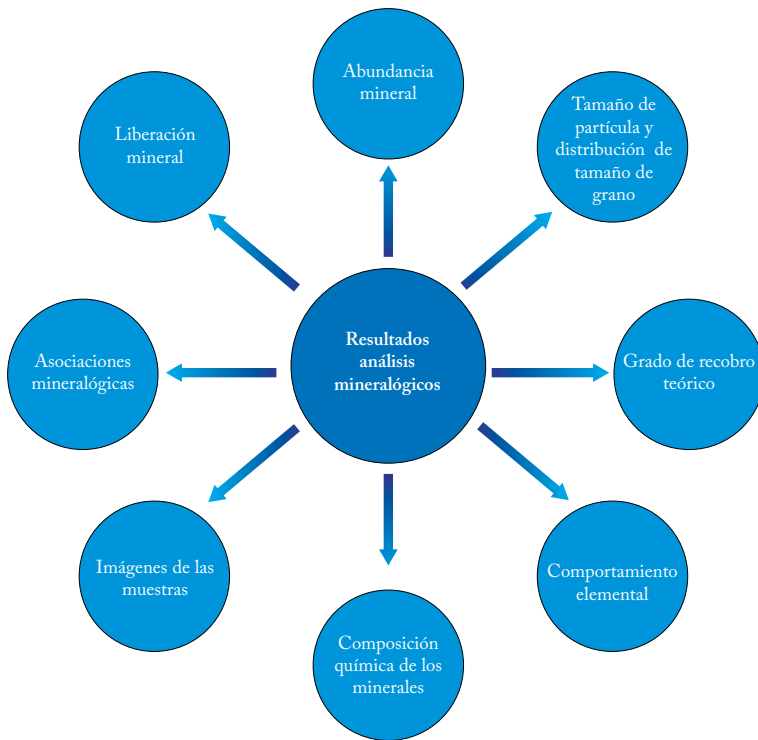


Figura 12. Tipos de análisis mineralógicos

Fuente: tomado y adaptado de *Automated mineralogy technique overview*.
The Australian Institute of Geoscientists (Swierczek, 2019).

Existen avances tecnológicos en caracterización mineralógico como Raman, que, junto con la difracción de rayos X, permiten identificar y caracterizar las fases mineralógicas presentes en lodos residuales que pueden decrecer la movilidad de nutrientes al suelo, por lo que se recomienda su

remoción. Además, al detectar otros minerales, permite determinar qué acciones se deben seguir para reducir el riesgo (Sánchez-Peña et al., 2018). Otros métodos de análisis tratan de resolver y facilitar la recuperación del mineral precioso como, por ejemplo, el uso de microondas en laboratorio, para el estudio de una tostación tradicional mejorando las condiciones del proceso al disminuir el consumo de energía eléctrica e incrementar su recuperación hasta en un 90 % (Amaya et al., 2013).

La manera de manifestarse el oro respecto a los minerales que lo acompañan define el grado de dificultad para extraerlo, lo cual resulta ser muy fácil si el oro está libre, pero si el oro resulta ser invisible al estar encriptado en otros minerales, su extracción puede resultar compleja y complicada. De tal forma que los estudios mineralógicos son la clave para determinar procedimientos adecuados de extracción y beneficio aurífero, utilizando agentes químicos en las proporciones precisas y exactas sin causar afectaciones innecesarias.

4. La minería aurífera convencional utiliza métodos imprecisos y poco tecnificados

El cianuro ha sido considerado como el ligante universal para la extracción de oro, por sus ventajas indiscutibles: bajo costo, gran efectividad para la disolución, su electividad por encima de otros metales y su fácil descomposición. Cabe anotar que existen otros ligantes tales como haluro, tiosulfato, tiourea y tiocianato, entre otros, capaces también de extraer oro (Asamoah et al., 2014) y, como ya se vio, dependiendo de los estudios mineralógicos que se lleven a cabo, pueden ser utilizados e incluso remplazar al cianuro.

Es importante resaltar que en los últimos años se han documentado cambios importantes en la producción aurífera con ventajas económicas importantes, al utilizar agentes químicos menos tóxicos y con altos niveles de recobro y reciclaje que el cianuro y otros lixiviantes alternativos, los cuales pueden ser preparados y producidos en las operaciones de beneficio que pueden ser llevadas en el sitio de mina, eliminando costos y riesgos asociados al transporte e incrementando la eficiencia y rentabilidad en el proceso (Adam, 2016).

4.1. Proceso de cianuración: todos lo utilizan y conocen

Un aspecto muy importante que se soslaya en la afirmación de la validez del mito del descuidado manejo de los subproductos del benéfico del oro es que, como ya se vio desde la introducción a este capítulo, la química, el uso y el manejo adecuado del cianuro se viene realizando desde hace algo más de dos siglos atrás, a pesar de que es un proceso altamente experimentado con una continua investigación y mejoría, pero que en manos inexpertas sin el suficiente soporte técnico se puede convertir en una actividad con alto riesgo de afectación.

Después del citado Scheele en 1783, la disolución del oro en soluciones cianuradas y el papel del oxígeno en este mecanismo fue investigada por Elsner en 1846 y la reacción reportada (Fernández-Pérez, 2007) es la siguiente:



El oro al ser extraído como un óxido es apilado sobre unas canaletas plásticas alineadas, en los cuales se riega una solución generalmente de cianuro de sodio, la cual después de cierto tiempo disuelve el oro y la plata, esta solución se recoge para continuar con el proceso de extracción de oro (figura 13). Una vez que el oro y la plata han sido recuperados de la solución cianurada, esta es reciclada para ser reutilizada de nuevo sobre una nueva carga de mineral oxidado (Lottermoser, 2010 y Cáceres, 2001).

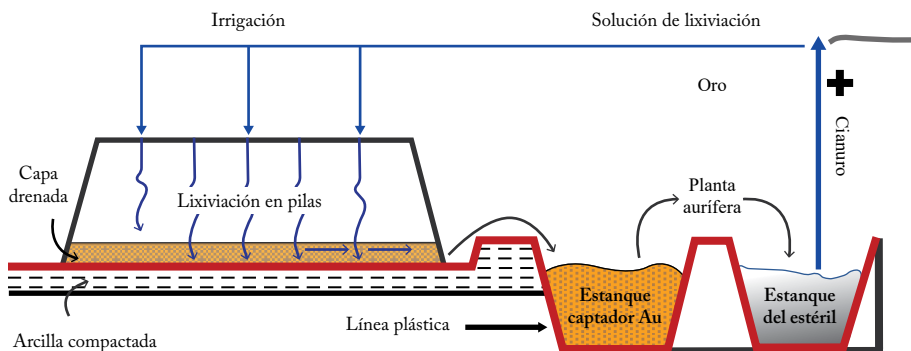


Figura 13. Sección simplificada de un proceso de lixiviación en pilas en una mina de oro

Fuente: tomado y adaptado de *Mine waste: Characteristics, Treatment and Environmental impact* (Lottermoser, 2010, p. 248).

La dosis letal de cianuro para personas adultas es entre 50 a 200 mg. De acuerdo con los estándares de la EPA¹⁵, la concentración de cianuro total registrada para el agua de consumo y la biota acuática es de 200 y 50 ppb¹⁶, respectivamente, refiriéndose al cianuro total, tanto al ion libre (CN⁻) como a los complejos metálicos cianurados (Young y Jordan, 1995). De acuerdo con la RCRA¹⁷, todas las especies cianuradas son consideradas por ser materiales muy peligrosos cuyos desechos son los más regulados.

Los complejos de oro formados por este proceso han sido considerados como muy estables y con altas radiaciones ultravioletas UV (fotólisis) o en medios muy ácidos, se disocian liberando CN. Otros parámetros que determinan la estabilidad de estos complejos en solución acuosa son: intensidad de luz, temperatura del agua, pH, sólidos totales disueltos, concentración del complejo entre otros (Cáceres, 2001).

Con el tiempo, el problema ambiental del cianuro libre se disipa, por cuanto se degrada en forma natural hacia compuestos de menor o nula toxicidad. Sin embargo, el problema ambiental de los complejos metálicos del cianuro persiste, debido a que generan la incorporación de metales pesados en los suelos y recursos hídricos. En consecuencia, se debe minimizar la descarga al ambiente de residuos que contengan complejos metálicos de cianuros (Cáceres, 2001). La principal fuente de riesgo lo constituyen las malas prácticas, tales como no utilizar la arcilla compacta y la línea plástica, que podría mitigar el riesgo debido a posibles percolaciones al suelo por depósitos de colas y estériles abandonados y sin comprobar su composición química (Jianu, 2012).

Al recobrar el oro por procesos de cianuración es frecuente que, durante la lixiviación, el oro esté acompañado por otros minerales como sulfuro y sulfu-arseniatos de cobre, plata, antimonio y arsénico principalmente (Asamoah et al., 2014). Estas reacciones reducen el cianuro libre y requiere de oxigenación para la extracción de oro. Se ha demostrado que la cantidad estequiométrica de cianuro libre necesita para un mayor recobre de oro de < 1% del total consumido; este cianuro y oxígeno es

¹⁵ *United States Environmental Protection Agency EPA.*

¹⁶ Partes por billón (ppb).

¹⁷ *Resource Conservation and Recovery Act* dictada por la EPA.

consumido por los compuestos conocidos como cianuros (por ejemplo: S, Cu, Zn, Fe, Ni, etc.).

Generalmente, el oro vetiforme extraído por minería subterránea tiene varias etapas de aperturas y cierre del sitio de mina, debido al extravío de la veta o filón por una falla geológica (Ortiz-Delgado, 1991). La otra causa es un cambio en el mineral que contiene el oro. Así, cuando el costo de la cianuración excede la ganancia por el oro producido¹⁸ se opta por cerrar la mina. Generalmente, el incremento en el costo del oro lleva a que el tenor de corte¹⁹ sea menor y, por lo tanto, a que el tenor crítico²⁰ vuelva a ser rentable para que la mina pueda ser reabierta y reiniciar su extracción del preciado oro.

Existen casos en que las empresas mineras retornan a sus depósitos de colas y estériles para establecer si se encuentran aún mineralizaciones auríferas rentables al estar por encima de los tenores críticos. Uno de estos casos es el de una mina donde se llevaron a cabo perforaciones en viejos depósitos de deshechos mineros, que incluyó estudios técnicos con la descripción de la ocurrencia del oro a partir de diversos estudios mineralógicos con los respectivos resultados químicos que incluían el análisis de tenores de oro, con lo cual se plantean alternativas de recuperación por su viabilidad económica como proyectos de reprocesamiento del material (Cervera-Acosta et al., 2008).

Cabe mencionar algunos estudios mineralógicos que han sido desarrollados en diversas minas auríferas de Colombia y con diversos fines en la última década, aportando el soporte mineralógico en mejora de la eficacia en los procesos de extracción aurífera, tales como: el *stock* porfirítico de Santa Lucía del departamento del Cauca, respecto a zonas de alteración (Gutiérrez y Mendoza, 2009) y rasgos epitermales (Leguizamón-Bejarano et al., 2009), el uso del Quemscan en minería artesanal antioqueña para buscar alternativas al mercurio (Rojas Reyes et al., 2017), en vetas de cuarzo

¹⁸ Tenor es el contenido o porcentaje de un mineral por unidad de peso o volumen tomado del texto guía *Geología minera del oro de veta* (Ortiz-Delgado, 1991).

¹⁹ Tenor de corte es el tenor que existe en el frente o corte de explotación (Ortiz-Delgado, 1991).

²⁰ Tenor crítico es el tenor mínimo explotable que hace algo rentable la producción o la mantiene para pagar costos de producción y desarrollo de mina (Ortiz-Delgado, 1991).

que definen la secuencia paragenética que define los eventos mineralizantes del Distrito Minero Zaragoza-Segovia-Remedios Castaño-Dávila et al., 2019), entre otros.

Las minas en las que su ley de oro se reduce significativamente requieren estudios mineralógicos para poder establecer si utilizando pretratamientos con otros agentes lixiviantes²¹ y con reactivos químicos diferentes al cianuro resulte más eficiente la lixiviación²². En muchos casos, al ser más altos los costos de producción que la ganancia, esta es cerrada y abandonada, sin ningún tipo de tratamiento a los desechos generados como ocurre con la minería convencional, generando los riesgos de liberar metales pesados e incrementar su concentración en aguas y suelos.

4.2. El peligro del mercurio en la amalgamación erradicado por las compañías mineras y en proceso de erradicación en la minería artesanal y pequeña

Con frecuencia, al agitarse el mito del vertimiento irresponsable de colas y estériles y de subproductos en la minería del oro, se incluye la aseveración del uso del mercurio en su beneficio y que este es vertido junto con esos materiales sin control alguno. La experiencia de los autores indica que al menos desde el 2011 su uso se restringió por parte de las empresas formales, al punto que cuando entró en vigencia la Ley 1658 de 2013, en la cual “se establecen las disposiciones para la comercialización y el uso del mercurio en las diferentes actividades industriales del país”, y la adopción por parte de Colombia de la Ley 1892 de 2018, respecto al “Convenio de Minamata sobre el Mercurio”, la minería formal ya había eliminado su empleo y cuando se cumplió el plazo dado para su substitución, esas operaciones ya habían acatado el mandato legal.

²¹ Un agente lixivante es una sustancia química (cianuro, tiourea, ácido) que tiene la propiedad de disolver selectivamente uno o más elementos presentes en una roca o mineral (Ministerio de Minas y Energía, 2003).

²² A este término puede dársele varias connotaciones. Lixiviable es el material extractable o tratable mediante técnicas de lixiviación como oro. Lixiviación (beneficio) es el proceso hidrometalúrgico mediante el cual se realiza la disolución selectiva de los diferentes metales que contiene una mena, por medio de una solución acuosa que contiene un reactivo químico apropiado (Ministerio de Minas y Energía, 2003).

Ahora bien, el mal manejo de ese metal hace que se produzcan afectaciones significativas las cuales están asociadas con técnicas ineficientes de amalgamación. En todo el mundo se estima una rata de emisión en un rango entre 800 a 100 toneladas por año. De este total, la mayor emisión es llevada a cabo por China con aproximadamente 200 a 250 ton/año, seguida de Indonesia con 100 a 150 ton/año, y entre 10 a 30 ton/año en Bolivia, Brasil, Colombia, Perú, Filipinas, Venezuela y Zimbabue (Veiga et al., 2006). En Colombia, desde el artículo 38 del Decreto 1594 de 1984 se ha buscado restringir el uso del mercurio e impedir su vertimiento indiscriminado en fuentes naturales de agua. Fijándose como VLP²³ en agua, la condición crítica aplica para concentraciones que exceden 0,002 mg/l, límite máximo permisible actualmente. Reiterando la vigencia de la Ley 1892 de 2018, respecto al “Convenio de Minamata sobre el Mercurio”, es decir, acciones gubernamentales para que este sea eliminado de los procesos en minería artesanal y pequeña, mientras que la mediana y gran minería, al requerir de licencia ambiental, dicho metal debe estar eliminado de sus procedimientos para ser otorgada o renovada (Decreto 282 del 2010).

La mayor amenaza reside en la minería aurífera no formal y corresponde al peligro que genera el uso del mercurio como materia prima del proceso de amalgamación²⁴ en sus trabajos de recuperación del oro (figura 14). Para poder controlar el riesgo y mitigar los sitios contaminados es importante conocer tanto el ambiente sociocultural en el que se escenifican esas prácticas así como las características del mercurio, los métodos de seguimiento y los utilizados para la mitigación.

²³ VLP 0. Valor límite permisible.

²⁴ La amalgamación es el procedimiento de concentración en el que los metales nativos se separan de los minerales no metálicos de la ganga mediante un mojado selectivo de las superficies metálicas por el mercurio. La amalgamación *in situ* es el proceso de amalgamación que se aplica solamente en la minería aluvial. Ocurre cuando el mercurio es vaciado directamente a la poza de excavación, luego con el movimiento y el transporte de la carga el oro libre existente se amalgama parcialmente. Esta técnica es utilizada frecuentemente en minas aluviales que tienen el sistema monitor - bomba de grava - canaleta o canalón (Ministerio de Minas y Energía, 2003).

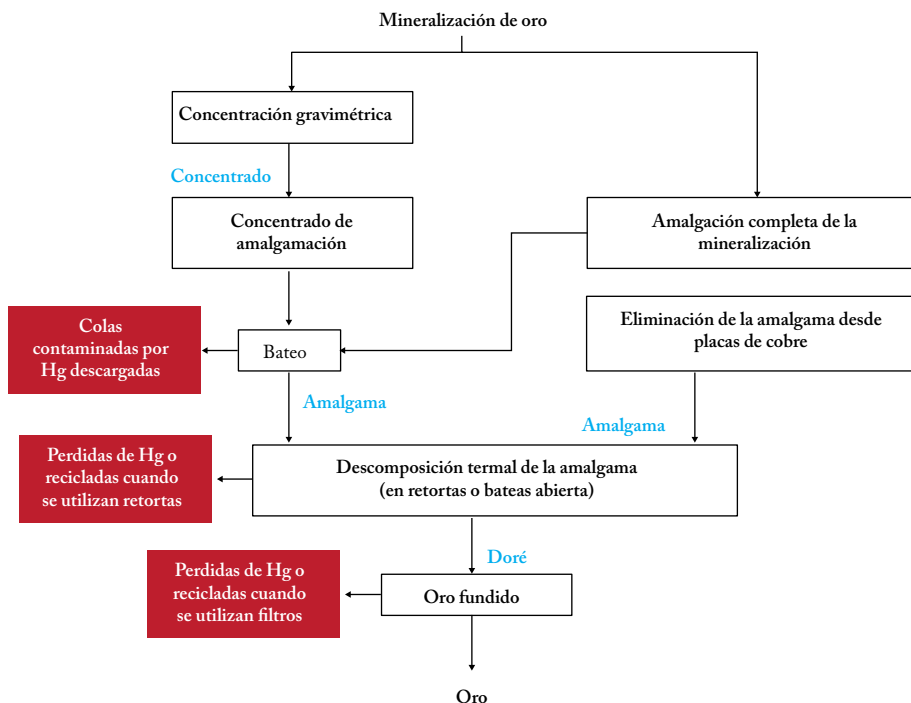


Figura 14. Métodos utilizados en minería artesanal para extracción de oro

Fuente: tomado y adaptado de *Origin and consumption of mercury in small-scale gold mining* (Veiga et al., 2006).

Este proceso se lleva a cabo por la facilidad y eficacia en el proceso de recuperación del oro, pero está demostrado que no es de uso obligatorio ni de uso imperativo, hecho que de nuevo contradice al mito. A pesar de la prohibición actual de la utilización del mercurio, es necesario reconocer que ha sido empleado desde hace mucho tiempo, lo cual provoca acumulaciones anómalas de este metal, constituyendo un pasivo-ambiental-minero (PAM) (Cordy et al., 2011), lo cual implica un alto riesgo de contaminación debido al ciclo del mercurio (figura 15).

Las consecuencias del uso indiscriminado del mercurio como fuente de contaminación en los ríos son bien conocidas y estudiadas, e identifican efectos de ese metal en un área de estudio en relación con la localización del sitio de mina, la distancia hasta la cual se encuentra contaminación de mercurio, la concentración de este en el agua y el suelo (Ahmed et al., 2019). A manera de ejemplo, se presentan algunos estudios de geoquímica ambiental llevados a cabo en las zonas de minería no formal en Colombia.

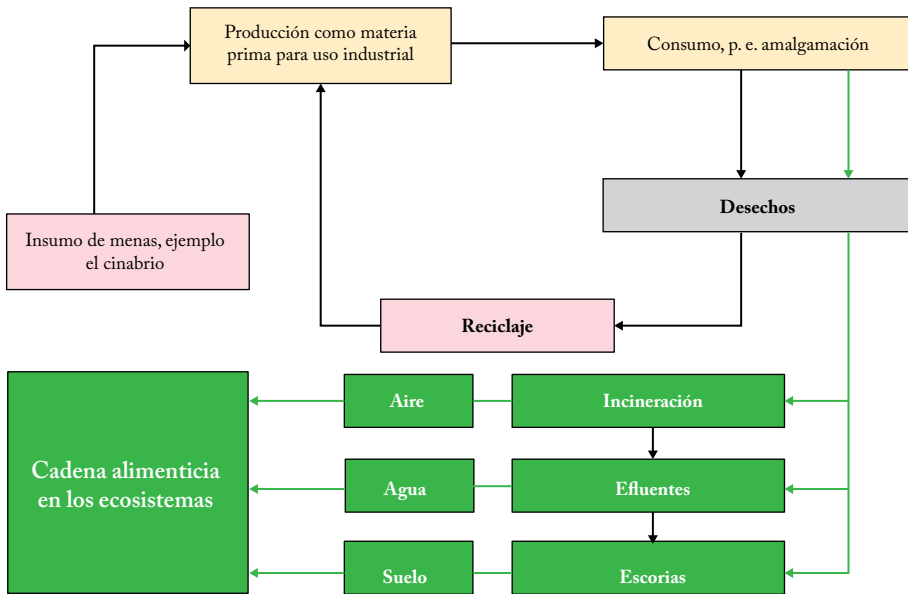


Figura 15. Ciclo del mercurio

Fuente: tomado y adaptado de *Mercury cycling in the terrestrial, aquatic and atmospheric environment of the Slovak Republic. An overview* (Kimáková, 2019).

La afectación por contaminación de mercurio en la cuenca del río Atrato estudia los siguientes aspectos: contaminación de sedimentos por el proceso de amalgamación desarrollada por la actividad de la minería; las tiendas donde se comercializa oro son una fuente de mercurio en el área urbana, las especies de pescado depredador tienen altos contenidos de mercurio, así como los bioacumuladores de mercurio en humanos, determinados por estudios en cabello, peces y sedimentos. También se hizo análisis del aire que incluían las tiendas de venta de oro para verificar si había trazas por quemaduras de amalgamas dentro de estas (Palacios-Torres et al., 2018). Además de llevar a cabo el objetivo de cuantificar otros elementos traza en sedimentos y pescados evaluando los riesgos para el medio ambiente y la salud humana. Los factores de concentración sugieren que además los sedimentos fueron moderadamente contaminados por cromo (Cr), cobre (Cu), cadmio (Cd) y fuertemente contaminados por arsénico (As), por lo que varias especies deberían no ser consumidas, debido a los altos contenidos reportados de As (Palacios-Torres et al., 2020).

Se destaca el estudio en la zona minera del sur de Bolívar diseñado para la evaluación del contenido de Hg total en seres humanos analizando muestras de cabello para establecer si exceden la norma US-EPA nivel de 1,0 µg/g, además de determinar concentraciones en peces, por lo tanto, ese trabajo concluyó que los riesgos de alcanzar dosis no óptimas en los seres humanos corresponde a las quemas de amalgama de mercurio y el consumo de peces (Carranza-López et al., 2019). Otro estudio realizado en una Ciénaga Grande que evalúa el impacto al amalgamar el oro en el ambiente, tomando muestras de agua, sedimentos, plancton, peces y humanos, recolectadas durante las dos estaciones tanto de lluvia como seca en tres distintos sitios, las cuales fueron analizadas para determinar el contenido total de mercurio (Marrugo-Negrete et al., 2008).

Los habitantes de un área minera en la zona conocida como La Mojana, que es una subregión de la Costa Caribe colombiana, caracterizada por ser una zona de humedales productivos, tienen registrados altos niveles de exposición ambiental y ocupacional de mercurio, sin embargo, hay pocos datos robustos sobre la magnitud de riesgos y factores asociados. Este estudio, al describir los niveles de mercurio en trabajadores y habitantes en esta región, logra identificar los factores sociodemográficos y ocupacionales que están asociados a este riesgo analizando muestras biológicas (sangre, orina y cabello) de más de 1000 personas (Díaz et al., 2018).

Otro estudio es el realizado en comunidades de sitios de extracción minera del Chocó, donde se tomaron muestras de cabello humano a las que se les determinó mercurio total y metil-mercurio, para evaluar si los niveles de mercurio total exceden la dosis permitida de 1,0 ppm, el nivel dado por la Organización Mundial de la Salud de 2,2 ppm (Salazar-Camacho et al., 2017). Se han identificado otros lugares contaminados, por mercurio vinculado a la producción artesanal de oro en varios municipios antioqueños donde se considera que han sido liberados y emitidos en un promedio de 92 (73 a 110) ton/año de mercurio, por lo que el Gobierno Nacional y organismos como el PNUD y USAID se unieron para reducir el uso del mercurio, con el fin de reducir su consumo, control sanitario como exámenes de mercurio en la orina; y llevar a cabo campañas de concientización (García et al., 2015).

Se vienen desarrollado nuevos métodos de extracción del oro de sus minerales (óxidos o sulfuros) reemplazando la amalgamación los cuales

han sido patentados. Mineros ancestrales del Chocó sin necesidad de utilizar mercurio, empleando biotecnología, como una de las metodologías alternativas de remplazo del mercurio para concentrar el oro libre de aluvión, como las que utilizan los mineros a pequeña escala en Tadó (Chocó), quienes producen “oro verde” (Brooks et al., 2015) usando extractos vegetales que crecen localmente como las hojas de balso (*Ochroma pyramidale*) y malva (*Hibiscus furcellatus*), mezcla que permite decantar el oro, magnetita y otros metales pesados, mientras que otros minerales flotan durante el bateo del oro (Brooks et al., 2015). Se resaltan las concentraciones de mercurio reportadas: 4530, 208 y 575.

Entre las prácticas de minería aurífera recomendadas en productores no formales, artesanales y de pequeña escala que permiten reducir la contaminación (García et al., 2015) y que están en línea con las recomendaciones realizadas para América Latina (Veiga, 2006), se encuentran: reciclaje del agua, organizaciones cooperativas para difundir, acordar y cumplir mejoras en los procedimientos, relaciones de operaciones mineras con comunidades locales para cumplimiento de reglamentaciones y manejo directo del comercio del oro entre el productor y su comprador.

Los comentarios, notas y referencias anteriores indican en su conjunto que la minería aurífera colombiana, en su manejo técnico y a lo largo de su historia, ha conocido desarrollos importantes, que corren a la par con unas prácticas prácticamente ancestrales estancadas en el tiempo y que no han evolucionado a formas modernas que incluyan trabajos continuados en cuanto al manejo ambiental. Con la aparición de compañías que desde hace algunas décadas laboran en municipios como El Bagre o Segovia en el departamento de Antioquia o en Marmato en Caldas, con considerables inversiones dedicadas a la prevención, control, mitigación y reparación ambiental, demuestran con su elevado nivel operativo que quien trabaje sin un soporte técnico, planeación, protocolos y buenas prácticas, produce afectaciones ambientales severas, sin un seguimiento, las cuales están destinadas a encarar severos problemas legales, comunitarios, de comercialización y sociales.

Se debe insistir que, siendo la academia un actor que cumple un rol importante en este sector, desde las universidades tienen el potencial de combinar sus áreas sociales con las ciencias e ingenierías para obtener de ellas acciones y conocimientos que permitan cambiar métodos anacrónicos

de extracción del oro por aquellos en los que los avances tecnológicos los hacen más racionales y, por ende, viables en términos ambientales.

5. Procesos de remediación, oportunidad de reducir la afectación por pasivos mineros huérfanos

Es una obligación de todos los actores que participan en cualquier actividad económica minimizar el riesgo en lo posible a niveles “cero”, es decir, reducción del riesgo²⁵ que depende del peligro y la exposición.

$$Riesgo = F < peligro \times exposición$$

Se consideran como metales pesados aquellos elementos químicos con una densidad cinco veces por encima de la del agua (la cual es considerada de 997 kg/m³); los más conocidos y mencionados son: arsénico (As), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), estaño (Sn) y cinc (Zn). En el mito, los elementos pesados son presentados como sinónimo de toxicidad, desconociendo que solo algunos de ellos comparten esas características y que además de estos forman parte del recurso que es extraído en lo posible en su totalidad en los materiales denominados.

Los elementos pesados pueden hacer presencia en cualquier sitio y sus afecciones al ambiente y a la salud humana están determinadas por los rangos de exposición²⁶ que puede sufrir un objetivo²⁷ en contacto con algún agente²⁸. De esta manera, se han establecido niveles de acción según el contenido de estos metales que podrían incrementarse debido a alguna actividad antrópica como minería, transporte, industria e incluso

²⁵ La reducción del riesgo hace referencia a las medidas de mitigación y prevención que se adoptan con antelación para reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los recursos ambientales, para evitar o minimizar los daños y pérdidas en caso de producirse los eventos físicos peligrosos. La reducción del riesgo la componen la intervención correctiva del riesgo existente, la intervención prospectiva de nuevo riesgo y la protección financiera. Tomado del “Sistema Nacional de Gestión del Riesgo”, Ley 1523 del 2012 (Colombia).

²⁶ Exposición se refiere al contacto entre un agente y su objetivo (EPA, 2011).

²⁷ Objetivo se refiere a algo físico, biológico o ecológico expuesto a un agente (EPA, 2011).

²⁸ Agente se refiere a una entidad química (por ejemplo, metales pesados), biológica o física que entra en contacto con un objetivo (EPA, 2011).

agricultura, a pesar de reconocerse que todos los seres vivos requieren de ciertas cantidades de metales como fuentes de vitaminas y minerales para el funcionamiento de los organismos, estos se pueden volver tóxicos²⁹ al ser consumidos en altas concentraciones (Bello, 2019).

En aquellas operaciones mineras, donde puede haber elementos que, de ser vertidos al agua o formar parte del material de los depósitos de colas y estériles sin la correcta disposición sobre el suelo, representan fuentes de riesgo de contaminación generadoras de problemas para la salud (EPA, 2007). Situaciones como estas requieren procesos para remover los elementos pesados y por ende reducir o eliminar sus efectos siendo posible aplicar tecnología fisicoquímica y biológica en donde sea necesaria la intervención (Stefaniak et al., 2018).

Para atender los efectos de la liberación y acumulación de metales como el mercurio, arsénico, cadmio, selenio y otras sustancias tóxicas, por vertimientos indiscriminados y sin control de su peligrosidad en aguas y suelos, existe el desarrollo suficiente de tecnologías limpias que llevan a la mitigación e incluso a la eliminación de fuentes de contaminación (figura 16) permitiendo de esta manera la recuperación de ecosistemas que habían perdido los niveles permitidos en sus aguas y suelos y por ende registraban daños a su fauna y flora.

Debido a malas prácticas mineras, ante el abandono de pasivos mineros como depósitos de desechos a los que no se les hace los debidos controles, desconociendo los procesos que ocurren en la naturaleza que alteran los contenidos normales de un sustrato rocosos y sus productos (suelos y sedimentos), se generan las condiciones para que se liberen elementos potencialmente tóxicos al medio ambiente. El ciclo del azufre (figura 17) muestra que procesos como la meteorización, debido a la acción de bacterias capaces de modificar el pH, pueden convertir los componentes de un sustrato rocoso con minerales de sulfuros (insolubles) en sulfatos (solubles) lixiviando metales en suelos que son un riesgo si llegan a alcanzar los niveles freáticos.

²⁹ La toxicidad puede ser considerada desde dos puntos de vista, el de toxi-dinámica respecto a los mecanismos fisiológicos que pueden absorber, distribuir, metabolizar y excretar las toxinas; el otro se refiere a toxi-cinética respecto al paso a través del cuerpo de un agente tóxico o sus metabolitos, usualmente es una acción similar a la fármaco-cinética (EPA, 2011).

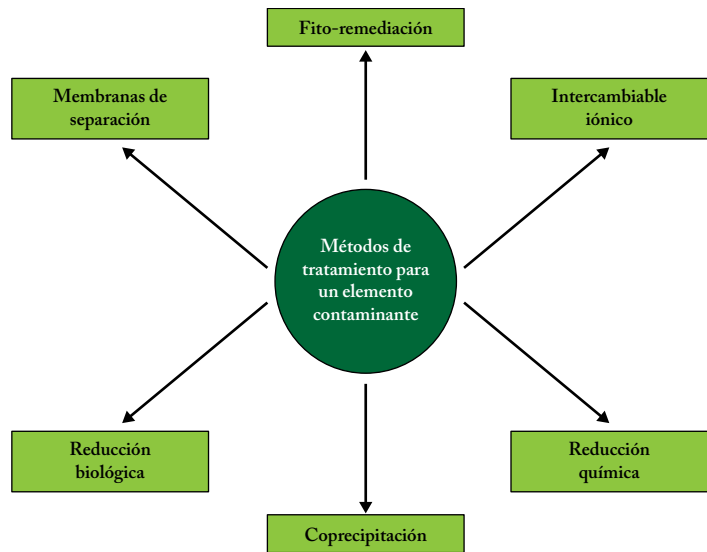


Figura 16. Métodos de remediación por contaminación

Fuente: tomado y adaptado de Etteieb (2020).

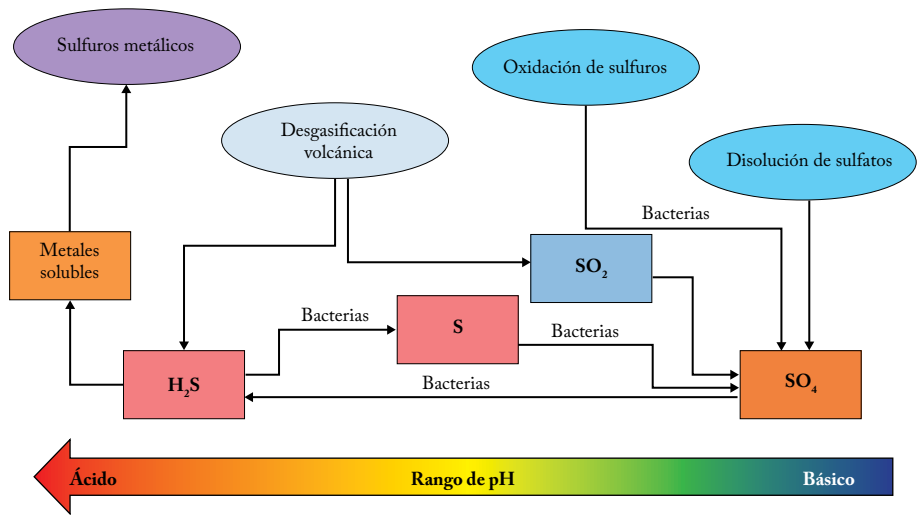


Figura 17. Sistema mineral del ciclo del azufre

Fuente: tomado y adaptado de *Hydrothermal processes and mineral systems* (Pirajno, 2010).

Los procesos de cambios en la composición de un elemento químico como parte de una especie mineral están regulados por el pH del entorno en que se encuentra el sustrato rocoso. Su estabilidad puede ser afectada al cambiar; si se vuelve más ácido se incrementa la disolución de los metales. Este tipo de procesos también puede darse como producto de otros procesos naturales, como la desgasificación volcánica (Pirajno, 2010), y por lo tanto de cualquier sustrato rocoso liberar metales pesados al medio ambiente.

Teniendo en cuenta que estos procesos pueden darse de manera natural o por falta de monitoreo y control de cualquier actividad económica que genera deshechos, para determinar el riesgo o el impacto ambiental, se requiere una evaluación objetiva desde un punto de vista crítico, siendo relevante la selección de varios factores de riesgo que dependen del criterio del evaluador. Además de crítica, es necesario desarrollar una evaluación basada en procedimientos de aplicación práctica que soporte las decisiones que puedan ser viables (Hatayama y Tahara, 2018).

5.1. Biorremediación con base en los procesos biológicos de los organismos que cohabitan con la afectación

Los tratamientos de áreas contaminadas son materia de una intensa investigación. Muchos estudios informan de efectos de neutralización mediante el riego de cal o adición de lodos de bauxol, brucita, calcita, yeso y combinaciones entre estos, con la incorporación de materia orgánica como el estiércol de cerdo u ovejas, con lignocelulosa u otros materiales. La acción bacterial cohibe de manera significativa los procesos reductores de sulfatos que por disolución pueden liberar metales (Kothe y Schütze, 2012).

También está en pleno auge la fitoremediación como método de tratamiento de áreas contaminadas (tabla 4). Esta técnica puede ser dividida en fitovolatilización y en biodegradación, así mismo, como los microorganismos que han demostrado efectos positivos en los procesos de descontaminación de suelos por metales pesados.

Téngase en cuenta que a partir de investigaciones que dan cuenta de sitios contaminados por la inadecuada deposición de residuos mineros, en los cuales al estar abandonados por un periodo largo puede crecer

Tabla 4. Ventajas y desventajas de los procesos de biorremediación

Ventajas	Desventajas
Ambientalmente amigable, rentable y estéticamente amena.	Depende de los ciclos de la naturaleza y, por lo siguiente, requiere tiempo.
Los metales son absorbidos en los tallos de las plantas que pueden ser extraídos desde la biomasa de la planta cosechada y luego ser recicladas de forma sostenible.	La fitorremediación solamente funciona si los contaminantes forman parte del crecimiento de las raíces de las plantas y están disueltas en el agua.
La fitorremediación puede ser utilizada para limpiar amplias variedades de contaminantes simultáneamente.	Las plantas que absorben grandes cargas de metales pueden ser un potencial riesgo para la cadena alimenticia.
El control de condiciones hidráulicas por transpiración ofrece un camino para reducir la entrada de contaminantes dentro de sistemas de agua subterránea y superficial.	Dependen de las condiciones climáticas

Fuente: Kothe, E. y Schütze, A. (2012).

vegetación con altos contenidos de mercurio (Hg) y arsénico (As) generando un alto riesgo para aquellos organismos que puedan alimentarse de estas plantaciones. Para mitigar dicho riesgo uno de los productos que puede ser utilizado es el selenito de sodio, que absorbe y reduce la bioacumulación de los contaminantes por absorción de estos en la vegetación del lugar (Chapman et al., 2019).

Los depósitos de colas y estériles, producto de la minería de oro, en donde puede ocurrir la movilización del mercurio y arsénico, y así generar contaminación de los niveles freáticos en suelos y fuentes hídricas, se han tratado llevando a cabo procesos de inmovilización utilizando estiércol de pollo o sulfato de hierro, lo cual decrece la concentración tanto del mercurio (Hg) como del arsénico (As), los cuales son absorbidos por los óxidos de hierro y la materia orgánica (Wang et al., 2019).

Es importante resaltar sustancias que eran utilizadas para remplazar el tradicional cianuro de sodio o potasio, como es el caso del tiocianato, que resulta ser un compuesto complejo cianurado (SCN⁻), el cual también presenta casos de contaminación en afluentes debido a percolaciones en colas. A partir del estudio de microorganismos y de la aplicación de glucosa, permiten inhibir el ion amonio (NH⁴⁺) logrando la remediación incluso de acuíferos subterráneos (Spurr et al., 2019).

5.2. Remediación del arsénico por cianuración

La liberación de arsénico presente en colas y estériles representa un alto riesgo, cuando estas contienen minerales ricos en arsénico como la gersdorfitita y sulfuros como la arsenopirita. Los depósitos abandonados de antiguas operaciones mineras llegan a ser una significativa causa de dispersión del arsénico (As) en niveles freáticos de suelos y acuíferos de agua subterránea (Coudert et al., 2020).

El riesgo de liberar arsénico (As) y otros metales se materializa en los desechos cianurados al ser abandonados. Para evitar esta situación, existen tratamientos químicos de descontaminación, convirtiendo el cianuro a la condición de cianato, considerado diez mil veces menos tóxico; luego se da la disociación a dióxido de carbono y nitrógeno. La secuencia es³⁰: 1) dilución; 2) degradación natural; 3) oxidación química; 4) precipitación; y 5) biodegradación (Fernández-Pérez, 2007).

En la tarea de evitar, mitigar y remediar daños ambientales, que se impone en los proyectos mineros de hoy, al contrario de lo expresado por el mito que afirma la imposibilidad de controlar los vertimientos, se emplea un proceso de “oxidación biológica asistida” en donde se apela a la capacidad de ciertos microorganismos para disociar compuestos de cianuro y amonio, así como de impedir la acumulación de metales pesados. Estos métodos son considerados en extremo eficientes para eliminar casi la totalidad del cianuro a un menor costo que la oxidación química. De esta manera, se ratifica la existencia de procesos que controlan los contenidos de arsénico por acción bacterial, reductores de arsenito (As+3) y arseniato (+5), lo cual se convierte en una alternativa viable en procesos de bio-remediación (Aguilar et al., 2020), y por lo tanto reducen el riesgo de un enriquecimiento de arsénico al ambiente.

³⁰ 1) Dilución se refiere a diluir las soluciones contaminadas hasta concentraciones sin ser permitido legalmente en algunos países ni se considera un método de eficiencia real; 2) degradación natural, reducen la toxicidad a largo tiempo; 3) oxidación química, la más utilizada es con agua oxigenada (H₂O₂); es considerada “no contaminante”, entre otros métodos que lo combinan con otros agentes químicos o físicos como la luz ultravioleta para acelerar su oxidación reduciendo el impacto ambiental; 4) precipitación de cianuros estables por el agregado de complejantes; 5) biodegradación, procesos biológicos que son la base de los tratamientos de efluentes industriales, incluyen procesos de remediación durante el cierre de la mina (Fernández-Pérez, 2007).

Microorganismos con capacidad de degradar el cianuro en desechos industriales muy tóxicos, han sido identificados en los últimos años y catalogados como organismos ciano-tróficos. Con énfasis especial en enzimas nitrificadas con gran potencial biotecnológico, la identificación de nuevas cepas constituye un gran éxito en los procesos de biodegradación (Luque-Almagro et al., 2016). La bacteria *P. pseudoalcaligenes* crece en medios con altas concentraciones de ciano-compuestos y metales, tales como efluentes generados en minería, industria galvanoplástica y joyería, dentro de un pH alcalino que evita que se volatilice como hidruro de cianuro. Dicha cepa induce a gran variedad de cambios metabólicos que además de ser tolerante y sobrevivir en estos compuestos tóxicos, también utilizan el cianuro y compuestos asociados como el nitrógeno para su crecimiento (Cabello et al., 2018). En otras palabras, esta bacteria libera de cianuro y sus compuestos a las aguas residuales.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de cianuración incluye que sea reciclado y reutilizado. Sin embargo, esto no lleva a que sea eliminado totalmente durante las operaciones mineras donde siguen esta práctica. La destrucción del compuesto una vez que se ha recuperado el oro. En ese empeño de ser eliminado en su totalidad es necesario reconocer procesos químicos avanzados, de oxidación asociados con métodos foto-líticos que han funcionado para todas las especies cianuradas y por tanto son utilizados en remediación, sin que se deje por esto de seguir investigando alternativas incluso con mayor eficiencia (Young y Jordan, 1995) en el propósito común de recuperar ecosistemas que habían perdido los niveles de composición química permitidos en aguas y suelos.

Respecto a la recuperación de sitios mineros desde hace mucho tiempo abandonados (pasivos mineros huérfanos)³¹, siguen siendo importantes las investigaciones que desarrollan métodos novedosos de biotecnología, que logran resultados halagüeños respecto a procedimientos de remediación. La recuperación de ecosistemas que habían sido considerados contaminados al haber perdido los niveles permitidos en sus aguas y suelos poniendo

³¹ En Colombia, algunos de los pasivos ambientales tienen responsables inminentes, otros se podrían considerar “huérfanos”, muchos de los cuales se configuraron por la ausencia, en su momento, de regulaciones que los previnieran.

en peligro su fauna y flora es una actividad relevante en la conservación y preservación del medio ambiente.

Conclusiones

Está demostrado que el oro puede ser extraído de manera inteligente siguiendo una estricta planificación de procedimientos operacionales normalizados con base en rigurosos estudios mineralógicos acompañados de sofisticados ensayos metalúrgicos que establecen los porcentajes de recuperación y el comportamiento químico de los productos generados en diversos escenarios. Por tanto, es posible y obligatorio prever y prevenir cualquier vertimiento y lixiviado al ambiente.

Sin duda, la informalidad ha alimentado al mito de que toda la industria vierte tóxicos de manera irresponsable y sin posibilidad de remediación, dado que las prácticas no formales están unidas por historia en “ensayo y error”, han afectado al medio físico y son el centro de atención de los estudios que se traslapan con la minería formal dando origen a este mito.

Todas las operaciones auríferas utilizan agentes químicos para liberar el oro con el objetivo de extraer en lo posible la totalidad de este. La complejidad del proceso está condicionada por la génesis del metal y su presentación mineralógica. Las empresas mineras, siendo conscientes de las graves consecuencias en que pueden incurrir ante un pasivo minero mal tratado bajo su responsabilidad jurídica, asumen los elevados costos para tener unos estudios de factibilidad que no enmascaren la decisión correcta de abrir o no una operación minera.

Las operaciones mineras que requieren sustancias químicas y los productos generados pueden ser controlados previniendo y evitando afectaciones a fuentes hídricas superficiales y niveles freáticos de suelos, evitando riesgos en la salud pública. Se cuenta con una amplia información respecto a soluciones comprobadas y utilizadas por compañías mineras en países donde el sector minero es la base de su desarrollo económico, como Canadá y Australia, por supuesto, también en América Latina, en países como México, Chile, Perú y Brasil, logrando reducir cualquier riesgo de afectación.

Hoy la disponibilidad de equipos, el conocimiento de nuevas técnicas y los avances normativos facilitan un seguimiento más inclusivo y técnico,

que permite dejar la especulación y acudir a las nuevas tecnologías para asegurar el adecuado manejo de los depósitos de colas y estériles.

Adicionalmente, durante la operación minera puede ser monitoreada de manera permanente la composición química y mineralógica de los productos mineros utilizando analizadores de fácil uso y portabilidad como gama-espectrómetro, pistolas fluorescencia de rayos X —FRX—, radiómetro —visible-infrarroja— y Raman, gama espectrómetro, además de equipos pequeños de fácil instalación y operación como difracción de rayos X —DRX—, micro-FRX y Raman, permite contar con alertas tempranas, así como la selección de muestras que requieran ser enviadas a un sofisticado laboratorio siguiendo estrictos protocolos de control de calidad o la evaluación de una alerta.

Hoy es posible que los actores del ciclo minero puedan realizar muestreos independientes y análisis en los laboratorios certificados, verificando la calidad de agua con instrumentación convencional como absorción atómica, plasma óptica —OES— y masas, además de los sencillos analizadores de transmisión —T-XRF— para detectar cambios de los componentes de un sistema acuoso de los drenajes circundantes a una mina en operación o abandonada.

Estudios geoquímicos ambientales dan evaluaciones que permitan exigir correcciones de afectaciones o cierres de minas con malas prácticas que afecten al medio, así como establecer los parámetros que deben ser corregidos para mitigar la afectación generada por un determinado pasivo minero.

Finalmente, dentro de un proceso de extracción y procesamiento mineral se lleva cabo el manejo y disposición final de desechos por extracción mineral, tanto líquidos contando con plantas de procesamiento de aguas residuales, así como la deposición de sólidos secos y filtrados (colas y estériles) almacenados en sitios previamente seleccionados bajo estrictas normas técnicas de adecuación e impermeabilización (temas tratados ampliamente en los capítulos 2 y 6, principalmente).

Referencias

- Acosta, I. H., Ortega, A. D., José, I. S. M., Suárez, C., Diez, B. D., Hernández, A. N., Vigoa, C. y Calzada, S. P. (2015). *Estudio de patentes y tendencia en minerales auríferos*.
- Adams, M. (2016). “Emerging and Transformational Gold Processing Technologies”. En M. D. Adams (Ed.), *Gold Ore Processing* (pp. 985-990). (2.^a ed.). Elsevier. ISBN 9780444636584, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00055->
- Aguilar, N., Faria, M., Pedron, T., Batista, B., Mesquita, J., Bomfeti, C. y Rodrigues, J. (2020). *Isolation and characterization of bacteria from a brazilian gold mining area with a capacity of arsenic bioaccumulation*. Chemosphere, 240, N/A. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653519321101>
- Amaya, I., Bernal, D., Garnica, S., Reslen, M. y Correa, R. (2013). Improved roasting of some Colombian gold ores. *Dyna*, 80(178), 70-77.
- Asamoah, R., Amankwah, R. y Addai-Mensah, J. (2014). *Cyanidation of Refractory Gold Ores: A Review*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4772.6407>.
- Aylmore, M. G. (2016). “Alternative Lixiviants to Cyanide for Leaching Gold Ores”. En M. D. Adams (Ed.), *Gold Ore Processing* (pp. 447-484) (2.^a ed.). Elsevier. ISBN 9780444636584, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00027-X>.
- Azañero, A., Núñez, P., Aramburú, V., León, E., Quiñones, L., Cabrera, M., Cerrón, J. y Alarcón, J. N. A. (2009). Factores que afectan la selección del proceso metalúrgico para beneficiar minerales complejos de oro. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 12(24), 49-55.
- Bell, R. T. (1996). “Sandstone uranium”. En O. R. Eckstrand, W. D. Sinclair y R. I. Thorpe (Eds.), *Geology of Canadian mineral deposit types* (pp. 212-219). Geological Survey of Canada.
- Bello, S., Nasiru, R., Garba, N. N. y Adeyemo, D. J. (2019). Carcinogenic and non-carcinogenic health risk assessment of heavy metals exposure from Shanono and Bagwai artisanal gold mines, Kano state, Nigeria. *Scientific African*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00197>
- Betancur-Corredor, B., Loaiza-Usuga, J. C., Denich, M. y Borgemeister, C. (2018). Gold mining as a potential driver of development in Colombia:

- Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 199, 538-553. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.142>
- Borgese, L., Bilo, F., Bontempi, E., Seralessandri, L., Cinosi, A., Siviero, G. y Depero, L. E. (2013). *Total Reflection X-Ray Fluorescence (TXRF) spectroscopy for environmental and biological analysis*. 16th International Congress of Metrology, 10010. <https://doi.org/10.1051/metrology/201310010>
- Brooks, W. E., Sierra-Giraldo, J. A. y Palacios, F. M. (2015). Green Gold-Dirty Gold, Tadó, Dept. Choco, Colombia. *Natural Resources*, 06(11), 534-542. <https://doi.org/10.4236/nr.2015.611051>
- Brooks, W, Schwörbel, G. y Castillo, L. (2013). Capítulo 10. "Amalgamation and Small-Scale Gold Mining in the Ancient Andes". En N. Tripcevich y K. J. Vaughn (Eds.), *Mining and Quarrying in the Ancient Andes*. Springer: Nueva York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5200-3>
- Cabello, P., Luque-Almagro, V. M., Olaya-Abril, A., Sáez, L. P., Moreno-Vivián, C. y Roldán, M. D. (2018). Assimilation of cyanide and cyano-derivatives by *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT5344: From omic approaches to biotechnological applications. *FEMS Microbiology Letters*, 365(6). <https://doi.org/10.1093/femsle/fny032>
- Cáceres, G. (2001). Impacto ambiental de la minería del oro. *Rev. Met. UTO, Oruro*, 22, 19-28.
- Carranza-López, L., Caballero-Gallardo, K., Cervantes-Ceballos, L., Turizo-Tapia, A. y Olivero-Verbel, J. (2019). Multicompartment Mercury Contamination in Major Gold Mining Districts at the Department of Bolívar, Colombia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 76(4), 640-649. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00609-w>
- Carrasco, O. H. (2016). Concentración gravimétrica de menas auríferas. *Revista Metalúrgica*, 38, 38-50.
- Castaño-Dávila, D. L., Hernández-González, J. S., Molano-Mendoza, J. C. y Rodríguez-Vargas, A. I. (2019). Mineralogía y microtermometría de inclusiones fluidas de la veta con mineralización Au-Ag de la mina La Aurora en la parte norte del Distrito Minero Zaragoza-Segovia Remedios (DMZSR), Colombia. *Boletín de Geología*, 41(3), 107-125. doi: 10.18273/revbol.v41n3-2019005.
- Cervera-Acosta, J. M., Neira-León, G., Molano-Mendoza, J. C. y Prieto-Rincón, G. (2008). Caracterización mineralógica y química de los

- depósitos de relaves (colas de proceso) en los sectores auríferos de Cueva Loca (Buga) y El Retiro (Ginebra-Guacarí), departamento del Valle del Cauca. *Geología Colombiana* n.º 33.
- Chapman, E., Moore, C. y Campbell, L. (2019) Native Plants for Revegetation of Mercury and Arsenic-Contaminated Historical Mining Waste-Can a Low-Dose Selenium Additive Improve Seedling Growth and Decrease Contaminant Bioaccumulation? *Water Air Soil Pollut*, 230, 225. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4267-x>
- Chopard, M., Mermillod-Blondin, P. y Benzaazoua, M. (2019). Environmental Impact of Mine Exploitation: An Early Predictive Methodology Based on Ore Mineralogy and Contaminant Speciation. *Minerals*, 9(7), 397. <https://doi.org/10.3390/min9070397>
- Cordy, P., Veiga, M. M., Salih, I., Al-Saadi, S., Console, S., García, O., Mesa, L. A., Velásquez-López, P. C. y Roeser, M. (2011). Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Science of The Total Environment*, 410-411, 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.006>
- Coudert, L., Bondu, R., Rakotonimaro, T. V., Rosa, E., Guittonny, M. y Neculita, C. M. (2020). Treatment of As-rich mine effluents and produced residues stability: Current knowledge and research priorities for gold mining. *Journal of Hazardous Materials*, 386, 121920. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121920>
- DeVore, C. L., Rodriguez-Freire, L., Mehdi-Ali, A., Ducheneaux, C., Artyushkova, K., Zhou, Z., Latta, D. E., Lueth, V. W., Gonzales, M., Lewis, J. y Cerrato, J. M. (2019). Effect of bicarbonate and phosphate on arsenic release from mining-impacted sediments in the Cheyenne River watershed, South Dakota, USA. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 21(3), 456-468. <https://doi.org/10.1039/C8EM00461G>
- Díaz, S., Muñoz-Guerrero, M., Palma-Parra, M., Becerra-Arias, C. y Fernández-Niño, J. (2018). Exposure to Mercury in Workers and the Population Surrounding Gold Mining Areas in the Mojana Region, Colombia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), 2337. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112337>

- EPA-U.S. Environmental Protection Agency policy (1998). *Field Portable X-ray florescence*. Disponible en <https://clu.in.org/download/CHAR/verstate/xrf/Sci-55.pdf>
- EPA-U.S. Environmental Protection Agency policy (2005). *Resource Conservation and Recovery Act (RCRA)*.
- EPA-U.S. Environmental Protection Agency policy (2007a). *On-Site Screening of Heavy Metals in Soil and Sediments*. Disponible en <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/6200.pdf>
- EPA-U.S. Environmental Protection Agency policy (2007b). *Framework for Metals Risk Assessment*. Disponible en <https://www.epa.gov/sites/production/files/2013-09/documents/metals-risk-assessment-final.pdf>
- EPA-U.S. Environmental Protection Agency policy (2011). *Glossary of terms from Exposure Factors Handbook*. Disponible en <https://www.nrc.gov/docs/ML1400/ML14007A666.pdf>
- Fernández-Pérez, B. (2007). *Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina*. Tesis doctoral. Universidad de Oviedo, Begoña. Disponible en https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/31849/UOV0080TBFP_1.pdf?sequence=1
- García, O., Veiga, M. M., Cordy, P., Suescún, O. E., Molina, J. M. y Roeser, M. (2015). Artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: A successful case of mercury reduction. *Journal of Cleaner Production*, 90, 244-252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.032>
- Gil-Rodríguez, J. (2010). *Igneous petrology of the Colosa gold-rich porphyry system* (Tolima, Colombia). M. Sc. Thesis, University of Arizona, 51 p., Tucson, AZ. Disponible en <https://www.geo.arizona.edu/Antevs/Theses/GilRodriguezColombia.pdf>
- Güiza, S. (2018). "Base metal sulphides (2) Ore-processing control's hand held xrf application". En *Handheld XRF application with emphasis on mining operation*. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/332180818_Chapter_7_Base_metal_sulphides_2_Ore-processing_control's_hand_held_XRF_application
- ICAM, International Congress on Applied Mineralogy in the Minerals Industry y Dong, F. (2015). *Proceedings of the 11th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)*. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-13948-7>
- Gutiérrez, D. F. G. y Mendoza, J. C. M. (2009). Caracterización de zonas de alteración y fases intrusivas para el prospecto "Stock de Piedra

- Sentada” (Vereda Santa Lucía) Cauca, Colombia. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 8(1), 24-34.
- Jianu, D., Iordache, V., Soare, B., Petrescu, L., Neagoe, A., Iacob, C. y Orza, R. (2012). “The Role of Mineralogy and Geochemistry in Hazard Potential Assessment of Mining Areas”. En E. Kothe y A. Varma (Eds.), *Bio-geo-interactions in metal-contaminated soils* (pp. 385-416). Springer.
- Kimáková, T., Nasser, B., Issa, M. y Uher, I. (2019). Mercury cycling in the terrestrial, aquatic and atmospheric environment of the Slovak Republic. An overview. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 26(2), 273-279. <https://doi.org/10.26444/aaem/105395>.
- Kothe, E. y Schütze, A. (2012). “Heavy Metal-Resistant Streptomyces in Soil”. En *Bio-geo-interactions in metal-contaminated soils*. Springer.
- Leguizamón-Bejarano, R., Molano-Mendoza, J. C. y Carrasco-Rincón, E. (2009). Rasgos epidermales encontrados en las rocas ubicadas al sw de la vereda Santa Lucía, departamento del Cauca, Colombia, 34, 12.
- Leichliter, S. E. (2013). *Gold Deportment and Geometallurgical Recovery Model for the La Colosa, Porphyry*. Submitted in fulfilment of the requirements for the Masters of Science in Geology University of Tasmania. Disponible en <https://eprints.utas.edu.au/17094/>
- Lesage, G. (2011). *Geochronology, Petrography, Geochemical Constraints, and Fluid Characterization of the Buriticá Gold Deposit, Antioquia Department, Colombia*. A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science Earth and Atmospheric Sciences. University of Alberta. Disponible en <https://era.library.ualberta.ca/items/53ce6797-f1c3-49d8-9cd8-759d71d186a1>
- Lottermoser, B. G. (2010). “Introduction to MineWastes”. En *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts* (3.^a ed.). Springer: Nueva York.
- Lottermoser, B. G. (2017). “Predictive Environmental Indicators”. En *Metal Mining Environmental indicators in metal mining*. (2016). Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-319-42731-7
- Lozano, H. y Pulido, O. (1986). Situación actual del oro y la plata en Colombia: Geología, génesis, aspectos mineros, reservas y producción. *Boletín Geológico, Ingeominas*, 27(3), 1-56.

- Luque-Almagro, V. M., Moreno-Vivián, C. y Roldán, M. D. (2016). *Biodegradation of cyanide wastes from mining and jewellery industries*. Current Opinion in Biotechnology, 38, 9-13. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.12.004>.
- Marsden, J. O. y House, C. I. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction* (2.^a ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME): Littleton, CO, USA.
- Ministerio de Minas y Energía. (2003). *Glosario Técnico Minero*. Disponible en <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>
- Morrison, A., Swierczek, Z. y Gulson, B. (2016). Visualisation and quantification of heavy metal accessibility in smelter slags: The influence of morphology on availability. *Environmental Pollution*, 210, 271-281. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.11.030>.
- Murussi, W., Santos, H. Anjos, M., Días, A. y Geraldés, M. (2018). Gold provenance and characterization using micro x-ray fluorescence (μ XRF): Preliminary results/ proveniência e caracterização de ouro com micro fluorescência de raios x (μ XRF): resultados preliminares. *Journal of Sedimentary Environments*, 3(3), 155-165. <https://doi.org/10.12957/jse.2018.37905>.
- Muniruzzaman, M., Karlsson, T. y Kauppila, P. M. (2018). Modelling tools for the prediction of drainage quality from mine wastes. Improving the Environmental Properties, Utilization Potential and Long-Term Prediction of Mining Wastes. *Geological Survey of Finland*, 408, 27-42. <https://doi.org/10.30440/bt408.2>.
- Myagkaya, I., Gustaytis, M., Kirichenko, I., Saryg-ool, B. y Lazareva, E. (2019). Acid Mine Drainage Contamination of the Ur Impoundment: Environmental Geochemistry. *Web of Conferences*, 98, 09021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199809021>.
- Nicol, M. J., Fleming, C. A. y Paul, R. L. (1987). "The Chemistry of the Extraction of Gold in the Extractive Metallurgy of Gold". En G. G. Stanley, *South African Institute of Mining and Metallurgy*. Johannesburg.
- Novoa, O. F. R. (2009). *Mineral paragenesis of the Gramalote gold deposit, Colombia*. A thesis submitted to the Department of Geological Sciences and Geological Engineering in Partial Fulfillment of the requirements

- for the degree of Master of Science in Mineral Exploration. Queen's University Kingston, Ontario, Canadá.
- Olds, W., Bird, B., Pearce, J., Sinclair, E., Orr, M. y Weber, P. (2016). *Geochemical Classification of Waste Rock using Process Flow Diagrams*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4404.0564>.
- Ortiz-Delgado, H. (1991). *Geología minera del oro de veta*. Texto Guía. Bogotá, Colombia: Colciencias.
- Otsuki, A., Chen, Y. y Zhao, Y. (2014). Characterisation and Beneficiation of Complex Ores for Sustainable Use of Mineral Resources: Refractory Gold Ore Beneficiation as an Example. *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources*, 20(2), 126-135. <https://doi.org/10.5188/ijsmer.20.126>.
- Palacios-Torres, Y. Caballero-Gallardo, K. y 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>.
- Palacios-Torres, Y., de la Rosa, J. D. y Olivero-Verbel, J. (2020). Trace elements in sediments and fish from Atrato River: An ecosystem with legal rights impacted by gold mining at the Colombian Pacific. *Environmental Pollution*, 256, 113290. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113290>.
- Parbhakar-Fox, A. y Lottermoser, B. G. (2016). "Prediction of Sulfidic Waste Characteristics". En B. G. Lottermoser (Ed.). *Environmental indicators in metal mining* (pp. 35-53). Springer Berlin Heidelberg.
- Parbhakar-Fox, A., Fox, N., Jackson, L. y Cornelius, R. (2018). Forecasting Geoenvironmental Risks: Integrated Applications of Mineralogical and Chemical Data. *Minerals*, 8(12), 541. <https://doi.org/10.3390/min8120541>.
- Pirajno, F. (2010). Capítulo 10. "Hydrothermal Systems and the Biosphere". En *Hydrothermal processes and mineral systems*.
- Restrepo, V. (1952). *Estudio sobre las minas de oro y plata de Colombia*. Publicaciones del Banco de la República. Archivo de la economía nacional. Bogotá.
- Rojas Reyes, N. R., Echeverry-Vargas, L. y Cataño-Martínez, J. (2017). *Characterization by QEMSCAN and FE-SEM of ore bodies gold artisanally treated with mercury in Antioquia, Colombia*. Caracterización por

- QEMSCAN y FE-SEM de yacimientos de oro tratados artesanalmente con mercurio en Antioquia, Colombia. *Prospectiva*, 15(2), 107-116. <https://doi.org/10.15665/rp.v15i2.1199>.
- Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Marrugo-Madrid, S., Marrugo-Negrete, J. y Díez, S. (2017). Dietary human exposure to mercury in two artisanal small-scale gold mining communities of northwestern Colombia. *Environment International*, 107, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.06.011>.
- Sánchez-Peña, N., Narváez-Semanate, J., Pabón-Patiño, D., Fernández-Mera, J., Oliveira, M., Boit, K., Tutikian, B., Crissien, T., Pinto, D., Serrano, I., Ayala, C., Duarte, A., Ruiz, J. y Silva, L. (2018). Chemical and nano-mineralogical study for determining potential uses of legal Colombian gold mine sludge: Experimental evidence. *Chemosphere*, 191, 1048-1055. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.127>.
- Spurr, L. P., Watts, M. P., Gan, H. M. y Moreau, J. W. (2019). *Biodegradation of thiocyanate by a native groundwater microbial consortium*. <https://doi.org/10.7717/peerj.6498>.
- Stefaniak, J., Dutta, A., Verbinnen, B., Shakya, M. y Rene, E. R. (2018). Selenium removal from mining and process wastewater: A systematic review of available technologies. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 67(8), 903-918. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.109>
- Stevens, R. (2010). *Mineral Exploration and Mining Essentials*. Pakawau GeoManagement Inc. Port Coquitlam, British Columbia. Disponible en www.miningessentials.com
- Swierczek, S. (2019). *Automated mineralogy technique overview*. The Australian Institute of Geoscientists.
- The Northern Miner (2012). *Mining Explained* (11th ed.). Disponible en www.northernminer.com
- Veiga, M. M., Maxson, P. A. y Hylander, L. D. (2006). Origin and consumption of mercury in small-scale gold mining. *Journal of Cleaner Production*, 14(3-4), 436-447. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.08.010>
- Wang, Y., Liu, Z., Zhang, J., Mao, R. y Zhang, Y. (2020). Advanced converter sludge utilization technologies for the recovery of valuable elements: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 381. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120902>

- Wellmer, F.-W., Dalheimer, M. y Wagner, M. (2008). *Economic evaluations in exploration* (2.^a ed.).
- Westerhof, A. B., (2003). *Exploration Design and Strategy book*.
- Young, C. A. y Jordan, T. S. (1998). *Cyanide remediation: current and past technologies*. Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazard.
- Zhou, J., Jago, B. y Martin, C. (2004). *Establishing the Process Mineralogy of Gold Ores*. 16. Technical bulletin. sgs Mine.

Capítulo 4

Riesgos de la minería aurífera subterránea en cuanto a los recursos hídricos subterráneos y la estabilidad física del terreno

Oswaldo Ordóñez-Carmona*
Viviana Rivera-Pulido**

Resumen

El capítulo presenta los resultados de la búsqueda y revisión de artículos y reportes de investigación, cuyo eje temático en común son los riesgos que sobrevienen por la modificación de los recursos hídricos subterráneos y la estructura física del terreno en proyectos de minería aurífera bajo tierra. Los documentos citados sobre la temática de técnicas y tecnologías modernas para su control corresponden a publicaciones divulgadas desde el año 2017 en adelante.

* Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, Ph.D. y MSc en Geociencias de la Universidad de Brasilia, Brasil. Con experiencia en el sector público y privado en temas sociales, ambientales, de infraestructura y geológico-mineros. Hace más de veinte años, se desempeña como profesor en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Es director del grupo de investigación en Georrecursos. Minería y Medio Ambiente-GEMMA; es miembro de la junta directiva de la Sociedad Colombiana de Geología y participa en la Society of Economic Geologist como miembro asociado. Correo electrónico: oswaldo.geologo@gmail.com

* Ingeniera de minas. Experiencia en ordenamiento y planeamiento minero. Actualmente se desempeña como investigadora de la Universidad del Rosario. Correo electrónico: viviana.riverapulido@mail.com

La información que se expone le permite al lector reconocer varios de los riesgos que surgen en el desarrollo de la extracción de oro bajo tierra y la normatividad colombiana aplicable a cada uno de ellos; por otra parte, visibiliza algunas de las técnicas y tecnologías disponibles y en desarrollo para mitigar, prevenir y compensar los riesgos evidenciados. Finalmente, a partir de lo anterior se examinan dos afirmaciones relacionadas directamente a las temáticas centrales, o que guiaron la presente investigación, para esclarecer si estas son mitos o representan realidades de la minería aurífera colombiana, siendo estas últimas puntos de partida o retos sobre los cuales sería deseable investigar ulteriormente.

Se identifica que en Colombia existe muy poca información sobre las temáticas indagadas, pues la mayor parte de los estudios encontrados corresponden a trabajos desarrollados en Estados Unidos, Australia, China y Japón; como contribución frente a este vacío de conocimiento, la investigación proporciona información correspondiente al proyecto minero Soto Norte de propiedad de la empresa Minesa, la cual es producto de visitas realizadas en campo, con el acompañamiento de personal técnico y administrativo de la empresa, a las inmediaciones en donde se desarrollará el proyecto.

Palabras clave: inestabilidades geológicas, monitoreo geomecánico, control de suelos, manejo de cavernas, subsidencia minera, tecnología minera, sostenimiento minero, monitoreo hídrico e hidrogeológico, técnicas de remediación y estabilización de terrenos, normativa colombiana.

Introducción

La minería aurífera bajo tierra comprende una serie de actividades operativas que inciden en el entorno natural, particularmente sobre el agua subterránea o la estructura física del terreno, debido a que son los principales componentes que directamente se modifican a partir de su ejecución. De manera general, se puede extender este entendimiento a todo tipo de minería en la cual se extraen minerales desde interior de la corteza terrestre.

Es por ello que actualmente en Colombia existe gran preocupación desde el punto de vista ambiental, por la preservación de los diversos

ecosistemas intervenidos con minería, dado que la modificación de las condiciones hídricas y estructurales del medio juegan un papel trascendental en su conservación a corto y largo plazo, frente a lo cual informes técnicos en la materia lo han puesto en evidencia mediante diagnósticos en los que se destacan los daños y pasivos ambientales sobre el agua y la superficie terrestre, que ha causado la minería en sus diferentes ámbitos a lo largo del territorio colombiano (Controlaría General de la República et al., 2018; Misa, Tajdus y Sroka, 2018; Perez, 2013; Sun et al., 2019). Al respecto, es pertinente por el momento señalar que la extracción subterránea de oro requiere desarrollarse dentro de un contexto en el que su efecto sobre los componentes señalados sea sostenible, esto quiere decir que los riesgos, que surgen por su intrínseco impacto en las condiciones hídricas y estructurales del terreno, deben ser aceptables y controlados de acuerdo con los máximos estándares para la conservación ambiental y sobre la base técnica y tecnológica disponible en materia. Así, entonces, el primer paso de la investigación consiste en realizar una búsqueda bibliográfica en las bases de datos académicas sobre situaciones reales que permitan dilucidar cómo la minería impacta las condiciones hídricas y estructurales del terreno en donde se desarrolla, priorizando aquellos estudios que involucren la realidad colombiana.

Paralelamente a la problemática ambiental que surge por la modificación de las características subterráneas hídricas y estructurales del terreno, dentro de las excavaciones mineras subterráneas, estos dos componentes cobran relevancia en el campo de la seguridad laboral debido a que son factores que condicionan los procesos de inestabilidad al interior de las minas bajo tierra. En Colombia, de acuerdo con el reporte estadístico de las emergencias y fatalidades mineras que ocurrieron durante el año 2019, el 33,3% y el 39,5% respectivamente, ocurrieron por derrumbes del terreno circundante de los cuales hasta un 95,6% del total de los casos sucedieron en labores de minería subterránea. La explotación bajo tierra de oro ocupa el segundo lugar, después del carbón, en reportar el mayor número de eventualidades, con aproximadamente el 19% del total de las emergencias y fatalidades registradas en dicho año (Agencia Nacional de Minería, 2019; Alonso, Arcos y Echavarría, 2017; Motta-Pascuas, Ustariz-Durán y Ordóñez-Carmona, 2018). La presencia de agua subterránea y la auscultación de minas bajo tierra teóricamente configuran un escenario

en donde la ocurrencia de derrumbes, precedidos por el debilitamiento de las rocas y las estructuras de soporte o por el incremento o disminución de las fuerzas que condicionan la estabilidad del terreno, es factible, pero a su vez mediante la ingeniería se logran ejecutar proyectos mineros cada vez con mayor grado de seguridad laboral (Oteo Mazo, 2016; Palmstrom y Stille, 2007; Zhang, Jiao y Wang, 2014). Por lo anterior, la investigación también está orientada a reunir información técnica-académica para comprender de qué manera las condiciones hídricas y estructurales del terreno ponen en riesgo la integridad del personal en las minas subterráneas de oro, haciendo énfasis en la investigación que exista sobre la realidad colombiana al respecto.

Hasta este punto se puede precisar que la investigación, en un primer plano, pretende recopilar información en torno a los riesgos que surgen en la minería aurífera bajo tierra en relación con las condiciones hídricas subterráneas y la estructura física del terreno, y que recaen en el entorno natural y la seguridad del personal minero, a nivel nacional y de manera subsidiaria internacionalmente, pues, como se expuso, estos son dos asuntos relevantes en cuanto a los impactos ambientales y la seguridad del personal en la minería de oro subterránea en el país.

Junto con la identificación de los riesgos, como se plantea anteriormente, la investigación está orientada a la identificación de las técnicas y tecnologías modernas, que ofrece la ciencia y la investigación para el control de los riesgos en cuestión, y a su vez se pretende señalar la normativa colombiana que rige para cada uno de ellos; lo anterior con el objetivo de dilucidar cómo dichos riesgos son afrontados y qué opciones se pueden explorar para mejorar o continuar avanzando hacia la preservación del ambiente y el cuidado del personal minero colombiano.

Finalmente, una vez presente la información, dentro de las conclusiones se analizan, mediante un examen retrospectivo de lo expuesto, las siguientes dos afirmaciones: 1) la minería aurífera bajo tierra impacta los recursos hídricos subterráneos, desconociendo su importancia y la necesidad de tomar medidas al respecto; y 2) la minería aurífera subterránea desconoce el hundimiento y colapso del terreno y además no existen medidas al respecto. Con lo anterior se pretende categorizar si estas afirmaciones pertenecen al conjunto de información de carácter mítico o, por el contrario, describen una realidad. El análisis de cada afirmación

se realiza, por una parte, teniendo en cuenta el concepto en sí mismo de minería subterránea de oro, tal y como se plantea, y posteriormente el mismo concepto haciendo alusión específicamente al contexto minero aurífero colombiano.

Para lo anterior, el estudio se llevó a cabo siguiendo la metodología para la elaboración de un artículo de revisión; así mismo, parte de la información consignada sobre las temáticas abordadas proviene de la realización de visitas concertadas con la empresa Minesa, en las instalaciones administrativas y el terreno en donde se pretende ejecutar el proyecto minero Soto Norte, considerado actualmente de interés nacional por la magnitud espacial y económica que representa; esto último como un ejemplo a nivel nacional en el cual se analizaron cada uno de los aspectos de la investigación con el objetivo de poner en conocimiento la situación en que se plantea desarrollar el proyecto. Igualmente, se aporta desde la experiencia de los autores en las múltiples minas subterráneas visitadas en estos años.

El capítulo se divide en dos bloques en los que se tratan, separadamente, los riesgos asociados a la modificación de las condiciones hídricas subterráneas y los que corresponden al cambio de la estructura física del terreno frente a las construcciones mineras subterráneas; en cada uno de ellos se exponen los riesgos identificados, la normativa colombiana aplicable a cada uno de estos y las técnicas y tecnologías modernas sujetas a investigación mediante las cuales es posible realizar un control de estos.

1. Metodología

Los resultados que se obtuvieron en la presente investigación siguieron la metodología para la elaboración de un artículo de revisión; la búsqueda de información en las bases de datos y fuentes fiables se ejecutó conforme a un compendio de 72 términos y frases en el idioma inglés y español; el rango temporal seleccionado para la revisión comprende principalmente el periodo 2014-2019, filtrando para los resultados de la temática de técnicas y tecnologías modernas los artículos publicados solamente desde 2017 en adelante. Los hallazgos sintetizan la información publicada sobre los temas en cuestión y provienen de fuentes avaladas por entidades gubernamentales, empresariales y académicas, así como también de las visitas que se realizaron al proyecto minero Soto Norte, caso de estudio integrado al desarrollo de la investigación.

2. Riesgos por la alteración hídrica subterránea y técnicas de manejo ambiental

La alteración de las condiciones del terreno por la minería bajo tierra trae consecuencias sobre la calidad y cantidad disponible de los recursos hídricos subterráneos, cuando las operaciones se desarrollan dentro de las inmediaciones y proximidades de los reservorios de agua subterránea o acuíferos, convirtiéndose en afectaciones críticas cuando no se adoptan medidas de protección ambiental con rigor técnico. La construcción de cavidades a profundidad puede modificar sustancialmente las rutas de recarga y descarga de los acuíferos (Kemp, Bond, Franks y Cote, 2010) y a su vez la constitución química natural, debido a que puede ponerlos en contacto con aguas superficiales y otros tipos de rocas que alteran su composición intrínseca (Zuo, Wang y Li, 2019). Por consiguiente, se deben realizar estudios previos que caractericen el régimen hidrogeológico en la zona de influencia del proyecto minero, así como también sobre la calidad del agua subterránea, que sirvan como referentes para establecer las medidas de prevención, mitigación, remediación y compensación ambiental o, caso contrario, para comprender por qué el proyecto minero resulta inaplicable dada la afectación que supone al recurso hídrico.

En materia, recientes investigaciones proponen nuevas metodologías para la elaboración del estudio hidrogeológico en proyectos de minería subterránea. En Liu et al. (2019) se analiza la forma en que el nivel freático de la zona a escala local y regional, es afectado por las actividades extractivas subterráneas. Otras investigaciones sugieren analizar la capacidad de recarga natural de los acuíferos, suponiendo la construcción de las diferentes obras mineras en el terreno, y con base en los resultados, establecer las medidas de protección adecuadas (Chi, Zhang, Fan, Zhang y Liu, 2019; Fan et al., 2019). Estos métodos son aplicables para analizar el alcance ambiental de los proyectos mineros por ejecutarse y en desarrollo, pero deben ser complementadas con otras metodologías, en los casos en los cuales se han constituido pasivos ambientales sobre el componente hidrogeológico que requieren ser remediados.

Al respecto, se plantea como alternativa la construcción de acuíferos artificiales empleando las cavidades posteriores a la explotación como medio de almacenamiento. El control del reservorio antropogénico exige inspecciones continuas sobre la calidad del agua, ya que puede variar, por

ejemplo, en periodos atmosféricos de alta precipitación imposibilitando su consumo (Cánovas, Macías y Olías, 2018; Ma, Zhang, Li, Fan y Zhao, 2009). Por lo tanto, el desarrollo de este tipo de medidas requiere un análisis previo riguroso y un compromiso constante por parte del operador minero y de las entidades de control ambiental.

La reutilización del drenaje minero, la aplicación de métodos extractivos que minimicen la cantidad del agua que fluye hacia los túneles y el uso de revestimientos para impermeabilizar el contorno de las cavidades mineras son otras de las medidas que se proponen para mitigar y compensar el descenso del nivel freático (Drahansky et al., 2016; Li, 2016; Loredó, 2019). Otro mecanismo recientemente contemplado que tiene el mismo objetivo, consiste en la construcción de pozos de inyección o bombeo que regulen la entrada y la salida del recurso hídrico en el área de explotación; esta metodología que aún se encuentra en desarrollo señala, por una parte, que es viable captar el agua y disponerla nuevamente en el entorno natural (Biswas y Sharma, 2017); en cuanto a la recarga artificial de acuíferos mediante la inyección de agua, solo es aplicable a cuerpos que se encuentren cerca de la superficie terrestre; en el caso de los reservorios profundos, la inyección del recurso puede ocasionar hundimientos significativos en el suelo, por lo cual se recomienda evaluar detalladamente su aplicabilidad (Anandan, Sahay y Karthikeyan, 2010; Zeng, Zheng y Xue, 2019).

En cuanto a las técnicas en desarrollo, para la recuperación de la calidad de los flujos que provienen de los reservorios hídricos subterráneos, se avanza hacia el uso de sustancias químicas y agentes biológicos para eliminar los contaminantes presentes en el agua (Li, Chen, Xie, Liu y Xiong, 2019; Ruiz, Thomson, Cerrato y Rodríguez-Freire, 2019). Se trata de una técnica experimental que se basa en la transformación molecular de las sustancias a través de interacciones físicas y químicas que remueven los elementos contaminantes en el agua sin afectar el ecosistema tratado a corto y largo plazo (véase capítulos 2 y 3).

Al respecto de la remediación de aguas subterráneas, novedosos estudios proponen incorporar nanopartículas artificiales de manera *ex situ* para restaurar los recursos hídricos que han sido afectados por las actividades mineras. En África, investigaciones enfocadas en la remediación o eliminación de metales traza en aguas contaminadas a partir de nanopartículas permiten validar las ventajas, aplicabilidad y oportunidad

de mejora en el campo de la minería y el ambiente a partir de este novedoso mecanismo; la metodología consiste en la reparación *ex situ* de aguas subterráneas contaminadas por elementos tóxicos (As, Cr, Cu, Fe, Hg, Zn, Mn, Ni, Zn) a partir de magnetita sintética y empleando los principios del superparamagnetismo en un sistema en el cual se hace circular el agua contaminada a remediar. El desarrollo de esta técnica muestra grandes ventajas para la reparación de aguas subterráneas, sin embargo, aún se continúan realizando estudios orientados a lograr mejores propiedades de la magnetita sintética a menores costos y con menores efectos adversos (Usman, Yusoff, Raoov y Hodgkinson, 2019).

Otras pruebas experimentales que han utilizado elementos trazadores isotópicos y químicos, para examinar la calidad y variación del agua en los diferentes ecosistemas, manifiestan que esta práctica, a pesar de tener algunas limitaciones, su creciente aplicación ha demostrado su eficiencia para evaluar el impacto ambiental sobre los recursos hídricos subterráneos (Peng, Li y Wang, 2015; Pouliaris, Perdikaki, Foglia, Schüth y Kallioras, 2018; Yang, Guo y Jiao, 2018; Yang, Meng y Jiao, 2018).

En este punto es necesario nuevamente recalcar que la aplicación de las medidas señaladas en los anteriores párrafos se hace con base en un modelo hídrico e hidrogeológico a escala local y regional de la zona en donde se construirá la mina. La importancia de la representación espacial de los ríos, lagos, acuíferos, conductos de recarga-descarga y demás cuerpos de agua reside en que facilita la selección de los mecanismos más apropiados para conservar la disponibilidad a corto y largo plazo del agua (Vargas Martínez, 2006). De ahí la importancia de la elaboración de un modelo acertado, mediante la recolección de información en campo de las condiciones naturales del agua en la zona en donde se proyecta la construcción de la mina. De lo anterior, como ejemplos en Colombia, se encontró que los proyectos de extracción minera como La Colosa, Buriticá, Quebradona, Segovia y Soto Norte han planeado y ejecutado estudios muy profundos para evaluar detalladamente el componente hidrogeológico dentro del área de influencia de la actividad minera.

El proyecto aurífero a cielo abierto de La Colosa, en el Tolima, es un ejemplo que merece destacarse en el ámbito de la evaluación del recurso hídrico en proyectos de minería, puesto que para su realización se llevaron a cabo estudios geológicos, hídricos e hidrogeológicos muy detallados y

robustos, a partir de los cuales se creó el modelo hidrogeológico conceptual presentado para el periodo 2011 a 2013; particularmente, a través de técnicas como el uso del ion cloruro e isótopos ambientales, fue posible delimitar con rigor técnico las variables hidrológicas y caracterizar el recorrido del agua en el medio subterráneo del macizo rocoso, a la vez que fue posible efectuar el monitoreo de aguas subterráneas y superficiales durante el periodo 2012-2017 (UNALMED, 2017).

Estudios similares se han ejecutado recientemente para la consolidación de los proyectos Buriticá y Quebradona en Antioquia, este último para la extracción de cobre, en los cuales se han evaluado minuciosamente el componente hidrogeológico dentro del área de influencia de la actividad minera que se proyecta. Adicionalmente, el proyecto de cobre que se planea subterráneo incorpora suficientes datos y exploraciones que impulsan la modelación hidrogeológica colombiana a tener altos estándares técnicos y ejemplares para la evaluación ambiental en proyectos en zonas de montaña o tropicales.

Por su parte, en el reporte técnico del proyecto de oro Segovia, presentado por la empresa minera Gran Colombia Gold, se menciona que, a finales del año 2019, la empresa inició la construcción de tres pozos de 700 metros y uno de 100 metros de longitud ubicados estratégicamente a lo largo del yacimiento de interés. A partir de los registros piezométricos del nivel de agua existente dentro de las perforaciones, se construirá un modelo representativo del gradiente hidráulico regional para analizar el curso y la disposición natural del agua en el área de influencia del proyecto (Gran Colombia Gold y SRK Consulting Inc, 2019). De esta manera, junto con otros estudios adelantados, la empresa evaluará las condiciones naturales del agua en la zona que abarcará el proyecto, con lo que podrán establecer las medidas de protección adecuadas para conservar la calidad y disponibilidad del agua en la región durante y posteriormente al funcionamiento de la mina.

Así mismo, el estudio ambiental hidrogeológico llevado a cabo por la empresa Minesa para la propuesta minera en Soto Norte comprende resumidamente más de 1.300 perforaciones de sondeo, 605 muestras isotópicas, 25 pruebas de infiltración, 93 exploraciones magneto-telúricas, más de 12.000 m de exploración de refracción sísmica, 90 calicatas, 3 pruebas de bombeo, la adaptación aproximada de 164 puntos de control y

monitoreo de agua de las quebradas y acuíferos a ser interceptados, y otra cantidad significativa de ensayos realizados en laboratorio para determinar las propiedades físicas, químicas e hidráulicas del terreno. A partir de toda la información recolectada mediante dichos procedimientos en campo y en laboratorio, se construye el modelo hidrogeológico que aquí presentamos de manera conceptual (figura 1).

Esta imagen representa sutilmente todo el trabajo de ingeniería que se concretó además con la ayuda de diferentes *softwares* especializados con los que virtualmente se recrea el proyecto; a partir de su análisis cuantitativo y cualitativo se determinaron minuciosamente todas las medidas y planes de acción para que el proyecto sea ambientalmente aceptado por las autoridades competentes. Una de estas medidas, consideradas de mayor relevancia por su complejidad, es la inyección de cemento en el contorno de las excavaciones en sitios estratégicos, con lo cual se disminuirá drásticamente la cantidad de agua a ser interceptada por el proyecto; la proporción que logra infiltrarse dentro de las excavaciones mineras será evacuada, tratada y dispuesta nuevamente en el ambiente siguiendo todos los protocolos y estándares de conservación ambiental (Minesa, 2020).

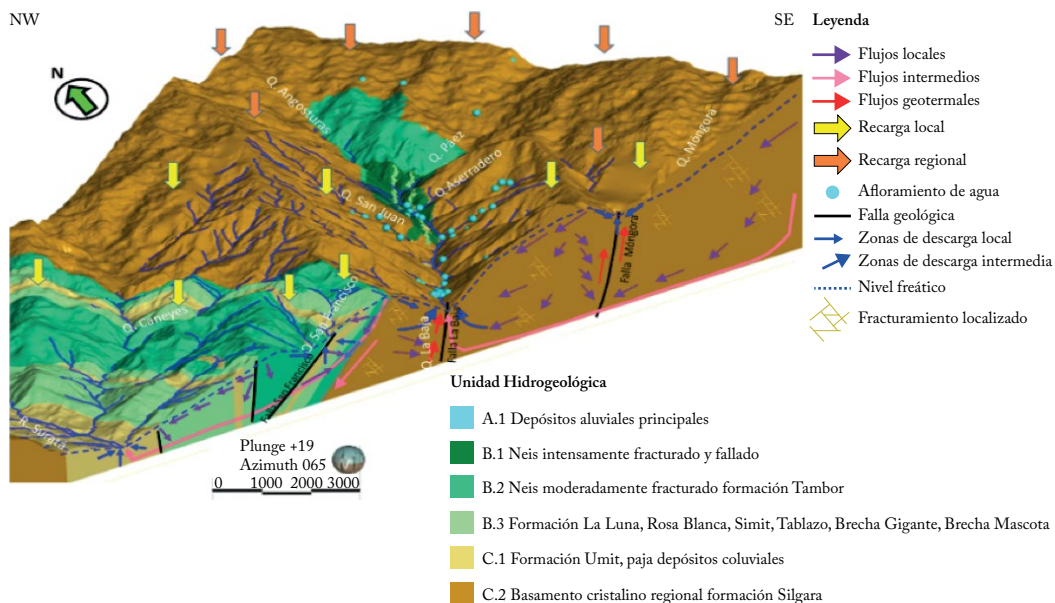


Figura 1. Modelo hidrogeológico conceptual. Proyecto minero Soto Norte

Fuente: Minesa (2020).

A pesar de los esfuerzos puntuales constatados de las empresas mineras, los resultados de la investigación indican que en Colombia existe muy poca información pública sobre los recursos hídricos subterráneos a lo largo del territorio nacional y su relación con la extracción aurífera subterránea, que permitan gestionar eficientemente el recurso natural. El informe publicado por el IDEAM en 2015 señalaba que de los 61 sistemas de acuíferos identificados para el año 2014, solo 11 de ellos contaban con un nivel de conocimiento hidrogeológico suficiente, mientras que los 50 sistemas restantes tenían información entre aceptable e insuficiente; de los 11 sistemas de acuíferos con un nivel de conocimiento hidrogeológico suficiente, solo en 7 de ellos se realizan actividades de monitoreo continuo; de esta manera, el instituto tuvo que replantear su metodología para conformar una Red Básica Nacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas, que para el año 2022 proyecta consolidar una base de datos histórica sobre la variación del régimen de aguas subterráneas en las diferentes zonas del país que permitan proteger y aprovechar dichos recursos de la forma más conveniente (IDEAM, 2015). En el Estudio Nacional del Agua 2018 presentado por la misma entidad, se delimitan algunos de los sistemas acuíferos prioritarios localizados en ciertas regiones de Colombia (IDEAM, 2019). Ante esto, a pesar de que los estudios hallados son pocos y recientes, constituyen avances significativos en materia, que facilitan encaminar y articular futuras investigaciones para generar conocimientos válidos que posibiliten la gestión eficiente del recurso hídrico en Colombia.

En cuanto a la normatividad vigente correspondiente al manejo ambiental hídrico subterráneo, se encuentra que dentro de los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental en proyectos de explotación minera se solicitan estudios geológicos y geofísicos para caracterizar e inventariar las formaciones rocosas a profundidad, que junto con la realización de sondeos y pruebas isotópicas, hidrogeoquímicas y de potencialidad de drenaje ácido, se realicen los modelos hidrogeológicos y de flujos de agua subterránea para determinar las medidas de manejo y compensación ambiental (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA], 2016).

Así mismo, la autoridad exige efectuar la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación de acuerdo con la metodología estandarizada “Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad

intrínseca de los acuíferos a la contaminación”, descrita en Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014) y en Vargas Quintero (2010). En el caso de que el agua subterránea interferida por el proyecto minero se utilice para el desarrollo del mismo, se debe realizar con antelación el estudio de exploración de aguas subterráneas, previo permiso con el cual se deberá soportar la solicitud de concesión de aguas subterráneas ante la autoridad competente, con el objetivo de validar técnica y legalmente dicha acción a ser ejecutada (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA], s. f.).

Finalmente, y en relación con el siguiente apartado del capítulo, debe destacarse que el fenómeno de subsidencia, el cual es común en explotaciones de carbón u obras subterráneas con deficientes procesos constructivos (en donde en algunos casos existe la presencia de suelos o sedimentos poco consolidados), se da como consecuencia de la alteración de los cuerpos de agua subterráneos, pues la variación del volumen del suelo al desecarse, cuando el agua migra hacia las cavidades mineras o cambia su curso natural, produce hundimientos que pueden afectar drásticamente la superficie del terreno (Kim, Lu y Kaufmann, 2019; Othman et al., 2018). En el siguiente ítem, además de profundizar un poco más acerca de la subsidencia minera, expondremos algunas técnicas y tecnologías disponibles y en desarrollo para enfrentar este tipo de afectaciones en el ambiente y la sociedad por la minería aurífera subterránea.

3. Riesgos por la alteración geoestructural del terreno

3.1. Subsidencia o hundimiento del terreno

La aparición de depresiones en la superficie procede de la existencia de cavidades al interior de la corteza terrestre, que al colapsar deliberadamente producen desplazamientos verticales en los materiales rocosos que se encuentran suprayacentes a las obras mineras. Se generan hundimientos a causa de la minería subterránea cuando los materiales en los que se construyen o que soportan las excavaciones mineras se deterioran gradualmente, induciendo movimientos paulatinos en el terreno que desembocan en la ocurrencia de derrumbes y, subsecuentemente, en el cambio morfológico de la superficie (Xia et al., 2019). De esta manera, la inestabilidad de las excavaciones es una de las principales eventualidades que inciden en la

conformación de hundimientos en la superficie terrestre, sin embargo, es producto a su vez de otras condiciones en el terreno que determinan el proceso generalizado de subsidencia.

Aydan y Ito investigaron el efecto de la profundidad de las cavidades mineras y el agua subterránea en el enterramiento del suelo en un área bajo la cual se ubican minas abandonadas en la región de Tokai, Japón. Se cuestionó la hipótesis que sustenta que el hundimiento del terreno es despreciable cuando se extraen yacimientos de poco espesor y gran profundidad, ya que la roca que se fractura y converge hacia los espacios vacíos rellena con gran volumen dichos lugares impidiendo el desplazamiento del piso; esta idea se complementa con la premisa de que el agua que fluye y ocupa estos espacios contribuye a la estabilidad de la superficie terrestre. Los autores concluyeron que el movimiento indeseado se atribuía principalmente al flujo de corrientes de agua subterránea, pues debilitan las estructuras de sostenimiento dejadas para estabilizar las excavaciones a largo plazo, fracturando y degradando la roca a su paso (Aydan e Ito, 2015). Estos resultados permiten dilucidar que la inestabilidad del terreno aumenta por la presencia de flujos de agua y ocurre de manera gradual y acumulativa hasta reproducir la subsidencia indeseada del suelo en el área minera.

Salmi, Karakus y Nazem investigaron el papel del “ablandamiento” gradual de los macizos rocosos y los efectos del deterioro de los trabajos mineros en la conformación de hundimientos a largo plazo. A través de un *software* numérico mediante el cual simulaban cambios en el terreno, estimaron la forma y duración de la zona de colapso en un tiempo de 190 años después del cese de las actividades extractivas (Salmi, Karakus y Nazem, 2019). Este aporte resulta interesante ya que brinda la posibilidad de establecer las medidas de acción para manejar el riesgo de hundimiento a largo plazo. Para mitigar esto y como medida de prevención, investigaciones recientes destacan la efectividad del uso de los residuos sólidos de construcción y demolición como materiales de relleno en los espacios dejados por la minería, con el objetivo de reducir la magnitud y la tasa de deterioro de la superficie terrestre (Diao et al., 2019; Li, Zhang, Sun, Wu y Zhou, 2019; Liu y Guo, 2019; Lu et al., 2018).

La ocurrencia de estos desplazamientos en el terreno no se limita al periodo de tiempo o espacio en que funciona la mina. Investigadores

polacos interpretaron la ocurrencia de tres importantes hundimientos que tuvieron lugar entre el 2017 y 2019, veinticinco años después del cierre de las minas en el distrito de cobre en Baja Silecia-Polonia; se llevaron a cabo medidas de remediación que consistieron en la incorporación de losas de hormigón armado y capas de relleno de arena-humus para restaurar las zonas degradadas (Mirek, Piasecki y Kowalczyk, 2019). En primera instancia, las consecuencias del hundimiento del terreno recaen sobre las construcciones civiles y los terrenos ubicados inmediatamente por encima del proyecto extractivo (Diao et al., 2019; Liu y Guo, 2019); seguidamente, los conflictos sociales que se desencadenan por la eventual desestabilización del medio se relacionan con el uso y ocupación de tierras por parte de las comunidades aledañas al proyecto (Ruiz, Correa, Gallardo y Sintoni, 2014). En este sentido, es imperativo emplear técnicas de soporte y acciones como el retrolleado, que, como se mencionaba, consiste en el uso de materiales de relleno dentro de las cavidades mineras ya explotadas para prevenir la degradación del terreno y los conflictos que se derivan ulteriormente.

El uso de vehículos aéreos no tripulados e imágenes satelitales de alta resolución para monitorear las zonas de subsidencia minera se están empleando con gran éxito en la actualidad, ya que son sistemas más ágiles, precisos y de menor costo que los métodos topográficos y cartográficos convencionales de medición. El funcionamiento básico de este tipo de tecnologías consiste en la toma de fotografías aéreas posicionadas geográficamente con una resolución a escala milimétrica, que permite medir el desplazamiento del terreno a través de un *software* de análisis fotogramétrico (Hejmanowski, Malinowska, Witkowski y Guzy, 2019; Morgan, Colombo y Meloni, 2019; Suh y Choi, 2017; Voina, Palamariu y Neuner, 2016). La tecnología espacial es, sin duda, una herramienta valiosa a la hora de identificar la modificación de la superficie terrestre por el desarrollo de proyectos de minería subterránea, ya que, por una parte, puede ocurrir en lugares poco accesibles o transitables vía terrestre que imposibilitan la toma de información de campo para analizar las medidas de contención necesarias; o, de otro modo, el movimiento puede abarcar grandes zonas o áreas requiriendo una logística costosa y demorada frente a la posibilidad del uso de drones para recolectar la información en campo de manera más ágil y eficiente.

En algunas ocasiones, el movimiento del suelo se ha registrado más allá del área que en superficie delimitan los trabajos mineros bajo tierra; la sismicidad inducida por la minería de gran magnitud espacial ocurre cuando el terreno colapsa a profundidad de modo rápido y explosivo, generando una onda de choque que se extiende de manera imperceptible y paulatina, más allá del lugar en donde existen las labores mineras (Xu et al., 2019; Zembaty et al., 2015). Este fenómeno, aunque ocasiona los mismos efectos que la subsidencia, se caracteriza por una onda sísmica que surge de manera espontánea cuyos efectos espaciales en el terreno son trazables luego de su ocurrencia.

El seguimiento a los efectos de la sismicidad inducida se ha llevado a cabo a través de imágenes satelitales captadas en tiempo real, mediante las cuales se inspeccionan las zonas en proceso de afectación (Malinowska, Witkowski, Guzy y Hejmanowski, 2018). Otros estudios sobre la temática concurren en la recolección de información en campo, a través de sensores sísmicos y su posterior análisis enfocado a establecer la relación, entre la velocidad de la onda con la magnitud del impacto generado, usando un modelo tridimensional a escala de la localización y dimensión de tales eventos (Barthwal y Van der Baan, 2019; Mendecki, 2019; Wang, Li y Shang, 2019). De esta manera, es posible obtener información sobre las características dinámicas del fenómeno para establecer medidas de prevención oportunas en proyectos de minería aurífera subterránea de gran magnitud.

Finalmente, la revisión bibliográfica en referencia a este apartado puso en evidencia una línea de estudio poco investigada, en la que las consecuencias del riesgo de subsidencia pueden ser toleradas o asimiladas técnicamente. Un estudio en el que se analizó la correlación entre el movimiento de la superficie del terreno a causa de la minería subterránea con las deformaciones paulatinas en los edificios suprayacentes al proyecto demuestra a partir de los resultados que, como medida de prevención, se puede optar por construir cimentaciones con sistemas estructurales de soporte diseñados en función de la posible deformación del suelo producto de la subsidencia (Szojda y Wandzik, 2019). El artículo constituye un aporte relevante en la materia, ya que en él se describen las pautas generales para el diseño estructural de obras urbanas como viviendas familiares, edificios de pequeña y gran altura con y sin sótano, en terrenos en donde las construcciones coexisten con las actividades mineras subterráneas de la zona.

3.2. Colapso de las excavaciones subterráneas

La explotación minera subterránea se puede definir de manera simple como la construcción, al interior de la corteza terrestre, de excavaciones mediante las cuales es posible acceder y extraer a superficie un yacimiento mineral localizado a profundidad. De esta manera, dichas obras se construyen atravesando capas de materiales rocosos que poseen diversas características físicas, químicas y mecánicas (Jordá-Bordegore, 2017); sumado a esto, la heterogeneidad del medio de construcción se acrecienta por las condiciones geoestructurales, hidrogeológicas y tectónicas naturales presentes en el terreno (González, Ferrer, Ortuño y Oteo, 2002). Ante esta variabilidad, la ingeniería ha definido mediante el término *macizo rocoso* el objeto de estudio que presenta todas estas condiciones que han de ser analizadas conjuntamente para establecer los mecanismos de estabilización de las obras mineras o del terreno circundante.

El concepto específicamente hace referencia a un objeto de estudio complejo, constituido esencialmente por materiales rocosos cuyas condiciones naturales varían en el tiempo por la construcción de múltiples obras subterráneas que pueden provocar su desestabilización. Los diferentes mecanismos de inestabilidad del terreno se describen a partir de dos conceptos fundamentales de la mecánica de rocas: la resistencia y deformación de macizos rocosos. El primero hace referencia a la capacidad del terreno a no fallar o colapsar cuando en él actúan tensiones en diferente magnitud, dirección y espacio; el segundo término indica el modo en que ocurre el mecanismo de desestabilización en función de las fuerzas, es decir, si el terreno se deforma considerablemente antes de fallar o colapsar, o si por el contrario sucede de manera repentina y explosiva (Jordá-Bordegore, 2017). De acuerdo con lo anterior, cabe preguntarse la procedencia y temporalidad de dichas tensiones o fuerzas que causan el desequilibrio en el macizo rocoso y seguidamente su colapso.

Naturalmente en el macizo rocoso actúan tensiones relacionadas con la gravedad terrestre, la tectónica de placas (y sus esfuerzos remanentes) y el régimen hidrogeológico de la zona, que interactúan libremente de tal forma que existe un equilibrio geológico en el entorno. Cuando se realizan excavaciones subterráneas se alteran las condiciones en que coexisten las fuerzas de modo natural y como consecuencia surgen comportamientos de falla o colapso en los túneles como una respuesta innata del terreno

en tratar de recuperar su equilibrio preliminar (Jordá-Bordehore, 2017). Ante esto, cuando el macizo rocoso logra recobrar un estado de equilibrio bajo la combinación de condiciones naturales y antrópicas se dice que es autosoportante.

Lo anterior explica por qué en algunas situaciones los túneles no requieren sistemas de sostenimiento, pues la posibilidad de que el terreno por sí mismo recobre su equilibrio es factible de manera natural (figura 2). En contraste, puede suceder que tras un breve periodo de tiempo las excavaciones comienzan a derrumbarse, por lo cual se deben instalar elementos estructurales elaborados en madera o metal (figura 3); convencionalmente se emplean puertas en madera, arcos de acero, concreto lanzado, mallas metálicas o pernos de anclaje. El profesor Xia-Ting Feng, presidente de la Sociedad de Mecánica de Rocas e Ingeniería en China, valiosamente explica de forma práctica las pautas claves para el diseño del sostenimiento minero en excavaciones subterráneas en roca dura; analiza de forma contemporánea y metódicamente cómo abordar los problemas que surgen durante el diseño y la operación de los sistemas de soporte minero (Feng et al., 2016). Todos los conceptos anteriormente mencionados son parte de los conocimientos fundamentales de la mecánica de rocas, sin los cuales no es posible identificar y comprender los diferentes comportamientos de colapso de las excavaciones subterráneas.

La mecánica de rocas es un área de conocimiento de la ingeniería que busca predecir el comportamiento del macizo rocoso, cuando en él se realizan obras de ingeniería; con base en los fundamentos teórico-experimentales que ofrece, es factible diseñar y replantear la geometría, la extensión, el lugar, los medios y el sostenimiento de los distintos espacios mineros. El uso de las palabras falla, colapso o derrumbe es común para indicar la desestabilización de manera general, no obstante técnicamente existen tres comportamientos recurrentes en obras subterráneas: la caída de roca (*rock fall*), el estallido de roca (*rockburst*) y la convergencia o cerramiento de excavaciones (*squeezing*) (Arlandi, Bernardo, Bordehore, Geoconsult y Ingenieros Consultores S. A, 2013; Kabwe y Wang, 2015). Estos comportamientos surgen, como se explicaba anteriormente, por la actuación de fuerzas naturales y antrópicas, pero también se debe al surgimiento de planos de debilidad dentro de los macizos rocosos, que técnicamente se denominan como diaclasas.



Figura 2. Tramo autosoportante del túnel vial de La Quiebra en Antioquia, Colombia (situación actual)

Fuente: elaboración propia.



Figura 3. Malla y pernos de anclaje frente de avance

Fuente: Zijin-Continental Gold (2018).

Cuando el macizo rocoso de las cavidades mineras se encuentra muy fracturado o diaclasado, es factible la conformación de bloques de roca susceptibles a caída libre, inesperada y peligrosa. Las diaclasas se observan como un plano que indica que por allí se ha quebrado el material y se extienden a lo largo y ancho del macizo rocoso. Estos planos de rotura conforman una indefinida variedad y cantidad de tamaños de bloques, que en un momento dado se desprenden desde el techo de los túneles mineros (Joughin, Muaka, Mpunzi, Sewnun y Wesseloo, 2016); es así como se entiende a, *grosso modo*, la caída de roca, la cual está condicionada por muchas otras variables, las cuales son debidamente caracterizadas en los levantamientos geotécnicos realizados en los frentes de explotación. En este caso, la condición de fracturamiento es predominante en el mecanismo de falla, sin embargo, existen rocas en las que el factor preponderante es la incidencia de tensiones superiores a su resistencia máxima que llevan a su desequilibrio y posterior colapso.

En efecto, existen materiales rocosos precariamente fracturados que colapsan súbitamente al experimentar grandes fuerzas o tensiones sin exhibir un patrón observable de deformación. En el instante en que los esfuerzos aplicados en las rocas superan su resistencia máxima sobreviene la rotura de modo rápido y explosivo, siendo esto característico en minas profundas (>500 m) construidas en roca dura y masiva (Zhou et al., 2015). El aporte realizado por los investigadores en (Manouchehrian y Cai, 2017) facilita estimar la energía cinética que involucra el comportamiento de inestabilidad, con lo cual se puede diseñar de manera más acertada, la capacidad requerida del sostenimiento minero para estas condiciones de trabajo.

En último lugar, la convergencia o cerramiento de los socavones describe la fluencia del material rocoso desde el contorno de la excavación de manera paulatina y perceptible. Es particular en materiales rocosos que son altamente deformables bajo procesos de carga constante (Narimani Dehnavi y Sadeghi, 2019). Por consiguiente, ante este tipo de comportamiento mecánico, se requieren sistemas de sostenimiento que ofrezcan una contención controlada y largo plazo de las paredes de la excavación.

En este contexto se han señalado algunos conceptos importantes sobre la estabilidad del subsuelo relacionados con las características físicas y mecánicas del mismo, a lo cual se suma la variable tiempo, la cual juega

un papel decisivo en la consolidación de los riesgos por la inestabilidad de las excavaciones a largo plazo (Narimani Dehnavi y Sadeghi, 2019). Para entender su influencia se tiene la siguiente analogía a modo de ejemplo: en un proyecto minero para el año dos se construyó el tramo B de la mina, en ese tiempo y lugar, el ambiente era seco, la roca estaba fresca y sin fracturas, el túnel era autosoportante, la temperatura era óptima y no había presencia de fallas geológicas. Pocos años después, suponiendo el año cuatro del proyecto, cuando se construía el tramo C de la mina las condiciones en el tramo B cambiaron; la roca se fracturó, quizás por el efecto de las voladuras o la meteorización y el terreno que antes estuvo seco, debido a la variación del régimen hidrogeológico, ahora estaba húmedo, presentaba goteos e incluso infiltraciones continuas de agua. Bajo estas nuevas condiciones el terreno dejó de ser autosoportante y en dicho tiempo y espacio la mina se derrumbó, aun cuando en el año dos el terreno se mostró estable frente a la construcción del tramo B de la mina.

A causa de la variabilidad e incertidumbre del comportamiento del macizo rocoso, es necesario poner en marcha programas continuos de inspección, control y monitoreo con la finalidad de prevenir sucesos que signifiquen pérdidas materiales y de vidas humanas (Joughin et al., 2016); con estos, se verifica continuamente si el sistema de soporte construido se desempeña debidamente, o si, por el contrario, es disfuncional por deterioro o cambios en el terreno; a través de inspecciones visuales, el experto en materia puede identificar condiciones generales de deterioro, sin embargo, ocurren procesos de desestabilización que solamente pueden analizarse a través de herramientas tecnológicas (Gelinas, Falmagne, Bedard y Matte, 2019). De ahí la importancia para la industria minera en conocer las tecnologías disponibles para el control de terrenos, pues la base empírica de conocimientos para el monitoreo de las explotaciones mineras no es suficiente para desarrollar actividades realmente seguras y sostenibles.

En este contexto, fruto del trabajo investigativo que se llevó a cabo, a continuación, se presentan algunas de las técnicas disponibles para el control eficiente de excavaciones en proyectos de minería subterránea; así mismo, se incluyen algunos de los recientes avances que impulsan el desarrollo de nuevas tecnologías para el sostenimiento y monitoreo de las cavidades mineras.

4. Técnicas y tecnologías para la prevención de riesgos geomecánicos

4.1. Fotogrametría

Es un sistema móvil, resistente y relativamente económico en comparación con la instrumentación geotécnica convencional, capaz de obtener resultados con la misma precisión; a través de un modelo 3D integral de la cavidad minera, facilita el análisis deformacional del terreno y la identificación de los esfuerzos desestabilizantes. Los instrumentos que se requieren para la toma de datos en campo son cámaras, lentes y luminarias que registran el contorno del túnel en fotografías; las imágenes se procesan a través del *software* para recrear el tramo tridimensionalmente; el programa cuenta con herramientas de medición y cálculo de variables para realizar análisis tenso-deformacionales en el área objeto de estudio (Benton, Seymour, Boltz, Raffaldi y Finely, 2017).

4.2. Sensores de fibra óptica (FOS)

La fibra óptica es un invento que revolucionó la forma de transmitir información a través de pulsos energéticos; en el campo de la ingeniería se descubrió que la luz que viaja a través de la fibra al interactuar con el entorno mediante sensores, puede brindar información por ejemplo sobre las temperaturas y tensiones que se desarrollan en el terreno (Hong, Zhang, Zhang, Leung y Liu, 2016); en función del tipo de sensor empleado y la configuración del sistema, es posible lograr mediciones tenso-deformacionales con sensibilidades inferiores al centímetro; así los datos recolectados por el mecanismo son comparables a las lecturas efectuadas por medios fotogramétricos (Chai y Du, 2019; Xu, Zhang, Zhang, Wu y Guo, 2015). Las tendencias en el desarrollo tecnológico de sistemas FOS avanzan hacia la incorporación de las fibras ópticas en las estructuras de sostenimiento, ya que se adhieren con gran facilidad a los elementos constitutivos metálicos o el hormigón; aunque debido a la fragilidad de las fibras es necesario incorporar recubrimientos que permitan su protección sin reducir el nivel de sensibilidad en la toma de información. Al respecto, se han realizado ensayos con recubrimientos en metal y polímeros obteniéndose buenos resultados, y aunque la técnica aún presenta algunas limitaciones las investigaciones teórico-experimentales proyectan ingeniar sistemas FOS

inteligentes con una amplia resolución espacial de fácil encapsulación e instalación en el terreno, como parte de las propias estructuras de sostenimiento de las excavaciones (Gong et al., 2019).

4.3. Monitoreo microsísmico

Ante la construcción de grandes cavidades mineras en zonas profundas de la corteza terrestre, el macizo rocoso en su acomodamiento natural puede originar microsismos; los movimientos sísmicos ocasionan procesos de inestabilidad no solamente en los diferentes lugares de la mina, sino que además pueden extenderse hasta la superficie del área en explotación. En junio del año 2017, el Centro Australiano de Geomecánica inició el desarrollo de un proyecto con el patrocinio de 22 grandes empresas mineras, entre las cuales en Colombia son conocidas la BHP Billinton, Glencore, South32, entre otras; el proyecto surgió de la necesidad de abordar las problemáticas asociadas a la sismicidad y el *rockburst* en minas profundas de explotación metálica (Potvin, Wesseloo, Morkel y Tierney, 2019).

A raíz del trabajo que se llevó a cabo, se creó la plataforma mXrap mediante la cual es posible realizar estudios analíticos y monitoreo continuo de datos geotécnicos y sísmicos tridimensionalmente. Actualmente, el programa cuenta con una amplia base de datos de estudios realizados en diferentes minas del mundo, que facilita el intercambio de experiencias, aprendizajes y conocimientos en torno a la geomecánica y el control de terrenos mineros. Dos casos de estudio que explican cómo funciona el monitoreo microsísmico se pueden revisar en E S G Solutions (2019) y Doolan y Chester Newcrest y Mining Limited (2018).

4.4. Estructuras dinámicas de soporte

Los estudios geomecánicos indican que el terreno experimenta, en primera instancia, dos etapas de reajuste natural; la primera tiene lugar una vez se realiza la excavación, y se caracteriza porque el medio rocoso del contorno de la cavidad se deforma o relaja en función de las tensiones que inciden en el área; la segunda etapa está definida como una estabilidad prolongada intertemporal de las obras mineras; no obstante, durante el tiempo de operación del proyecto, el macizo rocoso puede experimentar reiterativamente las dos etapas anteriormente descritas (Paraskevopoulou, 2016). En algunas ocasiones, el acomodamiento se desarrollará

de manera perceptible y paulatina, mientras que de otra forma puede suceder de manera espontánea y explosiva; para el último caso, el nivel de ocurrencia incrementa cuando las obras mineras se sitúan por encima de los 1000 m de profundidad (He et al., 2009).

Ante este componente de reajustes naturales surge la problemática del gasto ineficiente de insumos, equipos y maniobras de soporte minero. En muchos casos, la vida útil de las estructuras instaladas para estabilizar la roca es muy corta porque no se tiene en cuenta el carácter dinámico del comportamiento del medio de construcción (Li et al., 2019). En consecuencia, recientemente se han desarrollado sistemas de soporte patentados que genéricamente se catalogan como pernos de anclaje diseñados específicamente para terrenos proclives al estallido de roca. Se caracterizan por poseer una alta capacidad de absorción de energía dinámica y un rendimiento constante ante periodos repetitivos de carga y descarga (Cai, Champaigne, Coulombe y Challagulla, 2019; Yokota et al., 2019).

Su funcionamiento se asemeja al mecanismo de trabajo de un pistón, instalándose en este caso, dentro de una perforación en roca en donde se requiere instalar el sistema de soporte; la barra fija del pistón, se ancla por uno de sus extremos al terreno mediante una lechada de resina o cemento; la manga del sistema se mueve en la misma dirección en que se deforma la cavidad, sin embargo, este movimiento se regula mediante la fricción que se origina dentro de la manga con la barra fija, por un cono friccio-nante adherido a esta última; de esta manera, la resistencia que opone el pistón ante la deformación de la roca surge de la fricción entre las dos partes del sistema, que están elaboradas con ciertas características físicas y químicas preestablecidas. La fricción gradual permite que la deformación del terreno sea progresiva y de manera controlada. La manga del sistema está unida a una paleta de cara mediante un acople de tuerca y tornillo para sujetar el material que se encuentra en proceso de desestabilización (He et al., 2014).

4.5. Hormigón proyectado

La estabilidad, durabilidad y adecuado funcionamiento de las obras mineras subterráneas requiere de la instalación de sistemas de soporte y revestimientos que garanticen condiciones de seguridad a corto y largo plazo. El revestimiento consiste en disponer una capa de material con

ciertas características de adherencia y resistencia en el contorno de la cavidad para contrarrestar situaciones de colapso o caída de roca que puedan afectar la seguridad del personal y los equipos de trabajo. Los materiales empleados para la conformación de las capas de asistencia abarcan desde el uso de fibras de refuerzo hasta nanopartículas incorporadas a una mezcla cementante (Álvarez, 2007). Actualmente, las investigaciones se orientan en determinar las características físicas, químicas y de resistencia de nuevos materiales compuestos de fácil instalación, que mejoren la estabilidad de las excavaciones en condiciones de carga estática y dinámica.

En Xin, Wang, Zhou y Gao (2019), se presentan los resultados de una investigación en la cual se realizaron pruebas experimentales para simular la respuesta sísmica de un túnel revestido con capas de concreto simple, concreto reforzado con acero y concreto reforzado con fibras de polipropileno; los datos obtenidos demostraron que la fibra de polipropileno incorporada en el concreto simple advierte la aparición de grietas en el material de refuerzo, lo cual permite controlar la deformación de la excavación o, lo que es lo mismo, prevenir situaciones de colapso repentino en las obras mineras.

Otra línea de investigación se enfoca en estudiar y desarrollar nuevas membranas sintéticas que se producen *in situ*, mediante la proyección de biocomponentes que se endurecen rápidamente adhiriéndose a la roca. Este sistema de soporte TSL para la estabilización de las excavaciones mineras subterráneas se caracteriza por disminuir el consumo de materias primas y equipos necesarios para el revestimiento (Jjuuko y Kalumba, 2016; Uyar y Aksoy, 2018).

Investigadores estadounidenses desarrollaron un recubrimiento de concreto reforzado con fibra, el cual tiene mejores propiedades de resistencia que el concreto a base de cemento Portland usado convencionalmente para el revestimiento de túneles mineros; este novedoso sistema es apto para ambientes altamente corrosivos, es de fácil aplicación y demanda tiempos de curado muy bajos, aproximadamente de 15 minutos (Tadolini, Mills y Burkhard, 2018).

Finalmente, otros estudios en materia analizan las propiedades de los sistemas TSL en condiciones específicas de temperaturas y la respuesta del terreno ante la aplicación de las inyecciones químicas para mejorar

las propiedades de resistencia y deformación de las rocas (Niknezhad, Bonnet, Leklou y Amiri, 2019; Saw, Villaescusa, Windsor y Thompson, 2017; Uyar y Aksoy, 2018).

4.6. Refugios mineros

Ante los riesgos a los que están expuestos los trabajadores mineros en proyectos de extracción subterránea, surge la necesidad de establecer medidas de atención a emergencias que contribuyan a prevenir pérdidas de vidas humanas durante el funcionamiento de la operación. El desarrollo de refugios portátiles para ambientes mineros hace parte de la tecnología a la vanguardia que brinda una solución eficiente para salvaguardar la vida del personal minero ante la ocurrencia de eventos o desastres de gran magnitud. Estas cámaras de refugio tienen la capacidad para albergar hasta 30 personas a través de un diseño portable e incluso desmontable para su fácil transporte y movilidad dentro de las labores mineras. Hoy en día se han desarrollado cámaras de resguardo móviles con sistemas digitales de control avanzado de gases y aire acondicionado con tiempos de resguardo de 36 horas y resistencia ante situaciones explosivas (The Minearc, s. f.).

4.7. Hidrofractura

A medida que aumenta la profundidad de las labores mineras necesarias para extraer el cuerpo mineral de interés, se requieren sistemas de sostenimiento y revestimiento en las cavidades con mayores requerimientos de soporte; debido al confinamiento de la roca a profundidad se incrementan las tensiones que actúan en el contorno de la excavación las cuales deben ser resistidas por las estructuras de soporte (Bruning, Karakus, Akdag, Nguyen y Goodchild, 2018). La hidrofractura del terreno es un mecanismo mediante el cual se minimizan las fuerzas de confinamiento que se desarrollan en el medio rocoso, por ejemplo, cuando las tensiones confinantes aumentan con la profundidad a la que se construyen las obras mineras (Flores Gonzalez, 2019); esta metodología es una estrategia de gestión de riesgos que sirve para modificar las características del sustrato rocoso y sus condiciones de carga mediante la inyección de fluidos a alta presión, que al fracturar la roca previene el colapso súbito de las excavaciones.

4.8. Congelamiento (*freezing*)

La congelación artificial puede ser utilizada para fortalecer la estructura física del terreno y evitar la infiltración de agua hacia las cavidades mineras; este mecanismo resulta funcional para estabilizar túneles mineros construidos a grandes profundidades, en donde las fuerzas que actúan en el terreno son de gran magnitud y además hay presencia de cuerpos de agua que pueden ser afectados por las obras mineras (Wang y Zhou, 2018). La construcción de una capa artificial de hielo en el contorno de la excavación demanda un sistema de congelamiento con grandes consumos de energía, por lo cual esta técnica resulta costosa de montar y operar; a pesar de esto, algunas investigaciones buscan desarrollar sistemas con menos gasto energético, ya que a pesar de ello el mecanismo resulta ser una medida eficiente para el cuidado de los recursos hídricos subterráneos (Alzoubi, Zueter, Nie-Rouquette y Sasmito, 2019; Panteleev, Kostina, Zhelnin, Plekhov y Levin, 2017).

Ahora bien, de acuerdo con el plan para la estabilización física de la mina subterránea del proyecto Soto Norte, en todas las cámaras de explotación u obras mineras bajo tierra se instalará algún tipo de soporte que dependerá de las condiciones geológicas-mineras, el tiempo de uso de las labores y la necesidad de soporte para garantizar la estabilidad del terreno a largo plazo. Se empleará concreto lanzado reforzado con fibras sintéticas, mallas de acero, pernos de anclaje y cables y arcos metálicos, así como también una pasta de relleno constituida a base de residuos estériles de roca, que, mezclados con cemento, rellenarán las cavidades producto de la explotación a medida que el proyecto avanza en la extracción del mineral de interés en otras zonas de la mina (retrollenado). El diseño de cada uno de los elementos de soporte minero se realizó con base en el estudio geotécnico del área del proyecto e involucra programas de inspección y seguimiento continuo para garantizar la seguridad del personal y prevenir la subsidencia de la superficie en el área intervenida.

Finalmente, en relación con la normatividad colombiana existente para el control de los riesgos tratados, en el EIA y el Plan de Sostentamiento Minero se describen las pautas geotécnicas en relación con el manejo de cada uno de estos. Por una parte, en el Estudio de Impacto Ambiental se solicita que, mediante el análisis geotécnico del terreno, se identifiquen y caractericen los materiales geológicos y los procesos de

inestabilidad que surgirán eventualmente por la ejecución del proyecto en las diferentes etapas de este, incluida la fase de cierre y abandono de las obras e inmediaciones del proyecto; dicho análisis debe incluir escenarios normales y críticos de eventos sísmicos y cambios en el nivel freático con el objetivo de prever situaciones que lleven a la materialización indeseada de los riesgos no solo durante la operación minera, sino también durante la fase de conformación final del terreno o posminería; ante esto último, es obligatorio para el titular minero establecer un cronograma de actividades pos cierre con un periodo no menor a diez años con el objetivo de garantizar un control y monitoreo de la zona intervenida por la extracción minera; así mismo, la autoridad ambiental solicita al titular minero un Plan de Cierre Final en el que debe estimar los componentes residuales ambientales de la realización del proyecto, sobre el cual conviene recalcar que la subsidencia minera puede acontecer tiempo después del cierre, abandono y rehabilitación definitiva del área minera (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA], 2016).

Por su parte, en el Plan de Sosténimiento minero, que se construye de acuerdo con los resultados del estudio geotécnico, se establecen “las normas específicas sobre cuándo, dónde y qué tipo de apoyo del techo se tienen que instalar en todas las etapas del proceso de desarrollo de actividades subterráneas incluidas bocaminas, galerías y frentes” con el objetivo de “adoptar las medidas que sean necesarias para asegurar que las labores mineras subterráneas no presenten derrumbes ni desprendimientos de rocas que pongan en peligro la vida e integridad de las personas” e “igualmente, se debe garantizar que en superficie, tanto las obras civiles como la infraestructura existente, no se vean afectadas por la subsidencia. Para lo anterior, se debe realizar un diseño con los cálculos respectivos que sirva para establecer las dimensiones mínimas y la localización” de los diferentes espacios mineros (Ministerio de Minas y Energía, 2015).

Conclusiones

El impacto de la extracción subterránea de minerales repercute sobre el nivel freático y la disponibilidad del agua que reposa en los acuíferos, siempre y cuando las operaciones mineras se desarrollen en las inmediaciones de estos y no se disponga de estudios técnicos previos que permitan gestionar eficientemente los recursos hídricos subterráneos. Los estudios hallados

plantean nuevas metodologías de análisis y el uso de trazadores isotópicos y químicos, para evaluar previamente la situación hídrica subterránea del área de influencia del proyecto minero. Las alternativas encontradas para el manejo del riesgo abarcan medidas como la construcción de acuíferos artificiales, la reutilización y el tratamiento del agua contaminada, la instalación de revestimientos en las obras mineras, la aplicación de métodos de explotación que reduzcan la cantidad de agua a ser interceptada, la construcción de pozos de bombeo y la recarga artificial de acuíferos, medidas que, en la minería del siglo XXI, son práctica común para la gestión sostenible de las operaciones mineras.

El diagnóstico llevado a cabo por el IDEAM en el Estudio Nacional del Agua 2018 y la Red Básica Nacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas pone en manifiesto la escasa información articulada sobre la caracterización y el control y seguimiento de los recursos hídricos subterráneos en Colombia; ante lo cual los reportes técnicos de los proyectos como La Colosa en el Tolima, Buriticá, Quebradona y Segovia en Antioquia y Soto Norte en Santander constituyen avances puntuales en la identificación y el manejo ambiental del agua subterránea en las áreas que ocupan, caracterizándose por incluir estudios rigurosos que han demandado inversiones significativas de capital y la contratación de personal altamente capacitado. En vista de lo anterior, cabe hacer hincapié en la complejidad de estos estudios, que, si bien son locales, están soportados, como se evidenció, en gran cantidad de datos, muestras y perforaciones, con los cuales los modelos hidrogeológicos resultan ser sofisticados y coherentes al buen desarrollo de la actividad minera, y que son, así mismo, cruciales para que las autoridades ambientales tengan control y puedan realizar labores de monitoreo al recurso hídrico dentro del territorio nacional.

La normativa colombiana para afrontar esta temática, está consignada en los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental de proyectos de minería y las diferentes resoluciones en donde se solicitan variados estudios, mediciones y planes puntuales con el objetivo de lograr el cuidado ambiental y la menor afectación al recurso hídrico; así mismo, es de carácter obligatorio la presentación del estudio de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos cuando los proyectos mineros se proyecten en zonas en donde existan dichos cuerpos de agua.

La subsidencia del suelo y el colapso de las excavaciones son dos riesgos que se originan por la inestabilidad física del terreno, producto de la construcción de cavidades al interior de la corteza terrestre, en las cuales los sistemas tradicionales de sostenimiento minero son precarios a corto y largo plazo. Las investigaciones recopiladas tratan acerca del estudio de variables que condicionan el hundimiento del suelo como la profundidad de las cavidades, la presencia de agua y el factor tiempo. Los hallazgos sobre las técnicas y tecnologías para el control de los riesgos en cuestión analizan la aplicabilidad del retrolleado, los vehículos aéreos no tripulados, imágenes satelitales, la fotogrametría, sistemas FOS, sensores micro sísmicos, estructuras dinámicas de soporte, hormigones reforzados (con nano partículas o biocomponentes) y refugios mineros. Dos alternativas poco investigadas pero que son objeto de estudio son la construcción de obras civiles en función de la deformación a causa del hundimiento del suelo provocado por la minería subterránea y la creación de capas de congelamiento en el contorno de las excavaciones bajo tierra, para contrarrestar situaciones de derrumbe y afectación a los recursos hídricos subterráneos.

Con respecto a las acciones que se adoptan en Colombia para prevenir el colapso de las excavaciones, existe muy poca información pública disponible que sirva para dinamizar el uso y la investigación de mejores prácticas de seguridad para la estabilización de las obras mineras subterráneas. Recientemente, estudios de proyectos como el de Soto Norte en Santander, Quebradona y Buriticá en Antioquia, que son de dominio público y con sustento técnico, ofrecen estudios geotécnicos densos, que constituyen la base de conocimiento a partir de la cual se diseñan y plantean las medidas de estabilización del terreno, sirviendo además como fuente de conocimiento para el reconocimiento del suelo y subsuelo nacional.

El uso de residuos para rellenar los espacios vacíos dejados por la extracción de minerales es una alternativa motivo de investigación académica, que exalta su eficiencia al disminuir la tasa de conformación y magnitud del hundimiento del suelo y el colapso inesperado de las excavaciones subterráneas, al tiempo que promueve el cuidado del ambiente y el desarrollo de industrias sostenibles. El proyecto minero Soto Norte y el de Buriticá incluyen esta medida ambiental y de seguridad laboral, proponiendo el

uso de los residuos de roca estériles que se originan de la extracción del mineral de interés que, junto con otros elementos adicionados, conformarán una pasta de relleno que se depositará en los espacios vacíos dejados por la explotación, al tiempo que se avanza en la recuperación del material de interés en otras zonas no explotadas.

La normativa dispuesta en el Decreto 1886 del 2015 y los términos de referencia para la elaboración del EIA apuntalan, mediante la adopción del Plan de Sostenimiento Minero y estudios geotécnicos, al establecimiento de medidas de acción para prevenir el colapso inseguro de las cavidades mineras y su efecto en la superficie terrestre durante las diferentes fases del proyecto minero, incluyendo el cierre definitivo o posminería, en el que se deben estimar los componentes ambientales residuales del proyecto y proponer un cronograma a diez años, que contenga las actividades de control y seguimiento que se llevarán a cabo una vez culmine la operación minera.

Finalmente, de acuerdo con todo lo tratado se concluye que es un mito afirmar, según los resultados de la investigación, que dentro de lo que se comprende como la minería aurífera subterránea se desconoce la importancia y la necesidad de tomar medidas que salvaguarden los recursos hídricos subterráneos, la superficie terrestre y la integridad de los trabajadores frente a los derrumbes mineros, pues como se evidencia existen metodologías preestablecidas para evaluar el componente ambiental hidrogeológico y geomecánico en proyectos de minería subterránea; sumado a esto existe información e investigaciones muy interesantes que tratan acerca de técnicas y tecnologías modernas disponibles y en desarrollo que brindan alternativas en pro de lograr mejores resultados y estudios más acordes a los proyectos mineros.

En el contexto colombiano, la falta de información pública, documentada, articulada y de carácter técnico por parte del sector y de las autoridades, no permite tener un diagnóstico definitivo que sirva de referente para concluir sobre las afectaciones de la minería subterránea y su entorno. De esta manera, es importante resaltar, del propósito de la investigación, las técnicas y tecnologías modernas y aquellas que recientemente son objeto de estudio y desarrollo en otras partes del mundo, para que sean conocidas, debatidas o puestas en práctica por la academia y los operadores mineros en Colombia con el objetivo de continuar avanzando hacia el desarrollo de actividades mineras responsables.

Con el propósito de subsanar algunas de estas carencias surge la necesidad de realizar estudios o conceptos periciales, en los cuales se investigue, a través de un cuerpo técnico multidisciplinar, si las metodologías, técnicas y tecnologías son eficientes dadas las condiciones en las que se conciben los proyectos mineros en Colombia, pues desde el punto de vista ingenieril las medidas ambientales y laborales resultan eficientes conforme los estudios correspondan a la realidad observada, por lo cual se requiere, a través de cuerpos o entidades multidisciplinarios de profesionales, la realización de evaluaciones retroalimentadas, fundamentadas en la teoría y los avances tecnológicos e investigativos, con el objetivo de validar y perfeccionar las prácticas mineras o que promuevan encadenamientos investigativos al respecto.

Referencias

- Agencia Nacional de Minería. (2019). *Estadísticas de emergencias y fatalidades mineras en el año 2019*. Recuperado de: https://www.anm.gov.co/?q=emergencias_mineras
- Alonso, J., Arcos, C. A. y Echavarría, E. (2017). *Seguridad y salud en la pequeña minería Colombiana: estudios de caso en oro y carbón*. Recuperado de <http://www.responsiblemines.org/wp-content/uploads/2017/07/07-10-2017-Somos-Tesoro-Seguridad-y-Salud.compressed.pdf>
- Álvarez, L. C. (2007). Nuevas tendencias en los revestimientos de túneles. *Revista de Obras Públicas*, 154(3473), 7-16.
- Alzoubi, M. A., Zueter, A., Nie-Rouquette, A. y Sasmito, A. P. (2019). Freezing on demand: A new concept for mine safety and energy savings in wet underground mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(4), 621-627. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.06.015>
- Anandan, K. S., Sahay, S. N. y Karthikeyan, S. (2010). Delineation of recharge area and artificial recharge studies in the Neyveli hydrogeological basin. *Mine Water and the Environment*, 29(1), 14-22. <https://doi.org/10.1007/s10230-009-0090-8>
- Arlandi, M., Bernardo, A., Bordehore, L., Geoconsult & Ingenieros Consultores S. A. (2013). Predicción empírica del Strainburst y Squeezing en galerías profundas. *Túneles*, (January), 18-22. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Luis_Jorda/publication/318338920_Prediccion_empirica_del_Strainburst_y_Squeezing_en_galerias_profundas/

- links/5964732aa6fdccc9b160760d/Prediccion-empirica-del-Strainburst-y-Squeezing-en-galerias-profundas.pdf
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (s. f.). Concesión de Aguas Subterráneas. Recuperado de: <http://portal.anla.gov.co/concesion-aguas-subterraneas>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). Términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Proyectos de Explotación Minera (2016). Recuperado de: <http://portal.anla.gov.co/terminos-referencia>
- Aydan, O. y Ito, T. (2015). The effect of the depth and groundwater on the formation of sinkholes or ground subsidence associated with abandoned room and pillar lignite mines under static and dynamic conditions. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 281-284. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-281-2015>
- Barthwal, H. y Van der Baan, M. (2019). Microseismicity observed in an underground mine: Source mechanisms and possible causes. *Geomechanics for Energy and the Environment*. Recuperado de: <http://10.0.3.248/j.gete.2019.100167>
- Benton, D., Seymour, J. B., Boltz, M. S., Raffaldi, M. y Finely, S. (2017). Photogrammetry in underground mining ground control. Lucky Friday mine case study. *Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining, Deep Mining 2017*, (Signer 2011), 587-598. Recuperado de https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1704_39_Benton/
- Biswas, A. y Sharma, S. P. (2017). Geophysical surveys for identifying source and pathways of subsurface water inflow at the Bangur chromite mine, Odisha, India. *Natural Hazards*, 88(2), 947-964. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2899-y>
- Bruning, T., Karakus, M., Akdag, S., Nguyen, G. D. y Goodchild, D. (2018). Influence of deviatoric stress on rockburst occurrence: An experimental study. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(5), 763-766. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.08.005>
- Cai, M., Champaigne, D., Coulombe, J. G. y Challagulla, K. (2019). Development of two new rockbolts for safe and rapid tunneling in burst-prone ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 91(January), 103010. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103010>

- Cánovas, C. R., Macías, F. y Olías, M. (2018). Hydrogeochemical behavior of an anthropogenic mine aquifer: Implications for potential remediation measures. *Science of the Total Environment*, 636, 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.270>
- Chai, J. y Du, W. (2019). Experimental study on the application of BOTDA in the overlying strata deformation monitoring induced by coal mining. *Journal of Sensors*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3439723>
- Chi, M., Zhang, D., Fan, G., Zhang, W. y Liu, H. (2019). Prediction of water resource carrying capacity by the analytic hierarchy process-fuzzy discrimination method in a mining area. *Ecological Indicators*, 96, 647-655. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.021>
- Controlaría General de la República, Ministerio de Minas y Energía, Agencia Nacional Minera, Ministerio del Interior, Parques Nacionales Naturales de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible e Instituto Alexander Von Humboldt. (2018). *Investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera en los ecosistemas del territorio colombiano*. Recuperado de http://www.andi.com.co/Uploads/10._Diagnóstico_de_la_información_ambiental_y_social_respecto_a_la_actividad_minera_y_la_extracción.pdf
- Diao, X., Wu, K., Zhou, D., Wang, J., Duan, Z. y Yu, Z. (2019). Combining subsidence theory and slope stability analysis method for building damage assessment in mountainous mining subsidence regions. *PLoS ONE*, 14(2), 1-17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210021>
- Doolan, J., Chester, C. y Newcrest & Mining Limited. (2018). Rapid assessment of the spatial extent of strong ground motion in mines – ShakeMap approach. En *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, Caving 2018* (pp. 533-544). Recuperado a partir de https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1815_41_Meyer/
- Drahansky, M., Paridah, M., Moradbak, A., Mohamed, A. y Owolabi, F. Abdulwahab Taiwo, Asniza, M. y Abdul Khalid, S. H. (2016). We are IntechOpen, the world's leading publisher of Open Access books Built by scientists, for scientists TOP 1 %. *Intech, i(tourism)*, 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>
- E S G Solutions. (2019). Calibration of a seismic hazard assessment tool using velocity fields and geotechnical data. En *Mining Geomechanical Risk 2019* (pp. 233-244).

- Fan, G., Zhang, S., Zhang, D., Zhang, C., Chen, M. y Li, Q. (2019). An index of aquiclude destabilization for mining-induced roof water inrush forecasting: A case study. *Water (Switzerland)*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/w1102170>
- Feng, X. T., Zhang, C., Qiu, S., Zhou, H., Jiang, Q. y Li, S. (2016). Dynamic design method for deep hard rock tunnels and its application. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(4), 443-461. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.01.004>
- Flores Gonzalez, G. (2019). Major hazards associated with cave mining: are they manageable? En *Mining Geomechanical Risk 2019* (pp. 31-46). Recuperado de: https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1905_0.3_Flores-Gonzalez/
- Gelinas, L.-P., Falmagne, V., Bedard, B. y Matte, O. (2019). Advanced geotechnical monitoring technology to assess ground support effectiveness, 59-74. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1925_02_gelinas
- Gong, H., Kizil, M. S., Chen, Z., Amanzadeh, M., Yang, B. y Aminossadati, S. M. (2019). Advances in fibre optic based geotechnical monitoring systems for underground excavations. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(2), 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.06.007>
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. (I. Capella, Ed.). Madrid: Pearson Educación S. A.
- Gran Colombia Gold & SRK Consulting Inc. (2019). *NI 43-101 Technical Report Prefeasibility Study Update Segovia Project*. Denver, Colorado.
- Hadjigeorgiu, J., Karampinos, E., Turcotte, P. y Mercier-Langevin, F. (2013). Assessment of the influence of drift orientation on observed levels of squeezing in hard rock mines. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction* (pp. 109-118). Recuperado de https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1304_05_Hadjigeorgiou/
- He, M. C., Zhang, G. F., Wang, G. L., Xu, Y. L., Wu, C. Z. y Tang, Q. D. (2009). Research on mechanism and application to floor heave control of deep gateway. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28, 2593-2598.
- He, M., Gong, W., Wang, J., Qi, P., Tao, Z., Du, S. y Peng, Y. (2014). Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily

- large elongation and constant resistance. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 29-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.01.007>
- Hejmanowski, R., Malinowska, A. A., Witkowski, W. T. y Guzy, A. (2019). An analysis applying inSAR of subsidence caused by nearby mining-induced earthquakes. *Geosciences (Switzerland)*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/geosciences9120490>
- Hong, C. Y., Zhang, Y. F., Zhang, M. X., Leung, L. M. G. y Liu, L. Q. (2016). Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 244, 184-197. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.04.033>
- IDEAM. (2015). *Red Básica Nacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas*. Bogotá D. C., Colombia. Recuperado de: capacitacion.sirh.ideam.gov.co
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá D. C. Colombia.
- Jimena Motta-Pascuas, A., Alfonso Ustariz-Durán, M. y Ordoñez-Carmona, O. (2018). Identification, analysis and evaluation of risks associated with gold mining in Marmato, Caldas. *Boletín Ciencias de la Tierra* 44, 21-30. <http://dx.doi.org/10.15446/rbct.n44.61646>
- Jjuuko, S. y Kalumba, D. (2016). Application of Thin Spray-on Liners for Rock Surface Support in South African Mines. A Review. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 7(3), 2349-2763. <https://doi.org/10.17632/zzjfb8tsj.1>
- Jordá-Bordehore, L. (2017). Stability Assessment of Natural Caves Using Empirical Approaches and Rock Mass Classifications. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(8), 2143. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1216-0>
- Joughin, W. C., Muaka, J. J. M., Mpunzi, P., Sewnun, D. y Wesseloo, J. (2016). A risk-based approach to ground support design. *Eighth International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction*, 19. Recuperado de internal-pdf://211.20.80.204/2016.pdf
- Kabwe, E. y Wang, Y. (2015). Review on Rockburst Theory and Types of Rock Support in Rockburst Prone Mines. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 5(4), 104-121. <https://doi.org/10.4236/ojsst.2015.54013>

- Kemp, D., Bond, C. J., Franks, D. M. y Cote, C. (2010). Mining, water and human rights: Making the connection. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1553-1562. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.008>
- Kim, J. W., Lu, Z. y Kaufmann, J. (2019). Evolution of sinkholes over Wink, Texas, observed by high-resolution optical and SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 222(April 2018), 119-132. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.028>
- Li, C. C., Mikula, P., Simser, B., Hebblewhite, B., Joughin, W., Feng, X. y Xu, N. (2019). Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(5), 1110-1118. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.06.001>
- Li, M., Zhang, J., Sun, K., Wu, Z. y Zhou, N. (2019). Reducing surface subsidence risk using solid waste backfill technique: A case study under buildings. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(5), 3333-3341. <https://doi.org/10.15244/pjoes/94814>
- Li, W., Chen, X., Xie, L., Liu, Z. y Xiong, X. (2019). Bioelectrochemical systems for groundwater remediation: The development trend and research front revealed by bibliometric analysis. *Water (Switzerland)*, 11(8), 6-9. <https://doi.org/10.3390/w11081532>
- Li, Y. (2016). Groundwater system for the periods of pre- and post-longwall mining over thin overburden. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 30(4), 295-311. <https://doi.org/10.1080/17480930.2015.1044595>
- Liu, S., Li, W., Qiao, W., Li, X., Wang, Q. y He, J. (2019). Zoning method for mining-induced environmental engineering geological patterns considering the degree of influence of mining activities on phreatic aquifer. *Journal of Hydrology*, 578(September 2018), 124020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124020>
- Liu, X. y Guo, G. (2019). Study on Failure Mechanism of Strip Foundation Buildings Caused By Surface Horizontal Deformation in Mining Area. *Stavební obzor - Civil Engineering Journal*, 28(2), 205-218. <https://doi.org/10.14311/cej.2019.02.0017>
- Loredó, J. (2019). Mine water management in abandoned mine sites: from waste to resource. En 16th International Conference on Environmental Science and Technology. Rodas.

- Lu, H., Qi, C., Chen, Q., Gan, D., Xue, Z. y Hu, Y. (2018). A new procedure for recycling waste tailings as cemented paste backfill to underground stopes and open pits. *Journal of Cleaner Production*, 188, 601-612. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.041>
- Ma, L., Zhang, D., Li, X., Fan, G. y Zhao, Y. (2009). Technology of groundwater reservoir construction in goafs of shallow coalfields. *Mining Science and Technology*, 19(6), 730-735. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60133-2](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60133-2)
- Malinowska, A. A., Witkowski, W. T., Guzy, A. y Hejmanowski, R. (2018). Mapping ground movements caused by mining-induced earthquakes applying satellite radar interferometry. *Engineering Geology*, 246, 402-411. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.013>
- Manouchehrian, A. y Cai, M. (2017). Analysis of rockburst in tunnels subjected to static and dynamic loads. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(6), 1031-1040. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.07.001>
- Mendecki, A. J. (2019). Simple GMPE for underground mines. *Acta Geophysica*, 67(3), 837-847. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00289-z>
- Minesa. (2020). *Estudio de impacto ambiental para el proyecto de explotación subterránea de minerales auroargentíferos “Soto Norte”*. Ambiente.
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). *Reglamento de seguridad en las labores mineras Subterráneas. Decreto 1886 de 2015*. Recuperado de: https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/698204/DOCUMENTO_ReglamentoSeguridadMineriaSubterranea.pdf/774e58ab-d35d-4d92-8e7e-fd63ec127216
- Mirek, A., Piasecki, P. y Kowalczyk, B. (2019). Sinkhole hazard in the post-mining area of Old Copper District, Lower Silesia, Poland. *E3S Web of Conferences*, 106, 1-9. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910601019>
- Misa, R., Tajdus, K. y Sroka, A. (2018). Impact of geotechnical barrier modelled in the vicinity of a building structures located in mining area. *Archives of Mining Sciences*, 63(4), 919-933. <https://doi.org/10.24425/ams.2018.124984>
- Morgan, J. L., Colombo, D. y Meloni, F. (2019). InSAR tools for risk assessment over mine assets. En *Mining Geomechanical Risk 2019* (pp. 159-170). Recuperado de https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1905_06_Morgan/

- Narimani Dehnavi, R. y Sadeghi, M. (2019). Deterioration of weak rocks over time and its effect on designing tunnel support systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(2), 1045-1056. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1154-9>
- Niknezhad, D., Bonnet, S., Leklou, N. y Amiri, O. (2019). Effect of thermal damage on mechanical behavior and transport properties of self-compacting concrete incorporating polypropylene fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33(23), 2535-2566. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1650427>
- Oteo Mazo, C. (2016). El agua y los túneles. *Revista de Obras Públicas: Órgano profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos*, (3579), 6-16.
- Othman, A., Sultan, M., Becker, R., Alsefry, S., Alharbi, T., Gebremichael, E., ... y Abdelmohsen, K. (2018). Use of Geophysical and Remote Sensing Data for Assessment of Aquifer Depletion and Related Land Deformation. *Surveys in Geophysics*, 39(3), 543-566. <https://doi.org/10.1007/s10712-017-9458-7>
- Palmstrom, A. y Stille, H. (2007). Ground behaviour and rock engineering tools for underground excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(4), 363-376. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.03.006>
- Pantelev, I., Kostina, A., Zhelnin, M., Plekhov, A. y Levin, L. (2017). Intellectual monitoring of artificial ground freezing in the fluid-saturated rock mass. *Procedia Structural Integrity*, 5, 492-499. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.149>
- Paraskevopoulou, C. (2016). *PhD Thesis - Time dependency of rocks and implications associated with tunnelling*. Queen's University.
- Peng, K., Li, X. y Wang, Z. (2015). Hydrochemical characteristics of groundwater movement and evolution in the Xinli deposit of the Sanshandao gold mine using FCM and PCA methods. *Environmental Earth Sciences*, 73(12), 7873-7888. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3938-6>
- Perez, A. J. (2013). Impacto de la minería subterránea en acuíferos: perspectivas en el contexto colombiano, 3(6), 7-21.
- Potvin, Y., Wesseloo, J., Morkel, G. y Tierney, S. (2019). Seismic Risk Management practices in metalliferous mines (pp. 24-25). Recuperado de https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1952_10_Potvin/%0ASeismic
- Pouliaris, C., Perdikiaki, M., Foglia, L., Schüth, C. y Kallioras, A. (2018). Hydrodynamic analysis of a Mediterranean aquifer system with the use

- of hydrochemical and isotopical analysis as supporting tools. *Environmental Earth Sciences*, 77(6). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7418-2>
- Ruiz, M. S., Correa, R., Gallardo, A. L. C. F. y Sintoni, A. (2014). Addressing socio-environmental conflicts in cases of coal mine subsidence in Brazil and the USA. *Ambiente e Sociedade*, 17(2), 129-156. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2014000200010>
- Ruiz, O., Thomson, B., Cerrato, J. M. y Rodriguez-Freire, L. (2019). Ground-water restoration following in-situ recovery (ISR) mining of uranium. *Applied Geochemistry*, 109(August), 104418. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104418>
- Salmi, E. F., Karakus, M. y Nazem, M. (2019). Assessing the effects of rock mass gradual deterioration on the long-term stability of abandoned mine workings and the mechanisms of post-mining subsidence. A case study of Castle Fields mine. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, 169-185. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.007>
- Saw, H. A., Villaescusa, E., Windsor, C. R. y Thompson, A. G. (2017). Surface support capabilities of freshly sprayed fibre reinforced concrete and safe re-entry time for underground excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 64, 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.01.005>
- Suh, J. y Choi, Y. (2017). Mapping hazardous mining-induced sinkhole subsidence using unmanned aerial vehicle (drone) photogrammetry. *Environmental Earth Sciences*, 76(4). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6458-3>
- Sun, S., Sun, H., Zhang, D., Zhang, J., Cai, Z., Qin, G. y Song, Y. (2019). Response of soil microbes to vegetation restoration in coal mining subsidence areas at Huaibei coal mine, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(10), 1-14. <https://doi.org/10.3390/ijerph16101757>
- Szojda, L. y Wandzik, G. (2019). Discontinuous terrain deformation. Forecasting and consequences of their occurrence for building structures. *MATEC Web of Conferences*, 284, 3010. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201928403010>
- Tadolini, S. C., Mills, P. S. y Burkhard, D. R. (2018). Tekcrete Fast®: Fiber-reinforced, rapid-setting sprayed concrete for rib and surface control.

- International Journal of Mining Science and Technology*, 28(1), 29-34.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.11.009>
- The Minearc. (s. f.). Hard Rock Mine Refuge Chambers.
- Uyar, G. G. y Aksoy, C. O. (2018). New Support Suggestions to High Swelling Clayey Rock Mass. *Journal of Mining Science*, 54(4), 617-627.
<https://doi.org/10.1134/S1062739118044087>
- Vargas Martínez, N. O. (2006). Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia. *Boletín Geológico y Minero*, 117(1), 47-61.
- Vargas Quintero, M. C. (2010). Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación. *Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial*, 1(1021), 1-30.
<https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Voina, I., Palamariu, M. y Neuner, I. (2016). Considerations on the Ways of Determining the Movement of the Earth'S Surface Due To the Phenomenon of Subsidence. *Scientific Papers-Series E-Land Reclamation Earth Observation & Surveying Environmental Engineering*, 5, 109-114.
- Wang, P. y Zhou, G. (2018). Frost-heaving pressure in geotechnical engineering materials during freezing process. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(2), 287-296. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.003>
- Wang, Z., Li, X. y Shang, X. (2019). Distribution Characteristics of Mining-Induced Seismicity Revealed by 3-D Ray-Tracing Relocation and the fcm Clustering Method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(1), 183-197. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1585-z>
- Xia, K., Chen, C., Zheng, Y., Zhang, H., Liu, X., Deng, Y. y Yang, K. (2019). Engineering geology and ground collapse mechanism in the Chengchao Iron-ore Mine in China. *Engineering Geology*, 249 (December 2018), 129-147. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.12.028>
- Xin, C. L., Wang, Z. Z., Zhou, J. M. y Gao, B. (2019). Shaking table tests on seismic behavior of polypropylene fiber reinforced concrete tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.02.019>
- Xu, S., Zhang, P., Zhang, D., Wu, R. y Guo, L. (2015). Simulation study of fiber optic monitoring technology of surrounding rock deformation under deep mining conditions. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(5), 563-571. <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0125-8>

- Xu, Z., Zhang, Y., Yang, J., Liu, F., Bi, R., Zhu, H., ... y Yu, J. (2019). Effect of underground coal mining on the regional soil organic carbon pool in farmland in a mining subsidence area. *Sustainability (Switzerland)*, 11(18), 4961. <https://doi.org/10.3390/su11184961>
- Yang, Y., Guo, T. y Jiao, W. (2018). Destruction processes of mining on water environment in the mining area combining isotopic and hydrochemical tracer. *Environmental Pollution*, 237, 356-365. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.002>
- Yang, Y., Meng, Z. y Jiao, W. (2018). Hydrological and pollution processes in mining area of Fenhe River Basin in China. *Environmental Pollution*, 234(3), 743-750. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.018>
- Yokota, Y., Zhao, Z., Nie, W., Date, K., Iwano, K., Koizumi, Y. y Okada, Y. (2019). Development of a new deformation-controlled rockbolt: numerical modelling and laboratory verification, (Hoek 2006), 545-556. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1925_39_yokota
- Zembaty, Z., Kokot, S., Bozzoni, F., Scandella, L., Lai, C. G., Kuś, J. y Bobra, P. (2015). A system to mitigate deep mine tremor effects in the design of civil infrastructure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 74, 81-90. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.01.004>
- Zeng, C. F., Zheng, G. y Xue, X. L. (2019). Responses of deep soil layers to combined recharge in a leaky aquifer. *Engineering Geology*, 260, 105263. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105263>
- Zhang, G. H., Jiao, Y. Y. y Wang, H. (2014). Outstanding issues in excavation of deep and long rock tunnels: A case study. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(9), 984-994. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0087>.
- Zhou, H., Meng, F., Zhang, C., Hu, D., Yang, F. y Lu, J. (2015). Analysis of rockburst mechanisms induced by structural planes in deep tunnels. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(4), 1435-1451. Recuperado a partir de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=eoah&AN=34110364&lang=es&site=ehost-live>.
- Zuo, Q., Wang, Y. y Li, J. (2019). Ground subsidence in old coal mining area and its geological and ecological environment effect. *Ekoloji*, 28(108), 2429-2433.

Capítulo 5

Empleo de explosivos en proyectos de minería aurífera

Omar Giraldo-Villada*
John Alexander León-Castillo**

Resumen

En actividades de voladuras, el uso de explosivos es fundamental, dado que a través de la detonación, debido a sus propiedades físico-químicas, se generan de manera instantánea gases a alta presión y temperatura, lo que permite la fragmentación de la roca de forma rápida y dirigida. Esto controla efectivamente la energía y permite el aprovechamiento adecuado de los recursos del subsuelo. Sin embargo, esta técnica se ha estigmatizado, pues se ha relacionado con una serie de mitos como la supuesta relación causa-efecto que hay entre el uso de explosivos y la generación de una onda, capaz de producir sismos o derrumbes y proyección de fragmentos sobre montañas cercanas, entre otros aspectos. Estos mitos surgen desde el desconocimiento de la técnica y los procesos de control que hay alrededor

* Ingeniero de Minas y Metalurgia, MSc. Gestión de la Industria Minera. Profesor asociado de cátedra de Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: omegiraldovi@unal.edu.co; omargiraldovillada@gmail.com

** Geógrafo, MSc. Geología y especialista en Técnicas de Voladura en Obras de Ingeniería Civil y Militar. Docente y miembro del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIDC) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: jhaleonc@correo.udistrital.edu.co; jaleonc2000@gmail.com

de la actividad. En el caso del control de vibraciones y la onda aérea, se ha establecido que ejerciendo un control adecuado del tiempo de detonación estas ondas presentan una propagación y atenuación en diferentes direcciones; además, a mayor distancia del punto de origen de la detonación, estas ondas decrecen rápidamente. En el aspecto de normatividad y medidas de seguridad e higiene laboral, estas actividades se centran en la aplicación de protocolos internacionales en torno a las características propias de las empresas, dado que para el territorio colombiano no existe normatividad en ninguna institución reguladora en la que se definan los parámetros técnicos o protocolos de fiscalización.

Palabras clave: voladura, variables geomecánicas, vibración, onda aérea, estudio de impacto ambiental, medidas de seguridad.

Introducción

En cualquier proyecto minero, el aprovechamiento de los recursos del subsuelo minero exige el empleo de explosivos, para el desarrollo de túneles, galerías e incluso la extracción del mineral a aprovechar; en los últimos, el incremento en la demanda de recursos mineros ha exigido técnicas más efectivas de explotación de recursos, acelerando el desarrollo en técnicas y control de las voladuras, a las que se les ha acusado de generar daños ambientales severos, dado que existen mitos sobre el uso desmedido de los explosivos en esta actividad, esto a raíz del desconocimiento de la temática en general y, en específico, en el manejo de protocolos para el control de vibraciones o ruido.

Bajo suposiciones generalizadas, por desconocimiento de la técnica de voladuras, se ha estigmatizado la complejidad y cuidadosos cálculos que hay detrás del empleo de explosivos para actividades de minería, desconociendo que detrás de cada detonación hay diversas técnicas de evaluación, manejo y control del explosivo, antecediendo en todo momento a una cuidadosa evaluación del entorno, la fuente explosiva, el camino o trayectoria que seguirán las ondas hasta su disipación. Al respecto, se increpa con una serie de mitos que circulan entre los habitantes residentes en las zonas aledañas a actividades de minería, mitos entre los que se encuentra la supuesta relación causa-efecto que hay entre el uso

de explosivos y la generación de una onda, capaz de producir sismos o derrumbes, proyección de fragmentos sobre montañas cercanas, así como la afectación o generación de daños a la infraestructura.

En el presente capítulo, se desmentirán algunos mitos acerca del empleo de explosivos en proyectos de minería a fin de entender los procesos de evaluación, manejo y control que existen en torno a las voladuras. Es indispensable, aunque sea a nivel básico, conocer sobre los materiales y métodos implementados, por ello se presenta, de manera general, el tema de los explosivos, sus propiedades, clases y algunos conceptos básicos en voladuras. Para tal efecto, se abordan temas como: 1) explosivos industriales, a fin de dar a conocer la clasificación de estos y, dadas sus características químicas, evidenciar qué compuestos realmente se liberan al medio; 2) criterios de selección del explosivo; se evidenciará que no todos los explosivos tienen el mismo uso y su fin hace parte de cuidadosos diseños del patrón de voladura en el que se busca el menor impacto y el máximo aprovechamiento del recurso; 3) uso de explosivos en proyectos mineros; se muestra en qué etapas del proyecto minero se hace realmente uso de estos; 4) impactos ambientales asociados al uso de explosivos; este aparte tratará los impactos reales que genera la utilización de explosivos; 5) medidas de seguridad en el empleo de explosivos; se describirán las condiciones de seguridad que se deben tener a fin de realizar una operación de voladura y, finalmente; 6) disposiciones legales, en las que se dan a conocer los requerimientos que dispone la ley para el uso, manejo y control de explosivos en el territorio nacional. Esta estructura se presenta para que el lector, a medida que profundice en la lectura, vaya generando conclusiones de carácter general y que le permitirán revertir los mitos que existen sobre los impactos generados al ambiente por el uso de explosivos.

1. Metodología

Para el desarrollo del presente capítulo se utilizó el método de investigación desde el enfoque cualitativo-cuantitativo, para lo cual se utiliza como instrumentos de recabación de la información diferentes estudios, manuales y literatura referente a esta temática, basadas en las técnicas de recolección de datos y análisis de problemáticas. Dicha revisión bibliográfica se desarrolla bajo el contexto del empleo de explosivos en proyectos de minería, comprendiendo libros, manuales, informes técnicos y demás relevantes

en el tema del uso de explosivos en proyectos de minería, evaluando de manera técnica y analítica los procesos en los que se requiere este insumo y sus aspectos, y asociándolo a los mitos por su uso. Por esta razón, este capítulo será de tipo descriptivo, mediante el cual se realizará una explicación general de los procesos en los que se involucra su utilización, desde una perspectiva técnica y adecuada para el desarrollo de voladuras. Esta información servirá de base para la posterior desmitificación sobre su uso.

Para el desarrollo del capítulo, se consultan y evalúan referentes bibliográficos que presentan los estándares en el proceso de voladuras y manejo de explosivos, además de consulta de material detallado de las metodologías implementadas en este aspecto en países de tradición minera en Latinoamérica como Chile, Argentina, Perú y Colombia, norteamericanos como los Estados Unidos, Canadá y México y europeos como Italia, España y Suiza, en los que se exponen las relaciones de vigilancia desarrolladas en cada una de las naciones para el control de impactos generados por el uso de explosivos.

Por otra parte, el capítulo tendrá como estudio de caso la revisión de un estudio de impacto ambiental (EIA), en el cual se evaluará su pertinencia respecto a la relación causa y efecto de una potencial voladura y el uso de sustancias explosivas para esta, a fin de establecer su pertinencia en la valoración y manejo de los impactos al medio posteriores a la voladura.

2. ¿Qué son los explosivos?

Los explosivos son compuestos químicos o mezclas susceptibles a un proceso de degradación extremadamente rápido, el cual genera de manera instantánea grandes volúmenes de gases a alta temperatura y presión, el cual provoca un efecto destructor. Según Ames (2012), “un explosivo es un compuesto químico o una mezcla de compuestos químicos a los cuales al imprimirles un estímulo correcto o incorrecto, sufren una reacción química violenta de tipo exotérmica”. Su utilización esencial es en actividades de minería para el arranque de rocas y consiste en disponer de una energía concentrada químicamente, situada de modo adecuado en un lugar y en una cantidad específica, de tal forma que al ser liberarla de manera controlada (tiempo y espacio) genere una fragmentación determinada del material rocoso (Ames, 2012).

Los explosivos convencionales y los agentes explosivos presentan propiedades que los diferencian y caracterizan, propiedad que se aprovecha para su adecuada selección, buscando responder al tipo de voladura que se pretende realizar y las condiciones específicas requeridas para la misma (López Jimeno, López Jimeno y García Bermúdez, 2003).

3. Los explosivos industriales

Los explosivos químicos industriales se clasifican en dos grandes grupos, según la velocidad de su onda de choque: explosivos rápidos detonantes con velocidades de entre 2000 m/s a 7000 m/s y explosivos lentos deflagantes con menos de 2000 m/s (López Jimeno, López Limeno y Ayala Carcedo, 2006).

Los explosivos industriales se dividen a su vez en dos grandes grupos: los agentes explosivos que corresponden a mezclas que intrínsecamente no contienen ingredientes explosivos, dentro de los que encontramos el ANFO, ALANFO, hidrogeles, emulsiones, ANFO pesado; y los explosivos convencionales, los que requieren para su fabricación sustancias intrínsecamente explosivas, las que actúan como sensibilizadores de las mezclas; dentro de las más comunes encontramos los gelatinosos, pulverulentos y de seguridad (Marshall y Oxley, 2009).

De acuerdo con su composición, los agentes explosivos también se pueden diferenciar en:

Agentes explosivos secos. En este grupo encontramos todos aquellos explosivos que no son sensibles al detonador y en cuya composición no ingresa el agua. El factor común entre ellos es el contenido de nitrato amónico, por lo que deben ser analizadas algunas de sus propiedades (López Jimeno, López Limeno y Ayala Carcedo, 2006).

Nitrato amónico (NH_4NO_3). Corresponde a una sal de tipo inorgánica de color blanco cuya temperatura de fusión es 160,6 °C., que por sí sola no es un explosivo, pues solo adquiere esta propiedad cuando es mezclada con una pequeña cantidad de combustible y reacciona violentamente con él aportando oxígeno. Su contenido de aire es del 21% de oxígeno, el NA posee el 60%. Aunque el NA puede encontrarse en diversas formas, en la fabricación de explosivos se emplea aquel que se obtiene como partículas esféricas o *prills* porosos, ya que es el que presenta las mejores características para absorber y retener los combustibles líquidos y es fácilmente

manipulable sin que se produzcan apelmazamientos y adherencias (López Jimeno, López Jimeno, Ayala Carcedo y Visser de Ramiro, 2017).

ANFO. Es un explosivo de alta potencia el cual está constituido por una mezcla de nitrato de amonio y combustible derivado del petróleo. La cantidad de nitrato de amonio y combustible pueden variar según la longitud de la cadena hidrocarbonada del combustible utilizado. Los porcentajes van del 90% al 97% de nitrato de amonio y del 3% al 10% de combustible, por ejemplo, 95% de nitrato de amonio y 5% de queroseno, en este caso se tiene como principal inconveniente su extremada facilidad para disolverse en agua, dada su tendencia a la absorción derivada de propiedad de higroscopia. Cuando al ANFO se le añade polvo de aluminio, este se transforma a una variedad de mayor potencia llamada AIANFO. La explosión del ANFO no presenta destello y su onda expansiva es muy poderosa en relación con la cantidad utilizada (López Jimeno, López Limeno y Ayala Carcedo, 2006).

Hidrogeles. Este agente explosivo corresponde a los constituidos por soluciones acuosas saturadas de NA, con frecuencia con otros oxidantes como el nitrato de sodio o de calcio, en el cual se encuentran dispersos los combustibles, sensibilizantes, agentes espesantes y gelatinizantes que evitan la segregación de los productos sólidos. La solución de oxidantes está constituida por agua, nitrato amónico y nitrato sódico, a la cual se agrega tio-úrea y parte de goma, la que permite conseguir una viscosidad alta para retener las burbujas de gas. El nitrato sódico tiene las ventajas de disponer de una gran cantidad de oxígeno y disminuye el punto de cristalización de las soluciones salinas (López Jimeno, López Jimeno y García Bermúdez, 2003).

Emulsiones. Mantienen las propiedades de los hidrogeles, pero se diferencia de estos en que se mejoran dos características fundamentales, su potencia y su resistencia al agua. Sus constituyentes han permanecido químicamente inalterados durante mucho tiempo (nitrato amónico + gas oil), pero se ha alterado físicamente de forma drástica. Químicamente, una emulsión es un sistema bifásico en forma de dispersión estable en estado líquido inmiscible en otro. Las emulsiones explosivas son del tipo denominado “agua en aceite” en las que su fase acuosa está compuesta por sales inorgánicas oxidantes disueltas en agua y la fase aceitosa por un combustible líquido inmiscible con el agua del tipo hidrocarbonado. El

agente gasificante utilizado está compuesto por poliestireno expandido o microesferas de vidrio (López Jimeno, López Jimeno, Ayala Carcedo y Visser de Ramiro, 2017).

ANFO pesado. Es una combinación de emulsión base con ANFO, el cual presenta unos huecos intersticiales que pueden ser ocupados por explosivo líquido como la emulsión que actúa como una matriz energética, esto tiene de beneficio una mayor energía, mejores características de sensibilidad, alta resistencia al agua, posibilidad de desarrollo de cargas con variación de energía a lo largo del barreno (López Jimeno, López Jimeno y García Bermúdez, 2003).

Gelatinosos. Es una gelatina explosiva conformada en un 92% de NG y el 8% de NC, lo que genera un balance nulo de oxígeno y desarrollando una energía superior generada por la NG pura. Se agregan sustancias oxidantes y combustibles en adecuadas proporciones para mantener el balance de oxígeno, así, el porcentaje de NC-NG de las gelatinas explosivas actuales oscila entre el 30 y el 35%, y el restante corresponde a los oxidantes como el nitrato amónico, a los combustibles y a otros productos especiales usados para corregir la higroscopicidad de los nitratos (López Jimeno, López Jimeno y García Bermúdez, 2003).

Explosivos de seguridad. Son todos a aquellos preparados para uso en atmósferas explosivas, ambientes inflamables de polvo y gas grisú. Se caracterizan por presentar una baja temperatura de explosión, estos a su vez se clasifican en dos grupos, el primero, en su composición presenta un aditivo que actúa como inhibidor de la explosión, usualmente cloruro sódico. El segundo grupo o de seguridad reforzada o de intercambio iónico habitualmente está compuesto por pequeños porcentajes de NG, un combustible y el par salino nitrato sódico-cloruro amónico (López Jimeno, López Limeno & Ayala Carcedo, 2006).

Pólvoras. Están compuestas básicamente por nitrato potásico (75%), azufre (10%) y carbón (15%) (López Jimeno, López Jimeno y García Bermúdez, 2003).

Se puede establecer a nivel general que, aunque los explosivos tienen una composición de base similar, cada tipo de explosivo se caracteriza por presentar una composición química específica, permitiendo establecer que están constituidos por una serie de sustancias, mezcladas íntimamente, unas de tipo combustibles y otras de tipo oxidante, las que, estando

debidamente balanceadas y siendo correctamente iniciadas, responden al estímulo casi de manera inmediata, dando lugar a una reacción química que produce la liberación de muy altas cantidades de energía, con un desplazamiento de alta velocidad, aunque no de carácter homogéneo, que genera gases a alta temperatura y presión, razón por la que cada uno cuenta con características propias y útiles en los procesos requeridos en las labores de minería.

4. Propiedades y características de los explosivos

En las labores de minería, la selección adecuada del explosivo, para un determinado fin supone conocer las características y propiedades de cada explosivo, y a partir de ellas hacer la elección del más adecuado acorde al tipo de labor por desarrollar dentro de la operación de minería. Las características prácticas de mayor interés en el conocimiento de explosivos son la potencia explosiva, poder rompedor, velocidad de detonación, densidad, diámetro crítico, masa crítica, resistencia al agua, calidad de humos, toxicidad, sensibilidad, estabilidad química, calor de explosión y balance de oxígeno (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013). A continuación, se trata cada una de estas propiedades y características.

Potencia explosiva. Se define la potencia explosiva como la capacidad que tiene el explosivo para fragmentar y proyectar la roca. En realidad, se trata de la energía de este aprovechada en la voladura. Esta característica está estrechamente relacionada con la composición del explosivo, el cual se puede optimizar con técnicas de voladura adecuadas (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

Poder de fragmentación. Es una propiedad del explosivo que indica la capacidad de fracturar la roca adecuadamente y conforme a la onda de detonación y no al conjunto de la onda de detonación más la presión de los gases (que es medida de potencia). El poder fragmentador es un parámetro muy importante para el uso de explosivos confinados o desacoplados, en este caso, los gases no pueden desarrollar grandes presiones. Es el caso de las cargas huecas y de las cargas para taqueo. Se caracteriza por que se realiza mediante el método de Hess, en el que se establece la reducción de altura que provoca la detonación de una cantidad de explosivo definida en un cilindro de plomo. Este método también es adecuado para explosivos sensibles al detonador y de diámetro crítico pequeño. Si bien es un ensayo

utilizado hace mucho tiempo y que los explosivos han evolucionado en gran medida desde su inicio, esta metodología sigue generando resultados apropiados (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

Velocidad de detonación. La detonación de una columna continua de explosivo provocará la transformación del explosivo en un gran volumen de gases a elevada temperatura y presión. La velocidad a la que se produce la transformación se denomina velocidad de detonación, siendo su unidad de medida el metro sobre segundo (m/s). Es importante diferenciar entre la velocidad de detonación (producto de la reacción química) y de la onda de choque (producto de la transmisión física). La velocidad de detonación es una propiedad que se debe evaluar al hacer la elección del explosivo. Se elegirá un explosivo que detone lentamente, dando lugar a una energía que se genera de manera progresiva, cuando se desarrolla en voladuras en rocas blandas o se requiere una fragmentación gruesa, mientras que se deben escoger explosivos dotados de elevada velocidad de detonación cuando se pretendan fragmentaciones más intensas en rocas duras.

Existen diferentes métodos para el cálculo y medición de la velocidad de detonación, los que se diferencian básicamente por el objeto de cada uno de ellos. Así, se pueden obtener medidas desarrolladas en condiciones de laboratorio y mediciones realizadas en campo. Si bien los resultados deben ser análogos, las medidas ejecutadas en campo permiten explicar la evolución de la velocidad de detonación a lo largo del barreno, estableciendo la relación del comportamiento del explosivo bajo condiciones reales de voladura (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

Densidad: es una característica muy importante de los explosivos industriales. Esta depende del tipo de componentes empleados para fabricación, estableciendo que cuanto mayor es la densidad del explosivo mayor será la concentración de carga para el diámetro de barreno determinado. La densidad relativa del explosivo está comprendida normalmente entre los 0,8 y 1,5. Existen explosivos de menor densidad con aplicaciones determinadas, cuyo uso implica una baja energía por unidad de volumen con aplicación en voladuras de recorte o bien en aplicaciones en voladuras de escombreras. La densidad es también un parámetro a tener en cuenta al momento de la carga de barrenos con agua en su interior. La carga de explosivos de densidad por debajo de $1,1 \text{ g/cm}^3$ en barrenos con agua resulta complicada, ya que se hace más difícil al llenarse completamente

los barrenos, dado que los cartuchos tienden a flotar (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

Diámetro crítico. Es el diámetro de una carga cilíndrica por debajo de la cual la onda de detonación no se propaga o lo hace a una velocidad muy inferior a la nominal (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

Masa crítica. Es la mínima cantidad de explosivo que se necesita para que se produzca la detonación por efecto de una llama (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

Resistencia al agua. Es la característica por la cual un explosivo, sin necesidad de cubrimiento especial, mantiene sus propiedades inalteradas durante un periodo de tiempo en contacto con el agua. Las dinamitas gelatinosas, hidrogeles y emulsiones se oponen perfectamente cuando son cargados en barrenos con agua y por esta característica es adecuado su uso en barrenos con agua en su interior. Sin embargo, los productos pulverulentos y ANFOS no resisten al agua por su carácter soluble del nitrato amónico. La resistencia al agua depende primordialmente del estado de agregación de cada elemento del explosivo.

A modo de ejemplo, el nitrato amónico es poco resistente al agua, ya que se disuelve en ella con facilidad; sin embargo y en determinadas condiciones y en forma de emulsión o disolución saturada, es el componente principal de ciertos explosivos caracterizados por presentar alta resistencia al agua. En el caso de que el uso del explosivo sea en voladuras bajo agua, se debe tener en cuenta que el explosivo utilizado sea capaz de soportar la presencia del agua y no disolverse, además debe mantener su sensibilidad de iniciación y propagación bajo estas circunstancias. En estas condiciones, se deben utilizar explosivos diseñados especialmente para esta finalidad. Por último, cuando los barrenos presentan simplemente un grado alto de humedad, se puede emplear cualquier tipo de explosivo, asegurándose siempre de que el tiempo de permanencia de este en el barreno sea corto o se realice el enfundado del mismo; si se trata de explosivos a granel como el ANFO, para disminuir o mitigar este efecto, se han desarrollado productos específicos, como el ANFO resistente al agua, que incorpora aditivos que recubren el *prill* de nitrato amónico de modo que no se disuelva en agua durante un periodo de tiempo establecido (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

Calidad de los humos. El humo residual es el conjunto de productos gaseosos producto de las reacciones de detonación del explosivo, entre los que se encuentran vapores nitrosos (NO_x), vapor de agua, monóxido de carbono (CO) y anhídrido carbónico (CO_2). Los explosivos industriales poseen una composición preestablecida en el que las reacciones químicas que se producen generan humos de voladura de limitado contenido en gases nocivos (CO y NO_x), lo que indica que se producen bajo una reacción química completa. No obstante, dado que las condiciones de aplicación en campo se apartan de las condiciones teóricas, el nivel de gases tóxicos (CO, NO_x , etc.) generados en las voladuras es elevado, esto puede generar molestias e incluso graves intoxicaciones a las personas inmersas en el proceso. Por esta razón, nunca se debe acceder a las inmediaciones de un frente después del desarrollo de una voladura, sin tener la seguridad de que se han ventilado adecuadamente los gases producidos en esta, bien sea por medición directa o por cálculo (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

Toxicidad. Los glicoles nitrados, como la nitroglicerina, son vasodilatadores y causan dolor de cabeza por inhalación o absorción cutánea. Al entrar en contacto con la piel, pueden causar diversas alteraciones como dermatitis, decoloración, irritaciones, entre otras. Es por ello que la manipulación de los explosivos debe realizarse siempre tomando las debidas precauciones de seguridad industrial (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

Sensibilidad. Se define la sensibilidad de un explosivo como el mayor o menor grado de energía de iniciación que debe transmitir para que se produzca su iniciación y, a continuación, su debida detonación. Se pueden considerar diferentes aspectos relativos a la sensibilidad de los explosivos; unas afectan a la seguridad en la manipulación (fabricación, transporte y utilización) y otras a su iniciación en la voladura: sensibilidad al detonador, sensibilidad a la onda explosiva y sensibilidad al choque y al rozamiento (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

Ensayos específicos en explosivos de seguridad. Los explosivos utilizados específicamente en labores de minería de carbón requieren estar catalogados como explosivo de seguridad. Esta catalogación y clasificación se realiza atendiendo a los resultados de pruebas y criterios concretos. Los ensayos, con atmósferas explosivas, se deben efectuar en galerías de ensayo

específicas, las que constan de cámaras de explosión que desarrollan las condiciones que requieren simular y una cámara o zona de expansión para dirigir la salida de los gases o la llamarada, si es que se produce. Para simular los barrenos, se utilizan cilindros de hierro denominados morteros. Estos morteros llevan un taladro longitudinal a lo largo de su eje y tienen diferentes longitudes (mortero largo o corto) y diferentes configuraciones (mortero cilíndrico o de esquina). Dentro de la cámara de explosión se generan las condiciones más desfavorables que pudieran presentarse en una mina, introduciendo metano, polvo de carbón depositado o en suspensión, o una mezcla de metano y polvo en suspensión (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

La elección y el control estricto de las propiedades y características de los explosivos nos permite obtener una fragmentación específica, ya que desde el manejo del explosivo se puede manipular adecuadamente la reacción química desarrollada, llevando el explosivo a unas condiciones de interés particular, logrando que dicha reacción adquiera velocidades superiores a las del sonido, durante la reacción al explosivo y transformándolo en otras sustancias químicas. Estas reacciones producen gases a entre los 1500 y 4000°C y presiones entre 2 y 10 GPa, los cuales al expandirse rápidamente en condiciones de presión producen una onda de choque de tipo supersónico, con lo que se generan nuevas fracturas alrededor de la roca que lo rodea.

5. Sistemas de iniciación

Los diferentes sistemas de iniciación, conocidos como detonadores, pueden ser empleados de manera indiferente tanto en las voladuras a cielo abierto como en las voladuras subterráneas, su finalidad es dar inicio al explosivo dentro del barreno, o bien al cartucho cebo o multiplicador para que desencadene la detonación al interior de este (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

La elección de cada uno de los diferentes tipos de detonadores está determinada por las necesidades de secuenciación, las características del entorno y la facilidad en la realización de las conexiones, entre otros factores (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

Todos los detonadores establecidos para el uso civil empleados habitualmente en labores de minería tienen en común que contienen

aproximadamente la misma carga explosiva, siendo el elemento diferenciador el modo de iniciación de la carga. En términos generales, este consta de una cápsula metálica de aluminio, o cobre, que alojan un explosivo iniciador, formando una carga base (compuesta por trinitrorresorcinato de plomo y azida de plomo), y otra carga (compuesta por pentrita). Esta carga explosiva se inicia por medio de una píldora inflamable (en detonadores eléctricos, no eléctricos o electrónicos) o bien directamente por efecto de una llama (detonadores ordinarios) (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

6. Tipos de detonadores

Los diferentes sistemas de iniciación, conocidos como detonadores, pueden emplearse tanto en voladuras a cielo abierto como en interior. Su finalidad es la de iniciar los explosivos dentro del barreno, o bien el cartucho cebo o multiplicador que desencadene la detonación en el interior de este. La elección de cada uno de los tipos de detonadores vendrá determinada por las necesidades de secuenciación, características del entorno y facilidad en la realización de la conexión, entre otros factores (Ministerio de Industria Energía y Turismo [MIET], 2016).

6.1. Detonador no eléctrico

Para solucionar el principal problema de los detonadores eléctricos, en 1976, se desarrolló el sistema no eléctrico NONEL. Bajo este sistema no existe ningún elemento con características eléctricas, por lo que es totalmente inerte a los diferentes fenómenos electromagnéticos. El detonador no eléctrico contiene un elemento de retardo, una carga primaria y una carga base, al igual que los detonadores eléctricos. Sin embargo, este elemento de retardo se inicia en este caso por una onda de choque de baja intensidad que viaja a través de lo que se conoce como tubo de choque o de tubo de transmisión (Ministerio de Industria, Energía y Turismo [MIET], 2016).

En este tubo de polietileno, muy fino pero muy resistente a los esfuerzos normales de tracción y de abrasión durante la carga, contiene un leve revestimiento interior de mezcla explosiva (octógeno-aluminio), lo que le permite transmitir una onda de detonación de baja intensidad a una velocidad de aproximadamente unos 2100 m/s. La intensidad de la onda es tan baja que el ruido que genera es tolerable y el tubo no se destruye ni

se produce daño alguno a su alrededor durante el uso. Este tubo se inicia bien mediante un explosor especial o mediante un detonador eléctrico encintado a él. En este caso, gran parte de las ventajas de seguridad del sistema no eléctrico desaparecen. Por esto se recomienda que su iniciación siempre sea mediante una línea de tiro y explosor de tipo no eléctrico (MIET, 2016).

6.2. Detonador electrónico

Estos representan el último desarrollo técnico en materia de sistemas de iniciación. Este detonador se compone de un elemento electrónico el cual se comunica con las unidades de programación y de disparo mediante dos hilos de cobre, un condensador eléctrico, una cerilla pirotécnica, una carga primaria y una carga base. Todos los componentes se encuentran encapsulados y sellados en un casquillo de aluminio. Los extremos de los hilos de conexión van insertados en una pinza especial la cual se cierra fácilmente en la línea de disparo. En este sistema, un elemento electrónico administra los tiempos de retardo, se verifica el circuito y se ejecuta el disparo a voluntad del artillero. Estas dos últimas características presentan una ventaja muy importante y son claves en los procesos de la reducción de vibraciones y la optimización de la fragmentación, ya que las vibraciones terrestres producidas pueden ser previstas de manera anticipada y son modificadas porque no hay una superposición de ondas y se puede diseñar mejor la secuenciación de la voladura, además la precisión del sistema implica una mejor cooperación en la relación entre barrenos (MIET, 2016).

El fin de iniciar un explosivo es generar su adecuada detonación a fin de obtener el máximo de aprovechamiento de la energía liberada para el desarrollo de un trabajo, de ello se resalta que los detonadores no eléctricos pueden reunir características que les permiten una fácil manipulación y seguridad en las labores mineras, generando altos rendimientos en la voladura, además de obtener la minimización de las vibraciones y la reducción de humos tóxicos. Dadas las ventajas anteriores, la voladura que se implementa con detonadores electrónicos, se logra la optimización de la fragmentación y la seguridad en la voladura. Esto se sustenta en la mayor ventaja que presentan los detonadores electrónicos que es su extrema precisión y exactitud, lo que permite tener control de los TQ (tiros quedados) los que son el mayor riesgo en las voladuras, con lo que

logramos la identificación y toma de decisiones en el desarrollo de medidas de seguridad para evitar la detonación no deseada.

6.3. Criterios de selección de explosivo

La elección del explosivo apropiado forma parte fundamental del diseño de una voladura y como consecuencia puede afectar los resultados que se esperan. Para el análisis adecuado y la correcta selección del explosivo es necesario el análisis de variables como precio del explosivo, diámetro de carga, características de la roca, volumen de roca a volar, presencia de agua, condiciones de seguridad, atmósferas explosivas y problemas de suministro (Bhandari, 2007), variables las cuales se presentan tratan a continuación.

El costo del explosivo. Es un criterio de selección muy importante, en principio, se basa en la elección del explosivo más barato que garantice realizar el trabajo requerido (López Jimeno, López Jimeno y García Bermúdez, 2003).

El diámetro de carga. Al usar explosivos cuya velocidad de detonación pueda variar fuertemente con el diámetro, se influye en el resultado de la voladura (López Jimeno, López Jimeno y García Bermúdez, 2003).

Las propiedades y características geomecánicas del macizo rocoso, en donde se desarrollará la voladura. Componen el grupo de variables más importantes, no solo por su influencia directa en los resultados de las voladuras, sino porque además está interrelacionada con otras variables del diseño de la malla de voladura (López Jimeno, López Jimeno y García Bermúdez, 2003).

El volumen de roca por volar. Este criterio establece el tamaño de la excavación por realizar y los tiempos o ritmos de trabajo, asociado a las cantidades de explosivo por utilizar (López Jimeno, López Jimeno y García Bermúdez, 2003).

Las condiciones atmosféricas. En temperaturas ambientales bajas, pueden afectar gravemente los explosivos que contienen nitroglicerina, dado que estos tienden a congelarse a temperaturas inferiores a los 8°C. Para solucionar este problema se utilizan sustancias como el nitroglicol, el cual hace que el punto de congelación pase a los -20°C. Por otro lado, las altas temperaturas también pueden dar lugar a inconvenientes, lo que hace que el manejo del explosivo sea peligroso, como es el caso de las denominadas condiciones de exudación; además, en los ambientes calurosos

los explosivos líquidos tienden a presentar pérdida de combustible por evaporación (López Jimeno, López Jimeno y García Bermúdez, 2003).

Agua. La presencia de esta en el uso de explosivos como el ANFO, en ambientes en los que se presentan condiciones de humedad por encima del 10%, genera alteraciones que impiden la correcta detonación del explosivo (López Jimeno, López Jimeno y García Bermúdez, 2003).

Humos. Los explosivos se han diseñado y preparado de tal forma para que en ellos exista un equilibrio de oxígeno a fin de que se maximice la energía desarrollada y se minimicen los gases tóxicos producto de la detonación; es inevitable la formación de humos nocivos con un porcentaje de gases nitrosos y CO. En la minería subterránea la generación de humos, que es un problema inherente de los explosivos, se debe tener un diseño adecuado del circuito de ventilación para evacuarlos fuera de la mina. Por otra parte, el ANFO al detonar produce una elevada concentración de gases nitrosos (López Jimeno, López Limeno y Ayala Carcedo, 2006).

Condiciones de seguridad. La tecnología avanza en el desarrollo y producción de explosivos menos sensibles a las vibraciones, como los hidrogeles y emulsiones, que son insensibles a los golpes, la fricción y los estímulos de tipo subsónicos (López Jimeno, López Limeno y Ayala Carcedo, 2006).

Atmósferas explosivas. Se deben llevar a cabo estudios de la atmósfera y del entorno próximo a la voladura a fin de establecer la presencia de atmósferas potencialmente inflamables con gas grisú o polvo, que en su mayoría se presenta en minas de carbón y explotaciones metálicas, a fin de usar explosivos de tipo convencional o utilizar explosivos de seguridad (López Jimeno, López Limeno y Ayala Carcedo, 2006).

Problemas de suministro. Hay que tener en cuenta las posibilidades reales del suministro en función de la localización de la actividad, de los requerimientos para los trabajos y puntos de abastecimiento de los explosivos y accesorios, así como el sistema de polvorines necesarios considerando los tiempos de almacenamiento y tipos de explosivo por almacenar (López Jimeno, López Jimeno, Ayala Carcedo y Visser de Ramiro, 2017).

La selección adecuada del explosivo permite incidir directamente en los resultados de la voladura, que a su vez mejora los rendimientos de producción. Se debe evaluar y controlar impactos como vibraciones o ruido, esto desde el control de las propiedades de cada explosivo utilizado; por

otra parte, el control de los niveles de velocidad de partículas provocadas en la detonación está directamente relacionado al tipo de explosivo y el medio en que se use, el adecuado análisis y cálculos de la liberación de energía permite elaborar un diagnóstico y predecir los impactos en la roca circundante.

7. Variables geométricas que intervienen en el diseño de las voladuras

En cualquier actividad de minería, es fundamental que solo se empleen explosivos y accesorios que estén debidamente certificados, e igualmente las personas que manipulen explosivos deben contar con licencia o permiso vigente expedida por la autoridad fiscalizadora competente en el área o lugar en que se encuentre ubicada la faena minera. Con esto se pueden minimizar los impactos y garantizar el control de las variables geomecánicas que intervienen en el proceso de las voladuras. Es importante hacer énfasis en las variables que son controlables en todo trabajo de voladura, variables las cuales se clasifican en tres grupos: 1) geométricas (diámetro, longitud de carga, espaciamiento, retiro, etc.); 2) químico-físicas (tipo de explosivos, potencia del explosivo, energía, sistemas de carga, etc.); y 3) de tiempo (tiempos de retardo, secuencia de iniciación y tiempos de salida) (Servicio Nacional de Geología y Minería [SNGM], 2014).

Según Contreras (2010), una vez establecidas estas variables de diseño, es recomendable dar forma a los parámetros y nomenclaturas que se utilizan en todos los trabajos de voladura en bancos a cielo abierto.

Para su mejor entendimiento se definen estas variables a continuación:

Banco (ver figura 1). Corresponde a la superficie en el terreno, generalmente horizontal con características geométricas tales que faciliten las operaciones de perforación, está dispuesta en una altura en metros definida en el plan de mina y en forma escalonada (Contreras, 2010).

Altura de banco (H) (ver figura 1). Corresponde a la cota topográfica definida por los estudios geotécnicos y avalada en el plan de minas por los entes reguladores, la relación óptima de la altura de banco está definida por la ecuación ($H/B \geq 3$). Si $H/B = 1$, se obtiene una fragmentación gruesa con problemas de repiés y sobrexcavación, si $H/B = 2$, estos efectos se aminoran, pero con $H/B \geq 3$, los efectos son casi nulos. Esta relación

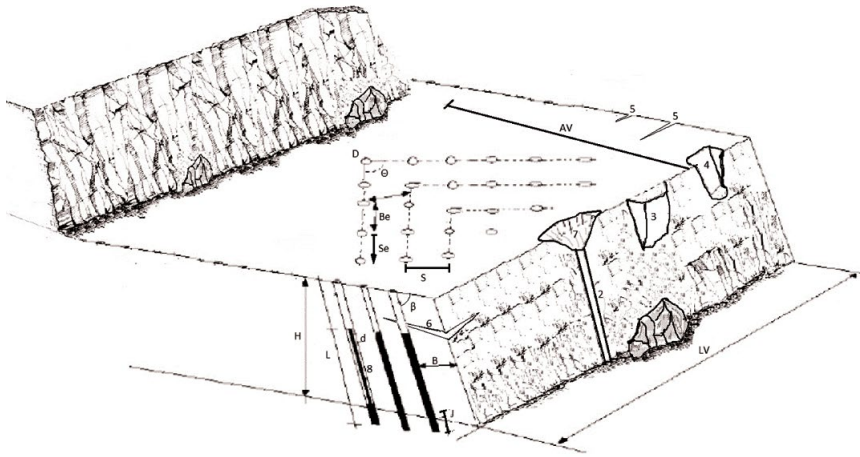


Figura 1. Esquema de una voladura tipo

H: Altura de banco	Øb: Diámetro del barreno	1: Repié
L: Longitud del barreno	Be: Retiro efectivo	2: Área del barreno
S: Espaciamiento	J: Sobreperforación	3: Roca saliente o en voladizo
LV: Longitud de la voladura	I: Longitud de la carga	4: Sobre excavación
Se: Espaciamiento efectivo	T: Retacado	5: Grieta de tracción
AV: Ancho de la voladura	D: Diámetro de la carga	6: Descabezamiento
β: Ángulo de inclinación del barreno	θ: Ángulo de salida	7: Cráter
	B: Retiro	8: Carga desacoplada

Fuente: autores (2020).

se cumple en canteras y minería de carbón, pero en minería de metálicos la altura de banco viene impuesta por el alcance del equipo de carga y la dilución mineral (Contreras, 2010).

Longitud del barreno (L) (ver figura 1). La longitud de perforación corresponde a la perforación realizada en el área de voladura, la que está definida por la altura del banco (Contreras, 2010).

Área a volar. Es la denominación que recibe el sector previamente seleccionado para el desarrollo de la voladura (Contreras, 2010).

Diseño localizado. Es la ubicación exacta de los barrenos ya perforados en los planos de diseño topográficos (Contreras, 2010).

Bolones. Son rocas de gran tamaño, producto en ocasiones de una malla voladura (Contreras, 2010).

Malla de perforación. Representa la disposición de los barrenos en el terreno definida por el espacial burden o retiro y espaciamiento (Contreras, 2010).

Diámetro del barreno ($\varnothing b$). Definido por el diámetro de la broca de perforación, diseñado según las características del macizo rocoso, el grado de fragmentación deseado, la altura del banco, la configuración de las cargas y por el equipo de perforación seleccionado (Contreras, 2010).

Burden o retiro (B) (ver figura 1). Distancia más corta a la cara libre, en una malla de perforación, esta variable depende del diámetro de la perforación, de las propiedades de la roca, de los explosivos por utilizar, de la altura del banco y el grado de fragmentación y desplazamiento del material deseado; los valores de esta se encuentran entre 25 a 40 D, dependiendo fundamentalmente del macizo rocoso. Valores menores o mayores con respecto al teórico previsto se pueden presentar bajo las siguientes condiciones: 1) error de posicionamiento o replanteo del barreno; 2) falta de paralelismo entre el barreno y la cara del banco; 3) desviaciones del barreno durante la perforación; y 4) irregularidades en el frente del talud (Contreras, 2010).

Espaciamiento (S) (ver figura 2) Distancia más larga entre barrenos de una misma fila en una malla de perforación, como en el cálculo del Burden, esta variable depende del retiro, el tiempo de retardo de los barrenos y de la secuencia de encendido. Espaciamientos pequeños pueden producir entre las cargas un exceso de trituración. Espaciamientos excesivos generan bloques de gran tamaño (Contreras, 2010).

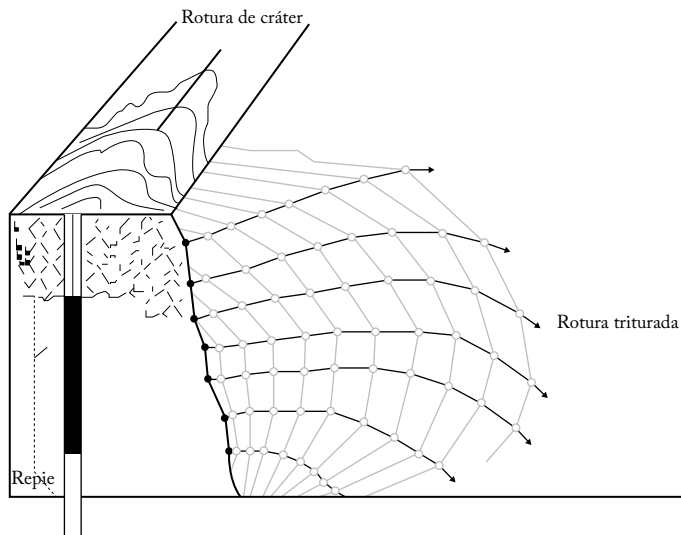


Figura 2. Influencia del espaciamiento en una voladura en banco

Fuente: autores (2020).

Retacado (T). Volumen del barrenado relleno de material inerte generalmente en superficie y que está definido por la relación entre la carga del barrenado y el diámetro del mismo. Por regla general, se establece que al aumentar el diámetro del barrenado se incrementa el retacado, se guarda relación con este mediante la forma $T/\varnothing b < 60$. Tiene la misión de confinar y retener los gases producidos durante la explosión para permitir que se desarrolle por completo el proceso de fragmentación de la roca. Si este es insuficiente se produce un escape prematuro de los gases generando problemas de onda aérea y amenaza por la generación de proyecciones, si este es excesivo se obtienen grandes cantidades de bloques, poco esponjamiento de la pila de material y altos niveles de vibración. Para su determinación, se debe tener en cuenta: 1) el tipo y tamaño del material utilizado, y 2) la longitud de la columna de retacado (Contreras, 2010).

Por lo general, se emplea el material de detritus de la perforación, ya que este se encuentra disponible junto al barrenado, sin embargo, se recomienda que el material producto de la trituración esté seco, pues el aumento de la humedad disminuye el riesgo de eyección de la roca, el tamaño del material de retacado debe estar entre $1/17\varnothing b$ y $1/25\varnothing b$.

Respecto a la longitud óptima del retacado, se considera que debe estar entre $20\varnothing b$ y $60\varnothing b$, aumentando esta conforme disminuye la competencia y calidad de la roca. Se recomienda contar con una longitud de retacado superior a $25\varnothing b$ para evitar problemas de onda aérea, proyecciones, cortes y sobreexcavaciones (Contreras, 2010).

Sobreperforación (J). Hace referencia a la longitud del barrenado requerida por debajo del nivel del piso para romper la roca a la altura del banco y lograr una fragmentación y desplazamiento adecuada del material, que permita al equipo de carga alcanzar la cota de excavación prevista. Si la sobreperforación es pequeña, no se producirá el corte a la rasante que se proyecta, dando como resultado la aparición de repiés con un considerable aumento en los costos de carga, pero si esta es excesiva se puede producir:

- Aumento de los costos de perforación y voladura.
- Incremento de los niveles de vibraciones.
- Fragmentación excesiva en la parte alta del banco inferior, que provocará problemas en la perforación de este y afectará en las zonas finales de cota a la estabilidad de los taludes.

- Un aumento en los riesgos de descabezamiento y sobreexcavación al acentuarse la componente vertical de desplazamiento de la roca. La rotura en el fondo del barreno se produce en forma de cono invertido con un ángulo con la horizontal dependiendo de la estructura del macizo y de las tensiones residuales, normalmente está entre 10° y 30° . El valor de la sobreperforación se puede obtener de la fórmula:

$$J = 0,30B$$

Puesto que se cumple la relación $S = 1$ a $1,40B$ y, además,

$$J / B = \text{Tag } \alpha \times (S / 2), \text{ en donde: } \alpha = \text{ángulo con la horizontal } (10^\circ \text{ a } 30^\circ)$$

Para eliminar la sobreperforación se recomienda la aplicación de cargas explosivas con un alto valor de concentración de energía por unidad de longitud en la parte inferior de la carga y el empleo de barrenos inclinados. Como dato adicional en las labores de minería de carbón en capas horizontales, cabe señalar que para eliminar los efectos de la trituration de los extremos de las cargas, la sobreperforación tomará valores negativos, ya que se efectúa un relleno en el fondo del barreno en longitud aproximada de $4\phi b$ (Contreras, 2010).

Angulo de salida (θ). Este corresponde al ángulo de incidencia de un barreno respecto a la disposición de los demás barrenos en la malla de perforación (Contreras, 2010).

Angulo de inclinación del barreno (β). Este corresponde al ángulo en que se desarrolla la perforación con respecto a la vertical y que se encuentra relacionado con los parámetros geotécnicos de la roca, mientras la perforación esté inclinada se presentan ventajas dentro de las que se destacan:

- Se mejora la fragmentación, el desplazamiento y el esponjamiento de la pila de materiales, ya que el valor B se mantiene uniforme, aumentando el ángulo de la trayectoria de las proyecciones.
- Se mejoran los problemas de cortes en las líneas de iniciación y por consiguiente las fallas en las voladuras.
- Los taludes con paredes más sanas, estables y seguras en los nuevos bancos creados.

- Los equipos de carga sobre ruedas obtienen mayores rendimientos, debido a la menor altura y un mayor esponjamiento de la pila (Contreras, 2010).

La propiedad geométrica más importante en el diseño de voladuras es el diámetro del barreno, con este se optimiza la velocidad de detonación de los explosivos, se define el tamaño u objetivo de la voladura y a partir del diámetro se dimensionan todas las otras variables geométricas.

El adecuado conocimiento de las variables geomecánicas que intervienen en desarrollo de las voladuras permite el desarrollo y aplicación de algoritmos o técnicas de modelamiento rápidas y adecuadas con cuyo resultado se obtienen las diferentes variables que acondicionan y determinan la operación de voladura; puesto en otro contexto, es el ingreso de datos de las variables contra el valor de la resistencia a la compresión de la roca, parámetro que puede condicionar todo el proceso de voladura. Para conocer el valor de dichas variables es necesario tener un adecuado conocimiento del terreno y un buen diseño de la malla, lo que nos permite retroalimentar el algoritmo acorde a cada cambio detectado. Esto se traduce en ahorro de tiempo, lo cual para la industria minera es sinónimo de disminución de costos.

8. El uso de los explosivos

La elección de un explosivo para el desarrollo de actividades determinadas requiere una cuidadosa valoración de las propiedades y características de la roca que se desea fragmentar como las de los explosivos disponibles en el mercado (Contreras, 2010).

Cuando se arrancan rocas masivas, casi toda la superficie específica del material se desarrolla durante la voladura y con la aplicación de explosivos adecuados, los que corresponden a los de mayor potencia y velocidad de detonación, produciendo una alta presión de barreno, para rocas intensamente fracturadas o estratificadas en las que la superficie total de las discontinuidades representa un área relativamente mayor que la que se crea con la voladura. En estas condiciones, el explosivo de baja densidad y VOD es mucho más eficiente (Contreras, 2010).

Para mejorar los rendimientos en el cargue es necesario que la voladura tenga un buen esponjamiento, es decir, que los fragmentos de roca

queden bien distribuidos y sueltos. Esto lo podemos lograr cuando se tiene un equilibrio entre la Energía de Tensión (ET) y la Energía de los Gases (EG), cada explosivo define estas energías dependiendo del diámetro de las cargas, de la densidad y del sistema de iniciación. En este orden, las emulsiones poseen alta ET y se aplican en rocas masivas duras y en las situaciones en que no se requiere un máximo de desplazamiento. Si en una detonación se producen altas cantidades de material fino por efecto de la trituración de la roca, se deben emplear los ANFOS o algún agente de voladura de baja densidad o en el caso de las mezclas con sustancias inertes (Contreras, 2010).

9. Distribución de explosivos en el barrenado

En las voladuras de banco, la energía que se requiere para la fragmentación o rotura de la roca no es constante en toda su altura. En consecuencia, la energía generada por el explosivo debe superar la resistencia a la tracción de la roca en la sección (CDD'C') y la resistencia al cizallamiento en la sección (A'B'C'D') (Contreras, 2010).

Dado que la resistencia a cizallamiento es muy superior a la resistencia a la tracción, es preciso emplear una distribución de cargas de manera selectiva, de tal forma que la energía específica en el fondo del barrenado esté en una relación de 2 a 2,5 veces superior a la energía de la columna (ver figura 3). Esto significa que se deben emplear explosivos de gran densidad y potencia en la carga de fondo y explosivos de baja densidad en la carga de columna (Contreras, 2010).

Para la carga de fondo se debe tener al menos una longitud de 0,6 B para que su centro de gravedad esté por encima o a la misma cota que el piso del banco. Según Langefors, se prolongará la carga de fondo por encima de una longitud igual al valor del Burden, con esto no se contribuye apreciablemente al efecto de rotura en el plano en el pie del banco, por lo que la carga inferior debe estar comprendida entre 0,6 a 1,3 B. Para cargas cilíndricas alargadas en explotaciones mineras a cielo abierto de gran diámetro (299-415) mm, se ha extendido el uso de cargas continuas de ANFO a granel, mezclas (emulsión/ANFO) y en algunos casos se realizan cargas selectivas constituidas en el fondo por ANFO aluminizado, hidrogeles o emulsiones con longitudes de 8 a 16 D (Contreras, 2010).

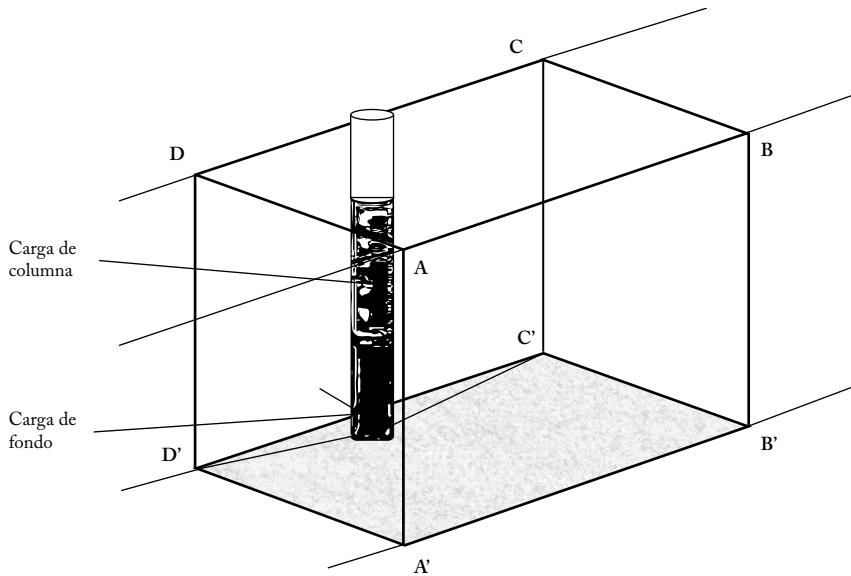


Figura 3. Distribución del explosivo en un barreno

Fuente: autores (2020).

En los casos en que son implementadas cargas de tipo selectivo, se pueden presentar las siguientes ventajas:

1. Aumento en el rendimiento de la perforación como consecuencia de un esquema más amplio y la menor longitud de sobreperforación.
2. Mejora la rotura en el fondo, eliminando los problemas de repiés y favoreciendo la operación de carga de escombros.
3. Disminución en los costos de perforación y voladura, en especial en las rocas duras.
4. Baja en el consumo específico de explosivos, esto se debe a que hay un mejor aprovechamiento del mismo. (Contreras, 2010)

10. Consumo específico de explosivos

Es la cantidad de explosivo necesaria para generar la fragmentación de 1 m^3 o 1 t de roca, este parámetro se conoce como Consumo Específico (CE). Este parámetro no constituye ni la mejor ni la única herramienta para el diseño de voladuras, a no ser que se haga referencia a un explosivo

patrón o se exprese como consumo energético. Fundamentalmente, se debe a que la distribución espacial del explosivo en el barreno perforado en el macizo rocoso tiene una gran influencia sobre el resultado al final de la voladura. El CE de las voladuras se incrementa con: 1) el aumento del diámetro de los barrenos, la resistencia de la roca y el grado de fragmentación, desplazamiento y esponjamiento requerido, y 2) con una mala distribución de la carga, se genera la disminución de la resistencia a la eyección del retacado, disparos contra frentes libres cóncavos biplanares o cubiertos de escombros, la relación longitud/altura inadecuada y tiempo efectivo de retardo inadecuado (Contreras, 2010).

Cuando son utilizados barrenos paralelos al frente libre y esquemas triangulares equiláteros tradicionalmente se debe iniciar con consecuencias en V1 o V2, de esta manera los consumos específicos serán menores.

Los CE altos, además de proporcionar una buena fragmentación, adecuado desplazamiento y esponjamiento de la roca, dan lugar a menores problemas de repiés, con lo que contribuyen a obtener el punto óptimo en los costos totales de la operación (perforación, voladura, carga, transporte y trituración) (Contreras, 2010).

Tabla 1. Valores típicos del consumo explosivo

Tipo de roca	Consumo específico (kg/m ³)
Rocas masivas y resistentes	0,60-1,50
Rocas de resistencia media	0,30-0,60
Rocas muy fracturadas, alteradas o blandas	0,10-0,30

Fuente: Contreras (2010).

En la tabla 1 se pueden observar los valores típicos del CE para diferentes tipos de rocas, aplicado a las voladuras en banco a cielo abierto. Para voladuras subterráneas el CE puede variar entre el 0,90-7 kg/m³, dependiendo del tipo de roca, la superficie libre, el diámetro del barreno y tipo de cueles (Contreras, 2010).

11. Iniciación y cebado de cargas

Para un tipo de explosivo, mediante el empleo de iniciadores o cebos (*booster* minero), en el cual puede variarse el equilibrio entre la energía de

tensión ET y la energía de burbuja EB desarrolladas durante la voladura, para adecuarse a las características de resistencia y estructurales de la roca. También cuando se desea aumentar la tensión en un tramo específico de la roca más dura dentro del área de influencia de un barreno se pueden colocar iniciadores en esos niveles (Contreras, 2010).

12. Tiempos de retardo y secuencias de encendido

Los tiempos de retardo entre barrenos y las secuencias de encendido juegan un papel fundamental en la voladura, puesto que con sus distribuciones adecuadas se pueden disminuir las cargas operantes y como consecuencia reducir los niveles de vibración producidos y hacer que se logre una mayor efectividad de los mecanismos de fragmentación, rotura y control sobre los desplazamientos de la roca, disminuyendo así los procesos de sobreexcavación, repiés y generación de proyecciones (Contreras, 2010).

13. Perforación específica (ps)

Se entiende como perforación específica la longitud de los barrenos perforados por unidad de volumen de roca. La expresión usada para calcular la perforación específica es ps, la cual está dada en m/m^3 (Contreras, 2010).

14. Calidad de la perforación

Los errores en los que se incurre en la perforación son:

- Errores en el replanteo de los barrenos.
- Errores de inclinación y de dirección.
- Errores de desviación.
- Errores en la profundidad de los barrenos.
- Efectos de desviación de los barrenos en la práctica: para determinar estos valores se puede tomar como criterio guía las ecuaciones plantadas en la teoría, para estimar la precisión de la perforación cuando se utilizan accesorios adecuados a las longitudes de los barrenos.
- Control de las desviaciones de los barrenos: actualmente se utilizan herramientas para ejercer control de las desviaciones como; el sistema de brújulas magnética-clinómetro, el

clinómetro químico de ácido, la Girocompás y el Sistemas de dos Clinómetros. (Contreras, 2010)

La adecuada selección de explosivos permite que una determinada roca tenga la energía suficiente para ser fragmentada. La relación entre la densidad del explosivo y su VOD debe ser similar a la relación entre la densidad de la roca y su Vp. Esta relación genera un equilibrio que garantiza un ambiente óptimo en el uso de los explosivos, por lo que a la roca no hay que entregarle más o menos energía, hay que entregarle la energía suficiente que permita generar nuevas fracturas, que es el objetivo de una voladura.

15. Impactos ambientales asociados al uso de explosivos

El uso de explosivos para fines de voladura en operaciones mineras es uno de los principales métodos de extracción de minerales, aplicados tanto en la minería a cielo abierto como en minería subterránea. Su propósito principal es la fragmentación de la roca y para ello es requerida una cantidad considerable de explosivos, en que estos liberan energía durante el proceso de explosión, en el cual solo entre el 20% y el 30% es utilizada para la ruptura y el desplazamiento de las rocas, mientras que el restante de esta energía producida en la detonación es desperdiciada en forma de efectos secundarios que son susceptibles de ser transferidos al ambiente (Ghasemi, Sarai y Arael, 2012).

La voladura se puede definir como la ignición o deflagración de una carga masiva de explosivos (Sunahara, Lotufo, Kuperman y Hawari, 2009). En el proceso de voladura se comprenden varias etapas como el cargue de los huecos hechos durante la perforación. Con una sustancia explosiva, que al entrar en acción origina una onda de choque y, mediante una reacción libera gases a alta presión y temperatura de una forma substancialmente instantánea, para arrancar, fracturar o remover una cantidad de material según los parámetros de diseño preestablecidos en la voladura misma (Ministerio de Minas y Energía [MME], 2003).

La fragmentación de las rocas por voladura comprende la acción de un explosivo y su posterior respuesta de la masa de roca circundante, en la que se involucran factores como el tiempo, energía termodinámica, ondas

de presión, mecánica de rocas y otros, en un rápido y complejo mecanismo de iteración (EXSA, 2009).

La fragmentación del macizo rocoso es producida inmediatamente después de la detonación. El efecto de los impactos de la onda de choque y de los gases en rápida expansión sobre la pared del taladro se transfieren a la roca circundante, difundiéndose a través de ella en forma de ondas o fuerzas de compresión, provocándole solo la deformación de tipo elástica, ya que las rocas son muy resistentes a la compresión. Al llegar estas ondas a la cara libre en el frente de voladura causan esfuerzos de tensión en la masa de roca, entre la cara libre y el taladro. Si la resistencia a la tensión de la roca es excedida, esta se rompe en el área de la línea de menor resistencia o burden. En este caso, las ondas reflejadas son las de ondas de tensión que retornan al punto de origen creando las fisuras y grietas de tensión a partir de los puntos y planos de debilidad naturales existentes, agrietando profundamente la roca, lo que se denomina el efecto de craquelación (EXSA, 2009).

De manera casi simultánea, el volumen de gases liberados y en expansión penetra en las grietas iniciales ampliándolas por acción de la cuña y creando otras nuevas, con lo que se genera la fragmentación efectiva de la roca. Si la distancia entre el taladro y la cara libre está correctamente calculada la roca entre ambos puntos cederá. Posteriormente, los gases remanentes desplazan rápidamente la masa de material triturado hacia adelante, hasta perder su fuerza por enfriamiento y por aumento del volumen de la cavidad formada en la roca. En este momento es que los fragmentos o detritos caen y se acumulan para formar la pila de escombros o material voladura. Con esto se concluye el proceso de voladura (EXSA, 2009).

El uso de explosivos para voladura puede generar alteraciones e impactos al ambiente y comunidades a diferentes escalas. En términos generales, estos se pueden clasificar en impactos a la atmósfera; impactos a la geología y suelos; impactos hidrológicos; impactos a la biodiversidad e impactos a la sociedad. Dentro de los impactos más destacados encontramos el ruido, las vibraciones, la onda aérea, la emisión de polvo, la emisión de gases y las proyecciones de roca; estos impactos pueden generar daños temporales o permanentes al ambiente, además originan daños a las estructuras próximas y son causa de conflictos sociales con los habitantes próximos a las zonas de voladura.

En las actividades desarrolladas en minería, se exige el uso de implementos de seguridad industrial y se establecen perímetros de seguridad a los cuales se evacúa el personal, hacia una franja o perímetro seguro antes de la ejecución de la detonación, la que no es considerada peligrosa para la audición en la comunidad. Por lo tanto, en principio no tendría que representar ningún problema en el objeto de estudio que se realiza en el presente texto. A continuación, se describe la pérdida de la audición, dado que es la patología más común (Sernageomin, 2004).

La pérdida de la audición atribuida al ruido ha sido la patología que más se ha descrito desde los periodos de la Revolución Industrial. Incluso, desde hace varias décadas se ha incluido entre las diez primeras causas de enfermedades de tipo ocupacional; sin embargo, la mayoría de los organismos gubernamentales han hecho poco respecto a su prevención (González, 2009).

Esta patología consiste en la pérdida de la audición en las personas sometidas a una contaminación sonora excesiva. En parte, algunos casos constituyen una consecuencia y en proceso de adaptación a los ruidos excesivos: para evitar los daños físicos o el malestar psicológico que produce el ruido constante, el organismo se habitúa al mismo a costa de perder la capacidad auditiva. Sin embargo, si no se adoptan mecanismos de protección adecuados, se puede llegar a desarrollar una pérdida permanente de la audición (González, 2009).

Los estudios han demostrado que ruidos superiores a los 90 decibelios experimentados de manera frecuente y durante mucho tiempo producen la pérdida de audición. Sonidos que se encuentran por debajo de esta medida, pero que se presentan de forma continua pueden ser causa de daños permanentes a la salud del oído. Si bien una exposición larga a sonidos con una intensidad superior a 90 decibelios puede generar pérdida de audición permanente, de la misma forma una exposición continuada a sonidos de más de 80 decibelios puede llevar a los mismos resultados. También pueden producir pérdida de audición exposiciones de más de un cuarto de hora a 100 decibelios y de más de 1 minuto a 110 decibelios (STPS, 2001).

De manera práctica, el daño en el sistema auditivo está asociado con la exposición a la energía total de un ruido particular, por ejemplo: la equivalencia del nivel de ruido de la ponderación A por más de 8 horas

LAeq,8h (Attenborough, 1995). El análisis de datos disponibles proporciona la base para el desarrollo de estadísticas que tienen como fin el predecir el grado de pérdida auditiva que probablemente será experimentado por las personas expuestas a los ruidos de manera continua durante una jornada diaria de trabajo correspondiente a 8 horas por un período exposición hasta de 45 años (WHO, 1993).

Algunos de los impactos representativos son:

Impactos a la geología y suelos por uso de explosivos. Encontramos que la mayoría de los efectos están asociados a las vibraciones, entre los cuales se destacan: las alteración de la estabilidad estructural del macizo rocoso debido a la perforación y empleo de voladuras; los cambios morfológicos y alteración del macizo rocoso a causa de la remoción de material; la creación de taludes artificiales por los cortes realizados con explosivo al relieve natural; el incremento de procesos erosivos en taludes cercanos debido a las vibraciones generadas por las detonaciones; y la contaminación de suelos por vertimiento accidental de lubricantes y combustibles.

Impactos hidrológicos por uso de explosivos. Se destacan la contaminación de agua superficial por vertimiento accidental de lubricantes y combustibles; la modificación del flujo superficial; y la modificación del flujo subterráneo. Si dentro del área de intervención hay cuerpos hídricos, los derrames de combustible causados por procesos de carga de explosivos o por la acción de la escorrentía pueden afectar los cuerpos superficiales de agua y se puede presentar arrastre eólico de partículas, las que pueden colmatar estos cuerpos; además, por procesos de infiltración, se pueden presentar impactos a los acuíferos locales.

16. Vibraciones

Las vibraciones pueden variar acorde a las condiciones cambiantes presentadas por la geología local, su entorno y las características geomecánicas presentes en las rocas, las que generan influencia directa sobre el comportamiento de las vibraciones. Se resalta que en los macizos rocosos homogéneos y masivos las vibraciones presentan una propagación en todas las direcciones, pero en estructuras geológicas más complejas la propagación de las ondas puede variar con la dirección y como resultado se presentarán diferentes índices de atenuación o leyes de propagación (López Jimeno, López Jimeno, Ayala Carcedo y Visser de Ramiro, 2017).

La presencia de suelos que estén cubriendo el sustrato rocoso afecta por lo general la intensidad y frecuencia de las vibraciones. Los suelos tienen unos módulos de elasticidad inferiores a los de las rocas y por ello las velocidades de propagación de las ondas disminuyen en este material, la frecuencia de vibración disminuye también, pero el desplazamiento aumenta de manera significativa conforme los espesores de recubrimiento son mayores (López Jimeno, López Jimeno, Ayala Carcedo y Visser de Ramiro, 2017).

La magnitud de las vibraciones generadas a grandes distancias decrece rápidamente si existe material de recubrimiento, esto debido a que gran parte de la energía es consumida en el proceso de fricciones entre partículas y en los grandes desplazamientos de estas (López Jimeno, López Jimeno, Ayala Carcedo y Visser de Ramiro, 2017).

Por otra parte, las vibraciones producidas por el uso de explosivos corresponden a un tema que aún está en estudio. En esta temática, los expertos han establecido, en términos generales, una aproximación a la problemática, pues los fenómenos reales al involucrar un mayor número de variables son mucho más complejos debido al mismo comportamiento físico del fenómeno, para los que se analiza la superposición de los diferentes tipos de ondas y los mecanismos modificadores de estas (López Jimeno, López Limeno y Ayala Carcedo, 2006).

Las vibraciones producto de voladuras son transmitidas a través de los materiales como ondas sísmicas cuyo frente se desplaza de manera radial, a partir del punto de detonación. Las distintas ondas se clasifican en dos grupos: ondas internas y ondas superficiales (López Jimeno, López Limeno y Ayala Carcedo, 2006).

El primer tipo de ondas internas son las denominadas *ondas primarias* o de *compresión*. Se caracterizan por que se propagan dentro de los materiales, produciendo alternativamente compresiones y refracciones y dando lugar a un movimiento de las partículas en la dirección de propagación de las ondas. Estas son más rápidas y producen cambios de volumen, pero no de forma, en el material a través del que se propagan (López Jimeno, López Limeno y Ayala Carcedo, 2006).

El segundo tipo está conformado por las *ondas transversales* o de *cizallamiento*, las que dan lugar al movimiento de partículas de manera perpendicular a la dirección de propagación de la onda, en la cual la

velocidad de las ondas transversales está comprendida entre las ondas longitudinales y las ondas superficiales, para la cual los materiales a causa de estas ondas pueden experimentar cambios de forma, pero no de volumen (López Jimeno, López Limeno y Ayala Carcedo, 2006).

Las ondas de tipo superficial que se generan durante el proceso de voladuras son: las ondas Rayleigh-R y las ondas Love-O. Otros tipos de ondas superficiales producidas son las ondas canal y las ondas Stonelly, a las que poca importancia se les ha dado en el tema de voladuras, dada la poca información que suministran a la evaluación de la voladura (López Jimeno, López Limeno y Ayala Carcedo, 2006).

Existen diversos métodos de tipo empírico y estadístico que relacionan las variables de la operación de voladuras, así como los parámetros de diseño de esta, enfocados en la predicción de los valores de vibraciones producidos por explosiones con el fin de utilizarlos en el control de los efectos al medio, estableciendo en general que dicha reducción de impactos se obtiene adaptando o ajustando los patrones de los barrenos, tiempos de detonación, teniendo como principio que las vibraciones producto de la detonación de explosivos están en dependencia de: la relación entre cargas —es decir, la construcción y destrucción de ondas generadas por la carga explosiva—, condiciones de confinamiento, propiedades intrínsecas de la roca, la distancia del punto de voladura al punto de interés particular y las características geológicas, estructurales y geomorfológicas del área circundante.

17. Onda aérea

La onda aérea es la onda de presión que va asociada a la detonación de una carga explosiva, mientras que el ruido es la parte audible e infrasónica del espectro, la cual se encuentra desde los 20 Hz a 20 kHz (Mohanty, Sahoo, Pramanik, Samal y Jayanhu, 2020). Las ondas aéreas son vibraciones de baja frecuencia trasladadas al aire, con valores que generalmente se encuentran por debajo de los 20 Hz. Esta genera perturbaciones como: movimiento del terreno a causa de la explosión; escapes de gases por el barreno al proyectarse el retacado; escape de los gases a través de las grietas creadas en el frente del macizo rocoso; detonación del cordón iniciador al aire libre; desplazamiento del frente del banco al progresar la voladura y

colisión entre los fragmentos proyectados (López Jimeno, López Jimeno, Ayala Carcedo y Visser de Ramiro, 2017).

Por otra parte, la combinación de las vibraciones asociadas a estas fuentes genera un frente móvil de sobrepresión del aire que se puede desplazar desde el punto de la voladura. Como el aire es compresible, absorbe parte de la energía de la onda de presión para ser liberarla posteriormente mediante la expansión de los gases calientes causando la depresión de estos puntos (López Jimeno, López Jimeno, Ayala Carcedo y Visser de Ramiro, 2017).

Los impactos ambientales asociados a las voladuras más comunes son la vibración y la onda aérea. La mayoría de las quejas de la comunidad cercana a los proyectos mineros que utilizan explosivos en su explotación son por onda aérea. Normalmente, un buen diseño de voladura utilizando una secuencia de detonación permite controlar las vibraciones. El control de onda aérea se debe hacer en la voladura con un adecuado confinamiento de la energía del explosivo por medio de un retacado de granulometría y cantidad suficiente en los barrenos.

18. Medidas de seguridad en el empleo de explosivos

Se hace necesario mencionar que pocos autores se han dedicado al estudio de este tema, por lo general, son las mismas empresas especializadas en la fabricación del explosivo las que generan las disposiciones y normas de seguridad. Estas recomendaciones, con el paso del tiempo, se han complementado con la experiencia de campo recogidas por las diferentes empresas, a las que se suman las constantes actualizaciones de la normatividad del país. Partiendo de esta premisa, las leyes marco establecen que en el territorio colombiano las competencias en relación con los explosivos, en lo referente al control, producción, importación, comercialización, distribución, venta y almacenamiento, está a cargo de la Industria Militar, INDUMIL, dependencia del Ejército Nacional de Colombia, por lo que se establece que en este aspecto existe un monopolio controlado por el Estado. Por medio de disposiciones legales y mecanismos de control, le es permitido a los usuarios civiles disponer de estos elementos para fines mineros y de demolición.

En este contexto, las medidas de seguridad industrial e higiene laboral se centran en el estudio de las normas de seguridad en torno a la

manipulación del explosivo dadas las características propias de las empresas, lo que se complementa con el desarrollo y articulación de leyes, reglamentos y disposiciones que regulan este tipo de material, en lo referente al almacenamiento, transporte, uso y disposición final de los excedentes de explosivo, así como las recomendaciones de personal encargado de la manipulación de este material, dando al Ministerio de Defensa y en concreto a INDUMIL (Industria Militar) la libertad de establecer las regulaciones legales o reglamentarias relacionadas con su fabricación, uso y comercio.

En términos generales, el desarrollo de protocolos de seguridad industrial al interior de las empresas busca impedir accidentes y los efectos nocivos para la salud de quienes son sus trabajadores. En el caso del personal de las labores de minería a cielo abierto o minería subterránea, se hace énfasis en las enfermedades derivadas de su actividad a fin de generar garantías de buen diseño, utilización de la tecnología más adecuada y el funcionamiento de las labores en las debidas condiciones de seguridad; desde las cuales se deben proporcionar medios para analizar —desde el punto de vista de seguridad— la salud y condiciones de trabajo, así como tecnologías existentes, y modificarlas con el objeto de suprimir los peligros que se hayan puesto de manifiesto en ese análisis; se debe ofrecer orientaciones para delimitar una estructura administrativa, legal y educativa mediante la cual puedan llevarse a la práctica medidas preventivas y conexas; promoviendo la cooperación y consulta entre el Estado, organizaciones de empleadores y organizaciones de trabajadores, en procura del mejoramiento de la salud y la seguridad en las minas. Estas recomendaciones de prácticas de seguridad buscan ser aplicadas en toda situación u operación que afecte a la seguridad y la salud de los trabajadores en labores de minería y se busca señalar a la autoridad los posibles errores en procedimiento o las competencias y responsabilidades en la seguridad, salud y condiciones del trabajo, procediendo a considerar que las disposiciones que se generen constituyan los requisitos básicos para los protocolos de actividades a fin de proteger la salud de los trabajadores (Organización Internacional del Trabajo [OIT], 1991).

En términos generales, con el fin de que los trabajos de voladura de rocas se realicen bajo condiciones de seguridad, es necesario que estas operaciones se desarrollen bajo los siguientes parámetros: 1) cumplimiento de las Normas y Reglamentaciones vigentes; 2) formación técnica de los

operadores, artilleros y personal manipulador de explosivos con cursos periódicos adecuados; y 3) utilización de máquinas, explosivos, accesorios y sistemas de iniciación en condiciones de seguridad (Department of Consumer and Employment Protection, 2006).

Los técnicos responsables deben, pues, arbitrar las medidas oportunas para cubrir esas tres facetas, ya que de lo contrario el riesgo de accidentes aumentará debido al exceso de confianza, a las distracciones, al desconocimiento, a la infracción de normas de seguridad, etc. (López Jimeno, López Jimeno y García Bermúdez, 2003).

19. Normatividad

Las competencias y directrices normativas en relación con explosivos se establecen bajo los criterios de la Industria Militar (INDUMIL), dependencia del Ejército Nacional de Colombia. En este aspecto, existe un control por parte del Estado, desde el cual se establecen disposiciones legales y mecanismos de control para la compra y acceso de usuarios civiles al explosivo con fines mineros y de demolición (MPS, 2012).

En el aspecto ambiental se ha establecido que el impacto principal por el uso de explosivos son las vibraciones. Con el paso del tiempo, el requerimiento de recursos mineros se ha incrementado, aumentando el número de áreas que se pueden ver afectadas por este impacto. Para el caso colombiano, no se ha desarrollado normatividad en vibraciones en ninguna institución, como el Icontec, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Ministerio de Minas y Energía, la UPME, el IDEAM, el Servicio Geológico Colombiano (antiguo Ingeominas) y las Corporaciones Autónomas Regionales o Secretarías de Ambiente.

Sin embargo, se resalta que se han realizado investigaciones aisladas por parte de varios grupos en este tema, en algunas de las cuales se han aplicado los criterios del USBM RI8507 en ausencia de una normatividad nacional. En 1996, Ingeominas desarrolló un estudio en la mina Guativas, en Une, Cundinamarca; la Universidad de los Andes en Cementos del Valle en 1988 y 1992 y el Observatorio Sismológico del Suroccidente en Cementos del Valle en 1999, 2000, 2001 y 2002 en la mina la Calera en Yumbo, Valle del Cauca (Benjumea Cadavid, 2003).

Es común que en la práctica se recurra a la aplicación de la NSR (norma sismo-resistente colombiana) para la evaluación de efectos de las

voladuras sobre las construcciones, ya que esa norma tiene peso legal. Sin embargo, esta no es adecuada para este tipo de trabajos, ya que presenta problemáticas como las siguientes:

- En la parte relacionada con este tema, la NSR es una norma de diseño de estructuras.
- El periodo de retorno del sismo tipo es de 475 años, el daño estructural se presenta por un evento extremo, la estructura se supone que está en buen estado.
- Las voladuras tienen periodos de retorno pequeños (1/2, 1, 2 días, ocasionalmente una semanal o mensual), por lo cual el daño más bien puede ser por fatiga sobre elementos no estructurales.
- Lo que prevén las normas específicas es que no presente daño cosmético debido a las vibraciones; la NSR no proporciona esto. (Benjumea Cadavid, 2003)

Con el fin de presentar una visión panorámica de las normas y sintetizar los diferentes aspectos de ellas en lo que respecta a variables, valores indicativos, sensores, tipos constructivos, etc., se presenta en la tabla 2 una relación de la normatividad internacional en el manejo de voladuras (Benjumea Cadavid, 2003).

Las vibraciones causadas por el ser humano pueden causar daños a nivel estructural y cosméticos en las edificaciones; en la mayoría de los casos tales vibraciones son generadas por la voladura, maquinaria de construcción y tráfico vehicular o férreo (Marshall y Oxley, 2009). Las vibraciones inducen esfuerzos dinámicos en edificaciones, generando deformaciones temporales en todos los elementos constitutivos de la edificación. Sumados a los esfuerzos estáticos preexistentes, estas deformaciones dinámicas pueden causar daños en la edificación (Allan, 1989).

La relación entre velocidad de vibración la velocidad de partícula o resultante y los esfuerzos, en el caso idealizado de una onda plana en un medio elástico infinito, está dada por el esfuerzo, “la deformación, el módulo de elasticidad, la velocidad de partícula y la velocidad de propagación de la onda sísmica” (Persson et al., 1994).

Tabla 2. Normatividad internacional en el manejo de voladuras

País de procedencia	Nombre de reglamentación	Fecha de expedición
Alemania	DIN 4150	1975
Brasil	CETESB D7.013	1998
Escocia	PAN50	2000
EE. UU. (federal)	USBM RI8507	1980
EE. UU. (federal)	OSM 817.67	1983
España	UNE 22-381-93	1993
Francia	Recomendaciones GFEE	2001
Internacional	ISO 4866	1990
Italia	UNI 9916	1991
Nueva Zelanda	NZS 4403	1976
Portugal	NP2074	1983
Reino Unido	BSI 6472	1992
Reino Unido	BSI 7385	1993
Suecia	SS 460 48 46	1991
Suiza	SN 640 312a	1992

Fuente: Benjumea Cadavid (2003).

En consecuencia, para un sustrato geológico o una edificación determinada (velocidad de propagación y módulo de elasticidad constante), la velocidad de vibración de la partícula es una variable decisiva por controlar, puesto que esta determina los esfuerzos potencialmente causantes de daños. Por esta razón, las normas y recomendaciones asociadas al potencial de daño por movimientos generados por vibraciones producto de detonación utilizan la velocidad de vibración como primera variable básica de análisis (Benjumea Cadavid, 2003).

Por otro lado, la magnitud de deformación que una vibración dada genera a la estructura depende además del comportamiento dinámico de esta y en particular a sus frecuencias de resonancia o respuesta (las de la estructura en conjunto y las de los elementos individuales). Por esta razón, la frecuencia (el inverso del período) de la vibración incidente es la segunda variable básica de análisis en la evaluación potencial de daños.

Sin embargo, la probabilidad de daños por vibraciones depende de otros factores, tales como: 1) la duración de las vibraciones; 2) la cantidad de sollicitaciones a las que es sometida la estructura; 3) la resistencia de los materiales que constituyen la estructura; 4) la calidad de la construcción; 5) los esfuerzos estáticos preexistentes (incrementados por ejemplo por asentamientos del suelo); y 6) el nivel de mantenimiento y conservación de la estructura (Benjumea Cadavid, 2003).

Una evaluación rigurosa del potencial de daños por vibración en una serie de estructuras no es económicamente justificable en la mayoría de los casos. Por esto se ha recurrido generalmente a la aplicación de normas y recomendaciones que relacionan características de la estructura y del suelo de cimentación con el tipo de vibración, o con los niveles de vibración (velocidad de partícula, frecuencia dominante, cantidad de sollicitaciones), o solo con características de la voladura misma (cantidad de carga, distancias, etc.). Estas normas generalmente se fundamentan en la experiencia de varias décadas, involucrando miles de mediciones y observaciones de daños. Sin embargo, su aplicación en ambientes diferentes a los de su origen requiere una cuidadosa evaluación y asimilación, debiéndose considerar aspectos tales como el tipo de estructuras, materiales de construcción y prácticas constructivas. Con este requisito, las normas también pueden ser utilizadas como guías en países que no poseen norma propia, como ocurre en Colombia (Benjumea Cadavid, 2003).

Salvo las normas específicas para voladuras con explosivos, la reglamentación en el control de vibraciones no distingue el tipo de fuente. En esos casos, la diferenciación de la fuente se hace a partir de los parámetros de movimiento, estableciendo las diferencias según la cantidad de sollicitaciones —duración de los máximos— presentes en la señal. Hoy en día, el control de los efectos impactantes de las vibraciones causadas por las obras de ingeniería civil o la minería se logra mediante el riguroso acatamiento de los niveles permisibles sugeridos en las normas internacionales, además en la implementación precisa del diseño y manejo apropiado de los equipos y procesos causantes de vibraciones. Por ejemplo, el nivel de vibración causado por voladura puede ser reducido mediante la limitación de la carga o la implementación de secuencias a la voladura de tal forma que la energía transmitida al suelo se distribuya en el tiempo, lo que disminuye las velocidades máximas de vibración. Hoy en día, hay

técnicas sofisticadas, que mediante una secuencia controlada logran la interferencia destructiva y la directividad en el campo de ondas generado por la voladura (Benjumea Cadavid, 2003).

De manera generalizada, los valores máximos de velocidad de partícula permitidos o recomendados varían de una norma a otra, pero se establece como un estándar de valor indicativo 2 in/s (50,8 mm/s), este se fundamenta en el estudio de miles de detonaciones, observaciones realizadas por Langefors y Kihlstrom (Bollinger, 1980; Persson et al., 1994), quienes en 1963 establecieron, para diferentes tipos de suelos, valores de la velocidad de partícula pico y sus efectos asociados (Mohanty, Sahoo, Pramanik, Samal y Jayanhu, 2020).

Por otro lado, es importante evaluar las vibraciones en tres direcciones ortogonales (como algunas normas lo exigen), con el fin de observar la asimetría de radiación de las voladuras, así como las propiedades de los diferentes tipos de onda generadas, evaluando particularidades de la transmisión de las ondas elásticas en el suelo (Peralta Herrera y Mojica Villamizar, 2006).

Cuando los diseños de voladuras se realizan basados en las normas internacionales para el control de vibraciones y ondas aéreas, estos niveles son mínimos y solo podrán causar percepciones psicológicas en las comunidades vecinas de que se realizó la voladura. En todas las normas, los valores más restrictivos para construcciones comunes, viviendas de los pobladores cercanos a las operaciones mineras, en este caso si se ubica una moneda de forma vertical en una superficie plana, al momento de la detonación esta se sostendrá por sí sola manteniendo su posición respecto a la vertical, evidenciando un adecuado manejo y control de vibraciones, mostrando a los pobladores el efecto de una voladura bien diseñada.

20. Normas de seguridad en el manejo de explosivos

Con este aparte se pretende mostrar una serie de aspectos básicos en los requerimientos mínimos de seguridad, manipulación y uso de explosivos aplicados por la industria minera, de modo que sirva como referencia para mostrar las precauciones adoptadas en las diferentes fases en cuales se involucra la manipulación de explosivos, a fin de mitigar al máximo cualquier impacto adverso por su uso.

21. Almacenamiento de explosivos

Los explosivos se deben almacenar en depósitos diseñados, avalados y autorizados por personal experto en esta temática, a fin de asegurar el cumplimiento de los estrictos protocolos destinados a este objetivo. Estos, además, deben contar con una adecuada señalización; para lo cual se debe tener un responsable de distribución del explosivo, quien lo entrega al personal autorizado en la industria y lleva el registro de los movimientos de entrada y salida del producto desde las instalaciones de almacenamiento. Está estrictamente prohibido fumar y no existirá área de llama libre en las proximidades del depósito de explosivos. El explosivo, las cajas contendoras o cualquier otro elemento que contenga explosivos no debe ser golpeado ni manipulado de forma violenta. El explosivo se consume según las fechas de llegada al depósito, por lo cual se le debe dar prioridad al que lleva mayor tiempo de almacenamiento (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

22. Transporte en interiores

Se denomina transporte en interiores a todo aquel desplazamiento que se realice dentro de la explotación minera u obra civil. Este transporte está regulado por la normatividad y disposiciones internas de seguridad, incluidas en el proyecto de voladura, el que con anterioridad es conocido por todo el personal encargado del uso, manipulación o manejo del explosivo. Está prohibido el transporte conjunto del explosivo con cualquier mecanismo de iniciación del mismo. El transporte del explosivo no coincide con la entrada y salida de los relevos principales en labores de interior y evita la posible coincidencia con aglomeraciones en las vías de acceso en cualquier tipo de explotación. El transporte de explosivos y los mecanismos de iniciación, hasta los puntos de consumo o frente, solo se realiza en los empaques autorizados, siendo usados de manera preferencial los empaques originales. En dicho transporte, no se usan equipos que funcionen con radiofrecuencias, especialmente en el transporte de detonadores eléctricos. Una vez que el explosivo está en la zona de voladura se prohíbe el acceso a esta de cualquier tipo de maquinaria externa a la voladura, además los explosivos y detonadores se colocarán separados entre sí (Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert, 2013).

Siendo conscientes de que las operaciones con voladuras pueden generar a los trabajadores un nivel alto de amenazas, el desarrollo de medidas de seguridad en el empleo y manipulación de explosivos se hace manifiesto, por lo que es necesario generar protocolos de seguridad desde las entidades del Estado y las empresas privadas, que sean muy detallados y efectivos a fin de salvaguardar la protección e integridad de los trabajadores. A medida que pasa el tiempo los adelantos tecnológicos contribuyen a disminuir el riesgo y minimizan los accidentes.

23. Estudio de caso

Las actividades extractivas en el territorio colombiano deben cumplir con el desarrollo de protocolos y estudios, entre los que se destaca la Metodología General para la Presentación de Estudios Ambientales del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, que busca orientar a los usuarios de proyectos, obras o actividades sujetas a la obtención de licencia ambiental o al establecimiento de un plan de manejo ambiental en el desarrollo de los estudios que se requieran para el efecto, a fin de que garanticen información precisa y confiable para la toma de decisiones y para el seguimiento al desempeño ambiental de estos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Esta metodología presenta un consenso de parámetros establecidos por los diferentes institutos y entidades oficiales que tienen por función la generación, administración y análisis de información y se incluyen además las especificaciones para su manejo, contempladas en un modelo de almacenamiento geográfico, geodatabase corporativa del Sistema Nacional de Información de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (SNIIVDT) del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

La metodología presenta algunas de las fuentes de información que deben utilizarse en la elaboración de los diferentes estudios ambientales para el proceso de licenciamiento y las especificaciones de nivel técnico para la caracterización de los medios abiótico, biótico y socioeconómico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Así mismo, da las indicaciones y lineamientos para realizar la zonificación ambiental y el establecimiento de zonas de manejo, la identificación y valoración de impactos ambientales, el diseño de medidas de manejo

ambiental, la elaboración de los planes de seguimiento y monitoreo y la formulación del plan de contingencia (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). En el aspecto específico del uso de voladuras, es necesario generar una matriz de aspectos e impactos que normalmente se centran en la vibración y la onda de aire que estas generan.

Tomando como referencia lo anterior se realiza la revisión del “Estudio de Impacto Ambiental (EIA), proyecto de explotación subterránea de minerales auroargentíferos - Soto Norte”, proyecto minero para el desarrollo de una mina subterránea cerca a los municipios de California y Suratá en el departamento de Santander, Colombia, ubicada fuera de los límites del páramo de Santurbán, del estudio se establece que la metodología implementada para la elaboración del EIA partió de un enfoque general que tuvo en cuenta las particularidades del proyecto, el entendimiento del territorio y las dinámicas propias del desarrollo del estudio. Los bloques o propuestas metodológicas particulares se desglosaron del abordaje de la caracterización, la evaluación ambiental, la zonificación ambiental y del manejo y lineamientos de participación. Con anterioridad a cada salida de campo, se desarrolló un proceso que contó con metodologías específicas que dieran cuenta no solo de las necesidades propias y técnicas del estudio, sino de las condiciones y particularidades del entorno (INGETEC, 2019).

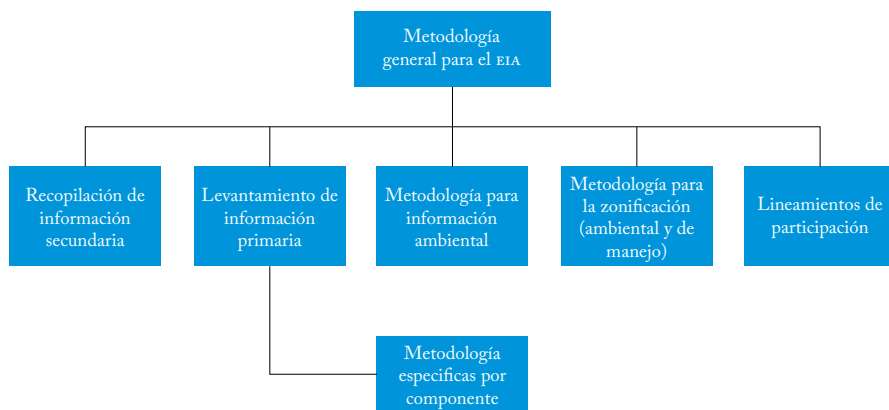


Figura 4. Abordaje metodológico para la elaboración del EIA

Fuente: autores (2020).

Con el objeto de llevar a cabo el EIA, la empresa revisó la información existente y se siguieron los lineamientos establecidos en los términos de

referencia indicados previamente, así como los lineamientos de Minesa relacionados con su política ambiental y de relacionamiento, adoptando la siguiente estructura lógica para la elaboración del EIA (INGETEC, 2019).

La evaluación de impactos ambientales busca reducir los impactos negativos y potenciar los impactos positivos, bajo un estricto sistema de manejo de información, en el que se incluyen los levantamientos y la construcción de línea base; evaluación del impacto ambiental; evaluación de riesgos; planes de manejo; planes de manejo de riesgo; sistemas de monitoreo; planes de contingencia y mitigación; auditorías ambientales y planes de abandono, los que una vez sean evaluados y cumplidos los requisitos en caso de un desarrollo minero podrán asegurar que la operación contará con la disminución, mitigación y compensación de impactos, reduciendo así la preocupación en la comunidad potencialmente afectada, ya que se garantizan unas prácticas adecuadas, concienciadas y altamente planificadas en armonía con el ambiente y basadas en el principio de precaución.

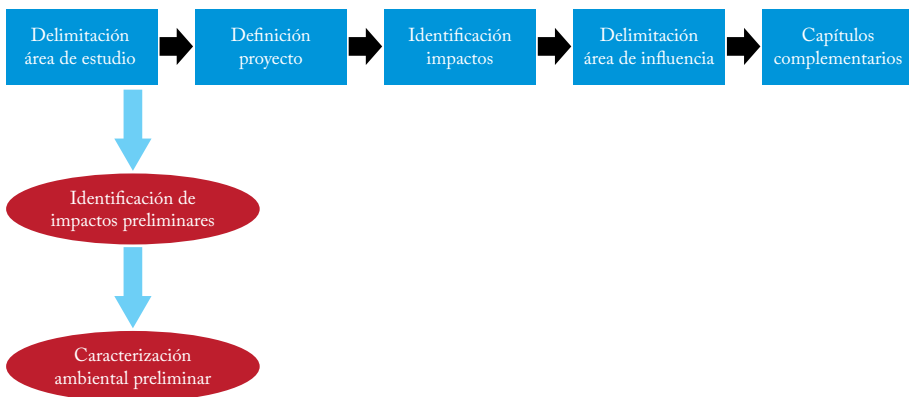


Figura 5. Estructura lógica para la elaboración del EIA

Fuente: autores (2020).

De la revisión del “Estudio de impacto ambiental – EIA – proyecto de explotación subterránea de minerales auroargentíferos - Soto Norte”. Como ya se expuso para el caso del manejo de explosivos, se resalta que en para Colombia no existen normas destinadas al control de vibraciones, razón por la cual para el proyecto se implementará la norma o recomendación europea (en particular, DIN 4150) y de Estados Unidos (USBM RI8507 y OSM 817.67), con el fin de limitar y proponer medidas de mitigación en

proyectos que requieren el uso de explosivos, equipos que inducen altos niveles de vibración y vehículos pesados (INGETEC, 2019).

En el caso del proyecto minero Soto Norte, la principal fuente de vibraciones que se presentará durante las fases de construcción y operación del proyecto corresponde a las inducidas por el uso de explosivos necesarios para ejecutar las obras asociadas con la zona de desarrollo y la zona de producción minera. El tipo de fuente en este caso es clasificado como una fuente transigente, con frecuencias fundamentales de vibración muy superiores a las frecuencias fundamentales de movimiento de las edificaciones de uno a tres pisos predominantes en la zona de estudio. Teniendo en cuenta lo anterior, se definen los impactos asociados a vibración con límite de velocidad de partícula de 13 mm/s o 0,5 in/s., con lo cual se establecen parámetros de control e intensidad de las vibraciones inducidas por voladuras. Con el desarrollo de la adecuada gestión y manejo integral de explosivos en la zona de intervención del proyecto, se podrá asegurar que los niveles de vibración en zonas pobladas o que se encuentren por fuera de la huella del proyecto no presenten niveles de vibración que superen los umbrales definidos en las normas DIN 4150 para fuentes de vibración transigentes (INGETEC, 2019).

En el desarrollo del proyecto, con el fin de determinar si las estimaciones de niveles de vibración inducidas por las voladuras previstas en las zonas de desarrollo y producción del proyecto minero son correctas y asegurar que no se generen impactos por vibraciones inducidas por las voladuras, se propone desarrollar un programa que incluya actividades de registro en todos los puntos de medición de vibraciones caracterizados en la línea base del proyecto y puntos adicionales que correspondan a viviendas o infraestructura que se encuentren cercanas a las zonas en donde se tiene previsto utilizar explosivos para voladuras. En caso de que se encuentre que los niveles de vibración por fuera de la huella del proyecto exceden el umbral establecido, se analizará la implementación de las medidas de mitigación de las vibraciones (INGETEC, 2019).

Como parte del monitoreo se consideran dos puntos adicionales con el fin de monitorear los niveles de vibración generados por el tráfico automotor, que aunque son de mucha menor magnitud que los efectos de los explosivos, dada la diferencia de la energía emitida por la fuente emisora (comparación entre explosivos y vehículos), se considera procedente

con el fin de asegurar que los niveles de vibración originados durante la construcción y operación del proyecto no vayan a superar los umbrales definidos en normativas internacionales. Para esto se incluyen dos puntos adicionales de monitoreo en relación con los puntos de medición de vibraciones para definir la línea base en el casco urbano del municipio de California y en la vereda La Baja (INGETEC, 2019).

Además, a fin de garantizar el seguimiento, control y ejecución al programa de manejo de las emisiones atmosféricas, y la emisión de ruido de tal forma que su incidencia en el medio se encuentre acorde con la normatividad ambiental vigente (Resolución 2254 de 2017 y Resolución 627 de 2006), el proyecto implementará el subprograma de ruido ambiental que se encamina a que las emisiones de ruido generadas en las diferentes actividades del proyecto Soto Norte se mantengan en todo momento en los niveles de emisión de ruido y ruido ambiental por debajo de los límites de la legislación nacional vigente (Resolución 627 de 2006) y que estas no afecten a las poblaciones aledañas al proyecto. Por medio de este subprograma se implementarán acciones y estrategias para el control y la mitigación del ruido generado por las fuentes y actividades de operación de la mina, aumentando los diferenciales de ruido frente a los estándares normativos en materia de ruido.

Se deben implementar acciones que incluyan los principios básicos de control de ruido, los cuales establecen medidas partiendo del control en la fuente y seguido del medio de propagación en el emplazamiento de la mina. De acuerdo con las condiciones de operación de la mina y la compatibilidad normativa obtenida con los usos de suelo suburbano y residencial colindantes, se establecen estrategias de inspección para el control de ruido de las operaciones de la mina, acciones encaminadas a controles en la fuente y control del medio de propagación (INGETEC, 2019).

Conclusiones

Para el desarrollo óptimo en un proceso de voladura, es fundamental el estudio del macizo rocoso, ya que el grado de heterogeneidad en la roca es un factor importante en el diseño y calidad de la voladura. La presencia de discontinuidades, juntas, planos de fractura, fallas y vetas puede provocar que la energía del explosivo sea desaprovechada, además las características geológicas y estructurales determinan las propiedades

físicas y mecánicas de las rocas; lo que permite mejores procesos en el desarrollo de la fragmentación cuando la cara libre es paralela a la mayor familia de discontinuidades, además esta condición permite aprovechar la energía de los gases. Estas condiciones cobran mayor importancia en rocas que se encuentran prefracturadas, debido a que los gases aumentan las grietas existentes.

La adecuada selección del explosivo acorde a las características de la roca minimiza costos operacionales, así como los impactos generados por la voladura, por lo que dentro de los múltiples tipos de explosivos una adecuada selección dentro del rango de operatividad permite encontrar aplicaciones múltiples, debido a la variedad de combinaciones de las condiciones presentes. La óptima selección de explosivos o combinaciones del mismo es determinada por condiciones de campo y solo puede ser determinada después de evaluar factores como potencia, densidad, grado de resistencia al agua, sensibilidad de detonación y propagación, etc.

Un adecuado diseño de la malla de voladura brinda soluciones técnicas para prevenir o mitigar los impactos ambientales derivados de la está, lo que permite describir el movimiento que el banco experimenta durante el proceso de voladura, con lo que se generan análisis y proyecciones sobre el desplazamiento y comportamiento de las partículas, dado que la velocidad inicial, la velocidad de cada una de las partículas del banco dependerá de su posición con respecto a la columna de explosivo así como a la potencia de este, estableciendo la rapidez, siendo esta la derivada de la posición con respecto al tiempo. Gracias a estos datos se podrá tener un adecuado manejo y control de vibraciones.

El éxito o fracaso de la voladura está estrechamente relacionado a una función directa, la secuencia de detonación, por esta razón el primer arranque debe ser cuidadosamente diseñado. El uso de detonadores electrónicos puede garantizar la minimización de impactos, dado que controlando los tiempos de retardo se permite un mejor control del nivel de vibraciones, facilitando con ello el control del ruido. Además, los circuitos eléctricos permiten comprobar la adecuada disposición de las conexiones, así como que estas sean ejecutadas de manera correcta. Por otra parte, el uso de estos dispositivos hace que la columna explosiva no deflagra por acción de los alambres conductores de corriente, lo que permite alcanzar su máximo de rendimiento y proporciona beneficios a nivel económico y de seguridad.

Dado que la actividad en el país a nivel normativo no cuenta con una legislación precisa y esta se encuentra regulada por las normas internas de las empresas dedicadas a estas actividades, estas compañías han elaborado y ejecutan diferentes procedimientos operacionales y políticas de seguridad para complementar y en algunos casos suplir la norma legal, basándose en normas y protocolos internacionales. Por ello, es preciso que dichos protocolos estén diseñados e implementados a programas de prevención para neutralizar cualquier tipo de riesgo. Ante la ausencia de directrices que sirvan de referente, se debe garantizar la calidad y adecuado funcionamiento de los equipos, así como el cumplimiento o la estandarización de protocolos y procesos para garantizar la protección ambiental y del personal. En esta actividad se ha establecido estadísticamente que gran parte de los accidentes con material explosivo han sido provocados por personas inexpertas o carentes de la idoneidad en su manejo, mas no por la falta de normas reguladoras al interior de las empresa. La mayor accidentalidad se presenta en las actividades relacionadas con las etapas de manipulación de material explosivo, centralizadas está en la preparación de la zona de voladura, y debido a la presencia de cargas explosivas o barrenos sin explotar, predominando como principal causa de activación la presencia de “electricidades extrañas”.

Existen soluciones técnicas para prevenir o mitigar los impactos derivados del uso de explosivos, por lo que se debe ejercer un control riguroso en todas las etapas del proceso de voladura, dado que con la implementación de procesos sencillos y de rápido registro se puede generar un análisis del costo/beneficio en materia ambiental de los proyectos de voladura, ya que en la mayoría de los casos los registros se quedan al interior de la empresa, cuando estos datos podrían generar un banco para la ponderación de escenarios suficientemente soportada para demostrar el perfecto manejo de los factores ambientales que se estén evaluando, a fin de establecer índices y la elaboración de modelos predictivos. En este aspecto, uno de los principales problemas para ello es el de los métodos para su evaluación, dado que al no tener una regulación clara, no se puede pasar de un ejercicio empresarial o académico de análisis o modelamiento de variables circunstanciales.

Referencias

- Allan, P. (1989). *Acoustics. An Introduction to its Physical Principles and Applications*.
- Álvarez-Álvarez, C., Zapata-Montoya, A., Montoya-Cañola, S., Ordóñez-Carmona, O. y Zapata-Madruga, G. (2014). Detection of explosive atmospheres using the software AtmosXp V2.0. *DYNA (Colombia)*, 81(187), 91-95.
- Ames, L. V. (2012). *Tecnología de Explosivos I* (Vol. I). Lima: UNCP.
- Aquatic Ecosystem Health and Management Society. (2003). *Fate and toxicity in seawater and sediment, in Sediment Quality Assessment and Management: Insight and Progress*. Ontario: Aquatic Ecosystem Health and Management Society.
- Attenborough. (1995). Benchmark cases for outdoor sound propagation models. *Journal of Sound and Vibration*, 97, 173-191.
- Benjumea Cadavid, J. M. (2003). *Vibraciones causadas por actividad humana*. Santiago de Cali: Univalle.
- Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J. y Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. (D. d. Subterráneas, Ed.). Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Bhandari, S. (2007). *Engineering rock blasting operations*. Jodhpur, Jodhpur, India: A.A. Balkema.
- Cheng, J., Mei, J., Peng, S., Qi, C. y Shi, Y. (2019). Comprehensive consultation model for explosion risk in mine atmosphere-CCMER. *Safety Science*, 120, 798-812.
- Contreras, J. L. (2010). *Manual de perforación y voladura de rocas*. (U. C. Venezuela, Ed.) Caracas, Venezuela.
- Department of Consumer and Employment Protection. (2006). *Guideline Noise control in mines*. Australia: Western.
- EXSA, C. T. (2009). Manual Práctico de Voladura. *International Journals of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1, 145-165.
- Ghasemi, E., Sarai, M. y Atael, M. (Marzo de 2012). Development of an empirical model for predicting the effects of controllable blasting parameters on flyrock distance in surface mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 52, 63-170. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/233427497>

- Gonzalez, S. E. (2009). *Seguridad en operaciones de explosivos en minería y petroleras* (Vol. 1). Rosario, Rosario, Argentina: Red Porteger.
- INGETEC. (2019). *Estudio de impacto ambiental —EIA—. Proyecto de explotación subterránea de minerales auroargentíferos “Soto Norte”*. Bogotá, D. C.: Colombia.
- López Jimeno, C., López Jimeno, E. y García Bermúdez, P. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid: Gráficas Arias Montano S. A.
- López Jimeno, C., López Jimeno, E., Ayala Carcedo, F. J. y Visser de Ramiro, Y. (2017). *Drilling and Blasting of Rocks*. Londres, Reino Unido: Taylor and Francis Group.
- López Jimeno, C., López Limeno, E. y Ayala Carcedo, F. J. (2006). *Drilling and blasting of rocks*. Londres: Taylor & Francis Group.
- Marshall, M. y Oxley, J. (2009). *Aspects of explosives detection*. Nueva York: Elsevier.
- Meyer, R., Kohler, J. y Homburg, A. (2002). *Explosives*. Essen, Alemania: WILEY-VCH.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Metodología general para la presentación de estudios ambientales*. (V. d. Ambiente, Ed.). Bogotá, D. C., Colombia: Dirección de Licencias, Permisos y trámites Ambientales.
- Ministerio de Industria Energía y Turismo (MIET). (2016). *Guía de buenas prácticas en el diseño y ejecución de voladuras en banco*. Ministerio de Industria Energía y Turismo, Dirección General de Política Energética y Minas. Madrid: EPC Groupe.
- Ministerio de Minas y Energía (MME). (Agosto de 2003). *Glosario técnico minero*. Bogotá, D. C., Colombia.
- Mohanty, S., Sahoo, J., Pramanik, J., Samal, A. y Jayanhu, S. (2020). A Review of Techniques in Practice for Sensing Ground Vibration Due to Blasting in Open Cast Mining. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 80, 306-314.
- Ministerio de Protección Social [MPS] (2012). *Guía Adquisición de Explosivos y Accesorios de Voladura*. Bogotá, D. C., Colombia.
- Nipper, M. (2001). Archives of Environmental Contamination and Toxicology. *Development of marine toxicity data for ordnance compounds*, 41, 308-318.
- Organizacion Internacional del Trabajo [OIT]. (1991). *Certainty and health in strip mines*. Organizacion Internacional del Trabajo OIT, Ginebra.

- Peralta Herrera, G. y Mojica Villamizar, R. D. (2006). *Características y control de las vibraciones producidas por acción de las voladuras a cielo abierto*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - Escuela de Ingeniería de Minas.
- Sernageomin. (2004). *Normatividad de seguridad minera*. Santiago de Chile: Departamento de Comunicaciones del Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Servicio Nacional de Geología y Minería [SNGM]. (2014). Guía de Operación para el Manejo de Explosivos. *Guías de Operación para la Pequeña Minería*. Santiago de Chile. Chile.
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social [STPS] (2001). Norma oficial Mexicana NOM-011-STPS-2001. (I. t. Celaya, Ed.). *Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido*. México.
- Sunahara, G., Lotufo, G., Kuperman, R. y Hawari, J. (2009). *Ecotoxicology of explosives*. Londres: Taylor & Francis Group.
- WHO. (1993). *Environmental health Criteria Document*. Londres: Community Noise.

Capítulo 6

Análisis de los depósitos de colas y estériles por minería de oro en Colombia

Héctor Raúl Vargas C.*
Germán Vargas C.**

Los depósitos inevitables en toda operación aurífera, de colas o relaves y material estéril pueden colapsar o tener filtraciones y de esta manera afectar a las comunidades y a los cuerpos de agua.

Resumen

La minería en Colombia, particularmente la del oro como metal precioso y mitológico de culturas ancestrales, ha venido realizándose desde antes de la Colonia, principalmente de forma artesanal y a pequeña escala. Al volverse esta actividad un recurso importante para la economía del país, que registra un aporte de 4,75 de PIB (MinMinas, 2019) y los altos precios de los *comodites*, y el hecho de que Colombia sea aún un país inexplorado, ha invitado y atraído por parte del Gobierno Nacional a la inversión extranjera y nacional para la implementación de proyectos mineros de pequeña,

* Geólogo, con 38 años de experiencia en la dirección y evaluación de proyectos mineros. Consultor. Correo electrónico: hvargas442@gmail.com

** Geólogo, doctor en Ciencias de la Tierra. Profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: gvargasc@unal.edu.co

mediana y gran escala. De un total de 3762 títulos mineros en Colombia, 442 corresponden a oro y metales preciosos (Agencia Nacional Minera, 2020). Ante estos panoramas, la actividad minera ha impactado diferencialmente a la comunidad nacional bajo dos puntos de vista: por una parte, como una necesidad económica por el aporte de insumos y del ingreso tributario de las regalías a los municipios y, por otra parte, como innecesaria y perjudicial para el medio ambiente y la sociedad.

En este capítulo se realiza un análisis de la minería del oro en Colombia tomando como eje central, el manejo de los depósitos de colas o estériles dejados por la actividad minera pasada, actual y potencial de explotaciones futuras de proyectos a gran escala, valorando ejemplos de actividades y proyectos mineros a diferentes escalas en Colombia y técnicas y métodos de manejo sostenible de la actividad en otros países.

Palabras clave: minería, oro, colas, estériles, relaves, Colombia.

Introducción

En las actividades mineras auríferas, es notoria la presencia de volúmenes de los materiales sobrantes (colas y estériles), que generalmente son acumulados en las cercanías de las operaciones en lugares definidos por los estudios de factibilidad minera, que se van acumulando durante la vida de la mina y después de terminada la operación como pasivos mineros (Unal y Minminas, 2014; Arango y Olaya, 2012). El mito generalizado es el temor de que estos depósitos generen fluidos tóxicos o se desestabilicen y puedan generar riesgos por fenómenos de remoción en masa, en particular, flujos de lodos. Aunque los riesgos existen, y han ocurrido eventos de este tipo, técnicas modernas permiten mitigar estos riesgos con depósitos de colas secas, control de lixiviados y retrolleado (en las partes vacías de los trabajos subterráneos).

En Colombia, han existido operaciones mineras auríferas por largos periodos de tiempo (aproximadamente 500 años) y la disposición final de estos depósitos, que no han sido de grandes dimensiones, no ha sido la óptima (ej., vertimientos y depósitos no tecnificados sobre laderas y cimas, excavaciones y montículos en valles aluviales) causando contaminación, por sus lixiviados y por la inestabilidad de los depósitos en zonas de riesgos.

Hoy en día, en Colombia, a pesar de no existir aún operaciones de gran minería de oro en el país, hay una alta incertidumbre de los posibles impactos por operaciones mineras auríferas a gran escala que generarían un gran volumen de material estéril.

En el marco de esta situación, se realizó en este trabajo una investigación sobre los manejos que se han dado en Colombia a estos depósitos en la minería del oro, considerando el tipo de minería, el nivel de escala, ejemplos de proyectos tipo, impactos, técnicas y métodos desarrollados de deposición en otros proyectos internacionales sostenibles, características y riesgos. Se enuncian algunos ejemplos de operaciones con éxito a nivel nacional e internacional y de cómo se hace en otros países con una minería desarrollada.

1. Características de los depósitos de colas, estériles o relaves

Los depósitos de estériles y colas son términos comunes Colombia, en México se les dice jales y en el Perú, canchas de jales. En otros países y desde la minería convencional y tecnificada se denominan depósitos de relaves. Estos términos se utilizarán sin distinción como sinónimos en el presente texto.

Para el caso de menas auríferas, en donde la concentración económica de oro se mide en gramos/tonelada (“ppm”, partes por millón), los desechos por lo general representan grandes volúmenes y dimensiones, producto del proceso de explotación o beneficio. Esta relación se evidencia en su concentración de tal forma que, en depósitos auríferos en general de alta ley, no superan 20 o 30 g/tm¹, mientras en los depósitos de baja ley las concentraciones de oro varían de 3,0 a 0,3 g/t. Esto denota el gran volumen de material residual o estéril que se generaría para extraer un gramo de oro en una explotación aurífera.

En operaciones mineras a gran escala los procesos de depositación y tratamiento de los desechos o estériles contemplan estructuras de diseño y construcción de obras como la presa y la zona de embalse. El tratamiento de las colas y estériles pueden tener las zonas de espesado, filtrado o en pasta.

¹ Esta simbología, que reemplaza la de gm/T, es la correspondiente a la notación aprobada para el sistema métrico decimal.

Hoy día existen varios tipos de depósitos de colas, estériles o relaves, en el cual su diseño es el resultado del estudio de factibilidad minera, que define el lugar preciso para cada área y las obras asociadas con el fin de mantener un equilibrio con el medio ambiente.

En la minería del oro y de muchos otros minerales metálicos y no metálicos, se han utilizado dos métodos de procesamiento de los materiales residuales: colas húmedas (más de 70% de humedad) y colas secas, el método más utilizado actualmente.

2. Métodos y técnicas

Los depósitos de colas o estériles mineros asociados a la exploración del oro presentan varios impactos que pueden asociarse a partir de sus propiedades físicas y químicas. Desde un punto de vista químico, los residuos de sulfuros en colas pueden producir ácido sulfúrico en sus lixiviados, otros depósitos de colas de oro pueden contener importantes cantidades de arsénico (As) y mercurio (Hg) (López et al., 2019; Díaz et al., 2018; Rojas et al., 2017; Cordy et al., 2011; Torres et al., 2018); desde un punto de vista físico, el tipo y contenido de minerales arcillosos en colas afecta la estabilidad geotécnica, la recuperación de agua e interviene en el espesado de las colas.

El tratamiento de colas de desechos mineros incluye varios métodos que permiten un mejor manejo ambiental y geotécnico para su estabilidad como represas de valle cruzado o laderas, terraplenes elevados /embalses, apilamiento en seco de colas, pila seca filtrada (Davies, 2011), establecimientos de líneas base geoquímicas (Parsons y Little, 2015), espesados en tierra (Benzaazoua et al., 2004; 2004a y 2004b), relleno en tajo abierto abandonado minas o minas subterráneas y disposición directa en ríos, lagos y el océano (superficie oceánica y eliminación de relaves submarinos), análisis de estabilidad a partir de técnicas de sensores remotos (Wei et al., 2018), métodos de diseños de presas para eliminación de colas de lodo comprenden embalses de purines; embalses del valle, diques de anillo, embalses en el pozo y pozos cavados (EPA, 1994). Modelos estocásticos e integrados para la gestión minera y procesamiento y optimización de las colas o relaves con una expansión de su periodo de vida, han sido propuestos por varios investigadores, como Saliva et al. (2019) y Edaki et al. (2014).

Ejemplos de técnicas de espesados de colas se utilizan para la eliminación superficial de granos finos, optimizar la recuperación de agua,

reducir el riesgo de inestabilidad, bajar los costos, minimizar la perturbación de la tierra, producir un flujo denso de colas y permitir la conversión de los estanques de estériles en un área de disposición de relaves espesados extendiendo la vida de las minas y el aumento del almacenamiento de sólidos. Comúnmente se usa cal cuando es necesario aumentar la viscosidad de estos (Oxenford y Lord, 2006).

Actualmente, en la industria minera mundial se manejan dos alternativas para almacenar los relaves: depósito de relaves convencionales, y depósito de relaves filtrados, producto del desarrollo tecnológico de la minería. Los contenidos de humedad en los relaves convencionales tienen un índice de humedad superior a 70%, mientras que en los relaves filtrados este es menor a 15%. El menor contenido de humedad reduce la generación de lixiviados, y permite compactar los relaves para mejorar la estabilidad del depósito. Los relaves convencionales implican un bajo costo operativo pero un riesgo moderado-alto, mientras que en los relaves filtrados el costo es alto, pues requiere grandes inversiones en sistemas de filtración, camiones y bandas transportadoras, con el fin de reducir considerablemente el riesgo del fallo.

Al tener que almacenar relaves con altos contenidos de agua, los depósitos convencionales requieren altos volúmenes de almacenamiento, incrementando el riesgo de fallo y desastre. Al ser filtrados y compactados, los relaves secos ocupan menor huella superficial. Mientras que en los relaves convencionales la huella es mayor debido a que hay menor contenido de sólidos y mayor humedad.

En los relaves secos es más fácil rellenar los vacíos minados del subsuelo, con el fin de estabilizar el terreno de la mina y mitigar los impactos sobre el agua subterránea. A esta técnica se le conoce como *retrollenado*.

3. Depósitos de colas y estériles en la minería colombiana

El manejo final de las colas y estériles en todos los procesos históricos en Colombia ha generado uno de los mayores efectos ambientales y contaminación, por lo que hoy se puede decir que corresponden a “realidades y no a mitos”, evidenciado por los llamados pasivos ambientales. Según el censo minero de 2011, el 95% de las pequeñas minas ilegales no cuentan con ningún tipo de permiso o autorización ambiental, lo que está generando graves impactos ambientales en el país (Guiza, 2013).

El estado no tiene establecida una política para la identificación y manejo de los pasivos ambientales derivados de la actividad minera, pese a los diferentes problemas ambientales derivados de los impactos acumulativos, residuales y sinérgicos que ha traído la actividad minera en diferentes regiones del país, no sólo asociados a la minería ilegal, sino también a aquellos emprendimientos mineros de gran escala.

Los yacimientos auríferos explotados e identificados a la fecha en Colombia están ubicados sobre macizos ígneo cristalinos sobre las tres cordilleras y en el Macizo Colombiano, en Nariño, Putumayo, Cauca, por lo tanto ubicados en gran variedad de climas (por altitud), todos en zonas tropicales, en diferentes posiciones geográficas, y en general en zonas geológicas activas por sismicidad y vulcanismo (cordillera Central y Occidental), salvo los que están presentes en rocas de escudo, sobre los cratones² al este de Colombia (Distrito de Tararira). Por lo tanto, las colas y estériles están y estarán localizados en diferentes ambientes geográficos y climas relacionados con la altitud y ambientes bióticos. Dos tipos de yacimientos caracterizan las explotaciones y depósitos de colas en Colombia: minería aluvial y minería subterránea.

4. Depósitos en la minería aluvial

Los depósitos aluviales auríferos se definen como acumulaciones mecánicas, formadas por procesos de meteorización y transporte que permiten la concentración de minerales pesados, en este caso, oro. La minería aluvial en Colombia se ha realizado desde épocas precolombinas y sus actividades estuvieron muy ligadas a los ejes de colonización hace 500 años (Restrepo, 1883).

Los depósitos de colas y estériles en zonas aluviales de ambientes de llanuras bajas en los cuales los cauces desarrollan amplias zonas de movilidad natural sobre su lecho mayor (Vargas, 2015) y llanuras de

² Los cratones “son zonas de la corteza continental muy antiguas y erosionadas y se diferencian los arcaicos (más antiguos) de rocas ígneas y metamórficas, los post-arcaicos que conservan una cobertera plegada de rocas sedimentarias más o menos metamorfozadas. Las primeras son de topografía plana, penillanuras, los segundos, relieve apalachense” (Glosario Geografía Física, s.f., <https://glosarios.servidor-alicante.com/geografia-fisica/cratones-o-escudos>).

inundación son comúnmente mal manejados vertiéndose sobre su cauce activo o lecho mayor de forma aleatoria o indiscriminadamente produciendo excavaciones y promontorios que limitan la movilidad natural del cauce activo (Universidad Nacional de Colombia y Ministerio de Minas y Energía, 2014; Arango y Olaya, 2012) (figura 1).



Figura 1. Vista de detalle del río Dagua afectado por excavaciones de su cauce activo y lecho mayor por minería ilícita de oro aluvial

Fuente: imagen Worldview 2 con procesamiento propio (2012).

La minería ilícita del oro en Colombia se ha acentuado en cauces fluviales en donde los depósitos y las excavaciones modifican la morfología de los depósitos aluviales y su método de beneficio con mercurio acentúa la contaminación. En Colombia varios lechos de ríos han sido afectados por esta minería ilícita, entre los cuales se destacan: Cauca, Nechí, Apaporis, Caquetá, Mecaya, Taraira, Guainía, Putumayo, Atrato, Cuiary, San Miguel, Bojayá, Murri, Páez, La Mojana, Chinchiná, Palo, La Vieja, Quito, etc. (UNODC, 2016; Güiza, 2013) (figura 2).

En estos procesos de explotaciones mineras aluviales ilícitas los depósitos de los desechos de las excavaciones sobre las llanuras, terrazas y lechos activos y mayores de los cauces son vertidos aleatoriamente en el

mismo lugar sin ninguna técnica afectando los sistemas naturales fluviales, produciendo el aumento de la sedimentación aguas abajo, cambios en los cauces activos, inundaciones y erosión fluvial.



Figura 2. Vista de imagen con minería aluvial ilícita en llanuras aluviales del río Nechí, Antioquía

Fuente: imagen de Google Earth (2020).

Zonas de minería aluvial asociada a títulos mineros legales en Colombia se presentan en las siguientes regiones: El Bagre, Antioquia; Bajo Cauca, Cáceres, Cauca, Zaragoza, El Bagre; La Viborita en Amalfi, Antioquia y Corregimiento de Zaragoza, Buga en El Valle del Cauca. Como ejemplo del manejo de las explotaciones mineras aluviales, se presenta a continuación una descripción de la zona minera del Bagre, Antioquia.

4.1. El Bagre, Antioquia

La región del Bajo Cauca, en el departamento de Antioquia, históricamente ha sido la productora de oro más importante de Colombia y representa cerca del 35% de la producción histórica de oro total de todo el país. Incluye una gran extensión de terrazas de depósitos aluviales que fueron hidráulicamente transportadas desde los materiales fuente cercanos.

La región incluye los tramos inferiores de los ríos Cauca y Nechí que drenan la zona de los núcleos plutónicos y metamórficos de la cordillera Central en su zona norte. La presencia de oro proviene en buena parte derivada de los cientos de vetas de cuarzo de oro mesotermales conocidas alojadas en unidades de roca plutono-metamórficas paleozoicas y mesozoicas localizadas al sur de estos valles. Los depósitos auríferos fueron trabajados originalmente por los indios Sinú, y luego extensamente por los españoles y posteriormente por varias compañías mineras, así como por Mineros S. A., que actualmente produce entre 120.000 y 150.000 onzas por año desde sus operaciones cerca de El Bagre, Antioquia.

El sistema de explotación utilizado para la extracción de oro de aluviones de gran espesor como es el caso de los del río Nechí, se realiza por medio de dragas de cucharas, siguiendo el método de corte y relleno. El beneficio del oro libre se da por medio de concentración gravimétrica a bordo de draga, sin la utilización de mercurio y con una recuperación ambiental constante que involucra procesos productivos en conjunto con la comunidad local.

Actualmente la operación aluvial en Mineros, se realiza mediante una operación mecanizada la cual está constituida por una draga de succión, una draga de cucharas y equipos de maquinaria pesada. La draga de succión extrae el suelo (capa vegetal), que oscila entre medio y un metro hasta los primeros 18 metros de profundidad aproximadamente, y lo bombea hacia la superficie para formar rellenos hidráulicos.

También utilizan una draga de cucharas que extrae gravas, arcillas y arenas con contenidos de oro, desde los 18 hasta los 27 m, aproximadamente, las cuales son beneficiadas al interior de la draga a través de procesos gravimétricos de peso y tamaño, sin la utilización de mercurio ni ningún agente químico contaminante (Mineros, 2019). Las gravas y arenas una vez lavadas son depositadas por la misma draga sobre los márgenes en donde la draga ha laborado; este material no aprovechable (colas y estériles) queda depositado definitivamente como pilas alargadas

de cargueros y rellenos hidráulicos, sobre los cuales se hace el restablecimiento de nuevos ecosistemas.

Otros procesos de recuperación y adaptación por resiliencia de lechos fluviales se dan en actividades mineras más sostenibles como en la zona del río Nechí en El Bagre por Mineros de Antioquia (figura 3).



Figura 3. Ejemplo de resiliencia y recuperación del cauce y de la llanura de inundación en cercanías a El Bagre

Fuente: imagen Google Earth del 2010 (izquierda) y PlanetScope de febrero de 2020 (derecha).

5. Depósitos de colas y estériles asociados a minería subterránea

En Colombia han existido labores de minería subterránea desde épocas precolombinas. A la llegada de los españoles, ya indígenas quimbaya laboraban en túneles sobre el cerro Marmato. Proyectos sobre el manejo de colas en minería subterránea de depósitos auríferos vetiformes pueden estar representados en las dos principales operaciones subterráneas existentes desde hace más de doscientos años, como son la zona de Marmato y Segovia-Remedios.

5.1. Marmato

El cerro de Marmato, donde se localiza la población del mismo nombre, representa la única zona minera en Colombia en la cual los títulos están

determinados por cotas y en el cual confluyen la minería artesanal, informal y la mediana minería con problemas sociales y ambientales.

Se estima que la capacidad actual del almacenamiento de colas y estériles de Marmato operada por minería a mediana escala, en su parte baja, proporcionará de tres a cuatro años adicionales de almacenamiento, después de lo cual las nuevas instalaciones de almacenamiento de pilas secas de colas y estériles tendrían que acomodar los relaves a través de los de 16 años de vida mina estimada. Actualmente las colas se envían a dos piscinas de decantación. El agua de drenaje de estos estanques se trata con floculante y se envía de vuelta a la planta para el uso en el proceso o descargado a la corriente cercana que es la quebrada de Marmato.

Los relaves son removidos de las piscinas de sedimentación y una vez están suficientemente deshidratados son transportados por camiones a las instalaciones existentes de almacenamiento de colas. El depósito de colas se construye con sistemas de drenaje subterráneo que consisten en tuberías centrales de cabecera y conectado a desagües transversales para gestionar cualquier filtración, manantial o flujo ascendente de agua subterránea dentro depósito de colas propuesto. Se trata de otra minería existente en el mismo cerro de tipo informal o pequeña minería que vierte parte de sus materiales sobre las laderas causando frecuentes movimientos en masa (figura 4).

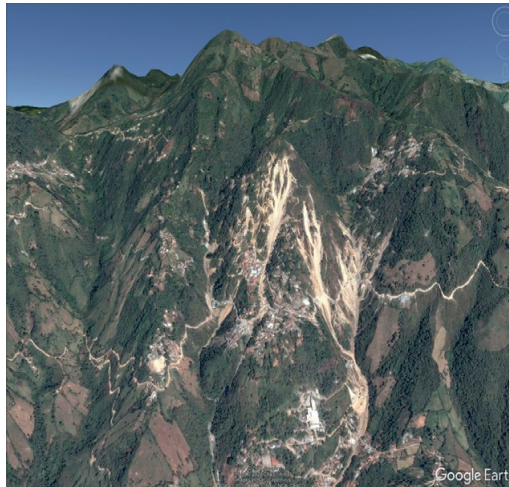


Figura 4. Vista 3D del cerro de Marmato, Antioquia. Nótese los depósitos de desechos de la minería subterránea vertidos sobre las laderas

Fuente: Google Earth (2020).

5.2. Segovia Remedios

Desde los inicios de la operación de minería subterránea en el Distrito de Segovia Remedios, al noreste de Antioquia, en 1854, todas las colas o relaves del proceso de molienda y cianuración se han depositado en el lecho de la quebrada Doña Teresa o La Cianurada, afluente del río Bagre.

Los depósitos de estériles en esta operación de minería hoy día se localizan en la zona denominada El Chocho y son depositados como colas secas, lo cual permite mejorar los sistemas de neutralización de las soluciones cianuradas mediante la instalación de una sola prensa de filtro de placa y marco instalada junto al TSF diseñado para tratar 1.500 t/d de sólidos secos cada una. En la corriente de María Dama la tasa de producción diaria promedio es de aproximadamente 1.200 t/d, con picos de procesamiento de hasta 1.500 t/d. En 2020; allí se planea agregar un segundo filtro de relaves idéntico para garantizar la disponibilidad de la planta. Boris et al. (2020) describen una combinación de dos metodologías modernas aplicadas al tratamiento de colas y relaves para la zona (SRK Consulting, 2019).

6. Depósitos de colas asociados a niveles o escalas de la minería en Colombia

De acuerdo con la estructura minera en Colombia, el Ministerio de Minas y Energía y la Agencia Nacional Minera han clasificado la actividad minera en tres tipos principales: 1) gran minería o minería empresarial, 2) minería a mediana escala, 3) pequeña minería y 4) minería artesanal. La gran minería se realiza de manera formal mediante la concesión de títulos mineros que el Estado colombiano otorga a empresas de gran capital. Ejemplos de proyectos mineros a gran escala en Colombia son: el proyecto de la Colosa, en el Tolima, proyecto Buritica y Gramalote en Antioquia, proyecto Soto Norte en Santander, y ejemplos de mediana minería es la mina de San Roque en Antioquia.

La mediana minería corresponde a proyectos mineros de mediana magnitud (volumen de producción o valor de la producción), la realizan empresas y sociedades mineras con títulos mineros vigentes mediante labores mecanizadas, pero con algunas limitaciones de capital o de equipos y de maquinaria utilizada. En algunos casos cumplen con las normas ambientales y en otros las incumplen o transgreden. Diferente

a oro son proyectos mineros de carbón con explotaciones subterráneas en regiones de Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca y Norte de Santander. En este mismo grupo se incluyen las explotaciones a cielo abierto de material de arrastre en sectores de cauce aluvial de ríos y algunas quebradas. Son los agregados pétreos (gravas y arenas) como materiales de la construcción (Universidad Nacional y Ministerio de Minas y Energía, 2014).

La pequeña minería corresponde a la minería tradicional (realizada por comunidades indígenas y de afrodescendientes) y minería artesanal (pequeños propietarios), que en su mayoría es minería informal, no legalizada, que extrae el mineral o materiales con valor económico mediante métodos de explotación subterránea y a cielo abierto, sin tomar las medidas de protección necesarias y al margen del ordenamiento técnico, jurídico y ambiental. Esta clase de minería está ampliamente difundida en el país, particularmente en regiones mineras como Chocó, Antioquia, Bolívar, Cundinamarca, Boyacá, Valle del Cauca, Tolima, Nariño y Cauca, entre otras (Universidad Nacional y Ministerio de Minas y Energía, 2014).

6.1. Proyectos de pequeña e informal minería

En Colombia y muchos países del mundo, las labores mineras de subsistencia (garrimpos como se les conoce en Brasil y barequeo en Colombia) que realizan actividades extractivas, en la mayor parte ilegales inicialmente, y que en muchos casos son los descubridores de aluviones y manifestaciones auríferas que en algunos casos se convierten en los grandes proyectos del futuro. Entre este tipo de actividad minería, realizada inicialmente por grupos de barequeros, itinerantes que se adentran a regiones inhóspitas y prospectivas y al encontrar oro, se difunden las noticias de un nuevo lugar y detrás de ellos llegan grandes grupos de personas a las zonas de vetas y enjambres de vetas, donde explotan las zonas oxidadas (oro libre) rápidamente en lo que denominan un apogeo (ver fotografía 1).

Después de un tiempo, al terminarse los óxidos, quedan los mineros más organizados, que generalmente solicitan las áreas e inician su legalización y los trabajos subterráneos de explotación-exploración en las zonas de sulfuros, en donde los manejos de colas y estériles no mejoran y siguen contaminando y generando grandes volúmenes de sedimentos en los cauces afectados.



Fotografía 1. Ejemplo de la forma de trabajo en minería sobre saprolitos³ y coluviones, por pequeños mineros y barequeros, lo que es semejante en cualquier lugar del mundo. San Martín de Loba, Bolívar

Fuente: fotografía Héctor Vargas (2004).

Es consenso entre los conocedores de esta situación de que en “Colombia hay necesidad de calificar con sumo cuidado la llamada pequeña minería, definida como *minería de hecho*, ya que en algunos casos no puede ser considerada como sinónimo de mala calidad operativa” (Güiza, 2013), y además es un factor a considerar en el análisis de los vertimientos.

De acuerdo con el Ministerio de Minas y Energía, “la minería artesanal” es la desarrollada sin estar inscrita en el Registro Minero Nacional y, por lo tanto, sin título minero. No obstante, en el artículo 58 de la Ley 141 de 1994, vigente al año 2020, el cual es referenciado por el Código de Minas en el artículo que regula precisamente el proceso de legalización minera.

El manejo de colas, relaves o estériles, en casi todos los casos de pequeña minería es caótico y desordenado, causando la mayor cantidad de pasivos ambientales en Colombia (contaminación con mercurio y cianuro, movimientos en masa del material de gravas y estériles acumulados sin

³ El saprolito es un “material blando producto de la meteorización química de las rocas el cual se caracteriza por la formación de minerales secundarios, en el que la estructura y fábrica originales están preservadas debido al emplazamiento pseudomórfico de los minerales originales sin alteración y transporte subsecuentes” (Aristizábal, Valencia, Vélez y Echeverri, 2011).

ningún concepto técnico y ambiental). Según el estudio “Minería informal aurífera en Colombia, Principales resultados del levantamiento de la línea de base”, por Fedesarrollo, se logró establecer que en el caso de la “minería informal aurífera colombiana, sólo el 50% de las operaciones formales encuestadas en los departamentos bajo estudio reporta tener una licencia ambiental”. De otro lado, más allá del licenciamiento y en términos del manejo ambiental de esta actividad, se encuentra que, a pesar de no tener titulación, el 62% de las operaciones informales cuenta con un lugar para almacenar el material estéril y el 50% hace cierre de minas una vez terminada la labor minera (este porcentaje es similar al observado entre las operaciones formales encuestadas). Esto no implica que el sector informal sea ambientalmente responsable, por el contrario, se observa que solo el 25% de las operaciones procesa o almacena relaves y entre el 60 y el 37% los arroja sin ningún tipo de tratamiento, ya sea al río, al campo o simplemente los entierran.

Con el auge de la mecanización en los últimos 40 años sobre aluviones en actividades mineras legales, ilegales, o de minería de hecho, han multiplicado los efectos del mal manejo de los residuos de la minería y grandes regiones han sido arrasadas y sus habitantes contaminados con altos niveles de mercurio (Bajo Cauca, río Nechi, Segovia Remedios, Zaragoza).

6.2. Proyectos de mediana minería

El *Proyecto Gramalote*, por ser el único proyecto de minería a cielo abierto ya licenciado, podría ser catalogado como una operación de gran minería. Gramalote no es un nuevo descubrimiento, ya que en este sitio, sobre la quebrada Guacas, cerca de la confluencia con el río Nus, en el noreste de Antioquia, existió por varias generaciones una operación semiartesanal que producía principalmente oro libre y usaba la fuerza hidráulica para hacer funcionar toda la operación de molienda, en una forma muy rudimentaria. Por lo tanto, todas las colas y estériles fueron depositados sobre sus laderas y vertidos directamente al afluente de la quebrada Guacas. Cuando se identificó el estilo de mineralización, se observó el estado de degradación en que se encontraba el área en 1996 (ver fotografía 2).



Fotografía 2. Ladera oeste del cerro Gramalote. Se observa el estado de intervención en que se encontraba el área en 1996, producto de una minería superficial sobre saprolitos con venillas de cuarzo aurífero, ejercida sin control y con muy mal manejo de estériles, depositados sobre las laderas

Fuente: fotografía Héctor Vargas (2006).

Según el estudio de impacto ambiental del proyecto minero Gramalote (Integral, 2015), y teniendo en cuenta el estilo de mineralización que predomina en Gramalote, se desarrolla como minería a cielo abierto, y de acuerdo con las proyecciones planteadas en el plan minero, el objetivo es remover un total 656 Mt de material del subsuelo y obtener como resultado total de las operaciones 3.651 kOz de oro y 3.772 kOz de plata. Durante la operación normal, la planta tendrá una capacidad nominal de producción anual aproximada de 414.600 onzas de oro y 426.500 onzas de plata.

La planta de beneficio fue diseñada para procesar hasta 23 millones de toneladas por año de rocas mineralizadas. El desarrollo del proyecto incluye dos tajos, un depósito de colas y relaves secos, compactados con una capacidad aproximada de 267 Mt; se muestran cómo será la distribución final de las obras, tajos y relaves secos aprobados en el EIA. Se escogió como el más óptimo lugar para el depósito final de colas y relaves secos y compactados, en la parte superior de varias cuencas menores afluentes del río Nus, ubicado en parte norte del proyecto.

Estos lugares también incluyen un lugar para el depósito temporal de material denominado *material marginal*. Este tendría una capacidad aproximada de 127 Mt. Para ambos depósitos se construirán drenes internos con material enrocado con el fin de recolectar el flujo de agua proveniente de las quebradas existentes. Estos drenes estarán ubicados en

el fondo del valle bajo la huella de las pilas y permitirá que la precipitación directa sobre los depósitos y la escorrentía de las cuencas El Topacio y El Banco que se infiltre hacia el fondo del valle sea conducida aguas abajo hacia los sedimentadores de cada estructura.

La presa de colas estará ubicada en el valle de la quebrada La Palestina, la configuración final de la presa de colas tendrá un área aproximada de 313 ha. La presa de colas será construida secuencialmente durante la vida de la mina. Los materiales de relleno para la presa de arranque serán saprolito y suelo residual, las colas de flotación se incrementarán según la capacidad de almacenamiento de relaves mediante el levantamiento de la presa de arena y su posterior extensión como contrafuerte de arena. Como se mencionó inicialmente, la presa y contrafuerte de arena se desarrollarán a lo largo de la operación de la mina, utilizando para su construcción la fracción gruesa de las colas de flotación (*underflow*), que será depositada mediante tuberías desde la zona de relleno (cresta) de la presa, en donde se extenderá y se compactará mecánicamente para formar una estructura densa y desecada (Integral, 2015).

El *Proyecto Buritica* (Independientes JDS Energy y Mining Inc., Buritica Project NI 43-101) actualmente se encuentra en la fase de construcción y montaje. Está ubicado en el departamento de Antioquia, corresponde a un proyecto de oro ya licenciado, en etapa de construcción (fotografía 3). De igual forma que el proyecto Gramalote, este depósito aurífero no podría ser catalogado como un descubrimiento, ya que desde 1700 operaba allí la mina María Centena, y desde 1990 operó una pequeña mina con beneficio de 20 a 30 toneladas por día por parte del denominado Grupo Bullet, en cabeza de Robert Allan. Hoy día, después de una primera campana exitosa de perforación, el proyecto desarrolló múltiples estudios y fue posteriormente controlado por un grupo canadiense (Continental Gold). La fase de producción está programada para comenzar en 2020. Una estimación de recursos minerales de 5,32 millones de onzas de oro con 10,32 g/t de oro (16 millones de toneladas) en términos de recursos medidos e indicados, más unos recursos inferidos de 6,02 millones de onzas de oro con 8,56 g/t de oro, para un total de 21,9 millones de toneladas. Recientemente, la operación fue adquirida por Zijin Mining Group (Independientes JDS Energy y Mining Inc., marzo de 2019).



Fotografía 3. Vista del proyecto Buritica, en donde se observan las obras de infraestructura y la actual disposición de estériles

Fuente: fotografía Continental Gold (2020).

El sitio definido para la deposición de colas se diseñó en forma de múltiples celdas protegidas con geomembranas que contendrán en total 6,5 millones de m^3 durante la vida de la mina, que serían 3,5 millones de m^3 en colas secas y filtradas y 3,0 millones de m^3 de material de estériles producto del desarrollo de la mina, que será complementado con materiales aluviales locales y será usado para todo tipo de obras, involucrados en la construcción de las celdas.

6.3. Proyectos de gran minería

No existen hoy en Colombia proyectos mineros de oro de gran minería. Las mayores operaciones auríferas activas son históricas y corresponden a Marmato y Segovia, que benefician máximo 1500 toneladas/día, sin embargo, se pueden enmarcar los siguientes proyectos:

En enero de 2018 inició operaciones el *Proyecto San Ramón*, localizado en Santa Rosa de Osos, Antioquia, siendo esta la primera mina que entraba en operación en los últimos 20 años, fue diseñada para operar con el método de minería subterránea. Inició sus operaciones beneficiando 750 toneladas/día, pero debido a problemas financieros y principalmente en su evaluación geológica, que se hicieron evidentes al iniciar operaciones, el

proyecto fue paralizado en noviembre de 2018, y alcanzó a producir 5.700 onzas de oro (de las 40.000 onzas que estaban previstas). En el depósito de colas se depositaron aproximadamente 20.000 de las 5 millones de toneladas que se producirían en la vida de mina, estimada en ocho años.

Otro proyecto de gran minería es el *Proyecto Soto Norte*, localizado en Surata y California, Santander, que se encuentra ubicado a 5 km de la cabecera del municipio de California. Los estudios de este proyecto indican que posee reservas y recursos con más de 12 millones de onzas de oro y plata. La operación minera está diseñada para extraer alrededor de 2,6 millones de toneladas (Mt de mineral útil al año), para una producción promedio anual de 410.000 onzas de oro en concentrados polimetálicos. La planta de beneficio se localizará en el área rural del municipio de Suratá. Está diseñada para producir concentrados polimetálicos de dos tipos, 1) concentrado de sulfuros de cobre y 2) concentrado de pirita, mediante fases de molienda y flotación, para lo cual se reutilizará más del 90% del agua, estos concentrados serán refinados en el exterior. La planta tendrá la capacidad de procesar 7000 toneladas diarias de roca mineralizada; tendrá un área para el manejo y depósito definitivo de materiales sobrantes del proceso de beneficio, colas y estriles, en este caso secos, con una capacidad de almacenar 34 Mt de colas secas y material estéril.

El 55% de los relaves del proceso de beneficio serán filtrados para reducir su contenido de humedad, luego almacenarlos y compactarlos en forma de arena seca, reduciendo el espacio necesario para su disposición y controlando la estabilidad del terreno. El 45% restante de los relaves del proceso de beneficio y un porcentaje de la roca estéril de la mina, serán reutilizados en el retrolleado de la futura mina. (Minesa, 2020a)

6.4. Depósitos de colas de la minería en otros países de Latinoamérica

Vale la pena mencionar un ejemplo del avance de la industria minera de Colombia en sus operaciones el exterior y es el nuevo diseño y puesta en marcha sobre el manejo de colas y estériles que viene implementando la empresa colombiana Mineros S. A., que en 2013 adquirió los derechos sobre el 90% de HEMCO, empresa minera de Nicaragua, localizada en el

denominado Triángulo de Oro, sobre el área de Bonanza, localizada a 411 km al norte de Managua; la zona se halla entre cotas de 200 a 300 msnm y es un distrito histórico de vetas auríferas que viene operando desde 1889 en labores de explotación de forma intermitente debido a los problemas políticos del país. Desde que Mineros S. A. tomó la operación subterránea y a cielo abierto inició el cambio de manejo tradicional de colas por un nuevo y moderno sistema de manejo, preparación y almacenamiento de sus colas y estériles como colas secas, depositadas en presas, previamente preparadas para su disposición final (Hemco, 2020). Es así como en julio de 2013 se comenzó la construcción de la presa de colas San José (bajo la total normatividad ambiental nicaragüense y los más altos estándares mundiales), mediante la elevación de un dique de 28 m, que se amplió hasta 40 m de altura en abril de 2020, y que podrá almacenar 3,3 millones de m³, para la vida de ocho años del proyecto. En el sitio de la presa se impermeabilizaron 350.000 m² de terreno, con la instalación de geomembrana HDPE y LDPE doble texturada de 1,5 mm de espesor GM13 y GM17, como se muestra en la fotografía 4.



Fotografía 4. Sitio de la presa San José en Bonanza, Nicaragua, donde se impermeabilizaron 350.000 m² de terreno con geomembrana

Fuente: Hemco (2020).

Se prevé que con el desarrollo de futuras operaciones mineras, sobre esta zona en Nicaragua, donde, a pesar de tener más de 220 años de historia minera, solo hasta 2010 se iniciaron los trabajos de exploración modernos mediante asociaciones con otras compañías mineras y se están anunciando nuevos descubrimientos.

7. Ejemplos de éxito en recuperación de depósitos de colas

Existen en el mundo muchas operaciones con éxito en el manejo de sus depósitos de colas, entre ellas, en Australia, Canadá, España, Brasil, Chile. Un buen ejemplo reciente es la planta fotovoltaica, pionera en Chile, ubicada sobre el depósito convencional de colas, que surge como una solución para maximizar el uso eficiente de agua ante la escasez hídrica de la zona central del país, donde se ubica la mina Los Bronces (cobre). Hoy Los Bronces recircula entre el 70% y el 80% del agua del proceso, lo que permite abastecer un 45% del requerimiento total de la operación.

Otra alternativa para recuperar depósitos de colas es obtener valores metálicos existentes, que, en algunos casos, es cercana a 0,5%. En muchos lugares, esta ley es hoy es considerada como económicamente explotable, por lo que algunas empresas están volviendo a procesar esos desechos para extraer todo el oro y cobre que todavía queda. También existen otros minerales, principalmente tierras raras, muchos de los cuales son escasos y tienen importancia económica estratégica, puesto que sus principales aplicaciones corresponden a tecnologías de punta en la industria aeroespacial, automotriz, médica, óptica, electrónica de consumo, baterías y una serie de aplicaciones en energías renovables. Entre los más conocidos figuran antimonio, manganeso, bismuto, selenio y mercurio.

Actualmente, en algunos complejos metalúrgicos en China, Europa y Japón se recuperan y comercializan, además de cobre y ácido sulfúrico, quince materiales y metales como oro, plata, selenio, telurio, platino y paladio, contenidos en los concentrados minerales o residuos provenientes de concentrados de las colas existentes en múltiples países. Otro ejemplo de la recuperación de colas se localiza en Perú, Cajamarca, cerca al caserío de Tumbacucho, distrito y provincia de Hualgayoc. Se trata del proyecto San Agustín (Colquirrumi), donde existen más de siete hectáreas con cuatro depósitos de colas antiguas. Con el objetivo de garantizar la estabilidad física, química e hidrológica de las colas que estuvieron siendo afectadas por drenajes ácidos y agrietamientos, un equipo de profesionales elaboró el nuevo diseño y geometría para su recuperación, realizó los trabajos para la disposición y conformación de relaves (banquetas, removiéndose más de 95.000 m³ de relave), sistema de drenaje subterráneo y superficial, sello de baja permeabilidad y encapsulado con coberturas naturales, mitigando

el impacto de los efectos erosivos locales, aminorando la infiltración de aguas de escorrentía y eliminando todo drenaje ácido que pudiera afectar las estructuras.

8. Desastres asociados a depósitos de colas y estériles

La literatura registra varios eventos, algunos fatales, otros no, en diversas partes del mundo asociados al colapso de algunos depósitos de colas húmedas convencionales y generalmente con muchos años de llenado, y de variables dimensiones, desde presas de colas, en operaciones mineras antiguas y aún en operación, hasta avalanchas por la ruptura de *tupias* (presas hechas con barro, palos y rastros que contienen colas de minería aluvial o coluvial) construidas por mineros ilegales en muchos lugares del mundo.

Con el desarrollo de nuevas tecnologías (colas secas) y la implementación de innovadores diseños, hoy estos desastres son evitables, además el continuo seguimiento por equipos profesionales idóneos, diseños geotécnicos e instrumentos de alta tecnología, que incluyen seguimientos satelitales sobre los sitios de presas, minimiza los riesgos de colapso de presas y depósitos de estériles. Algunos casos de accidentes mineros con características fatales se presentan a continuación.

La industria minera mundial está alerta con las consecuencias de la ruptura de la presa de Brumadinho, y las noticias internacionales destacaron este evento como un verdadero desastre ambiental que ocurrió el 25 de enero de 2019 en el municipio de Brumadinho (estado de Minas Gerais) al sureste de Brasil, cuando un dique de contención que represaba relaves convencionales húmedos de la mina Córrego de Feijão, propiedad de la minera Vale S. A. (más del 50% propiedad del Estado brasileiro), se derrumbó y generó una avalancha de miles de metros cúbicos de lodos saturados en agua eventualmente tóxica sobre la región. La ruptura de la presa de la mina Córrego do Feijão, anotó para siempre la historia de Vale, sus empleados, las comunidades y personas afectadas. Esto ocasionó 270 muertes, de las cuales 2 eran mujeres jóvenes embarazadas y 11 víctimas aún no se han localizado. Se estima que este accidente ocurrió por falta de controles y seguimiento técnico a los lugares de presa y falta de control de parte de las autoridades ambientales de Brasil (Vale, 2020).

Desde el análisis de la estabilidad de presas de colas, se ha encontrado que alrededor del 10% de las 1.635 presas de colas y estériles del mundo

han tenido problemas de estabilidad en alguna de sus etapas. Administradores de activos se están volviendo más incisivos por demostrar a los clientes que los proyectos mineros para la fase de explotación han sido bien estudiados y diseñados. Muchos ahora tienen criterios relacionados con colas y estériles, y deben ser aprobados antes de realizar grandes inversiones en construcción.

Otra la catástrofe fue en la Represa de Bento Rodrigues, ocurrida en noviembre de 2015, también de Vale, un evento catastrófico ocurrido al romperse los muros de contención de las presas Fundão y Santarém, ambas ubicadas en el subdistrito de Bento Rodrigues, a 35 kilómetros del centro de Mariana, en el estado de Minas Gerais, Brasil. Esta falla dejó 19 personas muertas y miles de desplazados, 3 ciudades arrasadas, 1.265 desalojados y 6 millones de personas afectadas. El balance de daños también incluye 98 especies de peces desaparecidas, 1.176 hectáreas de vegetación destruidas y la contaminación de los ríos adyacentes (Matko, 2019).

La represa Fundão liberó 34 millones de metros cúbicos de desecho de mineral, que descendieron 55 km por el río Gualaxo del Norte. Las represas fueron construidas para depositar los desechos provenientes de la extracción del mineral de hierro retirado de numerosas minas de la región. Es considerado el mayor desastre ambiental de la historia de Minas Gerais. Los desechos llegaron al río Doce, cuya cuenca hidrográfica abarca alrededor de 230 municipios de los estados de Minas Gerais y Espírito Santo que utilizan sus aguas para abastecer a la población. Ambientalistas creen que los desechos recién comenzarán a ser eliminados del mar en aproximadamente 100 años.

Los residuos vertidos al río afectaron también la Usina Hidrelétrica Risoleta Neves, que se encuentra en Santa Cruz do Escalvado, a unos 100 kilómetros de Mariana. Según la concesionaria que administra la presa, su funcionamiento no se vio perjudicado (Miranda, Friede, Cordeiro Rodrigues y Sampaio, 2017).

Conclusiones

En este trabajo se evidencia que el manejo de depósitos de colas y estériles de la minería del oro en Colombia, ancestralmente, en pequeña y mediana minería bajo la forma de minería aluvial, a cielo abierto y subterránea, con

algunas excepciones, pone en primer plano la realidad de este mito, sin embargo, la implementación de técnicas novedosas y de nuevos proyectos mineros con diseños sostenibles y geotécnicos, acordes con el medio ambiente y la sociedad, pueden cambiar la percepción de este mito hacia proyectos sustentables.

Hoy en día, la industria minera está implementando el uso de relaves secos y compactados para un mejor control geotécnico de estos depósitos y el Estado está migrando a esta técnica, además de que en algunas operaciones se estará implementando el método de retrolleado de labores subterráneas con estas mismas colas. El análisis de los métodos y técnicas existentes para el manejo de colas y estériles permite indicar que puede desarrollarse una minería acorde con el medio ambiente y con la mitigación de riesgos asociados.

Con el conocimiento de la forma como se ha manejado el tema de colas y estériles en la minería de oro en Colombia y la investigación realizada en este trabajo se evidencia que el tema de depósitos de colas y estériles se ha manejado bajo una normatividad atemporal y muy poco rigurosa al exigir su cumplimiento y al final estos depósitos son tratados como un desecho sin valor y son objeto de un mal manejo técnico que impide asegurar su estabilidad geotécnica y que lleva a la generación de fluidos contaminantes.

La puesta en marcha de los primeros dos proyectos auríferos licenciados en Colombia (Gramalote y Buriticá) podría mostrar cómo debe ser un buen manejo de los depósitos y estériles. Además, es tiempo de iniciar la recuperación de muchos pasivos ambientales, incluso concesionándolos para que compañías mineras hagan la recuperación de los valores metálicos existentes y a la vez realizar su adecuación ambiental.

Referencias

Agencia Nacional Minera, 2020. www.anm.gov.co

Arango, J. (2014). *Proyecto de minería de oro la Colosa, identificación ambiental de la zona de explotación y sus impactos*. Pontificia Universidad Javeriana. Recuperado de <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/13504/1/ArangoMendozaJulianAndres2014.pdf>

- Arango, M. y Olaya I. (2012). Problemáticas de los pasivos mineros en Colombia. *Revista Gestión y Ambiente*, 15, 125-133.
- Aristizábal, V., Vélez, M. y Echeverri, Ó. (2011). Caracterización geotécnica de perfiles de meteorización desarrollados sobre rocas ígneas en ambientes tropicales. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 30, 93-106. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/29298>
- Barrera-Cataño, J. I. y Valdés-López, C. (2007). Herramientas para abordar la restauración ecológica de áreas disturbadas en Colombia. *Universitas Scientiarum*, 12, 11-24.
- Barrera-Cataño, J. I., Contreras-Rodríguez, S. M., Garzón-Yepes, N. V., Moreno-Cárdenas, A. C y Montoya-Villarreal, S. P. (2010). *Manual para la Restauración Ecológica de los Ecosistemas Disturbados del Distrito Capital*. Bogotá D. C.: Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Pontificia Universidad Javeriana (PUJ).
- Bell, R. y Glade, T. (2004). *Quantitative risk analysis for landslides-examples from Búdudalur*, NW-Iceland. *Nat Hazard Earth Syst*, 117-131.
- Benzaazoua, M., Perez, P., Belem, T. y Fall, M. (s. f.). 2004. *A laboratory study of the behaviour of surface paste disposal*, 19.
- Benzaazoua M., Fall, M. y Belem, T. (2004a). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals Engineering*, 17-2, 141-152.
- Benzaazoua, M., Marion, P., Picquet, I. y Bussière, B. (2004b). The use of pastefill as a solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 17-2, 233-243.
- Bertona, A. (2001). De qué se trata cuándo hablamos del pasivo ambiental. *Ambiente Ecológico*. Recuperado de www.ambiente-ecologico.com/ediciones/2001/077_01.2001/077_Columnistas_AlbertoBertona.php3
- BHP Billiton. (2007). *Qualitative Risk Assessment for Denbrobium Mine*. Australia.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
- Blanchard, R. (1968). *Interpretation of leached outcrops*. Nevada Bureau of Mines, Bull 66.
- Carneiro, A. y Fourie, A. (2018). *A conceptual cost comparison of alternative tailings disposal strategies in Western Australia*. 439-454. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1805_36_Carneiro

- Chaparro, E. (2018). *La situación minera en América Latina y una propuesta de extensión del conocimiento y del análisis*. Colombia: Minergía.
- Cordy, P., Veiga, M., Salih, I., Sari Console, S., García, O., Mesa, L., Velásquez, P. y Roeser, M. (2011). Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia. *Science of the Total Environment*. 410-11, 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.006>
- Davies, D. M. (2011). *Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals*. 10.
- Davies, P., Lawrence, S. y Turnbull, J. (2015). Mercury use and loss from gold mining in nineteenth-century Victoria. *Proceedings of the Royal Society of Victoria*, 127(2), 44. <https://doi.org/10.1071/RS15017>
- Díaz, S. M., Muñoz, N. M., Palma, M., Becerra, C. y Fernández, J. (2018). Exposure to Mercury in Workers and the Population Surrounding Gold Mining Areas in the Mojana Region, Colombia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, 2337.
- Edraki, M., Huynh, T., Baumgartl, T., Huang, L., Andrusiewicz, M., Tungpalan, K., Tayebi-Khorami, M., Wightman, E., Palaniandy, S., Manlapig, E., Evans, C., Bradshaw, D. y Vink, S. (2014). *Designer Tailings. An Integrated Model for Tailings Management*. 10.
- Energy JDS y Mining Inc. (2016). “Buriticá Project NI 43-101 Technical Report Feasibility Study Antioquia, Colombia”, preparado según NI 43-101 fechado el 29 de marzo de 2016 y con fecha de entrada en vigor el 24 de febrero de 2016. Estudio realizado por los consultores.
- Fonseca, B. C., Oliveira, M. L., Rodrigues, N. S. y Santos, R. M. (2015). Análise do estudo de caso da comunidade rural de São Sebastião do Soberbo, atingida pela uhe Risoleta Neves, sob a perspectiva dos conflitos, das ideias e dos argumentos. *Rev. Geogr. Acadêmica*, 9(1), 116-126. Recuperado de <https://revista.ufrr.br/rga/article/view/2934>
- Güiza, L., (2013). *La pequeña minería en Colombia: una actividad no tan pequeña*. Bogotá D.C. Universidad del Rosario.
- Google Earth. (2020). Visor mundial de imágenes de satélite. Versión Earth Pro.
- Hamberg, R., Maurice, C. y Alakangas, L. (2018). The formation of unsaturated zones within cemented paste backfill mixtures. Effects on the release of copper, nickel, and zinc. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(21), 20809-20822. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2222-9>

- Hemco. (2020). *Proyecto Presa de Colas San José*. Abril de 2020.
- Higson, J. L. y Singer, M. B. (2015). The impact of the streamflow hydrograph on sediment supply from terrace erosion. *Geomorphology*, 248, 475-488. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.037>
- Infante, C. (2011). *Pasivos ambientales mineros, barriendo bajo la alfombra*. Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina. 72 pp.
- Integral. (2015). Estudio de impacto ambiental 2015. Proyecto Minero Gramalote TM 14292. Con el apoyo de Integral, Ingenieros Consultores, Medellín, Antioquia.
- Integral. (2019). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Quebradona en Jericó, Antioquia, con acompañamiento de Integral, noviembre de 2019.
- IPBES. (2016). *Diagnóstico de la información ambiental y social respecto a la actividad minera y la extracción ilícita de minerales en el país*. Sentencia T-445. 372 pp.
- Krisnayanti, B., Anderson, C., Sukartono, S., Afandi, Y., Suheri, H. y Ekawanti, A. (2016). Phytomining for Artisanal Gold Mine Tailings Management. *Minerals*, 6(3), 84. <https://doi.org/10.3390/min6030084>
- Lawson, S., Newman, P., Jewell, R. J. y Australian Centre for Geomechanics (Eds.). (2006). *Paste 2006: Proceedings of the ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings: 3-7 April 2006, Limerick, Ireland*. Australian Centre for Geomechanics.
- López, L., Caballero, K., Ceballos, L., Tapia, A. y Verbe, J. (2019). Multi-compartment Mercury Contamination in Major Gold Mining Districts at the Department of Bolívar, Colombia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 76, 640-649. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00609-w>
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts* (3.^a ed.). Dordrecht: Springer.
- Macías, J. L., Corona-Chávez, P., Sánchez-Núñez, J. M., Martínez-Medina, M., Garduño-Monroy, V. H., Capra, L., García-Tenorio, F. y Cisneros-Máximo, G. (2015). The 27 May 1937 catastrophic flow failure of gold tailings at Tlalpujahua, Michoacán, Mexico. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(5), 1069-1085. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1069-2015>
- Mantxo, M. (2017). El desastre de Mariana. *Revista Ecologista*, 94, 10-23. Recuperado de <https://issuu.com/ecologistasenaccion/docs/ee94>

- Minesa. (2020). Estudio de impacto ambiental —EIA— proyecto de explotación subterránea de minerales auroargentíferos “Soto Norte”. Minesa, Informe Técnico de 2020.
- Minesa. (2020a). Estudio de impacto ambiental para el proyecto de exploración subterránea de minerales auroargentíferos “Soto Norte”. Resumen ejecutivo. 217 pp.
- Minesa. (2020b). Estudio de impacto ambiental —EIA— proyecto de explotación subterránea de minerales auroargentíferos “Soto Norte”. Programa de manejo especial de la sardina *Hemibrycon sierraensis*.
- Ministerio de Minas y Ministerio de Medio Ambiente. (2002). *Guía Minero Ambiental de Explotación*. Recuperado de <http://www.simec.gov.co/Portals/0/Documental/1161.pdf>
- Miranda, M. G., Friede, R., Cordeiro Rodrigues, A. y Sampaio Almeida, D. (2017). Cadê a minha cidade, ou o impacto da tragédia da Samarco na vida dos moradores de Bento Rodrigues. *Interações*, 18(2), 3-12. <http://dx.doi.org/10.20435/inter.v18i2.1410>
- Opiso, E. M., Aseneiro, J. P. J., Banda, M. H. T. y Tabelin, C. B. (2018). Solid-phase partitioning of mercury in artisanal gold mine tailings from selected key areas in Mindanao, Philippines, and its implications for mercury detoxification. *Waste Management & Research*, 36(3), 269-276. <https://doi.org/10.1177/0734242X17753534>
- Parsons, M. B. y Little, M. E. (2015). Establishing geochemical baselines in forest soils for environmental risk assessment in the Montague and Goldenville gold districts, Nova Scotia, Canada. *Atlantic Geology*, 51(1), 364-386. <https://doi.org/10.4138/atlgol.2015.017>
- Planet. (2020). Imágenes de satélite planetScope. <https://www.planet.com/>
- Restrepo, V. (1883 [1979]). *Estudio sobre las minas de oro y plata en Colombia*. Medellín: Fondo Rotatorio de Publicaciones FAES.
- Rojas, N. R., Echeverry, L. E. y Cataño, J. (2017). Characterization by QEM-SCAN and FE-SEM of ore bodies gold artisanally treated with mercury in Antioquia, Colombia. *Prospect*, 15(2), 107-116.
- Saliba, Z. y Dimitrakopoulos, R. (2019). An application of simultaneous stochastic optimisation of an open-pit mining complex with tailings management. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1688954>

- SRK Consulting. (2019). (EE. UU.), Inc. Informe Técnico NI 43-101. Estudio de Prefactibilidad de Segovia. JAO/AK, Segovia_Amended_PFS_Update_NI43-101TR_461800-200_Rev38_KD.docx.
- SRK Consulting. (2019). Informe Técnico Evaluación Económica Preliminar Proyecto Marmato Colombia Efectivo. Fecha: 31 de julio de 2019. Fecha del informe: 27 de noviembre de 2019; Informe elaborado para Gran Colombia Gold Marmato S. A. S. Informe elaborado por SRK Consulting (EE. UU.).
- Supriatna, S., Susiloningtyas, D. y Firdaus, N. (2018). *Sustainability landscape spatial model for Kemiri Sunan crop at Pongkor mining and surrounding area, Indonesia*. 020177. <https://doi.org/10.1063/1.5064174>
- Torres, Y., Caballero, K. y Olivero, J. (2018). Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Choco biogeographic region, Colombia. *Chemosphere*, 193, 421-430.
- UNODC. (2016). Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota.
- Universidad Nacional de Colombia y Ministerio de Minas y Energía. (2014). “Metodología para la intervención de áreas afectadas por actividades mineras en estado de abandono en Colombia”. Informe técnico.
- UPME. (2014). Plan Nacional de Ordenamiento Minero. Recuperado de http://www.upme.gov.co/Normatividad/Upme/2014/PNOM_EN_EXTENSO.PDF
- Vargas Cuervo, G. (2015). *Guía y Catálogo de Unidades Geomorfológicas en Colombia por Sensores Remotos*. En Universidad Nacional de Colombia, vol. 1. Bogotá, Colombia.
- Vale, S. A. (2020). Relatório de sustentabilidade 2019. Recuperado de http://www.vale.com/PT/investors/information-market/annual-reports/sustainability-reports/Sustentabilidade/Relatorio_sustentabilidade_vale_2019_alta_pt.pdf
- Wang, Q., Yao, G., Zhu, X., Wang, J., Wu, P. y Lyu, X. (2019). Preparation of Portland Cement with Gold Ore Tailings. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2019/1324065>

Capítulo 7

Mecanismos de participación ciudadana en el sector minero: una mirada desde el derecho constitucional

Lorena Bolívar-Herrera^{*}
Leonardo Güiza-Suárez^{**}

Resumen

El crecimiento del sector minero en Colombia ha estado mediado por los desafíos del desarrollo sostenible —desde una perspectiva amplia que incluye dimensiones sociales, humanas, culturales, ambientales y económicas—. En los últimos años, diversas comunidades, autoridades locales, líderes sociales y sectores políticos y académicos han reclamado la ampliación de espacios y mecanismos de participación ciudadana, por lo que se ha creado

* Abogada de la Universidad del Rosario y politóloga de la Universidad Nacional de Colombia. Especialista en Derecho Administrativo la Universidad del Rosario y máster en Derechos Humanos, Interculturalidad y Desarrollo de la Universidad Pablo de Olavide (Sevilla, España). Consultora y docente universitaria en materia de derecho constitucional y derechos humanos. Correo electrónico: bolivarherrera7@gmail.com

** Abogado, licenciado en Biología y Tecnólogo en Saneamiento Ambiental. Máster en Derecho Ambiental Industrial de la Universidad de Poitiers, Francia. Máster (título propio) en Derechos Humanos, Estado de Derecho y Democracia en Iberoamérica de la Universidad de Alcalá, España. Actualmente es director del Centro de Innovación para la Minería y el Ambiente (CIMA) y miembro del Grupo de Investigación en Derecho Público de la Facultad de Jurisprudencia de la Universidad del Rosario. Correo electrónico: leonardo.guiza@urosario.edu.co

el imaginario de que en el país y en las operaciones del sector minero no se garantiza ni promueve el derecho a la participación ciudadana.

Sin embargo, la creación de nuevos mecanismos e instrumentos, como: 1) el Programa de Relacionamiento con el Territorio de la ANM; 2) los procedimientos y requisitos de participación en los Planes de Gestión Social; y 3) los estándares y disposiciones en materia de derechos humanos y empresas, debida diligencia y conducta empresarial responsable, evidencian que desde lo constitucional y la política pública, el sector minero colombiano y los proyectos de minería aurífera cuentan con una diversidad de mecanismos de participación ciudadana.

En razón del contexto global, de las actuales demandas sociales y las órdenes judiciales existentes, se requiere ahora sumar su divulgación y comunicación para que se refuerce su acceso y aplicación efectiva. Adicionalmente, la participación ciudadana se seguirá robusteciendo, en el marco, por ejemplo, del cumplimiento del Acuerdo de Escazú, de las normas y leyes que deben expedir respectivamente el Gobierno Nacional y el Congreso de la República, en cumplimiento, de exhortos y órdenes como las contenidas en las sentencias de unificación SU-123 de 2018 y SU-095 de 2018. Tales acciones deben repercutir en el bienestar, el mejoramiento de la calidad de vida y las condiciones socioeconómicas de las comunidades asentadas en el territorio, donde se realizan las operaciones de la industria, y de la población en general.

Palabras clave: democracia, coordinación, concurrencia, consulta previa y debida diligencia.

Introducción

El crecimiento del sector minero en Colombia ha estado mediado por retos significativos relacionados con generar reales procesos de desarrollo sostenible —entendido este desde una perspectiva amplia que incluye dimensiones sociales, humanas, culturales, ambientales y económicas— los cuales deben repercutir en el bienestar, el mejoramiento de la calidad de vida y las condiciones socioeconómicas de las comunidades asentadas en el territorio, donde se realizan las operaciones de la industria, y de la población en general.

En los últimos años diversas comunidades asentadas en zonas de influencia directa y en territorios donde se desarrollan actividades del sector minero, así como autoridades locales, líderes sociales y diferentes sectores políticos y académicos, entre otros, han reclamado la creación y ampliación de espacios y mecanismos de participación ciudadana, por lo que se ha creado el imaginario de que en el país y en las operaciones del sector minero no se garantiza ni promueve el derecho a la participación ciudadana y no existen mecanismos que conduzcan a su respeto y protección, y que en efecto, permitan prevenir, mitigar y atender debidamente los impactos sociales, culturales, ambientales o económicos que pueden ocurrir con ocasión de las actividades mineras.

En tal contexto, este capítulo tiene como objetivo general identificar y dar claridad en cuanto a la existencia y la progresiva ampliación de mecanismos de participación ciudadana durante las fases de planeación, implementación, desarrollo y operación en los proyectos mineros, incluidos los de minería aurífera, *desde una perspectiva constitucional y de política pública*, en el marco de estándares internacionales, el ordenamiento jurídico y la jurisprudencia constitucional. Desde este enfoque constitucional de los mecanismos de participación ciudadana, existe un componente esencial en el marco de derechos humanos y empresas y la conducta empresarial responsable que es el de debida diligencia, como una responsabilidad importante para los titulares mineros, como ejecutores de las operaciones del sector.

Al respecto, vale aclarar que el alcance y la efectividad de los mecanismos de participación ciudadana, puede ser analizada desde diversas perspectivas y niveles: 1) desde lo constitucional, lo jurídico y la política pública y, 2) también desde la implementación y la aplicación de dichos mecanismos en proyectos y casos concretos. Es así como este capítulo examina y presenta la revisión de los principales mecanismos de participación ciudadana desde lo constitucional y la política pública del sector minero, por lo que cuando se haga referencia al respeto, protección o garantía del derecho y a sus respectivos mecanismos se estará haciendo alusión desde el ámbito de lo constitucional y lo jurídico. Así, es de precisar que este análisis no incluye ni el abordaje desde casos particulares, debido a que estos deben tener un examen diferente, con uso de metodologías de evaluaciones de impacto y de análisis de casos en concreto, e incluir

trabajo de campo e investigaciones en el terreno para contar con acceso a información de fuentes primarias, en razón de las complejidades que conlleva la aplicación de mecanismos de participación ciudadana.

Los mecanismos de participación ciudadana que contempla el ordenamiento jurídico son diversos y múltiples, por lo que en este capítulo se revisará la regulación de los principales mecanismos en el marco de las fases de planeación, implementación, desarrollo y operación de los proyectos mineros, sin que ello signifique que no existan otros que deban igualmente implementarse en los escenarios que lo requieran. Es importante precisar además que este tipo de regulación y mecanismos aplican para el sector minero en general, y por ello de la misma forma a proyectos de minería aurífera.

La metodología que se ha aplicado para el abordaje de esta investigación consistió en la revisión de fuentes secundarias desde una óptica constitucional, con base en el estudio de estándares, normativa, jurisprudencia, guías, términos de referencia de autoridades públicas competentes y artículos de alta calidad, para así dar respuesta al objetivo propuesto.

El contenido del capítulo incluye un primer acápite que señala los fundamentos constitucionales del carácter democrático, participativo y pluralista del Estado colombiano, desde lo dispuesto por la Constitución Política y la jurisprudencia constitucional, como pautas esenciales por aplicar en todos los mecanismos de participación ciudadana definidos para las operaciones del sector minero. Posteriormente, se señalan los principios constitucionales de Estado unitario y autonomía territorial, coordinación, concurrencia y mecanismos de participación ciudadana previos a la titulación minera y las discusiones constitucionales existentes, indicando luego el Programa de Relacionamento con el Territorio de la Agencia Nacional de Minería (ANM), y los procedimientos que este establece.

Seguidamente, se hace alusión al derecho fundamental a la consulta previa como mecanismo de participación ciudadana a respetar previo a las operaciones en el sector minero, para luego explicar el fundamento constitucional de protección ambiental y los mecanismos de participación ciudadana en el marco del licenciamiento ambiental. A continuación, se indican las obligaciones sociales de los contratos mineros y a los mecanismos de participación ciudadana previstos en el contexto del Plan de Gestión Social. Inmediatamente, en el capítulo se describe el marco de

derechos humanos y empresa, con énfasis en los estándares internacionales y las disposiciones nacionales que definen la debida diligencia y la conducta empresarial responsable como elementos cardinales para la implementación de los mecanismos de participación ciudadana por parte de los titulares mineros.

El capítulo finaliza presentando las conclusiones del análisis, y confirmando la hipótesis de que, desde una perspectiva constitucional y de política pública, el ordenamiento cuenta con mecanismos efectivos para la participación ciudadana durante las fases de planeación, implementación, desarrollo y operación en los proyectos mineros y, que existen retos y desafíos al respecto, a los que se enfrenta actualmente el país.

1. Fundamentos constitucionales del carácter democrático, participativo y pluralista del Estado colombiano

El ordenamiento constitucional colombiano establece que el Estado tiene un carácter democrático, participativo y pluralista, refiriéndose a la democracia desde diversas acepciones como son la representación, la participación, el pueblo y la soberanía popular, entre otras, que dan lugar a fundamentos como los de poder político, mecanismos de participación ciudadana, legitimidad, derechos y deberes, por referir algunos.

Así, los artículos 40, 79, 103, 105 y 130 de la Carta Política establecen que: 1) todo ciudadano tiene derecho a participar en la conformación, ejercicio y control del poder político —artículo 40—; 2) en materia ambiental, la ley debe garantizar la participación de la comunidad en las decisiones que le afecten —artículo 79—; 3) existen diversos mecanismos de participación ciudadana, como el referendo el plebiscito, la consulta popular, entre otros —artículos 103, 105 y 130—; y 5) la participación es un deber ciudadano que tiene por objeto aportar a la construcción de sociedad y de país —artículo 95—.

Dichas premisas constitucionales encuentran fundamento en la figura integrativa del bloque de constitucionalidad, y por ello de tratados como la Declaración Americana de los Derechos y Deberes del Hombre (1948), el Pacto Internacional de Derechos Civiles y Políticos (1966), la Convención Americana de Derechos Humanos (1969) y la Carta Democrática de la Organización de los Estados Americanos (2001), fundamentalmente.

De las disposiciones referidas, contenidas en el bloque de constitucionalidad, se deriva que el carácter democrático, participativo y pluralista del Estado colombiano reconoce diversos derechos en titularidad de los ciudadanos, con base en el principio de soberanía popular, que se materializan a través de la elección de sus representantes y las decisiones que estos tomen en su nombre, o también mediante el uso de mecanismos que conducen de diversas formas a la efectivización de la participación ciudadana. Para ello la Corte Constitucional ha reconocido tres ámbitos en los que se despliegan dichos derechos: 1) el de *conformación*, que tiene lugar cuando el ciudadano interviene para ordenar, estructurar e integrar el poder político; 2) el del *ejercicio* ciudadano para practicar, desplegar o manifestar la titularidad del poder político; y 3) el de *control* para vigilar, explorar y examinar la gestión de los órganos que expresan institucionalmente el poder político (C. C. s. C-150 de 2015).

Estas dimensiones de la democracia tienen su razón de ser en que la vida en comunidad requiere de la aprobación, ya sea en forma tácita o en forma expresa, de instrumentos que permitan que, a pesar de las diferencias de convicciones, de intereses o de opiniones que perviven en cualquier agrupación humana, sea viable la toma de decisiones mediante la vinculación de todos los asociados, por medio de diversos mecanismos, ya sea desde la representatividad, la participación o por medio de la conformación, el ejercicio o el control del poder político, como se indicó anteriormente (C. C. s. C-011 de 1997).

Además, el principio democrático constitucional tiene un carácter *universal y expansivo* (C. C. s. C-303 de 2010), puesto que: i) incluye todo lo que pueda interesar a la persona, a la comunidad o al Estado que sea susceptible de afectar la distribución, control o asignación del poder social; y 2) a la vez es objeto de construcción constante por parte de los actores públicos y privados, ya que la naturaleza participativa implica que los asociados se involucren directamente en las decisiones que los afectan, y ello hace que su carácter sea evolutivo y responda a los cambios sociales y del desarrollo, en general (C. C. s. C-089 de 1994)¹.

¹ Y la sentencia continúa: “participación que es articulada a través de (i) el ejercicio de los derechos políticos consagrados en el artículo 40 C. P.; (ii) la práctica de los mecanismos de participación ciudadana a que hace referencia el artículo 103 C. P. y (iii) de una forma más

Es por ello que la Corte Constitucional ha indicado, en su jurisprudencia (C. C. s. C-150 de 2015), que existen en el ordenamiento jurídico multiplicidad de espacios, formas, medios, instrumentos y mecanismos de participación ciudadana, entre los que vale resaltar, en términos generales y entre muchos otros, los siguientes:

1) las formas de participación en entidades públicas o en el ejercicio de funciones públicas, como lo indica, por ejemplo, el artículo 79 superior al establecer que los ciudadanos impactados por una medida ambiental puedan intervenir en los procesos de decisión; 2) el ejercicio de las acciones administrativas o judiciales requeridas para el control de las actividades a cargo del Estado o para la efectividad de los derechos colectivos, como lo proponen los artículos 23 superior que funda el derecho fundamental de petición y 241 superior que establece la acción pública de inconstitucionalidad; 3) las formas de participación mediante la representación en los órganos correspondientes, por ejemplo, en relación con la conformación de las mayorías y la votación para elección en las corporaciones públicas, como lo establecen los artículos 145, 146, 153, 157, 376 y 378 superiores; 4) la protección de las decisiones privadas, que implican la opción de las personas y de las minorías de oponerse a decisiones de las mayorías cuando estas puedan afectar su individualidad, como lo señalan los artículos 16 y 42 superiores que amparan, respectivamente, el libre desarrollo de la personalidad y el derecho de la pareja a definir la conformación de su familia; 5) la participación de comunidades étnicas en los procesos de adopción de medidas que puedan afectar directamente sus formas de vida, de acuerdo con el artículo 330 superior y el Convenio 169 de la OIT; 6) las diferentes formas de participación social que permiten a las personas constituir organizaciones que gestionen sus intereses o los representen en diferentes instancias, como lo establecen los artículos 78 y 107 superiores, relacionados respectivamente con las organizaciones de consumidores y usuarios y los partidos y movimientos políticos; 7) las formas de participación directa de los ciudadanos en desarrollo de los mecanismos que, según el artículo 103 constitucional, puede desplegar el pueblo en ejercicio de su soberanía.

amplia, en los distintos escenarios de la vida social en que el Constituyente ha considerado a la práctica democrática como una de las garantías del individuo” (C. C. s. C-089 de 1994).

Las referencias expuestas dan cuenta de algunos ejemplos dentro de un extenso número de espacios, formas, medios, instrumentos y mecanismos de participación ciudadana, contenidas de manera diversa en el ordenamiento jurídico, en razón del carácter expansivo y universal de la democracia que debe responder a los retos del desarrollo.

Según los criterios de clasificación de la Corte Constitucional, las diferentes formas de participación ciudadana se pueden relacionar con: 1) la función o papel que cumplen los ciudadanos en el respectivo mecanismo ya sea para: elegir a quien tomará las decisiones, es decir, la definición de sus representantes; promover una deliberación para la toma de decisiones, mediante el uso de mecanismos como el cabildo abierto o la iniciativa popular normativa o, adoptar una decisión ciudadana, a través de mecanismos como el referendo, la consulta popular, la revocatoria del mandato o el plebiscito, entre otros; 2) el papel que cumple el derecho al voto en los mecanismos que lo prevén; y 3) el grado de intervención de las autoridades públicas y, en particular, de los órganos de representación en el mecanismo de participación correspondiente, caso en el cual existen mecanismos con extendida, mediana y leve intervención de autoridades públicas, con sujeción a la dependencia de la iniciativa, convocatoria y resultados respecto de los ciudadanos (C. C. s. C-150 de 2015).

De tal modo, los conceptos de democracia representativa y participativa no son opuestos y se complementan permitiendo que el pueblo, titular originario de la soberanía, pueda elegir —mediante el voto— a sus representantes y, al mismo tiempo, contar con espacios, formas, medios, instrumentos y mecanismos jurídicos que garanticen su vinculación con materias que le afectan directamente y en cuyo camino de solución sea importante su compromiso. Así la complementariedad entre representatividad y participación requiere necesariamente de un redimensionamiento en el alcance de los derechos que se relacionan con el poder político (C. C. s. C-150 de 2015), con el fin de promover la incorporación en el debate democrático de diferentes tendencias ideológicas y de posiciones sociales y comunitarias, entre las que vale resaltar, por ejemplo, las relacionadas con las minorías étnicas, las posturas políticas o económicas diversas sobre el desarrollo, entre otras (C. C. s. C-490 de 2011).

En consecuencia, se hace evidente que la participación ciudadana en el sector minero también se fundamenta en los postulados constitucionales

ya referidos, y por ello la estructura participativa en el sector conlleva cada vez más a la necesidad de contar con diversidad de mecanismos e instrumentos que incluyan modelos de representatividad e igualmente de participación, desde los ámbitos de conformación, ejercicio o control del poder político, con el objetivo de que estos den lugar a la coexistencia de diversidad de posturas y posiciones desde puntos de vista sociales, culturales, ambientales y económicos, entre otros, generando así un desarrollo sostenible.

En este sentido, vale precisar que en la jurisprudencia constitucional se ha reiterado que la sostenibilidad debe asegurarse desde las siguientes dimensiones, según las cuales:

(i) la sostenibilidad ecológica exige que el desarrollo sea compatible con el mantenimiento de la diversidad biológica y los recursos biológicos, (ii) la sostenibilidad social pretende que el desarrollo eleve el control que la gente tiene sobre sus vidas y se mantenga la identidad de la comunidad, (iii) la sostenibilidad cultural exige que el desarrollo sea compatible con la cultura y los valores de los pueblos afectados, y (iv) la sostenibilidad económica pretende que el desarrollo sea económicamente eficiente y sea equitativo dentro y entre generaciones. (C. C. s. T-606 de 2015)

Para el sector minero, como para en general todos los sectores y ámbitos del país, la participación ciudadana es un reto en las diferentes etapas y fases de los proyectos. En tal sentido, la Corte Constitucional en la Sentencia su-095 de 2018 definió como criterio para la realización de actividades del sector minero, el *criterio de diferencialidad y gradualidad*, que da lugar a que los mecanismos de participación del sector deban tener correspondencia con: 1) *la existencia de etapas o fases para la exploración y explotación del subsuelo*; 2) *la afectación generada a las comunidades*; 3) *la dimensión de los proyectos*, para el caso atendiendo a proyectos de pequeña, mediana o de minería a gran escala y sus respectivas de exploración, construcción y montaje o explotación; 4) *la magnitud del impacto de los proyectos*, en relación, por ejemplo, con el desarrollo de un proyecto de minería a cielo abierto o subterránea o de socavón y, 5) *la complejidad y el carácter técnico de las decisiones a tomar*, que implica que en algunos casos la participación

ciudadana se lleve a cabo a través de los representantes legítimos de la población, como son las autoridades locales elegidas mediante el voto como mecanismo de participación ciudadana.

Bajo los postulados y fundamentos constitucionales descritos anteriormente, en los siguientes acápites se referirán espacios, formas, medios, instrumentos y los principales mecanismos de participación ciudadana que prevé el ordenamiento jurídico para el sector minero y que deben cumplirse por el sector público y los titulares mineros del sector privado, desde una óptica de debida diligencia en el marco de los derechos humanos y empresas. Tales estrategias, que se describen y contextualizan en adelante, tienen un efecto significativo en los territorios, y por el momento actual del país y a nivel global, de acuerdo con estándares internacionales que se discuten en organismos del nivel internacional, a decisiones judiciales de organismos como el Sistema Interamericano de Derechos Humanos y a la jurisprudencia de la Corte Constitucional, estos se irán fortaleciendo y ampliando en beneficio de las comunidades y del desarrollo sostenible del país, lo que deberá ocurrir en el marco de la Constitución Política y en implementación del principio de Estado de derecho y seguridad jurídica.

2. Principios constitucionales de Estado unitario y autonomía territorial, coordinación, concurrencia y principales mecanismos de participación ciudadana previos a la titulación minera

Otro fundamento relevante para las operaciones del sector minero, relacionado con el fundamento de una República democrática, participativa y pluralista, es el dispuesto en el artículo 1 de la Constitución Política, que establece que Colombia es un Estado social de derecho, organizado en forma de República unitaria, descentralizada, con autonomía de sus entidades territoriales y fundada en el respeto de la dignidad humana.

La anterior disposición contiene tensiones y retos relevantes de ponderación de diversos principios constitucionales, que se hacen evidentes mediante la coexistencia de actividades que coinciden en un mismo territorio en relación con los usos del suelo y del subsuelo, y de las competencias de entidades de diversos órdenes del Estado, como son: de una parte, la nación y, de otra, las entidades territoriales, en cabeza de los municipios. Lo anterior ha generado la necesidad, en el marco del aumento de las

operaciones del sector minero, de definir políticas públicas, instrumentos y herramientas que respondan a los desafíos actuales en materia económica, ambiental, social y humana. Para comprender las discusiones y desafíos que se han desarrollado en la materia, se hace necesario inicialmente conocer y comprender de manera general el alcance de los postulados constitucionales de: Estado unitario, descentralización y autonomía, pues de estos se desprende el que en los últimos años se estén estableciendo cambios en el sector minero que dan lugar a la efectivización de la democracia.

Así, en primer lugar, el Estado colombiano es definido constitucionalmente como *unitario*. Al respecto, la jurisprudencia de la Corte Constitucional señala que este se caracteriza por: su unidad en la legislación, la presencia de fundamentos uniformes para el orden nacional y de competencias sujetas a la ley en el nivel local, es decir, en el territorial y, así mismo, por la existencia de competencias en el nivel central para la definición de decisiones de política pública que tengan aplicación en todo el territorio nacional (C. C. s. C-579 de 2001).

De lo expuesto se resalta que existen competencias en los niveles nacional y territorial, existiendo coincidencia de estas en materia de usos del suelo y del subsuelo como elementos que convergen en un mismo territorio. Al respecto, es de precisar que el artículo 332 de la Constitución Política define que el Estado es propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables, y la jurisprudencia constitucional ha indicado que en sentido amplio el concepto de Estado incluye el conjunto de todas las autoridades públicas, todas las entidades territoriales y todos los colombianos, pues con ello se pretende prevenir la centralización en el nivel nacional de los recursos que se generan con ocasión de la explotación de recursos naturales, y que deben beneficiar a toda la población del país (C. C. s. C-983 de 2010, C-389 de 201 y su-095 de 2018).

Por su parte, el artículo 285 y siguientes se refiere a la división general del territorio y las competencias de las entidades territoriales y el ordenamiento territorial. Es así como el artículo 311 define al municipio como entidad fundamental de la división político-administrativa del Estado, estableciendo entre otras de sus funciones las de ordenar el desarrollo de su territorio e igualmente promover la participación comunitaria, el mejoramiento social y cultural de sus habitantes.

En el marco de tales competencias que convergen en los niveles nacional y territoriales, el artículo 288² de la Constitución Política señala que estas han de establecerse por ley orgánica y que las atribuidas a los distintos niveles territoriales deben ser ejercidas con sujeción a los *principios de coordinación, concurrencia y subsidiariedad* (C.C. s. C-149 de 2010), atendiendo a los lineamientos constitucionales y legales. Estos principios se convierten en ejes importantes del sistema democrático del país, pues su implementación debe permitir formas de participación desde el concepto de representatividad.

Así, en cuanto al *principio de coordinación*, la jurisprudencia constitucional ha determinado que este se relaciona con la existencia de competencias concurrentes entre distintas autoridades del Estado, lo que impone el reto de que dichas funciones se ejerzan en armonía, resultando su ejercicio complementario para el cumplimiento de los objetivos de la acción estatal (C.C. s. C-149 de 2010³); por su parte, el *principio de concurrencia* se fundamenta en que existen una serie de fines del Estado cuya realización requiere de la participación de las autoridades del nivel nacional y también de las territoriales, requiriéndose así de la participación de los diferentes niveles de la administración pública (C.C. s. C-123 de 2014 y C-035 de 2016).

Tales principios contienen en sí mismos tensiones constitucionales y, en consecuencia, en Colombia en los últimos años se han presentado movilizaciones sociales, demandas judiciales y en respuesta a ello pronunciamientos y sentencias de los diversos jueces de la rama judicial y especialmente decisiones de la Corte Constitucional, que han conducido a cambios y ajustes institucionales en los procedimientos para el otorgamiento de títulos mineros y las actividades y operaciones de los mismos, y que dan lugar a la aplicación de los principios de coordinación y concurrencia, respecto a las competencias del Estado sobre el subsuelo. Estos ajustes

² Constitución Política de Colombia. Artículo 288. “La ley orgánica de ordenamiento territorial establecerá la distribución de competencias entre la Nación y las entidades territoriales. Las competencias atribuidas a los distintos niveles territoriales serán ejercidas conforme a los principios de coordinación, concurrencia y subsidiariedad en los términos que establezca la ley”.

³ Reiterada en la Sentencia T-445 de 2016.

han sido liderados por la Agencia Nacional de Minería, el Ministerio de Minas y Energía, y con ocasión de ello, hoy se cuenta con un mayor número de espacios, formas, mecanismos e instrumentos para la participación ciudadana en el sector minero, como se detallará más adelante.

En este contexto, en uso del mecanismo de participación ciudadana de Acción Pública de Inconstitucionalidad, establecido en el artículo 241 de la Constitución Política, la Corte Constitucional ha proferido un amplio número de decisiones judiciales, entre las que es preponderante mencionar las sentencias C-149 de 2010, C-395 de 2012, C-123 de 2014, C-035 de 2016, C-273 de 2016, C-389 de 2016 y SU-095 de 2018. Especialmente, en las sentencias C-123 de 2014 y C-389 de 2016, la Corte Constitucional declaró la exequibilidad condicionada de artículos del Código de Minas, dando órdenes de ajustes en los procesos y procedimientos para la exploración y explotación minera, bajo el principio de democracia, tanto desde la perspectiva de la representatividad como de la participación.

Así, en la Sentencia C-123 de 2014 la Corte estudió la constitucionalidad del artículo 37 del Código de Minas (Ley 685 de 2001) y declaró la exequibilidad condicionada del mismo al sujetar su aplicación a que, en el proceso por medio del cual se autorice la realización de actividades de exploración y explotación minera, las autoridades competentes del nivel nacional tienen que acordar con las autoridades territoriales concernidas, las medidas necesarias para la protección del ambiente, especialmente de sus cuencas hídricas, el desarrollo económico, social, cultural de sus comunidades y la salubridad de la población, en aplicación de los principios de coordinación, concurrencia y subsidiariedad definidos en el artículo 288 de la Carta Política. Para ello, se indicó en la sentencia que la opinión de los municipios en relación con las operaciones del sector minero, expresada a través de sus órganos de representación, debía ser valorada adecuadamente y tener una influencia apreciable en la toma de las decisiones, en lo concerniente a los aspectos esenciales de la vida del municipio⁴ (C. C. su-095 de 2018).

⁴ “La regulación sobre ordenamiento territorial atañe a aspectos que resultan esenciales para la vida de los pobladores del distrito o municipio, sea que estos se encuentren en un área urbana, suburbana o rural. La función de ordenamiento territorial, y dentro de ella con especial relevancia la de determinar los usos del suelo, afectan aspectos axiales a la vida en comunidad

Posteriormente, en la Sentencia C-273 de 2016 el artículo 37 del Código de Minas (Ley 685 de 2001) fue declarado inexecutable, por encontrarse su contenido sujeto a reserva de ley orgánica. Pese a su derogatoria, en cumplimiento de la mencionada Sentencia C-123 de 2014, las autoridades mineras, y en especial la Agencia Nacional de Minería, como autoridad minera, realizó ajustes en sus procesos y procedimientos, como se describirá más adelante.

Dos años después, en la Sentencia C-389 de 2018 la Corte Constitucional examinó la constitucionalidad de los artículos 16, 53, 270, 271, entre otros, del Código de Minas (Ley 685 de 2001), en especial, aquellos referidos a la propuesta de contrato de concesión y, ordenó a la autoridad minera *verificar mínimos de idoneidad laboral y ambiental*, con antelación a la entrega de un título minero, en atención a la naturaleza de la concesión solicitada, y con base en criterios diferenciales entre los distintos tipos de minería, y extensión de los proyectos. Igualmente, ordenó establecer un procedimiento para asegurar la participación ciudadana, preservando el derecho especial de los grupos étnicamente del país. La Corte señaló en la sentencia la necesidad de que existiera en el ordenamiento una instancia de participación real, representativa, libre, informada y efectiva, que existiera previo al otorgamiento de un título minero, teniendo en cuenta que la decisión de titulación no es inocua, sino que genera una expectativa en torno al destino del predio, el entorno y el territorio; en tal sentido, el Tribunal señaló que se presentaba en el ordenamiento jurídico un déficit de protección constitucional respecto a los postulados de competencias sobre el uso del subsuelo y del suelo, y en ese contexto, de los principios de coordinación y concurrencia.

En forma paralela a las referidas decisiones judiciales, en el país y en diferentes municipios del territorio, desde el año 2013 se iniciaron movilizaciones sociales e impulsaron consultas populares, en uso de mecanismos definidos por la Ley 134 de 1994, para someter a votación popular si en un municipio o territorio la población estaba de acuerdo en que se realizaran o prohibieran actividades de exploración y explotación

y llegan a determinar el modelo de desarrollo y, por consiguiente, las condiciones de vida en aspectos como el económico, el social, el cultural, el ambiental, el urbanístico, entre otros” (C. C. s. C-123 de 2014).

minera o petrolera⁵. En consecuencia, en algunos municipios se prohibieron actividades del sector minero, lo que generó debates sociales y económicos y discusiones de interpretación constitucional y jurídica y de aplicación normativa.

En el contexto de estas situaciones y tensiones de principios constitucionales y sociales, y de diversos y opuestos pronunciamientos judiciales por parte de diferentes tribunales administrativos del Consejo de Estado y de la Corte Constitucional, se expidió en 2018 la sentencia de unificación su-095 de 2018 de la Corte Constitucional, que puede considerarse un hito en materia de participación ciudadana.

Esta sentencia se expidió con ocasión de la acción de tutela interpuesta por una compañía petrolera en contra del Tribunal Administrativo del Meta que profirió una sentencia en el trámite de revisión de constitucionalidad de la convocatoria a consulta popular ordenada mediante el Decreto 58 de 2016 del municipio de Cumaral, Meta, y que sometía a votación popular la siguiente pregunta: “¿Está usted de acuerdo ciudadano cumaraleño que dentro de la jurisdicción del Municipio de Cumaral se ejecuten actividades de exploración sísmica, perforación exploratoria, producción transporte y comercialización de hidrocarburos? Sí___ No___”.

La decisión judicial su-095 es un hito trascendente en la aplicación de los principios constitucionales en tensión, descritos anteriormente, y en materia de participación ciudadana para el sector minero, ya que la Corte Constitucional señaló respecto a los principios de Estado unitario y de autonomía territorial que ninguno los dos postulados puede aplicarse de forma absoluta en desconocimiento del otro, pues estos deben conjuntamente aplicarse en un sistema de limitaciones recíprocas (C.C. s. C-983 de 2010) y las tensiones de estos se deben resolverse mediante una interpretación armónica del sistema jurídico constitucional (C.C. su-095 de 2018).

⁵ Número de consultas populares relacionadas con actividades del sector minero energético (hidrocarburos, minería y energía), de acuerdo con información de la Registraduría Nacional del Estado Civil.

Información tomada de: Corte Constitucional, Sentencia su-095 de 2018. 01-10-17 Santander/ Sucre; 17-09-17 Santander/ Jesús María; 09-07-17 Quindío/ Pijao; 09-07-17 C/ Marca/ Arbeláez; 04-06-17 Meta/ Cumaral; 26-03-17 Tolima/ Cajamarca; 26-02-17 C/Marca/ Cabrera; 15-12-13 Casanare/ Tauramenay, 28-07-13 Tolima/ Piedras.

De acuerdo con la Corte, ni la nación ni las entidades territoriales tienen competencias absolutas en materia de explotación del subsuelo; así, las entidades territoriales no cuentan con competencia absoluta sobre estos recursos, ni con poder de veto respecto a la realización de estas actividades; y ni el nivel nacional o el central detentan la posibilidad de imposición unánime por parte de ninguno hacia el otro. Además, la Corte indicó que la consulta popular no es el mecanismo idóneo para dar aplicación a los principios de coordinación y concurrencia entre la nación y el territorio, pues es un instrumento focalizado y limitado que no permite discusiones ampliadas, sistemáticas e integrales de una materia tan compleja como es la exploración y explotación de hidrocarburos o de minerales (C.C. SU-095 de 2018).

En la sentencia se afirma, que en el trámite para el otorgamiento de un contrato único de concesión minera, el Código de Minas (Ley 685 de 2001), las leyes estatutarias u orgánicas, los procedimientos administrativos u otras normas concomitantes no establecen un mecanismo de participación ciudadana, ni un instrumento en el que se aplique el artículo 288 constitucional que permita la concurrencia y coordinación del nivel nacional y territorial. Pues pese a que la ANM, en cumplimiento de las sentencias C-123 de 2014 y C-389 de 2016⁶, diseñó e implementó el programa de relacionamiento con el territorio y en tal marco creó dos procedimientos específicos: 1) la concertación con alcaldes como primera autoridad del municipio y, 2) las audiencias de participación mineras previo al otorgamiento del título minero; estos no son suficientes, pues no están regulados adecuadamente mediante leyes estatutarias u orgánicas, ni son lo suficientemente vigorosos y robustos para garantizar la participación efectiva de la comunidad.

Por lo expuesto, la Corte Constitucional señaló que existe en la materia un déficit de protección constitucionalmente inadmisibles y decidió

⁶ Información tomada del expediente T 6.298.958: 1) del documento remitido a la Corte Constitucional el 1.º de marzo de 2018 por la presidente de la Agencia Nacional de Minería en sede de revisión del expediente T-6.298.958 y en respuesta al auto de pruebas proferido el 8 de febrero de 2018. Folios 595 a 649 del expediente T 6.298.958; 2) de la intervención presentada por la presidente de la Agencia Nacional de Minería el 12 de abril de 2018 en la audiencia pública convocada mediante el Auto 138 de 2018.

exhortar al Congreso de la República a expedir las respectivas leyes y ordenó a las autoridades del sector minero del nivel nacional mantener y fortalecer los instrumentos y mecanismos existentes para la coordinación y concurrencia de las autoridades del nivel nacional y central, la participación ciudadana, las acciones e inversiones sociales, en el marco de la debida diligencia para la gestión de los riesgos ambientales y sociales, con ocasión de las operaciones de sus actividades.

Para el cumplimiento de dicho exhorto y órdenes la Corte establece los siguientes criterios para la definición de mecanismos de participación ciudadana e instrumentos de coordinación y concurrencia nación territorio específicos para la explotación del subsuelo y de recursos naturales no renovables, a saber: 1) participación ciudadana y pluralidad; 2) coordinación y concurrencia nación territorio; 3) inexistencia de un poder de veto de las entidades territoriales para la exploración y explotación del subsuelo y de recursos naturales no renovables; 4) diferencialidad / gradualidad; 5) enfoque territorial; 6) legitimidad y representatividad; 7) información previa, permanente, transparente, clara y suficiente; 8) desarrollo sostenible; 9) diálogo, comunicación y confianza; 10) respeto, protección y garantía de los derechos humanos; 11) buena fe; 12) coordinación y fortalecimiento de la capacidad institucional nacional y territorial y 13) sostenibilidad fiscal.

Como consecuencia de lo expuesto, desde el año 2018 se han dado ajustes en el ordenamiento minero con el fin de implementar las órdenes dadas, como se indicará en la presentación específica de los mecanismos de participación ciudadana hoy existentes. Así mismo, sigue vigente y en espera el cumplimiento al exhorto al Congreso de la República para que profiera las leyes correspondientes en materia de participación ciudadana y la aplicación de los principios de coordinación y concurrencia.

Posteriormente, y en un sentido similar la Corte Constitucional profirió la Sentencia T-342 de 2019 en el marco de la acción de tutela interpuesta contra el Tribunal Administrativo de Antioquia en la que se profirió sentencia declarando sin validez el Acuerdo 008 de 2017, mediante el cual se dictaron medidas para la defensa del patrimonio ecológico y cultural del municipio de Urrao y se prohibieron las actividades mineras de metálicos y de gran y mediana minería de los demás minerales. La Corte Constitucional concluyó que el Tribunal procedió de acuerdo con el ordenamiento jurídico constitucional colombiano al: 1) considerar que

no existe un derecho absoluto de los municipios sobre los recursos del subsuelo; 2) tener en cuenta competencias del nivel nacional radicadas en cabeza del Gobierno Nacional central; 3) basarse en los principios constitucionales de coordinación y concurrencia y, 4) señalar que la explotación y el aprovechamiento de los minerales yacientes en el suelo o en el subsuelo no pueden ser regulados de forma excluyente, única o exclusiva por una autoridad del orden municipal, pues si bien los concejos municipales tienen la facultad de reglamentar los usos del suelo, esta potestad no es absoluta de ellos.

Seguidamente, la Corte Constitucional profirió la Sentencia C-053 de 2019 y declaró inexecutable el artículo 33 de la Ley 136 de 1994, que disponía que:

Cuando el desarrollo de proyectos de naturaleza turística, minera o de otro tipo, amenace con crear un cambio significativo en el uso del suelo, que dé lugar a una transformación en las actividades tradicionales de un municipio, se deberá realizar una consulta popular de conformidad con la ley. La responsabilidad de estas consultas estará a cargo del respectivo municipio. [...].

Dicho artículo 33 fue declarado inexecutable arguyendo que la regulación relativa a los usos del suelo se debe regular por ley orgánica, pues establece la Constitución que solamente mediante este tipo de leyes es posible determinar las competencias de las entidades territoriales, de acuerdo con los artículos 151 y 288 de la Constitución Política (C.C. s. C-053 de 2019).

Es así como el país presenta actualmente desafíos importantes para la aplicación de los diferentes postulados constitucionales y el cumplimiento de las órdenes judiciales, pues si bien ya existen avances se requieren cambios institucionales y la expedición por ejemplo de las respectivas leyes por parte del Congreso de la República, en respuesta a las órdenes judiciales respectivas y vigentes.

A continuación, se indicarán los espacios, mecanismos, instrumentos y procedimientos creados en respuesta a reformas institucionales de iniciativa del gobierno y a las órdenes judiciales anteriormente descritas, y en los que se evidencia que el principio democrático, participativo y pluralista

del Estado se ha fortalecido para el sector minero, mediante formas que dan lugar a la democracia representativa y a la democracia participativa, de manera complementaria.

2.1. Programa de relacionamiento con el territorio de la Agencia Nacional de Minería (C. C. s. SU-095 de 2018)

En razón de los principios constitucionales del Estado democrático, participativo, pluralista, unitario y de autonomía territorial, la normativa que regula las actividades mineras y de los diversos pronunciamientos de la Corte Constitucional, enunciados en el acápite anterior, el Ministerio de Minas y Energía, la Agencia Nacional de Minería (ANM), y otras autoridades públicas competentes del sector minero han iniciado e implementado diversas estrategias para hacer efectivos dichos fundamentos, que en la actualidad están en un proceso de fortalecimiento y expansión en cumplimiento de la normativa vigente y la jurisprudencia constitucional, especialmente, las sentencias C-123 de 2014, C-389 de 2016, SU-095 de 2018 y T-342 de 2019.

De acuerdo con la información de la ANM, contenida en la Sentencia SU-095 de 2018, *en la etapa previa al contrato que da lugar a la titulación minera*, se realizan las siguientes gestiones: 1) se revisa la idoneidad ambiental, social y económica del solicitante; 2) se hace un ejercicio de concurrencia con las entidades territoriales, en el que se informa de los títulos mineros a otorgar en su jurisdicción, se contrasta con el plan de ordenamiento territorial y se revisa el catastro y registro minero; 3) se realizan las audiencias públicas con la ciudadanía con el fin de informar los títulos mineros por otorgar con sus características y se garantiza la participación; 4) se recogen insumos para la formulación del Plan de Gestión Social que debe realizar el concesionario.

En este contexto, la ANM creó el programa de relacionamiento con el territorio como una estrategia para orientar, facilitar y construir la llegada al territorio de los proyectos mineros con la finalidad de lograr la articulación nación, territorio, minería y comunidad⁷, y con la finalidad

⁷ Corte Constitucional, Sentencia SU-095 de 2018. Información tomada del expediente T-6.298.958: 1) del documento remitido a la Corte Constitucional el 1 de marzo de 2018 por la presidente de la Agencia Nacional de Minería en sede de revisión del expediente T-6.298.958

principal de lograr una participación efectiva, oportuna y permanente de los sectores estratégicos involucrados en el desarrollo de proyectos mineros, así como la armonización con las políticas de ordenación del suelo con el objetivo de incorporar el componente minero en los instrumentos de ordenamiento territorial de los entes territoriales (ANM, s. f.).

El programa de relacionamiento con el territorio tiene lugar en la fase previa a la titulación minera y se enfoca en seis líneas de acción⁸: 1) caracterización del territorio y *mapeo* de actores estratégicos; 2) planeación de la estrategia en campo; 3) construcción de alianzas estratégicas; 4) gestión de las reclamaciones; 5) veedurías y, 6) seguimiento permanente en territorio. Además, establece dos procedimientos específicos para la concertación, concurrencia y la participación ciudadana los cuales han sido denominados por la ANM como procesos de: 1) concertación con alcaldes como primera autoridad local —del municipio— y, 2) audiencia y participación de terceros, en el marco del artículo 259 del Código de Minas, previo al otorgamiento del título minero, los cuales se describen a continuación de conformidad con la información contenida en la *Sentencia SU-095 de 2018* de la Corte Constitucional.

2.1.1. Coordinación y concurrencia: concertación con las autoridades locales⁹

En consonancia con la información de la Agencia Nacional de Minería y la contenida en la Sentencia su-095 de 2018 de la Corte Constitucional, el primer proceso denominado *concertación con las autoridades locales* tiene como objetivo armonizar las políticas de ordenamiento del suelo con el desarrollo de proyectos de minería, para así incorporar de manera concertada el componente minero en los instrumentos de ordenamiento territorial, en cumplimiento de los principios constitucionales de coordinación y concurrencia. La concertación se desarrolla entre el alcalde del

y en respuesta al auto de pruebas proferido el 8 de febrero del 2018. Folios 595 a 649 del expediente T 6.298.958; 2) de la intervención presentada por la presidente de la Agencia Nacional de Minería el 12 de abril de 2018 en la audiencia pública convocada mediante el Auto 138 de 2018.

⁸ Ver la Sentencia su-095 de 2018 de la Corte Constitucional para conocer el detalle de cada una de las seis líneas de acción.

⁹ Información tomada de: Corte Constitucional, Sentencia su-095 de 2018.

municipio respectivo y la ANM, como autoridad minera, y a iniciativa de cualquiera de las dos partes.

De tal manera, este proceso da lugar a formas de democracia a través de la representatividad, mediante la intervención de las autoridades públicas y, en particular, de los órganos de representación competentes, pues establece mecanismos de participación ciudadana, lo que garantiza los principios democráticos constitucionales y, en consecuencia, la efectiva participación extendida través de los mismos (C. C. s. C-150 de 2015).

La implementación del proceso de concertación, como mecanismo de participación, se adelanta a través de la realización de cuatro fases¹⁰: 1) *fase inicial*: en la que se realiza *intercambio de información* entre la Autoridad Minera y la entidad territorial; 2) *fase de construcción*: consiste en la *coordinación entre la autoridad territorial y la autoridad minera*, con el apoyo, orientación y asesoramiento de las Corporaciones Autónomas Regionales y otras entidades con competencias en la materia. Para tal fin, se programa una reunión como espacio de diálogo y concertación sobre las áreas susceptibles de desarrollo de actividades mineras; 3) *fase de consolidación de la concertación*: una vez divulgado el objetivo de la concertación y analizado el interés del alcalde como autoridad del municipio, las partes suscriben un acta de *concertación* en la que se adoptan las áreas susceptibles de minería, sin perjuicio de los trámites ambientales respectivos, de otras actividades productivas que se desarrollen en el territorio o del ordenamiento del suelo que el municipio tenga dispuesto en su instrumento de ordenamiento territorial y, 4) *fase de seguimiento y retroalimentación*: pretende que la concertación sea un *diálogo permanente entre la autoridad territorial y la autoridad minera* para la realización de actividades de minería, con el fin de *armonizar el ejercicio de las competencias entre el gobierno nacional central y las autoridades territoriales*, dentro los límites que impone la forma unitaria de Estado y de autonomía territorial con fundamento en la Constitución y la Ley.

Este proceso de coordinación y concurrencia entre la Autoridad Minera y las autoridades territoriales competentes es así un mecanismo de participación ciudadana a través de la representación de los organismos

¹⁰ Ver Sentencia su-095 de 2018 de la Corte Constitucional para conocer el detalle de cada una de las fases.

correspondientes, y se lleva a cabo mediante el intercambio de información, la coordinación, concertación y el diálogo permanente, enfocado a un desarrollo sostenible de los territorios donde existe operación minera.

2.1.2. Audiencia y participación de terceros.

Artículo 259 del Código de Minas¹¹

Por otra parte, de acuerdo con la información de la Agencia Nacional de Minería y contenida en la Sentencia su-095 de 2018 de la Corte Constitucional, el segundo proceso del programa de relacionamiento con el territorio se denomina audiencia y participación de terceros en aplicación del artículo 259 del Código de Minas¹². Tiene como finalidad asegurar la participación de las comunidades ubicadas en los territorios en los que se involucre un proyecto minero. En esta audiencia se invita a la comunidad en general a participar en el proceso previo a la titulación minera para que presenten los diferentes argumentos, opiniones e inquietudes sobre la titulación minera en su territorio.

Este procedimiento se hace efectivo mediante las siguientes cuatro etapas: 1) *emisión del acto administrativo*. Este se expide en cumplimiento del artículo 259 de la Ley 685 de 2001 y el artículo 35 inciso tercero del Código de Procedimiento Administrativo y de lo Contencioso Administrativo y en este se definen las reglas de la audiencia, se ordena comunicación a personas determinadas e indeterminadas, y se fijan datos relevantes. La convocatoria se realiza a la comunidad ubicada en el área de la(s) propuesta(s) de contrato de concesión mediante edicto y también se hace una publicación en un periódico de alta circulación municipal o regional, en emisora radial o comunitaria o a través de perifoneo; 2) *celebración de la audiencia pública*. La audiencia minera es presidida por el representante de la Agencia Nacional de Minería o su delegado. Se desarrolla mediante la instalación, la presentación de las intervenciones, la

¹¹ Información tomada de Corte Constitucional, Sentencia su-095 de 2018.

¹² Artículo 259. “Audiencia y participación de terceros. En los casos en que dentro del procedimiento que antecede al contrato de concesión deba oírse previamente a terceros, a representantes de la comunidad y a grupos o estamentos sociales, se buscará que estos reciban real y efectivamente, por los medios apropiados, el llamamiento o comunicación de comparecencia dentro de los términos señalados en la ley”.

presentación del proyecto, el aporte de documentos y las pruebas por parte de los intervinientes; 3) *acta de audiencia*. La autoridad minera levanta un acta suscrita por quien la presidió, en la cual se recogen los aspectos más importantes expuestos durante su realización, y aquellos interrogantes que no puedan ser resueltos por la autoridad minera se trasladarán a las autoridades competentes. El acta de la audiencia pública y los documentos aportados por los intervinientes forman parte del expediente respectivo de la propuesta de contrato de concesión minera objeto del proceso de audiencia y, 4) *fase de análisis de las consideraciones recogidas en la audiencia*. Una vez recolectada la información la Autoridad Minera, esta la analiza para seguidamente dar continuidad al estudio de la propuesta de contrato de concesión minera.

En términos generales, el *programa de relacionamiento con el territorio* de la ANM es un mecanismo y estrategia actual del sector minero que da lugar a la aplicación del postulado de democracia, convirtiéndose en una herramienta e instrumento de participación ciudadana, que se efectiviza a través de la representatividad mediante la concertación con alcaldes como primera autoridad de los municipios y como representantes elegidos por el mecanismo del voto popular. Igualmente, las audiencias de participación mineras, previo al otorgamiento del título minero, son un mecanismo de participación ciudadana que da cuenta de la existencia de espacios específicos para el sector, que permiten desde la política pública abrir escenarios de discusión sobre el uso del territorio, las tensiones entre el suelo y subsuelo. La aplicación de estas estrategias debe ser evaluada en cada caso concreto para con ello validar su efectividad en la práctica, y tratándose de mecanismos creados en los últimos años en el país, seguramente se irán fortaleciendo y puliendo con el avance de su implementación.

La creación y existencia del programa de relacionamiento con el territorio de la ANM es un gran paso en el camino de fortalecer los mecanismos de participación ciudadana *durante la fase de planeación de los proyectos mineros*, y un medio de cumplimiento de los principios de coordinación y concurrencia entre los niveles nacional y territoriales que conducen a la protección de los territorios, teniendo en cuenta diversas variables y sus diferentes dimensiones y necesidades.

3. El derecho fundamental a la consulta previa como mecanismo de participación ciudadana previo a las operaciones del sector minero

El derecho fundamental a la consulta previa es un desarrollo del postulado del Estado colombiano democrático, participativo y pluralista, en cumplimiento el artículo 1.º de la Constitución Política que además reconoce y protege la diversidad étnica y cultural (artículos 7 y 70) y la autodeterminación de los pueblos indígenas en sus territorios (artículo 330), que da lugar a configurar al país como multicultural y multiétnico.

El derecho y el mecanismo de participación de consulta previa, como su nombre lo indica, debe llevarse a cabo en forma indispensable con antelación a la iniciación del proyecto de exploración o explotación de los recursos del subsuelo o antes de que se tome la medida que pueda afectar directamente a las comunidades, es decir, en el caso por ejemplo del sector minero antes de que el proyecto económico haya sido iniciado, pues de lo contrario la medida, el proyecto, obra o actividad puede ser invalidada por la violación de un derecho fundamental y omisión del mecanismo a través del cual se protege (C.C. s. T-660 de 2015 y su-095 de 2018). Es así como, en el marco de los requisitos y procedimientos para la operación de proyectos mineros, este derecho debe respetarse previo al inicio de las actividades mineras y en forma específica previo a radicarse la solicitud de licenciamiento ambiental y presentarse como requisito para el trámite de la misma, con el certificado del Ministerio del Interior sobre presencia o no de comunidades étnicas y de existencia de territorios colectivos en el área del título minero y con el acta de protocolización en caso de existir comunidades y por ello la obligación de respetar el derecho y adelantar el respectivo proceso de consulta previa.

Este derecho se incorporó al ordenamiento jurídico vía bloque de constitucionalidad mediante la ratificación del Convenio 169 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) a través de la Ley 21 de 1991, en consonancia con otras disposiciones internacionales como son el Pacto Internacional sobre los Derechos, Civiles y Políticos, el Pacto Internacional de Derechos Económicos Sociales y Culturales, la Convención Americana sobre los Derechos Humanos, la Recomendación General n.º 23 de 1997 relativa a los derechos de los pueblos indígenas de Naciones Unidas, la Declaración de las Naciones Unidas sobre los derechos de los Pueblos

Indígenas aprobada por la Resolución 61/295 (con las salvaguardas establecidas por el Estado colombiano) y la Convención para la Eliminación de todas las Formas de Discriminación Racial, principalmente.

El Convenio 169 de la OIT establece, en los artículos 6, 7, 15 y 16, que los gobiernos deberán consultar a los pueblos interesados, mediante procedimientos apropiados y en particular a través de sus instituciones representativas, cada vez que se prevean medidas legislativas o administrativas que sean susceptibles de afectarle directamente. Actualmente, el ordenamiento jurídico define procedimientos y da pautas en materia de implementación del proceso para garantizar el derecho fundamental a la consulta previa a través de la Directiva presidencial 10 de 2013 y el Decreto 2613 de 2013. La Directiva presidencial 10 contiene la *Guía para la realización de la consulta previa con comunidades étnicas* y define las pautas para la realización del proceso en las siguientes cinco etapas: 1) certificación sobre la presencia de comunidades étnicas; 2) coordinación y preparación; 3) preconsulta; 4) consulta previa: análisis e identificación de impactos y formulación de medidas de manejo, formulación de acuerdos y protocolización y, 4) seguimiento de acuerdos y cierre de consulta.

Como se evidencia la regulación en materia de consulta previa en Colombia, es somera y por ello se discute actualmente en varios escenarios públicos, privados y de la sociedad civil sobre la necesidad de la expedición de una ley estatutaria que regule la materia, ya que los vacíos jurídicos existentes han dado lugar a la presentación de múltiples acciones judiciales, a través de acciones de tutela como mecanismo de protección de derechos fundamentales. El alto número de acciones de tutela interpuestas han dado lugar a diferentes pronunciamientos y directrices judiciales, entre las que vale resaltar las siguientes, proferidas por la Corte Constitucional: sentencias SU-039 de 1997, 383 de 2013, 097, 133 y 217 de 2017, 123 de 2018 y las T-652 de 1998, 880 de 2006, 693, 698 y 129 de 2011, 462A y 857 de 2014, 730 de 2016, 298 de 2017, 103 y 298 de 2018, 063 de 2019.

Así, de acuerdo con la jurisprudencia, y especialmente la reciente sentencia de unificación SU-123 de 2018, la consulta previa como derecho fundamental protege a los pueblos indígenas y tribales, tiene un carácter irrenunciable y debe: 1) intentar lograr en forma genuina y por un diálogo intercultural el consentimiento con las comunidades indígenas y tribales sobre las medidas que las puedan afectar directamente; 2) estar guiada por

el principio de buena fe en el actuar de las partes que en ella intervienen; 3) asegurar la participación activa y efectiva de las comunidades étnicas; 4) ser un proceso de diálogo intercultural en el cual el Estado tiene la obligación de tomar las medidas necesarias para minimizar las desigualdades fácticas de poder en las que pueden estar inmersas las comunidades étnicas; 5) ser un diálogo intercultural, y por ello no es un derecho de veto para las comunidades, ni tampoco un poder arbitrario de imposición de proyectos, obras o medidas por implementar por parte del Estado; 6) ser flexible, es decir, debe adaptarse a las necesidades de cada asunto; 7) ser informada, lo que implica que las comunidades étnicas cuenten con la información suficiente para poder emitir su criterio sobre el asunto que pueda afectarles directamente y, 8) respetar la diversidad étnica y cultural con el fin de encontrar mecanismos de satisfacción para las partes que en ella intervienen (C. C. s. su-123 de 2018).

De conformidad con el Convenio 169 de la OIT, el concepto central para la definición de la consulta previa es el de afectación directa. Según la Corte Constitucional, de acuerdo con lo afirmado en la Sentencia su-123 de 2018, la afectación directa es un concepto indeterminado, y tiene lugar cuando se presentan las siguientes situaciones: 1) se perturban las estructuras sociales, espirituales, culturales, en salud y ocupacionales¹³; 2) existe un impacto sobre las fuentes de sustento ubicadas dentro del territorio de la minoría étnica¹⁴; 3) se imposibilita realizar los oficios de los que se deriva el sustento¹⁵; 4) se produce un reasentamiento de la comunidad en otro lugar distinto a su territorio¹⁶; 5) se expide una política, plan o proyecto que recae sobre cualquiera de los derechos de los pueblos indígenas o tribales; 6) la medida se oriente a desarrollar el Convenio 169 de la OIT; 7) se imponen cargas o atribuyen beneficios a una comunidad, de tal manera que modifiquen su situación o posición jurídica y, 8) por la interferencia en los elementos definitorios de la identidad o cultura del pueblo concernido, en el caso específico de proyectos de exploración y

¹³ Sentencia T-1045A de 2010, T-256 de 2015 y su-133 de 2017.

¹⁴ Sentencia T-733 de 2017.

¹⁵ Sentencia T-1045A de 2010.

¹⁶ Sentencia T-256 de 2015.

explotación de recursos no renovables. Así, la afectación directa incluye, el impacto en: 1) el territorio de la comunidad tradicional¹⁷; o 2) en el ambiente, la salud o la estructura social, económica, así como cultural del grupo¹⁸.

De lo expuesto, se evidencia que existen retos y desafíos en materia de respeto, garantía y protección del derecho fundamental a la consulta previa y en razón de la expedición, órdenes y exhortos, como por ejemplo los de la sentencia de unificación su-123 de 2018¹⁹, a partir de los cuales se han empezado a generar nuevas regulaciones como la del artículo 161 de la Ley 1955 de 2019 (Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022), que crea la tasa por la realización de la consulta previa. En cumplimiento de dicha disposición, se expidió el Decreto 2353 de 2019, que crea la Dirección de la Autoridad Nacional de Consulta Previa, con autonomía administrativa y financiera sin personería jurídica, y define funciones y competencias de las subdirecciones de esta.

La regulación existente da cuenta de una protección con enfoque diferencial a las comunidades étnicas del país, en el que desde la suscripción del Convenio 169 de la OIT y la vigente Constitución Política de 1991, la garantía de los derechos de las comunidades indígenas, negras, afrocolombianas, raizales, palenqueras y gitanas requiere de procesos especiales de participación en atención a las condiciones de vulnerabilidad de las comunidades étnicas y por la riqueza cultural y social que representan para nuestro país.

Actualmente, si bien existen retos y desafíos en materia del derecho fundamental a la Consulta Previa, pues aún existen vacíos respecto a su

¹⁷ Corte Constitucional. Sentencias su-039 de 1997, T 880 de 2006, T 769/2009, T 733 de 2017.

¹⁸ Corte Constitutionnel. Sentencia T 129/2011, T 693/2011, T 849 de 2014, T 298 de 2017.

¹⁹ “Sexto.- Exhortar al Gobierno Nacional y al Congreso de la República para que, con base en los lineamientos expuestos en esta sentencia: adopten las medidas pertinentes para regular lo relacionado con los certificados de presencia y afectación de comunidades étnicas, que hagan efectivo el derecho a la Consulta Previa, en los términos del Convenio 169 de la OIT; así mismo se realicen los ajustes para que la institución encargada de otorgar los certificados de presencia y afectación de comunidades étnicas cuente con autonomía e independencia administrativa y financiera, necesarias para ejercer adecuadamente su función”.

regulación y por tal razón está vigente el debate de la necesidad de expedir una normativa más detallada y específica como por ejemplo una ley estatutaria que regule la materia, es evidente que la consulta previa como derecho y como proceso se ha fortalecido en los últimos años, por lo que como mecanismo de participación se encuentra evolucionando desde la óptica de su efectividad, que se evidencia con las protecciones generadas por diversas instituciones del Estado.

4. La protección ambiental y los principales mecanismos de participación ciudadana para las operaciones del sector minero

Otros de los mecanismos de participación ciudadana del sector minero se enmarcan en los procesos de protección ambiental que tienen lugar *durante las fases de planeación, implementación, y operación de los proyectos mineros* las cuales están mediadas por autorizaciones ambientales y sus respectivos trámites, en el marco de los artículos 8, 49, 58, 79, 80 y 366 de la Constitución Política y de fundamentos de la jurisprudencia de la Corte Constitucional, según los cuales: 1) es obligación del Estado proteger las riquezas naturales de la nación y cumplir los deberes calificados de protección²⁰; y 2) es un derecho de las personas gozar de un ambiente sano y exigirlo por diversas vías judiciales.

Desde un enfoque internacional, el concepto de desarrollo sostenible ha sido un pilar importante en materia ambiental y fue reconocido y dispuesto desde inicios por las Naciones Unidas en la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1992). El principio 1º establece que “los seres humanos constituyen el centro de las preocupaciones relacionadas con el desarrollo sostenible. Tienen derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza”; el principio 3º señala que “las actividades de explotación de recursos naturales deben responder equitativamente a las necesidades de desarrollo y ambientales de las generaciones presentes y futuras”; y el principio 10º dispone que “el mejor modo de tratar las cuestiones ambientales es con la participación de todos los ciudadanos interesados, en el nivel que corresponda”.

²⁰ Corte Constitucional, sentencias T-411 de 1992, C-058 de 1994, C-519 de 1994, C-328 de 1995, C-495 de 1996, C-535 de 1996, C-595 de 2010 y C-259 de 2016.

Los fundamentos ambientales de la Declaración de Río han sido reiterados en diversos estándares, tratados e instrumentos internacionales. En la actualidad, vale resaltar la reciente suscripción, en diciembre del año 2019, del Acuerdo de Escazú, que tiene importancia al ser uno de los instrumentos ambientales fundamentales de la región y el único acuerdo vinculante emanado de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible (Río+20) que define referentes en materia de medio ambiente y derechos humanos y en el que se reconoce la valiosa función de los defensores de los derechos humanos en asuntos ambientales.

El Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe tiene como objetivo luchar contra la desigualdad y la discriminación y garantizar los derechos de todas las personas a un medio ambiente sano, dando especial atención a las personas y grupos en situación de vulnerabilidad y posicionando la igualdad como eje del desarrollo sostenible. El tratado de Escazú define disposiciones relevantes en materia de accesibilidad de la información ambiental, bajo el principio de máxima publicidad (artículo 5), generación y divulgación de información ambiental (artículo 6), participación pública en los procesos de toma de decisiones ambientales (artículo 7) y protecciones y garantías para los defensores de los derechos humanos en asuntos ambientales (artículo 9).

En línea con las disposiciones internacionales, la Corte Constitucional en sus pronunciamientos ha indicado que la participación ciudadana es trascendental en las decisiones y procesos de planificación de políticas ambientales, sosteniendo así que el carácter democrático, participativo y pluralista del Estado, el postulado de participación de los ciudadanos en las decisiones que los puedan afectar directamente y el de soberanía popular, que definen un marco político que modela las relaciones entre el individuo y el Estado, especialmente en elementos sensibles y vitales para todas las personas como es el tema ambiental y el derecho a gozar de un ambiente sano, y sobre el cual se dispone que la ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan generarle afectaciones (C. C. s. C-328 de 1995).

A su vez, el artículo 3 de la Ley 99 de 1993 señala como postulado relevante del manejo ambiental el concepto de desarrollo sostenible indicando que este consiste en conjugar el crecimiento económico, la elevación

de la calidad de la vida y el bienestar social “sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades” (Congreso de Colombia, Ley 99 de 1993), lo que lleva implícito asegurar la participación de las comunidades que puedan verse afectadas, en razón a que el manejo adecuado de los recursos naturales depende del conocimiento del entorno y de la satisfacción de las necesidades de las comunidades involucradas (C. C. su-095 de 2018).

Es así como, el ordenamiento jurídico prevé mecanismos de participación ciudadana en el marco de las protecciones ambientales. Estos instrumentos se deben aplicar en la formulación de los Estudios de Impacto Ambiental, en el trámite de solicitud y también en el cumplimiento de las respectivas autorizaciones ambientales que se otorguen para la operación de un título minero, es decir, *durante las fases de planeación, implementación, desarrollo y operación de los proyectos mineros*. Tales mecanismos de participación ciudadana se presentan a continuación.

4.1. El licenciamiento ambiental y los mecanismos de participación ciudadana previos y en las operaciones del sector minero

La Corte Constitucional en la Sentencia T-462A de 2014 señaló que la participación ciudadana en procesos de licenciamiento ambiental cumple con varias funciones constitucionales, a saber: 1) identificar diagnósticos de impactos sociales, económicos y ambientales de los proyectos de explotación y 2) formular medidas de compensación, corrección y reparación acordes con los contextos sociales y ecológicos según el caso (C. C. s. T-462A de 2014). Estas funciones se aplican *durante las fases de planeación, implementación, desarrollo y operación en los proyectos mineros*.

Es así como la Ley 99 de 1993, el Decreto 2041 de 2014 y el Decreto 1076 de 2015 (Decreto Reglamentario Único) establecen y definen la regulación, trámites o procedimientos en materia ambiental, y singularmente dos herramientas básicas para la gestión de actividades y proyectos, como son: 1) el Estudio de Impacto Ambiental (EIA)²¹ y 2) el Diagnóstico

²¹ Artículos 17 y 21 del Decreto 2041 de 2014. El EIA “es el instrumento básico para la toma de decisiones sobre los proyectos, obras o actividades que requieren licencia ambiental y se exigirá en todos los casos en que de acuerdo con la ley y el presente reglamento se requiera”,

Ambiental de Alternativas (DAA)²² y se deben gestionar respectivamente ante la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) o ante la Corporación Autónoma Regional (CAR), de acuerdo con la jurisdicción donde se vayan a realizar actividades o proyectos²³. El EIA y el DAA se encuentran debidamente caracterizados en el ordenamiento jurídico en el cual se define su alcance, competencias institucionales, características, procedimientos y trámites a los cuales hay lugar en razón de estos.

Con el propósito de detallar los mecanismos de participación contenidos en los instrumentos anteriormente referidos, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales expidió la “Guía de Participación Ciudadana para el Licenciamiento Ambiental” en el año 2018 (ANLA, 2018), en la cual señala que los diversos instrumentos del licenciamiento ambiental contienen directrices de participación que denotan los aspectos que deben ser incluidos en el proceso de participación en la elaboración del estudio ambiental del proyecto por parte del solicitante y que se deben llevar a cabo con los actores identificados en el área de influencia o área de estudio del proyecto. La guía determina que la participación ciudadana se instrumentaliza también durante el proceso de evaluación y seguimiento ambiental por medio de los mecanismos de participación dispuestos por la Ley, al estar dispuestos para el uso por parte de cualquier persona, ya sea esta natural o jurídica (ANLA, 2018).

con el cual se confirma que las posibles amenazas para fauna, flora, cuencas hídricas y personas pueden ser controladas corregidas y compensadas. En la elaboración del EIA, el concesionario tiene que socializar el proyecto con las comunidades que se encuentran dentro del área de influencia del proyecto, para finalmente diseñar un plan de gestión ambiental que proteja la calidad del aire, agua y tierra.

El artículo 15 del Decreto 2041 de 2014 establece que se deberá informar a las comunidades “el alcance del proyecto, con énfasis en los impactos y las medidas de manejo propuestas y valorar e incorporar en el estudio de impacto ambiental, cuando se consideren pertinentes, los aportes recibidos durante este proceso”. Disponibles en Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), <http://www.anla.gov.co/terminos-referencia>.

²² Artículo 17 del Decreto 2041 de 2014. “El DAA tiene como objeto suministrar la información para evaluar y comparar las diferentes opciones que presente el peticionario, bajo las cuales sea posible desarrollar un proyecto, obra o actividad con el fin de aportar los elementos requeridos para seleccionar la alternativa o alternativas que permitan optimizar y racionalizar el uso de recursos y evitar o minimizar los riesgos, efectos e impactos negativos que puedan generarse”.

²³ Artículos 8º y 9º del Decreto 2041 de 2014.

Al respecto, la guía indica que en la implementación de los lineamientos de participación que se requieren para la formulación de los estudios ambientales²⁴ es importante que se asegure que los actores que puedan estar afectados por posibles impactos ambientales, con ocasión de las actividades desarrolladas en un proyecto, obra o actividad en su área de influencia o área de estudio, según corresponda, participen efectivamente. Para garantizar la inclusión de los diversos actores, ya sean estos institucionales, sociales o económicos que estén presentes en el área de influencia o en el área de estudio del proyecto, es relevante identificarlos, dependiendo del tipo de proyecto y el entorno en el que este se pretende llevar a cabo. Para ello, se deben tener en cuenta: 1) las características socioeconómicas y organizativas de la población; 2) las características económicas, actividades productivas y organizaciones existentes en torno a estas; 3) el uso y aprovechamiento de los recursos naturales de la población; y 4) la organización político-administrativa (ANLA, 2018).

De conformidad con la guía, el proceso de participación debe adelantarse con: 1) las autoridades departamentales y municipales que contengan las unidades territoriales que se definan como parte del área de influencia o área de estudio; 2) instituciones que por el tipo y particularidad del proyecto sea necesario incluir en el proceso; por ejemplo, en los casos de proyectos, obras o actividades con influencia en las zonas costeras, se deberá tener en cuenta a las entidades con injerencia en estas áreas; 3) la comunidad en general, las organizaciones sociales y otros actores que por el tipo de intervención puedan verse afectados por las actividades del proyecto. En tal sentido, se deberán incluir los actores sociales cuyas actividades productivas puedan ser afectadas por el proyecto, tales como las comunidades o asociaciones de pescadores, mineros de subsistencia y pequeña minería, productores agropecuarios, entre otros; 4) las organizaciones o asociaciones existentes que administran los acueductos cuyas fuentes de abastecimiento puedan verse afectadas por la intervención del proyecto; y 5) los propietarios o habitantes de los predios a intervenir y los propietarios de los predios en donde se solicita el uso y aprovechamiento de recursos naturales renovables y no renovables (ANLA, 2018).

²⁴ Diagnóstico Ambiental del Alternativas, Estudios de Impacto Ambiental, Planes de Manejo Ambiental y sus respectivas modificaciones cuando aplique.

A continuación, se referirán las generalidades de los principales mecanismos de participación en el marco del licenciamiento ambiental (ANLA, 2018).

4.1.1. Audiencia pública ambiental

Como mecanismo de participación ciudadana, la audiencia pública ambiental se encuentra reglada en la Ley 99 de 1993, los decretos 330 y 1076 de 2015. Según lo dispuesto en el Decreto 1076, la audiencia pública ambiental tiene por objeto dar a conocer a las organizaciones sociales, comunidad en general, entidades públicas y privadas la solicitud de licencias, permisos o concesiones ambientales, o la existencia de un proyecto, obra o actividad, los impactos que este pueda generar o genere y las medidas de manejo propuestas o implementadas para prevenir, mitigar, corregir o compensar dichos impactos; así como recibir opiniones, informaciones y documentos que aporte la comunidad y demás entidades públicas o privadas.

Respecto a la oportunidad de celebración, la audiencia pública ambiental procederá en los siguientes casos: 1) con anticipación al acto que le ponga término a la actuación administrativa, bien sea para la expedición o modificación de la licencia ambiental o de los permisos que se requieran para el uso o aprovechamiento de los recursos naturales renovables; 2) durante la ejecución de un proyecto, obra o actividad, cuando fuere manifiesta la violación de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones bajo los cuales se otorgó la licencia o el permiso ambiental.

Con la audiencia pública ambiental se da a conocer: 1) la solicitud de licencias, permisos o concesiones ambientales, o la existencia de un proyecto, obra o actividad; 2) los impactos que este pueda generar o genere y, 3) las medidas de manejo propuestas o implementadas para prevenir, mitigar, corregir o compensar dichos impactos. Y en esta audiencia se reciben opiniones, información y documentos aportados por la comunidad, organizaciones sociales y demás entidades públicas o privadas relacionadas con las solicitudes ambientales o con los impactos y medidas de manejo de los proyectos, obras o actividades.

En la audiencia pública ambiental no se adoptan decisiones, pues es un espacio en el que se reciben “opiniones, informaciones y documentos, que deberán tenerse en cuenta en el momento de la toma de decisiones

por parte de la autoridad ambiental competente”²⁵. Estos espacios de participación proceden en los siguientes momentos: 1) con anticipación al acto que le ponga término a la actuación administrativa, bien sea para la expedición o modificación de la licencia ambiental o de los permisos que se requieran para el uso o aprovechamiento de los recursos naturales renovables; es relevante tener presente que la celebración de la audiencia suspende los términos del procedimiento administrativo para el otorgamiento de licencias o permisos y se hace sin perjuicio de las facultades atribuidas a la autoridad competente para expedir el acto administrativo correspondiente; y 2) durante la ejecución de un proyecto, obra o actividad, cuando fuere manifiesta la violación de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones bajo los cuales se otorgó la licencia o el permiso ambiental.

De acuerdo con la normativa, la audiencia pública ambiental puede ser solicitada por: el procurador general de la Nación o el delegado para Asuntos Ambientales y Agrarios, el defensor del Pueblo, el ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible, los directores generales de las demás autoridades ambientales, los gobernadores, los alcaldes, cien personas o por tres entidades sin ánimo de lucro. Respecto a la convocatoria de la audiencia la autoridad ambiental competente, ordenará la celebración de la misma mediante acto administrativo motivado; igualmente, la convocará mediante edicto, que deberá expedirse con una anticipación de por lo menos treinta días hábiles a la expedición del acto administrativo a través del cual se adopte la decisión frente al otorgamiento o no de la licencia, permiso o concesión ambiental, o ante la presunta violación de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones bajo los cuales se otorgó la licencia o permiso ambiental.

Es de señalar que cualquier persona puede asistir a la audiencia pública ambiental; no obstante, solo podrán intervenir las personas de la comunidad, organizaciones sociales y demás interesados sin derecho propio, que se hayan inscrito previamente; esto es, entre la fijación del edicto de convocatoria y hasta con tres días hábiles de antelación a la fecha de su celebración y se levantará un acta de esta. En la audiencia podrán recibirse las informaciones y pruebas que se consideren conducentes. La decisión

²⁵ Artículo 2º del Decreto 330 de 2007, “por el cual se reglamentan las audiencias públicas ambientales y se deroga el Decreto 2762 de 2005”.

administrativa deberá ser motivada, teniendo en cuenta las intervenciones y pruebas recogidas durante la audiencia.

4.1.2. Derecho a intervenir en las actuaciones administrativas ambientales

Otro mecanismo de participación ciudadana para la protección ambiental es el derecho a intervenir en las actuaciones administrativas ambientales y se encuentra regulado en la Ley 99 de 1993 y el Decreto 1076 de 2015. Es un mecanismo a través del cual cualquier persona natural o jurídica tiene la posibilidad de intervenir en las actuaciones administrativas iniciadas para la expedición, modificación o cancelación de permisos o licencias de actividades que afecten o puedan afectar el medio ambiente o para la imposición o revocación de sanciones por el incumplimiento de las normas y regulaciones ambientales (artículo 69, Ley 99 de 1993) (ANLA, 2018).

La persona natural o jurídica tiene la calidad de tercero interviniente y se convierte en un sujeto procesal más dentro de la actuación administrativa para la cual se solicite este derecho; será notificado de los actos administrativos que se expidan para el proyecto, obra o actividad objeto del trámite, y tendrá la posibilidad de controvertir los actos administrativos mediante los recursos de ley establecidos (ANLA, 2018).

4.1.3. Derecho de petición

El derecho de petición como derecho fundamental y de participación dispuesto en el artículo 23 de la Constitución Política y reglamentado en la Ley 1755 de 2015. En el licenciamiento ambiental; tiene como objeto garantizar el derecho del acceso a la información sobre los proyectos, obras y actividades y las actuaciones administrativas en relación con la evaluación y el seguimiento ambiental realizados por la Autoridad Ambiental.

Los referidos mecanismos de participación ciudadana son los principales con lo que cuenta el ordenamiento jurídico, sin que sean los únicos, pues existen otros como son las acciones judiciales como la acción pública de inconstitucionalidad, la acción de cumplimiento, la acción de tutela, las acciones populares y de grupo, las veedurías ciudadanas, el cabildo abierto, entre otras. Todos estos mecanismos de participación seguramente se fortalecerán en razón de la reciente suscripción del Acuerdo Regional

de Escazú sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales sustancialmente por las disposiciones referentes a la accesibilidad de la información ambiental, la generación y divulgación de información ambiental y la participación pública en los procesos de toma de decisiones ambientales.

De lo expuesto se puede concluir que los espacios e instrumentos de participación ciudadana ambiental referida dan cuenta de que desde el ordenamiento jurídico constitucional y legal existen mecanismos de participación ciudadana que efectivizan el carácter democrático, participativo y pluralista del Estado colombiano, y la importancia de la intervención de las comunidades y de la población en las decisiones que pueden afectarles. Igualmente, es de precisar que los mecanismos a los que se ha hecho alusión ocurren a solicitud de la comunidad o con ocasión de orden de la autoridad ambiental, lo que hace importante el conocimiento de los mismos por parte de los ciudadanos, el uso por parte de las autoridades ambientales competentes y el impulso por parte de los interesados en los proyectos, y en el caso del sector minero de los titulares mineros, con la finalidad de lograr un uso efectivo de estos.

5. Las obligaciones sociales de los contratos mineros: Plan de Gestión Social y principales mecanismos de participación ciudadana previos y a las operaciones del sector minero

El ordenamiento jurídico dispone de regulaciones que incluyen obligaciones de inversiones sociales en los contratos mineros suscritos por la Agencia Nacional de Minería (ANM). Desde el año 2014 en el marco de los objetivos del Plan de Desarrollo 2010-2014 se estableció la obligación para la ANM de definir protocolos para atender y acompañar a la industria en su relación con las comunidades *durante las fases de planeación, implementación, desarrollo y operación en los proyectos mineros*, y como consecuencia de ello se expidieron por parte de la ANM la “Guía para Planes de Gestión Social” (ANM, 2014a) y la “Caja de Herramientas – Anexo Guía n.º 1” (ANM, 2014b).

Posteriormente, el artículo 22 de la Ley 1753 de 2015 señaló que los contratos de concesión suscritos por la Autoridad Minera Nacional deberían incluir la obligación del concesionario de elaborar y ejecutar Planes

de Gestión Social. En implementación de dicha norma, se expidieron la Resolución 708 de 2016, que estableció los criterios para la elaboración, evaluación y ejecución de los Planes de Gestión Social y también la Resolución 394 de 2017, por medio de la cual se estableció y adoptó la minuta de contrato único de concesión minera, que en la cláusula séptima en el numeral 7.15 señaló la obligación del concesionario de presentar a la Autoridad Minera un plan de gestión social.

Recientemente, se profirieron las Resoluciones 318 de 2018 y 406 de 2019 (ANM, 2019a) y los Términos de Referencia para la Construcción de los Planes de Gestión Social, en junio del mismo año 2019 (ANM, 2019b) en los que se indica que

el Plan de Gestión Social (pgs) es un instrumento de gestión sistemática, continua, ordenada e integral que consolida los programas, proyectos y actividades que desarrolla un concesionario minero para prevenir, mitigar y atender los riesgos sociales generados por el desarrollo del proyecto minero, así como para incrementar las oportunidades y beneficios generados por el mismo, durante las fases de planeación, implementación, desarrollo y operación en los proyectos mineros.

Para la elaboración del pgs, el titular minero debe involucrar a la comunidad del área de influencia y articular sus proyectos de inversión social con el Plan Nacional de Desarrollo, el Plan de Desarrollo Departamental y el Plan de Desarrollo Municipal (ANM, 2019b).

De acuerdo con los Términos de Referencia de la ANM el pgs se compone de dos etapas (ANM, 2019b): 1) la primera, comprende las actividades de comunicación y divulgación a los grupos de interés sobre el proyecto minero, la consulta de los planes de desarrollo municipal, departamental y nacional y la participación de la comunidad del área de influencia del proyecto y, 2) la segunda, incluye la presentación, del Plan de Gestión Social, su aprobación y posterior ejecución durante las fases de construcción y montaje, explotación y cierre del proyecto minero, además de la comunicación permanente con la comunidad y autoridades.

El pgs debe contener la siguiente información (ANM, 2019b): 1) identificación del título; 2) descripción del proyecto minero; 3) área

de influencia del Plan de Gestión Social; 4) identificación de actores y grupos de interés del área de influencia del Plan de Gestión Social; 5) caracterización socioeconómica del área de influencia del proyecto minero; 6) debida diligencia de los riesgos sociales; 7) líneas estratégicas de fortalecimiento²⁶ al sector productivo y de generación de empleo, institucional, a la educación, cuidado, prevención y promoción de la salud, desarrollo en temas cultura, recreación y deportes o de inclusión social y mejoramiento de condiciones de bienestar; 8) plan de acción, cronograma y presupuesto; 9) información, comunicación, socialización y participación; y 10) coordinación y seguimiento con la autoridad.

En forma específica el componente nueve, referente a la información, comunicación, socialización y participación indica que el titular minero debe involucrar a la comunidad en la construcción del pgs utilizando los criterios de pluralidad, gradualidad, disponibilidad, acceso, calidad, permanencia, diálogo y publicidad efectiva y eficaz y que la definición de los proyectos de inversión social que se incluyan deben adelantarse con la participación de los grupos de interés (comunidades) que se ubican en el área de influencia directa del proyecto (ANM, 2019b).

Así mismo, y de conformidad con los términos de referencia el titular minero debe disponer de mínimo tres espacios que involucren la comunicación, socialización y participación del pgs, a saber: 1) mesas de trabajo con líderes sociales y autoridades del área de influencia del proyecto, que se reúnan periódicamente para que participen en la construcción del Plan de Gestión Social; 2) un espacio de socialización con la comunidad y a las autoridades locales cada vez que haya cambio de fase del proyecto; y 3) un espacio de socialización e información con líderes sociales, autoridades y comunidad en general del área de influencia del proyecto sobre la ejecución del Plan de Gestión Social. Igualmente, se deben considerar dos canales de comunicación permanentes con la comunidad: 1) uno que permita a la ciudadanía tener información clara, oportuna y precisa del Plan de Gestión Social y su realización en territorio (personal de

²⁶ El titular es autónomo en la definición del número de objetivos y líneas a desarrollar. Estas deben enfocarse en mejorar las condiciones de la comunidad en el territorio, deben estar coordinadas con la realidad del proyecto y ser pertinentes, sostenibles, medibles y realizables (ANM, 2019b).

contacto, oficina de atención u otro); y 2) otro canal para presentar las quejas y reclamos (buzón de quejas o sugerencias, mecanismos de quejas y reclamos u otros).

De lo anterior, se colige que durante las fases de planeación, implementación, y operación en los proyectos mineros los titulares tienen la obligación contractual de realizar inversiones sociales y en ese marco igualmente de implementar diversos mecanismos de participación ciudadana mediante el uso de estrategias, instrumentos, espacios, herramientas, entre otras formas, que dan cuenta de la efectividad contenida en el ordenamiento jurídico, para dar aplicación del carácter democrático, participativo y plural del Estado colombiano, mediante el mecanismo del Plan de Gestión Social y los instrumentos de participación que se deben aplicar en su diseño e implementación (ANM, 2019b).

6. El marco de derechos humanos y empresa: la debida diligencia en la aplicación de los mecanismos de participación ciudadana en las operaciones del sector minero

Todos los mecanismos de participación ciudadana descritos anteriormente para las operaciones del sector minero tienen un marco de acción importante que se ha fortalecido en los últimos años en el mundo y en el país, a través de la implementación de disposiciones y estándares internacionales, que define pautas y referentes de conducta empresarial responsable en el marco de los derechos humanos y empresas. Lo anterior desde una perspectiva de que las actividades empresariales lícitas e indispensables para el desarrollo social pueden tener un impacto sobre los derechos humanos, lo que hace necesario adoptar medidas para prevenirlos tales impactos (C. C. s. T-732 de 2016).

A continuación, se refieren algunos de estos estándares que definen que los mecanismos de participación ciudadana son un elemento relevante para el respeto, promoción y garantía del marco de derechos humanos y empresas, con un componente esencial que es el de debida diligencia y de conducta empresarial responsable que establece obligaciones y responsabilidades en esta materia para el sector privado.

6.1 Algunos estándares internacionales relevantes que incluyen como referente relevante mecanismos de participación ciudadana

Diferentes iniciativas e instituciones internacionales han propuesto e impulsado la idea de *que las empresas tienen obligaciones en materia de derechos humanos, dentro de los cuales se incluye el derecho a la participación ciudadana*, en el ejercicio de sus actividades industriales, en relación con las personas y las comunidades asentadas en sus áreas de operaciones y que puedan verse afectadas e impactadas por las mismas. Estas obligaciones van más allá del cumplimiento de los requisitos mínimos legales existentes para cada actividad industrial en cada país en particular (OCDE, 2011).

Tales estándares dan un marco de derechos humanos y empresas y contienen diversas metodologías relevantes en materia de participación ciudadana y directrices para que el sector privado implemente mecanismos que hagan efectivo el carácter democrático, participativo y pluralista del Estado colombiano, mediante espacios abiertos de participación ciudadana que llevan a un diálogo permanente entre diversos actores públicos, privados y de la sociedad civil.

Es así como, inicialmente el “Pacto Mundial de Naciones Unidas” celebrado en 2000 impulsó la implementación de diez principios universalmente aceptados para promover el desarrollo sostenible en las áreas de derechos humanos y empresa, normas laborales, medio ambiente y lucha contra la corrupción, en las actividades y las estrategias de negocio de las empresas, con base en el mensaje de que cualquier tipo de empresa en cualquier parte del planeta —de todos los tamaños y sectores— puede jugar un papel fundamental para mejorar el mundo, de acuerdo con las premisas de Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2000). Estos principios estuvieron apoyados en la expedición de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM).

Posteriormente, en 2008 se publicó el “Informe del Relator Especial de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos y las Empresas, John Ruggie” que se fundamenta en el axioma de que los Estados tienen la obligación de respetar, proteger y cumplir los derechos humanos y las libertades fundamentales y, las empresas el deber de cumplir todas las leyes aplicables y respetar los derechos humanos y la necesidad de que los derechos y obligaciones vayan acompañados de recursos adecuados y efectivos en caso de incumplimiento (Naciones Unidas, 2011).

En el marco del referido informe, en junio de 2011, el Consejo de Derechos Humanos de las Naciones Unidas, encargado de la promoción y protección de los derechos humanos, expidió los “Principios Rectores sobre las empresas y los derechos humanos”: puesta en práctica del marco de las Naciones Unidas para “proteger, respetar y remediar” elaborados por el representante especial del secretario general para la cuestión de los derechos humanos y las empresas transnacionales y otras empresas, John Ruggie (Naciones Unidas, 2011).

Los *principios Ruggie* reiteran disposiciones del derecho internacional según las cuales: 1) los Estados tienen el deber de *proteger* los derechos humanos, por ejemplo, contra violaciones cometidas por las empresas comerciales y otras terceras partes, mediante medidas adecuadas, actividades de reglamentación y sometimiento a la justicia; pero que las 2) las empresas deben *respetar* los derechos humanos, actuando con la *debida diligencia* para no vulnerar los derechos humanos o contribuir a vulnerarlos; y que existe 3) la necesidad de que sean establecidas vías de recurso efectivas para *reparar* las violaciones cuando se producen. De forma específica, el Principio 17 hace referencia a “la debida diligencia en materia de derechos humanos”, señala que sobre los derechos humanos las empresas deben proceder con la debida diligencia a fin de identificar, prevenir, mitigar y responder a las consecuencias negativas de sus actividades²⁷.

Seguidamente, en 2015 los Estados miembros de las Naciones Unidas adoptaron los “Objetivos de Desarrollo Sostenible” (ODS) y la “Agenda

²⁷ Según el alto comisionado de la Naciones Unidas para los Derechos Humanos, este proceso debe incluir una evaluación del impacto real y potencial de las actividades sobre los derechos humanos, la integración de las conclusiones, y la actuación al respecto; el seguimiento de las respuestas y la comunicación de la forma en que se hace frente a las consecuencias negativas. En criterio del Alto Comisionado para los Derechos Humanos de la ONU, la debida diligencia en materia de derechos humanos: a) debe abarcar las consecuencias negativas sobre los derechos humanos que la empresa haya provocado o contribuido a provocar a través de sus propias actividades, o que guarden relación directa con sus operaciones, productos o servicios prestados por sus relaciones comerciales; b) variará de complejidad en función del tamaño de la empresa, el riesgo de graves consecuencias negativas sobre los derechos humanos y la naturaleza y el contexto de sus operaciones; c) debe ser un proceso continuo, ya que los riesgos para los derechos humanos pueden cambiar con el tiempo, en función de la evolución de las operaciones y el contexto operacional de las empresas.

2030”, como un llamado universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para el año 2030. Los ODS contemplan 17 objetivos que están integrados, ya que reconocen que las intervenciones en un área afectarán los resultados de otras y que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad medioambiental, económica y social (Naciones Unidas, 2015) reconociendo el papel de las empresas en su implementación mediante el respeto de los derechos humanos en fundamento a los principios rectores de las Naciones Unidas sobre DD. HH. y empresas²⁸.

A la postre, en 2016 la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) expidió la “Guía de la OCDE de diligencia debida para la participación significativa de las partes interesadas del sector extractivo” (OCDE, 2016). La Guía

proporciona un marco de diligencia debida para las empresas que operan en el sector extractivo, orientada a la identificación y gestión de riesgos relacionados con las actividades de participación de las partes interesadas, para garantizar que desempeñen un papel a la hora de evitar los impactos adversos y darles respuesta, en consonancia con la definición contenida en las Directrices OCDE EMN.

La Guía indica que “la participación significativa de las partes interesadas se refiere a la participación continuada bidireccional, que se lleva a cabo de buena fe, resolutive, continuada y de manera sensible” y contiene: 1) un marco de diligencia debida para una participación significativa de las partes interesadas; 2) recomendaciones para la planificación corporativa o para los niveles de alta dirección acerca del posicionamiento estratégico de la participación de las partes interesadas; 3) recomendaciones para el personal en el terreno; 4) un anexo que incluye un marco de monitoreo y evaluación para supervisar las actividades de participación de las partes

²⁸ Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se traducen en 169 metas que abarcan aspectos sociales, ambientales y económicos. El número 8 presta importante interés para las empresas: *fomentar el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo, y el trabajo decente para todos* (Naciones Unidas, 2015).

interesadas; y 5) cuatro anexos temáticos que señalan una orientación temática sobre la participación de las comunidades indígenas, las mujeres, los trabajadores y los mineros artesanales y a pequeña escala.

Más adelante, en el año 2017 el Comité de Derechos Económicos Sociales y Culturales, suscribió la “Observación General número 24 de Naciones Unidas” (Naciones Unidas, 2017) sosteniendo que las empresas deben seguir el estándar de “diligencia debida” en materia de derechos humanos al indicar que:

16. La obligación de proteger entraña el deber positivo de adoptar un marco jurídico que exija que las empresas ejerzan la diligencia debida en materia de derechos humanos a fin de identificar, prevenir y mitigar los riesgos de vulneración de los derechos del Pacto, evitar que se conculquen esos derechos y responder de las consecuencias negativas que hayan provocado o contribuido a provocar sus decisiones y operaciones y las de las entidades que controlan en el disfrute de los derechos consagrados en el Pacto. Los Estados deberían adoptar medidas como imponer los requisitos de la diligencia debida para prevenir las violaciones de los derechos del Pacto en la cadena de suministro de las empresas y por parte de los subcontratistas, proveedores, franquiciados u otros socios comerciales. (Naciones Unidas, 2017)

La Observación General número 24 ha sido utilizada en Colombia por la Corte Constitucional como referente de interpretación hermenéutica, por ejemplo, en la sentencia de unificación su-123 de 2018.

Todos los estándares anteriores son referentes que contienen pautas importantes para que las empresas incorporen una debida diligencia en materia de derechos humanos y una conducta empresarial responsable, mediante guías y lineamientos para la efectiva aplicación de los mecanismos de participación ciudadana contenidos de forma cada vez más efectiva en el ordenamiento constitucional y jurídico de Colombia. Si bien los referentes no son aún vinculantes en forma directa, sí han empezado a ser estándares a la hora de analizar casos concretos y proyectos particulares.

6.2. Disposiciones en Colombia

A nivel nacional el Estado colombiano ha dispuesto en su ordenamiento y en el marco de la política pública instrumentos y programas que dan cuenta de la adopción de los estándares internacionales en el orden jurídico interno. Así, desde la ratificación de la Declaración Universal de los Derechos Humanos a través de la Ley 16 de 1972, se han incorporado vía bloque de constitucionalidad diferentes convenciones y pactos internacionales de respeto y garantía de los derechos humanos (DD. HH.) y del derecho internacional humanitario (DIH).

Recientemente, y en forma precisa respecto a los postulados de derechos humanos y empresas, en el año 2015 se expidió el Decreto 1081 que creó y organizó el Sistema Nacional de Derechos Humanos (DD. HH.) y Derecho Internacional Humanitario (DIH), con el fin de articular a las entidades e instancias del orden nacional y territorial y coordinar sus acciones para promover el respeto y garantía de los derechos humanos y la aplicación del derecho internacional humanitario, mediante el diseño, implementación, seguimiento y evaluación de la Política Integral de Derechos Humanos y Derecho Internacional Humanitario, la cual se denomina Estrategia Nacional para los DD. HH. 2014-2034, que da cuenta de significativos mecanismos para la participación ciudadana.

Igualmente, en el año 2015, como respuesta al llamado de Naciones Unidas, el Gobierno de Colombia expidió el *Plan de Acción de Derechos Humanos y Empresa* (Presidencia de la República de Colombia, 2015) como documento de política pública, construido participativamente entre empresas, organizaciones de la sociedad civil, Gobierno Nacional y comunidad internacional, lo que da cuenta de un proceso que contó con participación ciudadana, con el propósito de garantizar la protección adecuada por parte del Estado de los derechos humanos, y también de que las actividades empresariales respeten los derechos humanos y contribuyan al desarrollo sostenible del país. Para ello, el Plan establece, entre otros elementos: 1) mecanismos de articulación interinstitucional que permitan dar una respuesta más coherente y articulada a los retos de derechos humanos en el ámbito empresarial; 2) acciones orientadas a realizar inversión socialmente responsable de conformidad con los ODS; 3) herramientas para garantizar la participación efectiva de la sociedad

civil para prevenir o mitigar impactos de la actividad empresarial sobre sus derechos; y 4) la creación de instancias de concertación y diálogo social entre el gobierno en sus diferentes niveles, las comunidades y las empresas. Esto con el fin de generar espacios formales de interlocución entre actores con diversos intereses, lo que da cuenta de la aplicación del carácter democrático, participativo y pluralista del Estado colombiano (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

A la postre, en el año 2016 mediante la Resolución 40391 el Ministerio de Minas y Energía adoptó la *Política Minera Nacional* que establece cinco pilares. El segundo pilar indica el de confianza legítima, y busca generar valor agregado al desarrollo de las regiones a través del *diálogo tripartito* y los instrumentos de buenas prácticas como la responsabilidad social empresarial, la transparencia, la sustentabilidad ambiental, la seguridad y salud en las labores mineras y el respeto y garantía de los derechos humanos. La política establece como una de las acciones la de “Generar una política de empresa y derechos humanos aplicada al sector minero-energético, en el marco del Plan Nacional de Acción de Empresas y Derechos Humanos”.

En cumplimiento de tal disposición, en el año 2018 el Ministerio de Minas y Energía expidió la Resolución 40796 de 2018 que contiene la *Política de Derechos Humanos del Sector Minero Energético*. El objetivo general de la política sectorial en DD. HH. es “generar un marco de acción que permita al sector minero energético fortalecer su contribución en la prevención, promoción, protección y garantía de los Derechos Humanos, con enfoque diferencial”. La política establece cinco lineamientos generales y algunas acciones sugeridas a implementar de manera gradual y progresiva y tiene como una de sus acciones la de diseñar un plan de acción a corto, mediano y largo plazo que determine actividades concretas, responsables, tiempos de ejecución, así como metas e indicadores para cada una de las entidades que conforman el sector, mediante un ejercicio de articulación con el sector privado, para que en el marco de la corresponsabilidad también establezcan acciones de debida diligencia en DD. HH. (MME, 2018).

A continuación, se refieren los cinco lineamientos, y la temática referida en la política para cada uno de ellos (MME, 2018):

1) Articulación interinstitucional e intersectorial para la planeación y ejecución de las acciones del sector minero energético; 2) Aportar a la sostenibilidad económica regional y a la reducción de la pobreza y la desigualdad; 3) Transformación de la conflictividad a través del relacionamiento constructivo entre el Estado, las empresas mineroenergéticas y las comunidades.

Al respecto se indica que el Estado debe diseñar estrategias para la transformación de la conflictividad que permita avanzar en una visión conjunta de desarrollo territorial, donde se integre la visión de los diferentes actores que participan en el territorio, en especial la comunidad y se promuevan formas innovadoras o mecanismos alternativos de resolución de conflictos; 4) “cultura y procesos de formación en derechos humanos en la cadena de valor del sector minero energético” y, 5) “la transparencia como un factor de competitividad en el sector minero energético, a nivel regional y nacional”. Teniendo en cuenta que el sector minero energético desarrolla proyectos de alto impacto social y económico a nivel regional, es necesario fomentar escenarios de participación, de rendición de cuentas que generen instrumentos y estrategias para proveer de información a la población de la realización del proyecto, para que se fortalezcan las capacidades de veeduría de los grupos de interés y, en general, se dote de transparencia su actuar misional.

Es de señalar que en el marco de las iniciativas referidas y desde el año 2015 se dio inicio en el país a la creación de dos grupos de trabajo referentes a derechos humanos y minería: el Grupo de Carbón y Derechos Humanos y Grupo de Oro y Derechos Humanos, que responden a la necesidad de promover el conocimiento e implementación de estándares internacionalmente reconocidos sobre los derechos humanos y empresas de los sectores de minería de carbón y de oro, entre los que se destacan los Principios Rectores de Naciones Unidas sobre Empresas y Derechos Humanos, los Principios Voluntarios en Seguridad y Derechos Humanos, el Plan Nacional de Acción en Empresas y Derechos Humanos (PNA), y la Política de Derechos Humanos del sector minero energético. Estos grupos trabajan mediante un esfuerzo articulado entre empresas productoras de estos minerales, instituciones del Estado y sociedad civil con el objetivo de afrontar los desafíos en materia de derechos humanos y empresas de

los sectores de minería de carbón y de oro y de promover el conocimiento y la adopción de estándares internacionales que promuevan el respeto por los derechos humanos y fomenten su inclusión como eje de planeación y ejecución dentro de las políticas internas de distintas empresas que hacen parte del sector (Asociación Colombiana de Minería [ACM], 2018a).

A partir de lo anterior, se observa que existe un volumen importante de iniciativas regulatorias tanto internacionales como nacionales que logran constituir un régimen amplio de orientación que se fundan en una idea principal de que las empresas son un actor fundamental del desarrollo social y que tienen obligaciones en materia de derechos humanos, contenidas en estándares internacionales, que si bien no son vinculantes directamente sí son un criterio de interpretación del ordenamiento jurídico constitucional, como lo ha afirmado la Corte Constitucional en sentencias como las su-095 y su-123 de 2018. Así, en la sentencia su-123 de 2018, se arguyó que pese a que la responsabilidad principal de la consulta previa es del Estado, ello no es razón para que los particulares, y en especial las empresas, no tengan deberes en relación con este derecho fundamental; lo anterior, en razón del reconocimiento del derecho internacional de los derechos humanos según el cual las empresas tienen especiales obligaciones en materia de derechos humanos, que si bien no son equivalentes a las que tienen los Estados, tampoco son menores o irrelevantes. De tal modo, y en relación con lo señalado por la Corte Constitucional, el estándar de debida diligencia de las empresas en lo concerniente al respeto de los derechos de las comunidades étnicas permite determinar si existe una vulneración del derecho a la consulta previa y el correspondiente remedio judicial (C. C. s. su-123 de 2018).

En este contexto, la participación ciudadana se debe fortalecer y efectivizar en los casos concretos mediante acciones de debida diligencia y de conducta empresarial responsable, lo que hace que las empresas y el sector privado tengan responsabilidades estratégicas para el respeto, la protección y la garantía de los derechos humanos.

Conclusiones

La actualidad social del país, la regulación constitucional y normativa y los diversos pronunciamientos judiciales de la Corte Constitucional han llevado a que en los últimos años se hayan diseñado, definido, fortalecido

y ampliado mecanismos de participación ciudadana en cumplimiento de los principios que definen al Estado colombiano con el carácter de democrático, participativo y pluralista, de acuerdo con la Constitución Política.

Tanto a nivel internacional, mediante estándares y disposiciones, como a nivel nacional, a través de fundamentos constitucionales, leyes, decretos y regulaciones, en los años recientes se han robustecido estrategias y componentes que conducen a una participación ciudadana más activa en el marco del desarrollo sostenible, desde una perspectiva social, humana, ambiental y económica, y que propenden por la implementación de mecanismos de participación que impulsen en forma conjunta entre sector público y privado el bienestar social y la mejora de la calidad de vida de la población.

Si bien la participación ciudadana es un reto permanente para el Estado y la sociedad colombiana, del cual no se escapa el sector minero, ni tampoco los proyectos de minería aurífera, es interesante identificar que en la actualidad existen cada vez más espacios, formas, medios, instrumentos y mecanismos de participación ciudadana, que requieren seguir fortaleciéndose con la finalidad de propender por una construcción conjunta de los territorios del país, mediante diferentes estrategias que implementan complementariamente los postulados de democracia representativa y de democracia participativa, por medio de la articulación de actores públicos, tanto del nivel nacional como del nivel local, de actores privados y de la sociedad civil, con el objetivo de equilibradamente ponderar principios y derechos constitucionales, e igualmente de generar un desarrollo sostenible del país.

En este contexto, la participación ciudadana se convierte en un pilar fundamental para la transformación de las sociedades actuales y para que los territorios se desarrollen en beneficio de las necesidades de las comunidades que se encuentran asentadas en zonas donde operan proyectos mineros y, en consecuencia, estas concurren en la identificación de sus impactos y de acciones de prevención, mitigación y atención de estos, ya sea a través de la participación directa, por ejemplo, en audiencias públicas en el marco del programa de relacionamiento con el territorio de la ANM o del licenciamiento ambiental, en procesos de Consultas Previas, participando en la definición de Planes de Gestión Social o, por otra

parte, a través de sus representantes legítimos, como son las autoridades e instituciones públicas de las entidades territoriales, dirigentes sociales, como, por ejemplo, los presidentes de Juntas de Acción Comunal, representantes étnicos en consejos comunitarios y cabildos gobernadores de resguardos indígenas, entre otros.

La existencia de los mecanismos contenidos en el ordenamiento internacional y la regulación del sector minero colombiano, dentro del que se encuentra el de minería aurífera, garantiza cada vez con mayor vigor desde lo constitucional y lo normativo el desarrollo sostenible integralmente, y los postulados del Estado unitario y descentralizado, los derechos humanos y la democracia; si bien aún se tienen retos y necesidades el país se encuentra en ese camino de consolidar y ampliar las estrategias en beneficio de las poblaciones.

La creación de nuevos mecanismos e instrumentos, como: 1) el Programa de Relacionamento con el Territorio de la ANM que define la concertación con las autoridades locales y la audiencia y participación de terceros, en aplicación del artículo 259 del Código de Minas; 2) los procedimientos y requisitos de participación en los Planes de Gestión Social, como obligación contractual de los titulares mineros y, 3) los estándares y disposiciones en materia de derechos humanos y empresas, y la debida diligencia y conducta empresarial responsable, ha sido significativa en los últimos años, y se requiere ahora sumar a su diseño e implementación la divulgación y comunicación efectiva de estos instrumentos para que se refuerce el acceso a estos y su real puesta en práctica.

De lo expuesto, se concluye que el sector minero colombiano, incluidos los proyectos de minería aurífera, desde lo constitucional y la política pública, cuenta con diversidad de mecanismos e instrumentos de participación ciudadana, que fortalecen cada vez más la intervención social en el desarrollo de sus actividades, con el fin de prevenir, mitigar y responder a los impactos generados por las operaciones. Así mismo, es de indicar que en razón del contexto global, de las actuales demandas sociales y las órdenes judiciales ya existentes, seguramente la participación ciudadana se seguirá robusteciendo y ampliando, en el marco, por ejemplo, del cumplimiento del Acuerdo de Escazú —suscrito a finales del año 2019—, de las normas y leyes que deben expedir respectivamente el Gobierno Nacional

y el Congreso de la República, en cumplimiento de exhortos y órdenes como las contenidas en las sentencias de unificación su-123 de 2018, en materia de regulación del derecho fundamental de Consulta Previa, y de la su-095 de 2018, en relación con la creación de mecanismos de participación ciudadana e instrumentos de coordinación y concurrencia nación territorio para la operación del sector minero y de hidrocarburos.

Referencias

- Alfonso, O., Henao J.C., y González, A.C. (2006). *Minería y comunidades: impactos, conflictos y participación ciudadana*. Universidad Externado de Colombia.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) (2018). *Guía de Participación Ciudadana para el Licenciamiento Ambiental*. Julio 2018. Recuperado de http://www.andi.com.co/Uploads/guia_participacion_ciudadana.pdf
- Agencia Nacional de Minería (ANM). (1 de marzo de 2018). Documento remitido a la Corte Constitucional en sede de revisión del expediente T6.298.958. Folios 595-649.
- Agencia Nacional de Minería (ANM) (2014a). *Guía para planes de gestión social*. Recuperado de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/planes-gestion-social_v4.pdf
- Agencia Nacional de Minería (ANM) (2014b). *Caja de herramientas para la implementación del plan de gestión social*. Recuperado: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/Documentos/cajadeherramientas_gestionsocial.pdf
- Agencia Nacional de Minería (ANM) (s.f.). Programa de relacionamiento con el territorio de la Agencia Nacional de Minería. Recuperado de <https://www.anm.gov.co/?q=programa-de-relacionamiento-con-el-territorio-agencia-nacional-mineria>
- Agencia Nacional de Minería (ANM) (2018). (20 de junio de 2018). Resolución 318 de 2018.
- Agencia Nacional de Minería (ANM) (2019a). (28 de junio de 2019). Resolución 406 de 2019.
- Agencia Nacional de Minería (ANM) (2019b). Términos de Referencia para la Construcción de los Planes de Gestión Social. Recuperado de

- https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/terminos_ref_elaboracion_planos_proyectos_gestion_social.pdf
- Agencia Nacional de Minería (ANM) (2020). Plan de Participación Ciudadana. Recuperado de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/plan_de_participacion_ciudadana_anm_2020.pdf
- Habib, S. (2018). Intervención presentada por La Presidente de la Agencia Nacional de Minería en la Audiencia Pública de la Corte Constitucional convocada mediante Auto 138 de 2018, 12 de abril de 2018.
- Asociación Colombiana de Minería. (ACM) (2018a). Grupo de Trabajo de Derechos Humanos y Carbón. Recuperado de <http://www.derechoshumanos.gov.co/Prensa/2018/Documents/derechos-humanos-empresas/6.1%20-%206.5%20-%207.6%20-%207.7%20Grupo%20Carbon%20y%20DDHH.pdf> y de <https://acmineria.com.co/sociedad-y-sostenibilidad/carbon-ddhh/>
- Asociación Colombiana de Minería. [ACM] (2018b). Grupo de Trabajo de Oro y Derechos Humanos. Recuperado de <https://acmineria.com.co/acm/wp-content/uploads/2020/02/Metodologia-GrupoOroDDHH-Sesion4Diciembre.pdf>
- Congreso de Colombia. (22 de diciembre de 1993). [Ley 99 de 1993]. DO: 41.146.
- Congreso de Colombia (19 de julio de 1994) [Ley 152 de 1994]. DO: 41.450.
- Congreso de Colombia. (24 de julio de 1997). [Ley 388 de 1997]. DO: 43.091.
- Congreso de Colombia. (15 de agosto de 2001). [Ley 685 de 2001]. DO: 44.545.
- Congreso de Colombia. (28 de junio de 2011). [Ley 1454 de 2011]. DO: 48.115.
- Constitución política de Colombia [Const.] (1991). Gaceta Constitucional n.º 116 de 20 de julio de 1991. Secretaría del Senado de República de Colombia. Recuperado de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Cuarta. (cc) (3 de marzo de 1994). Sentencia T-411 de 1992. [M. P. Eduardo Cifuentes].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (17 de febrero de 1994). Sentencia C-58 de 1994. [M. P. Alejandro Martínez].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (14 de abril de 1994). Sentencia C-180 de 1994. [M. P. Hernando Herrera].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (29 de septiembre de 1994). Sentencia C-424 de 1994. [M. P. Fabio Morón Díaz].

- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (21 de noviembre de 1994). Sentencia C-519 de 1994. [M. P. Vladimiro Naranjo].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (27 de julio de 1995). Sentencia C-328 de 1995. [M. P. Eduardo Cifuentes].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (26 de septiembre de 1996). Sentencia C-495 de 1996. [M. P. Fabio Moron].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (16 de octubre de 1996). Sentencia C-535 de 1996. [M. P. Alejandro Martínez].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (23 de enero de 1997). Sentencia C-011 de 1997. [M. P. Eduardo Cifuentes Muñoz].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (3 de febrero de 1997). Sentencia C-424 de 1997. [M. P. Antonio Barrera].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (5 de junio de 2001). Sentencia C-579 de 2001. [M. P. Eduardo Montealegre].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (28 de junio de 2001). Sentencia C-671 de 2001. [M. P. Jaime Araújo].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (18 de julio de 2002). Sentencia C-538 de 2002. [M. P. Jaime Araújo].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (30 de julio de 2002). Sentencia C-579 de 2002. [M. P. Jaime Araújo].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Octava. (cc) (26 de octubre de 2006). Sentencia T-880 de 2006. [M. P. Álvaro Tafur].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Séptima. (cc) (29 de octubre de 2009). Sentencia T-769 de 2009. [M. P. Nilson Pinilla].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (4 de marzo de 2010). Sentencia C-149 de 2010. [M. P. Jorge Iván Palacio].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (28 de abril de 2010). Sentencia C-303 de 2010. [M. P. Luis Ernesto Vargas].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (27 de julio de 2010). Sentencia C-595 de 2010. [M. P. Luis Ernesto Vargas].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (1 de diciembre de 2010). Sentencia C-983 de 2010. [M. P. Jorge Iván Palacio].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Sexta. (cc) (14 de diciembre de 2010). Sentencia T-1045A de 2010. [M. P. Nilson Pinilla].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Quinta. (cc) (23 de junio de 2011). Sentencia C-490 de 2011. [M. P. Luis Ernesto Vargas Silva].

- Corte Constitucional de Colombia, Sala Quinta. (cc) (3 de marzo de 2011). Sentencia T-129 de 2011. [M. P. Jorge Iván Palacio].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Séptima. (cc) (23 de septiembre de 2011). Sentencia T-693 de 2011. [M. P. Jorge Ignacio Pretelt].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (5 de marzo de 2014). Sentencia C-123 de 2014. [M. P. Alberto Rojas].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Séptima. (cc) (8 de julio de 2014). Sentencia T-462 A. [M. P. Jorge Pretelt].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Octava. (cc) (12 de noviembre de 2014). Sentencia T-849 de 2014. [M. P. Martha SÁCHICA].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Sexta. (cc) (21 de septiembre de 2015). Sentencia T-606 de 2015. [M. P. Jorge Iván Palacio].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Octava de Revisión. (cc) (5 de mayo de 2015). Sentencia T-256 de 2015. [M. P. Martha SÁCHICA].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Séptima de Revisión. (cc) (23 de octubre de 2015). Sentencia T-660 de 2015. [M. P. Jorge Ignacio Pretelt Chaljub].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (8 de abril de 2015). Sentencia C-150 de 2015. [M. P. Mauricio González Cuervo].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (6 de mayo de 2015). Sentencia C-260 de 2015. [M. P. Gloria Ortiz].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (8 de febrero de 2016). Sentencia C-035 de 2016. [M. P. Gloria Ortiz].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (18 de mayo de 2016). Sentencia C-259 de 2016. [M. P. Luis Guillermo Guerrero].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (25 de mayo de 2016). Sentencia C-273 de 2016. [M. P. Gloria Ortiz].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Sexta. (cc) (19 de agosto de 2016). Sentencia T-445 de 2016. [M. P. Jorge Iván Palacio].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Quinta. (cc) (19 de diciembre de 2016). Sentencia T-732 de 2016. [M. P. Gloria Ortiz].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (28 de febrero de 2017). Sentencia SU-133 de 2017. [M. P. Luis Ernesto Vargas].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Séptima. (cc) (15 de diciembre de 2017). Sentencia T-733 de 2017. [M. P. Alberto Rojas].

- Corte Constitucional de Colombia, Sala Séptima. (cc) (8 de mayo de 2017). Sentencia T-298 de 2017. [M. P. Aquiles Arrieta].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (4 de abril de 2018). Sentencia C-21 de 2018. [M. P. Cristina Pardo].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (11 de octubre de 2018). Sentencia SU-095 de 2018. [M. P. Cristina Pardo].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (15 de noviembre de 2018). Sentencia SU-123 de 2018. [M. P. Alberto Rojas, Rodrigo Uprimmy].
- Corte Constitucional de Colombia, Sala Plena. (cc) (13 de febrero de 2019). Sentencia C-053 de 2019. [M. P. Cristina Pardo].
- Dare, M., Schirmer, J. y Vanclay, F. (2014). Community engagement and social license to operate. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 32(3), 188-197.
- Fundación Ideas Para la Paz (2014). Guía para la debida diligencia en DD.HH. y DHH en las acciones de fortalecimiento institucional. Guías Colombia para los Derechos Humanos y las Empresas. Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://cdn.ideaspaz.org/media/website/document/5a1ed6f46e693.pdf>
- Güiza Suárez, L., Londoño Toro, B. y Rodríguez Barajas, C. (2015). La judicialización de los conflictos ambientales: un estudio del caso de la cuenca hidrográfica del río Bogotá (CHRB), Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(2), 195-209. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Henríquez, M. G. y Nozica, G. N. (2010). Participación ciudadana y actividad minera. La experiencia en la provincia de San Juan, Argentina. *Revista II-SE - Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, 1(1), 115-122. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/5535/553556974011.pdf>
- Londoño Toro, B. (2012). *Conflictos ambientales en Colombia. Retos y perspectivas desde el enfoque de derechos humanos y la participación ciudadana*. Universidad del Rosario: Bogotá D. C., Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía y Ministerio del Medio Ambiente (MME) (s. f.). Guía Minero Ambiental de exploración. Recuperado de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/normativas/guia_mineroambiental_de_exploracion.pdf
- Massa, P., Del Cisne Arcos, R. y Maldonado, D. (2018). Minería a gran escala y conflictos sociales: un análisis para el sur de Ecuador. Problemas

- del desarrollo. *Revista Latinoamericana de Economía*, 49(194). <http://dx.doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2018.194.63175>
- Muñoz Ávila, L. (2016). Derechos de acceso en asuntos ambientales en Colombia. Hacia el desarrollo de una actividad minera respetuosa el entorno y las comunidades (LC/L.4280). Comisión Económica para América Latina, Organización de Naciones Unidas.
- Muñoz Ávila, L. (2016). Desarrollo y minería: cuatro décadas en la búsqueda de la sostenibilidad en la extracción de recursos naturales. *Revista de derecho Universidad de Concepción*, 239, 199-242.
- Murguía, D. (2019). La competitividad del sector minero metalífero argentino en perspectiva: una comparación con Australia y Canadá. *Economía Regional*, 3, 48-79. Recuperado de <http://revistas.uncuyo.edu.ar/ojs/index.php/cuyonomics/article/view/1806>
- Ministerio de Minas y Energía (MME) (2018), Resolución 40796. Por medio de la cual se adopta la política de derechos humanos del sector minero-energético. 1.º de agosto de 2018.
- Naciones Unidas (1992). Agenda 21: Programa para el Desarrollo Sostenible. Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de 1992. Texto final de los acuerdos negociados por los gobiernos de la Conferencia sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, 3-14 de junio de 1992. Río de Janeiro, Brasil.
- Naciones Unidas (2000). Pacto Mundial de Derechos Humanos: una llamada a la acción para empresas sostenibles. Recuperado de https://www.pactomundial.org/wp-content/uploads/2018/02/Flyer-New-Strategy-GC-2018_20180126.pdf
- Naciones Unidas (2011). Principios Rectores sobre las empresas y los derechos humanos: puesta en práctica del marco de las Naciones Unidas para “proteger, respetar y remediar”. Resolución 17/4, 16 de junio de 2011. A/HRC/17/31. Recuperado de https://www.ohchr.org/documents/publications/guidingprinciplesbusinesshr_sp.pdf
- Naciones Unidas (2017). Observación general núm. 24 (2017) sobre las obligaciones de los Estados en virtud del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales en el contexto de las actividades empresariales. 10 de agosto de 2017.

- Naciones Unidas (2015). Objetivos de desarrollo sostenible. Recuperado de <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) (2011). Líneas directrices de la OCDE para empresas multinacionales. OECD Publishing. Recuperado de <https://www.oecd.org/daf/inv/mne/MNE-guidelinesESPANOL.pdf>
- Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) (2016). Guía de la OCDE de diligencia debida para la participación significativa de las partes interesadas del sector extractivo, OECD Publishing. Recuperado de <https://mneguidelines.oecd.org/OECD-Guidance-Extractives-Sector-Stakeholder-Engagement-ESP.pdf>
- Presidencia de la República de Colombia (2013a). (7 de noviembre de 2013). Directiva Presidencial 10 de 2013.
- Presidencia de la República de Colombia (2013b). (8 de febrero de 2007). Decreto 330 de 2007.
- Presidencia de la República de Colombia (2013c). (20 de noviembre de 2013). Decreto 2613 de 2013.
- Presidencia de la República de Colombia (2014). (15 de octubre de 2014). Decreto 2041 de 2014.
- Presidencia de la República de Colombia (2015). Plan de Acción sobre Derechos Humanos y Empresa. Recuperado: http://www.ohchr.org/Documents/Issues/Business/NationalPlans/PNA_Colombia_9dic.pdf
- Presidencia de la República de Colombia (2019). (23 de diciembre de 2019). Decreto 2353 de 2019.
- Rodríguez, G. A. (2017). *De la consulta previa al consentimiento libre, previo e informado a pueblos indígenas en Colombia*, 2.^a ed. Bogotá D. C., Colombia: Editorial Universidad del Rosario - Grupo Editorial Ibáñez.
- Roldán, C., Zárate, C. y Molina, J. (2019). La jurisprudencia constitucional colombiana sobre ordenamiento territorial, participación ciudadana y su impacto en la actividad minera. *Revista de Derecho*, (51), 90-110. <http://dx.doi.org/10.14482/dere.51.348.3>
- Schiaffini, H. H. (2011). Minería, conflicto y mediadores locales. *Minera San Xavier en Cerro de San Pedro, México. Cuadernos de Antropología Social*, 34, 115-139. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1809/180922374006.pdf>

- Solomon, F., Katz, E. y Lovel, R. (2008). Social dimensions of mining: Research, policy and practice challenges for the minerals industry in Australia. *Resources Policy*, 33(3), 142-149.
- Valencia, A. (2018). Participación ciudadana en la evaluación ambiental del sector minero en el Perú. Análisis de las dinámicas participativas e incorporación de enfoque de género. *Cuaderno de Investigación*, n.º 8. Escuela de Gobierno y Políticas Públicas. Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/124219>

Capítulo 8

Reasentamiento y proyectos mineros: una decisión de última instancia

Rafael Mateus^{*}
Algemiرو Vergara^{**}

Resumen

Este capítulo presenta los resultados de una revisión bibliográfica de la producción científica registrada en las bases de datos Scopus y Redalyc sobre las prácticas de reasentamiento en la industria minera, publicadas entre enero de 2015 y diciembre de 2020. Adicionalmente, se hizo una visita a la zona de un proyecto minero de oro en donde se tiene contemplada la realización de un reasentamiento. El objetivo de dicho ejercicio es comprender los impactos tanto positivos como negativos del reasentamiento, generando un balance teórico y metodológico que contribuya a clarificar algunos supuestos distorsionados sobre esta práctica. Los resultados muestran que el reasentamiento es llamado de diversas maneras en la literatura académica (reasentamiento involuntario; desplazamiento y reasentamiento inducido

* Abogado de la Pontificia Universidad Javeriana. Especialista en Gestión Pública e Instituciones Administrativas de la Universidad de los Andes. Director de Portex, firma de consultoría en comunicación y relacionamiento. Correo electrónico: rmateus@portex.com.co

** Psicólogo de la Universidad Santo Tomás. Licenciado en Ciencias Religiosas de la Pontificia Universidad Javeriana. Estudios de maestría en Investigación Social Interdisciplinar de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Consultor en asuntos de relacionamiento. Correo electrónico: algemiرو.vergara@gmail.com

por el desarrollo; reubicación; migración forzada, entre otros), dependiendo de intereses y visiones diversas, que dificultan la evaluación de sus impactos y la identificación de los riesgos relacionados con el reasentamiento. No obstante, más allá de las nominaciones para realizar el reasentamiento en Colombia se necesita el cumplimiento de normas constitucionales y legales, que están alineadas con principios, guías y estándares internacionales, especialmente las del Banco Mundial y las de la Corporación Financiera Internacional. La aplicación de estas normas se analiza en dos casos que se están realizando en el país (uno por desastres naturales y el otro por el desarrollo de proyectos mineros de carbón), así como en una propuesta de reasentamiento para un proyecto minero aurífero. Al final, se muestra la necesidad de continuar profundizando en la investigación sobre los procesos de reasentamiento, poniendo especial atención en tres componentes: 1) el control del proceso de planificación, 2) el enfoque de la remediación, y 3) el seguimiento y rendición de cuentas del proceso.

Palabras clave: reasentamiento, reasentamiento inducido por el desarrollo, evaluación de impactos, evaluación de riesgos, compensación, restauración de condiciones de vida.

Introducción

Uno de los temas que mayor preocupación genera alrededor de los proyectos mineros —además de los ambientales— es el relacionado con el reasentamiento. La preocupación aumenta entre las personas cuando se le agrega el adjetivo “involuntario” a la palabra reasentamiento, llevando a los críticos de este mecanismo a nominarlo “desplazamiento forzado”, con la connotación que tiene en Colombia (Hernández, 2018), generando así una gran alarma —pero también gran confusión— entre quienes escuchan o se enteran de que en un determinado proyecto minero está contemplado un posible proceso de reasentamiento, para poder extraer el recurso presente en la zona en donde habitan personas y comunidades, que lo han hecho desde antes de la llegada del titular minero.

Con frecuencia, los que se oponen a los procesos de reasentamiento acuden a la figura de “el poder que se impone”, como una fuerza sin freno, de corte neoliberal, que puede hacer lo que quiera en medio de

un territorio, por la capacidad económica y de propaganda que tiene, así como las relaciones privilegiadas con el gobierno central, que es el órgano decisorio sobre el territorio que, a su vez, desconoce la agencia de las propias comunidades (Zibechi, 2014).

No obstante, el proceso de reasentamiento no es una decisión que se toma de manera ligera, con la sola consideración del desarrollo del proyecto que se tenga planeado en ese territorio, sino que se siguen normas y procedimientos establecidos por diferentes organismos y estamentos. Tales lineamientos han sido el fruto de la experiencia en este tipo de eventos. En efecto, los primeros procesos de reasentamiento se produjeron en los ochenta por la construcción de grandes presas para la generación de energía y de agua para la irrigación de cultivos. Dado el costo de estos proyectos, el principal financiador fue el Banco Mundial y envió personal especializado en desarrollo social (especialmente antropólogos) para el diseño de políticas para los futuros reasentamientos (Cernea y Maldonado, 2018).

Al final de estos primeros reasentamientos se detectó una brecha entre enfoques etnográficos descriptivos y la necesidad de contar con parámetros claros que debían ser tenidos en cuenta en el momento de realizarlos. De ahí que en la década de los noventa se desarrollara una política normativa con directrices y recomendaciones para mejorar los procesos de reasentamiento, y que en la primera década de este siglo se tuviera en cuenta la vulnerabilidad de grupos particulares —*v. gr.* mujeres y grupos étnicos, especialmente—, para evaluar mejor las decisiones en las compensaciones y proyectos de mejoría de condiciones de vida de las personas sujetas a reasentamiento (Cernea y Maldonado, 2018).

En síntesis, los pasos exigidos los resume Hervé Huamaní:

En primer lugar, indica la necesidad de [una cartografía temática] de la zona afectada. Se identifican ciertas características como los lugares de vivienda, características topográficas y ambientales, recursos y tipos de uso de la tierra. Luego, se efectúa un “censo de las personas afectadas y su ubicación”. El tercer punto consiste en hacer un “inventario de los bienes perdidos, por hogares, empresas y comunidades”. En cuarto lugar, se efectúan evaluaciones en cuanto a la economía y a las características sociales de las personas afectadas que debe incluir a todas las personas afectadas por el

reasentamiento; es decir, no solo a las personas que se desplazarán, sino también a las personas que viven en las proximidades del lugar del futuro reasentamiento. El quinto punto tiene que ver con estudios analíticos cualitativos y cuantitativos donde se evalúan las encuestas y se definen baremos de indemnización. Se establecen también estrategias de sostenibilidad económicas y sociales para el futuro de las familias. El sexto y último paso consiste en consultar a la población para encontrar maneras de mitigar los efectos negativos del reasentamiento y definir “oportunidades de desarrollo”. Este proceso que reúne un conjunto de medidas —mapear, censar, hacer inventarios, evaluar, definir baremos, identificar, determinar, etc.— forma parte de una construcción de saberes políticos sugerida a las compañías mineras para una gestión política de la población. (Hervé Huamaní, 2017, p. 38)

Con todo y estos adelantos, el reto que se plantea al reasentamiento en la actualidad es que debe ir todavía más allá. Si bien hay una intención de compensar de manera justa a las comunidades reasentadas, hay que repensar los costos culturales y económicos no monetarios, que surgen como externalidades del proceso. Este llamado que se hace busca evitar caer en la trampa de la simplificación, ya sea en analizar el reasentamiento como un acto de poder unidireccional, brutal y violento hacia comunidades indefensas, o de solo hablar de los beneficios y del progreso que el reasentamiento trae a las personas y comunidades, ignorando los impactos y retos de adaptación que afrontan las comunidades a corto, mediano y largo plazo, así como el fortalecimiento de la autodeterminación y la corresponsabilidad en el restablecimiento de las condiciones de vida de estas poblaciones.

Esto se debe en gran parte en que la literatura que se produce sobre el reasentamiento existe una gran polarización. Como comentan Rogers y Wilmsen (2019), por un lado, están quienes se enfocan en el reasentamiento en la aplicación del proceso, la implementación y la manera en que pueden ser evaluados los impactos, convencidos de que el reasentamiento es un mecanismo necesario para el desarrollo de la sociedad. Por el otro, están los académicos que critican el reasentamiento desde perspectivas

políticas y económicas enfatizando sus impactos negativos y perjudiciales para las comunidades que han sido movidas de lugar.

Al existir tal polarización, una y otra perspectiva terminan retroalimentando discursos contrapuestos con consecuencias de reforzar sistemas de creencias que no son útiles y, muchas veces, tampoco son pertinentes para las comunidades que son reasentadas, así como para las instituciones encargadas de gestionar y supervisar la manera en que se ha realizado el proceso de reasentamiento. Así, por un lado, en el afán de legitimar el reasentamiento, se genera la idea de que este no es uno de los últimos recursos contemplados en el proyecto, sino que es un mecanismo más que puede llevarse a cabo de manera legítima y habitual en la minería. Pero también se alimentan creencias de que el reasentamiento debe ser un mecanismo que jamás debe usarse por ser un dispositivo que siempre viola los derechos humanos y produce daños irreparables en las personas y comunidades reasentadas.

Ante tal nivel de tensión se hace necesario ampliar la mirada sobre el reasentamiento y la manera en que este se desarrolla en la actividad minera, para comprender sus impactos tanto positivos como negativos y generar un balance teórico y metodológico que contribuya a clarificar algunos supuestos distorsionados que terminan reproduciendo mitos y reforzando creencias que están alejadas del rigor en la investigación que en los últimos años se ha hecho sobre este fenómeno, buscando comprenderlo para mejorarlo y producir así los mejores efectos para las comunidades reasentadas, así como para corregir, mitigar y remediar aquellos aspectos problemáticos que terminan sufriendo todos aquellos que están involucrados en el proceso.

Para lograr este propósito, el capítulo tiene la siguiente estructura: en primer lugar, se hace un recorrido por la nominación del reasentamiento de tal manera que se pueda observar la complejidad que encierra su caracterización, especialmente cuando se focaliza en la actividad minera, por sus características particulares, que no están presentes en otros proyectos de desarrollo como las presas hidroeléctricas o grandes infraestructuras de transporte. Luego, se muestra el marco normativo, para mostrar que el reasentamiento no se hace de cualquier manera ni en cualquier momento, sino que hay que cumplir con un ordenamiento jurídico e institucional diseñado en nuestro país para que pueda llevarse a cabo, teniendo en

cuenta que no existe una norma específica de reasentamiento en Colombia. A continuación, se examina la evaluación que se realiza en la literatura existente sobre el reasentamiento, señalando la diversidad de visiones, horizontes e intereses al momento de valorar los impactos del proceso. Más adelante, se analizan unos casos, realizando una descripción de qué se ha hecho en cada uno, mostrando el ejercicio institucional y normativo en el proceso. El capítulo finaliza con unas conclusiones que invitan a seguir investigando sobre el reasentamiento en minería, indicando que se requiere de nuevas categorías de análisis y de la articulación de perspectivas y técnicas tanto cuantitativas como cualitativas para valorar mejor los impactos, tanto positivos como negativos del reasentamiento y así poder gestionar de mejor manera los mismos.

1. Metodología

Para la escritura de este capítulo se hizo una revisión analítica de artículos científicos seleccionados en dos bases de datos: Scopus y Redalyc. Como criterio de búsqueda se eligieron los siguientes descriptores relacionados con el tema, en las ciencias económicas y sociales, tanto en inglés como en español: “resettlement” [reasentamiento], “displacement” [desplazamiento], “livelihood restoration” [restablecimiento de medios de vida-subsistencia] “mining” [minería], “guidelines” [guías]. Estos descriptores fueron combinados con los operadores lógicos de estas bases de datos (AND, OR, NOT, etc.). Como pauta general de búsqueda, se estableció como idioma artículos escritos en inglés y español, publicados en cualquier país, desde enero de 2015 a diciembre de 2019, disponibles con texto completo.

Dado que el tema de reasentamiento está vinculado a estándares y lineamientos provenientes de instituciones internacionales, como la Corporación Financiera Internacional (IFC), del Banco Mundial, y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), se incluyó una búsqueda de publicaciones de estos organismos y libros relacionados con el tema, en inglés y español, que incluyeran estas directrices, así como análisis de caso.

El filtro de las publicaciones (inclusión y exclusión de artículos, libros, sentencias) se hizo de forma manual, una vez leída la información obtenida, atendiendo a criterios de relevancia para el propósito de este capítulo, relacionado con los aspectos que se tienen en cuenta al momento

de decidir o no un proceso de reasentamiento. La información fue recogida en una matriz, con las siguientes categorías de análisis:

- Datos bibliográficos (autor/tipo de publicación/año, etc.)
- Enfoque de la publicación: aspectos técnicos, aspectos económicos, aspectos sociales, aspectos legales, responsabilidad social corporativa.
- Casos expuestos: análisis situacional en Colombia, Latinoamérica, otros países del resto del mundo.
- Conclusiones: balance del análisis realizado en torno a los procesos de reasentamiento considerados en la publicación.
- Recomendaciones: indicaciones relevantes que deben ser tenidas en cuenta en el proceso de reasentamiento.

Se realizó un análisis de contenido, haciendo comparaciones y contrastes entre los usos de las categorías en las publicaciones, desarrollando conceptos emergentes que proporcionen una panorámica que precise los mitos de contenido tanto negativos como positivos alrededor del reasentamiento.

Para la realización del análisis de casos de reasentamiento en Colombia se contó con información de primera mano debido a que uno de los autores ha hecho entrevistas con las comunidades del corredor minero del Cesar. Además, los autores efectuaron una visita de campo al proyecto aurífero Soto Norte para recoger información documental de la empresa, así como del territorio.

2. La nominación del mecanismo

Uno de los aspectos que inciden en las conversaciones y mensajes que circulan alrededor del reasentamiento involuntario es la manera en que dicho mecanismo es referido. El hecho de que personas y comunidades tengan que moverse de un lugar a otro conlleva una serie de consideraciones en donde la nominación es importante, dada la existencia de términos parecidos, pero con cargas semánticas y políticas distintas, los cuales son usados con la intencionalidad de transmitir una determinada perspectiva, en medio de la polarización anteriormente comentada.

En los primeros estudios sociales, realizados para analizar el movimiento de seres y grupos humanos de un lugar para establecerse en otro, este fenómeno fue llamado “migración”, sin establecer mayores distinciones entre causas o características diferenciales de tales migraciones. Hacia los años setenta se acuña el término “migración forzada”, poniendo especial atención en los aspectos ambientales, lo que llevó al profesor Essam El-Hinnawi a proponer la expresión “refugiados ambientales” para referirse a las personas o grupos humanos obligados a dejar su hábitat natural, debido a una perturbación ambiental que puso en peligro su existencia y calidad de vida. Más adelante, el término sería cambiado por “personas desplazadas por motivos ambientales” (Terminski, 2015).

En 1980 se adoptaron las primeras directrices del Banco Mundial sobre el reasentamiento involuntario. En estas publicaciones es donde se propone la expresión “desplazamiento y reasentamiento inducidos por el desarrollo” (en inglés, *development-induced displacement and resettlement*, DIDR). Muy pronto, las publicaciones científicas acogerán esta misma terminología para referirse al movimiento de personas que tienen que salir de sus lugares de origen en virtud de un proyecto grande de infraestructura (especialmente hidroeléctricas) que ocupará dicho hábitat (Terminski, 2015).

Aunque algunos critican el acrónimo DIDR por considerarlo muy optimista al hacer énfasis en el desarrollo, es el término que tiene mayor aceptación a nivel global (Satiroglu y Choi, 2015) en la literatura dedicada al fenómeno aunque, para responder a parte de esas críticas, el Banco Mundial (2001) popularizó y difundió la expresión “reasentamiento involuntario”, propuesto inicialmente por Scudder y Colson (1982) como contrapartida al reasentamiento voluntario, pero indicando que es un programa de asentamiento planificado. Aunque “involuntario” implica la naturaleza forzada del reasentamiento, su énfasis reside en el “reasentamiento” tomando la movilidad de las personas como algo dado.

Es de anotar que en el acrónimo DIDR se distinguen dos fenómenos: “reasentamiento” y “desplazamiento”. La razón de esto es que están relacionados, pero no necesariamente unidos. En otras palabras, puede haber desplazamiento sin que haya reasentamiento. En cambio, en el proceso de reasentamiento va implicado también un proceso de desplazamiento. Adicionalmente, el sustantivo desplazamiento va ligado con el adjetivo “forzado”. Mientras que el sustantivo reasentamiento se relaciona con el

adjetivo “involuntario”. Aunque pareciera que es una cuestión semántica, el asunto tiene unas connotaciones políticas profundas, debido a que el desplazamiento se asocia con conflictos internos al interior de los países, derivados de confrontaciones armadas. Si se homologara el reasentamiento al desplazamiento, tales fenómenos quedarían invisibilizados, tal como pasa en el contexto brasileiro:

En Brasil, no hay una taxonomía oficial para el desplazamiento interno. Más bien, el concepto —‘deslocados’— pareciera estar restringido a las personas y familias que se ven obligadas a huir de los grandes eventos climáticos o ‘ambientales’, predominantemente lluvias intensas e inundaciones. En otros casos, el término se utiliza para describir a los hogares y comunidades que son desplazados por grandes proyectos de desarrollo, especialmente presas hidroeléctricas, proyectos de minería, vías de transporte y explotaciones ganaderas y agroindustriales. Con respecto a los desplazados por conflictos, delincuencia o violencia política, prácticamente no hay debate en los medios de comunicación masiva, y mucho menos en las comunidades políticas y académicas. (Muggah, 2015, pp. 224-225)

A diferencia de lo expresado por Muggah, en el resto del contexto latinoamericano —y especialmente del colombiano— el desplazamiento forzado se usa como categoría de análisis en relación con el conflicto armado, especialmente porque la intención de los investigadores y académicos ha sido recoger la experiencia de las víctimas, exponer la vulneración, abuso y violación de los derechos humanos de quienes han sido desplazados, buscando con ello la intervención del Estado para garantizar condiciones de vida digna y protegidas (González, 2020).

En relación con la minería (o cualquier otro proyecto de desarrollo), la mayoría de los académicos tiene clara la distinción entre desplazamiento y reasentamiento. Un ejemplo de ello es el escrito de León:

[E]mpleamos el término “desplazamiento” para referirnos a la movilización, forzada o no, de una población debido a un proyecto minero o de construcción de infraestructura. El desplazamiento de

poblaciones sin asistencia de ningún tipo es motivo de múltiples riesgos de empobrecimiento y caída en la calidad de vida. Por “reasentamiento”, por otro lado, nos referimos tanto al desplazamiento físico de gente como a las políticas que buscan manejar los impactos generados. El reasentamiento, bajo el modelo del Banco Mundial, busca restablecer los medios de vida de los reasentados. (León, 2017, p. 7)

Lo mismo pasa en el continente asiático, en donde Tammy Tabe hace una precisión terminológica en su estudio, para no generar confusiones. Así, toma los siguientes conceptos:

Migración, como el proceso de moverse dentro o a través de las fronteras, de manera temporal, estacional o permanente. Se asocia comúnmente con un elemento de elección y a menudo se considera de naturaleza voluntaria, o a veces forzada; pero en este caso se utilizará para describir el movimiento voluntario de personas. El *Desplazamiento* se refiere a las situaciones en que las personas se ven obligadas a abandonar sus hogares como resultado directo de acontecimientos de inicio lento o rápido. En el presente documento se utilizará para referirse a los grupos de personas y comunidades que se ven obligados a trasladarse de sus islas como resultado del aumento del nivel del mar, la falta de agencia y de participación en los procesos de decisión y la expulsión forzosa de sus tierras. El *Reasentamiento* se refiere al proceso que describe los movimientos en gran escala de personas, ya sea de forma voluntaria u obligada, como resultado de proyectos de desarrollo o políticos, y que conlleva al reemplazo de sus bienes, medios de vida, tierras y recursos para mantener la continuidad de sus comunidades y medios de vida. La *Reubicación...* se refiere a una medida orientada a la solución, facilitada por el Estado en el que una comunidad es trasladada físicamente de un lugar a otro. Finaliza con la *evacuación*, aunque puede desempeñar un papel posterior a la evacuación, especialmente en circunstancias en las que los lugares de origen ya no son adecuados para vivir. (Tabé, 2019, pp. 5-6)

Por su parte, la polaca Bogumil Terminski establece una diferencia entre desplazamiento, reasentamiento y desalojo.

El término “desplazamiento” se utiliza con mayor frecuencia en el contexto de la reubicación relacionada con la privación del acceso a la tierra y los recursos existentes, sin que vaya acompañada de mecanismos de apoyo adecuados para las personas afectadas. Así pues, el fenómeno del desplazamiento no se limita a la salida física del territorio donde viven, sino que se asocia principalmente a la pérdida de las instalaciones económicas y sociales existentes y del acceso a los recursos pertinentes, sin que se obtengan beneficios a cambio. El término desplazamiento se aplica principalmente a la situación de las personas, tribus y comunidades que han quedado aisladas de su base socioeconómica actual y que, como consecuencia, han visto deteriorarse considerablemente su nivel de funcionamiento. La categoría de reasentamiento tiene un carácter definitivamente más relacionado con el proceso de restablecimiento de medios de vida que con el desplazamiento.

Utilizamos el término “reasentamiento” en el contexto de la reubicación basada en planes previos y consultas sociales con las comunidades afectadas, generalmente acompañada de mecanismos de apoyo adecuados en el nuevo lugar de residencia. Así pues, los costos de la reubicación física y el agotamiento de los recursos anteriores se compensan con el apoyo recibido en el nuevo lugar. El tercer término que se suele utilizar para describir los traslados involuntarios relacionados con el desarrollo económico es “desalojo”. Según el entendimiento más común, el desalojo es el traslado obligatorio de una persona de un territorio (por ejemplo, una unidad de vivienda) al que no tiene derecho legal. En la literatura científica esta categoría se aplica principalmente a los traslados de colonos ilegales, los traslados forzosos por motivos de conservación de la naturaleza y los desalojos en zonas urbanas, por ejemplo, los relacionados con la limpieza o la demolición forzosa de barrios marginales. (Terminski, 2015, pp. 59-60)

Pero ¿por qué tanta insistencia en distinguir el concepto de reasentamiento de los otros términos afines? Por el horizonte de sentido que contiene. En efecto, como se ha resaltado en todos los autores citados, con el reasentamiento se busca que las comunidades logren mantener, y en lo posible superar, las condiciones de vida que tenían en el lugar de donde son trasladadas, siendo así la mejor respuesta posible frente al desplazamiento físico y económico causado por el desarrollo de un proyecto. Y esto es muy importante, porque es la perspectiva desde donde se concibe el reasentamiento en Colombia. Vásquez Santamaría (2019) recoge los planteamientos que los académicos juristas colombianos tienen sobre este mecanismo y que, para él, pueden condensarse en dos ejes. El primero, que el reasentamiento es una medida de protección, no de choque. Si bien las poblaciones

se ven afectadas en su propio equilibrio y en el normal desarrollo de sus condiciones de vida, toda vez que se someten a nuevas modalidades de relaciones sociales, de cooperación y de resistencia frente a ellas, es un fenómeno que se enmarca en la asistencia humanitaria y que compromete al Estado en su capacidad de actuación. De lo anterior, el reasentamiento supone un proceso de planificación que involucra el reconocimiento de diferentes variables físicas, sociales, económicas, jurídicas y culturales, que deben tenerse en cuenta para el proceso de solución, desarrollado por medio del diseño —en algunos casos participativo— de un Plan de Gestión Social. (Vásquez Santamaría, 2019, p. 283)

El segundo eje es el de la superación de la reubicación. En efecto, la reubicación es un simple acto administrativo por el que el Estado faculta a la autoridad para que se ocupe de la población que ha sido objeto de desplazamiento

con el cometido de atenuar las consecuencias generadas por el choque del traslado, y trabaja por restablecer y brindar unas condiciones de vida y bienestar que permitan evidenciar la protección de los derechos humanos. Pero, si bien la reubicación conlleva el traslado masivo de personas a un sitio de vivienda nuevo, ese procedimiento no

tiene que estar siempre custodiado por una asesoría de tipo social, económica y jurídica. Esto hace de la reubicación una operación que no es integral porque generalmente se encamina a suministrar una vivienda nueva a la población desplazada, sin trascender en el restablecimiento de redes sociales ni económicas, ni de condiciones que impliquen una integral indemnización y formalización de la propiedad privada. (Vásquez Santamaría, 2019, p. 284)

Estos aspectos se concretan en la definición que proporciona la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) afirmando que el reasentamiento es

el diseño e implementación planificada de un proceso de intervención y acompañamiento con perspectivas integral de inclusión, de género y enfoque de derechos humanos de la población sujeto del desplazamiento involuntario que... [t]iene como propósito restablecer y mejorar los niveles de vida que tenían antes del desplazamiento. (UNGRD, 2015, p. 7)

Además de las definiciones y comprensiones del reasentamiento inducido por el desarrollo, la producción académica lo clasifica por la causa que lo origina, y por la voluntad de quienes son el objeto del reasentamiento. En cuanto a las causas, se han establecido siete: 1) construcción de hidroeléctricas y presas para proyectos de irrigación; 2) desarrollo de la infraestructura de transporte; 3) urbanización, reurbanización, transformación del espacio urbano y planes de redistribución de la población en las zonas urbanas; 4) deforestación y expansión de la frontera agrícola; 5) minería y transporte de recursos extractivos; 6) planes de redistribución de la población; 7) conservación de la naturaleza (Owen y Kemp, 2015).

Por el lado del aspecto volitivo se habla de reasentamiento “voluntario” e “involuntario”. Este último es definido por el Banco Mundial, así:

Se entiende como reasentamiento involuntario al desplazamiento físico involuntario de personas causado por un proyecto de envergadura... A los efectos de esta política, por “involuntarias” se entienden aquellas acciones que se pueden realizar sin que la persona

desplazada consienta en ellas con conocimiento de causa, ni tenga poder de decisión al respecto. (Banco Mundial, 2001, §1; §7)

No obstante esta definición y clasificación, hay un grupo importante de científicos sociales que están en desacuerdo con la dicotomía voluntario-involuntario por carecer de utilidad práctica y presentar un falso dilema. Así, Wilmsen y Wang (2015), analizaron dos proyectos —uno de reasentamiento “voluntario” (reasentamiento para reducir la pobreza), y otro de reasentamiento “involuntario” (proyecto de reasentamiento de la presa las Tres Gargantas)— y encontraron que los resultados más o menos favorables no dependen de la voluntad de las comunidades, sino de las prácticas centradas en las personas e incorporadas en las políticas, en la planeación y en la implementación del proceso, constatando así que la dicotomía voluntario-involuntario es inútil a la hora de evaluar los efectos positivos y negativos del proceso.

Por otro lado, el binomio voluntario-involuntario no es tanto una dicotomía, sino más bien momentos de un proceso, ya que el reasentamiento comienza como algo involuntario, pero, más pronto que tarde, las personas comienzan a negociar cómo será la adquisición de predios, las condiciones del lugar a donde quieren ir, etc. (Penz et al., 2011). Precisamente al lugar donde se quiere ir es parte central del proceso porque no solo es una ocupación espacial, sino también simbólica que hay que ocupar, utilizar, controlar, etc. (Hammar, 2016). Adicionalmente, en la dinámica del proceso hay un ejercicio de poder de lado y lado (aunque con una relativa asimetría hacia las comunidades) en donde cada parte tiene que ceder en algunas condiciones que suponen la “buena voluntad”, en medio de las tensiones que el proceso genera para los distintos actores e instancias que están involucradas (Price, 2015).

Así como se va ganando consenso en que la nominación de reasentamiento involuntario no es útil, también está pasando lo mismo con la expresión “desplazamiento inducido por el desarrollo”, cuando se refiere a la actividad minera. La principal crítica estriba en que la palabra “desarrollo” distrae de lo central de la conversación, así como también atrae críticas, lo cual se muestra en la gran cantidad de literatura que pone de relieve solo los impactos negativos del reasentamiento en las personas afectadas. Lo que olvidan los críticos es que el reasentamiento no solo se da “por” el

desarrollo —causa—, sino también “para” el desarrollo —propósito—, es decir, para la búsqueda de un bienestar general, ya sea por el desarrollo de un gran proyecto de infraestructura que busca satisfacer la demanda energética creciente (como en el caso de las hidroeléctricas), incrementar la competitividad del país (como en el caso de vías de transporte), o proporcionar minerales básicos como componentes fundamentales de productos necesarios para la sociedad de hoy (como el platino, por ejemplo, que es un componente fundamental de marcapasos, convertidores catalíticos, pilas, discos duros de las computadoras y medicamentos para el cáncer). El desafío es, por tanto, que ese desarrollo también se vea reflejado en las comunidades reasentadas, generando oportunidades de mejora de sus condiciones de vida, que no se presentaría en su lugar de origen sin la puesta en marcha del proyecto (Adam et al., 2015).

El otro problema que tiene la palabra “desarrollo” es que los críticos del reasentamiento lo reducen al modelo capitalista (especialmente los movimientos y organizaciones antiglobalización), lo cual es una simplificación ingenua, superficial y facilista, ya que en los regímenes socialistas también se han dado, y se siguen dando, fenómenos de reasentamiento con la promesa del desarrollo y el bienestar colectivo. El caso más visible es el de las grandes represas hidroeléctricas y extensión de campos de cultivo que se iniciaron en la China de Mao Tse-Tung, con un estilo mucho más autoritario y coercitivo. De hecho, la represa de las Tres Gargantas —el proyecto hidroeléctrico más grande del mundo— implicó el traslado de casi 1.300.000 personas, con un balance negativo para grupos poblacionales importantes, a los que no se les consultó por sus condiciones de vida al momento del reasentamiento, lo que llevó a que este proceso no sea considerado un caso de éxito en ningún estudio académico al respecto (Ramsay, 2017).

Con este trasfondo, cada vez más autores, que se han dedicado a trabajar el tema del reasentamiento en la minería, proponen que debe hablarse de “reasentamiento inducido por la minería”, porque en el campo extractivo este proceso tiene unas particularidades que solo se dan en esta actividad. Entre esas características figuran el aumento del costo para el acceso a la tierra, la cohabitación entre las minas y las comunidades en donde algunos buscan que el reasentamiento se dé en lugares cercanos al proyecto minero, el cambio de la actividad económica dominante (generalmente

agrícola) que se modifica por los mayores ingresos del trabajo en la mina, etc. (Owen y Kemp, 2015)

Además de lo anterior, los proyectos mineros se caracterizan por la incertidumbre y aún en la etapa de exploración pueden darse procesos de reasentamiento, con el abandono del proyecto al no ser factible con los precios del recurso en ese momento, dejando expectativas no cumplidas, para después ser retomado por un titular minero distinto. Owen y Kemp (2015) analizan como ejemplo el proyecto La Granja en el Perú, que se adjudicó por primera vez en 1994 a la compañía canadiense Cambior, para realizar exploración de detalle. En la fase de estudio de factibilidad, presentó el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y desarrolló un programa de adquisición de tierras y de reubicación de los respectivos propietarios. En 2000, Cambior vendió sus derechos de exploración a Billiton, de Sudáfrica que, posteriormente, se fusionó con la multinacional australiana BHP. Tras determinar que el proyecto no era factible, BHP Billiton devolvió la propiedad al gobierno peruano en 2002. Como parte de su programa de cierre, la empresa instituyó un plan de recompra de tierras a los antiguos propietarios. En 2005, Río Tinto ganó una licitación emitida por el gobierno peruano para continuar la exploración y el desarrollo de la concesión. Desde el principio, la empresa decidió arrendar en lugar de adquirir tierras para la exploración. Como el precio del mineral subió, Río Tinto determinó que el proyecto era factible, procediendo a la construcción y montaje de la mina, lo cual llevó a tener que reasentar a 21 familias para poder desarrollar infraestructura relacionada con la mina.

Estas particularidades sustentan que el reasentamiento inducido por la minería debe tener una categoría especial porque al estar incluido en el desplazamiento inducido por el desarrollo no se pueden considerar todos los aspectos que se han mencionado. Además, los costos del reasentamiento no son los mismos en fase de exploración, que en fase de producción. En el caso del proyecto La Granja, el costo en dólares del proceso de reasentamiento por hogar en fase de construcción y montaje fue de 41.667; en producción, de 67.358. Este incremento se dio, en gran parte por la “gentrificación”, es decir, por el aumento del costo de las tierras que conlleva el ejercicio de la actividad minera (Owen y Kemp, 2015). Esto no quiere decir que cada hogar recibió las cantidades monetarias

enunciadas anteriormente, sino los costos totales asociados, lo que implicó esas cifras económicas.

3. El marco normativo

En el anterior apartado se describió al reasentamiento como una medida de mitigación del desplazamiento físico y económico que busca la protección y la salvaguarda de las condiciones de vida de personas y comunidades que tienen que ser trasladadas a otro sitio en virtud de un proyecto de desarrollo —en este caso, un proyecto minero— que será adelantado en el lugar en donde habitan dichas personas, no pudiendo permanecer en este.

Dadas esas consideraciones, el proceso de reasentamiento no puede ser realizado de cualquier manera, sino que debe acogerse a parámetros y normas existentes tanto en el ámbito jurídico colombiano, como en las mejores prácticas y políticas internacionales, recordando lo que ya se ha anotado, que en Colombia no existe una norma específica para el asunto del reasentamiento. Las principales normas relacionadas se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Normativa colombiana e internacional relacionada con el reasentamiento

Constitución Política de Colombia
Artículo 1. Colombia es un Estado Social de Derecho. Artículo 2. Fines esenciales del Estado. Artículo 5. Primacía de los derechos inalienables de la persona y protección de las familias. Artículo 8. Obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación. Artículo 13. Establece el goce de manera igualitaria, para los habitantes del territorio nacional, de todos los derechos y oportunidades sin que existe algún tipo de discriminación. Artículo 15. Derecho a la intimidad y protección de datos. Artículo 23. Derecho a presentar peticiones respetuosas a las autoridades y a que se les responda. Artículo 29. El debido proceso se aplicará a toda clase de actuaciones judiciales y Administrativas. Artículo 44. Prevalencia de los derechos de los niños sobre el de los demás. Artículo 45. Prioridad de los derechos de los adolescentes. Artículo 47. Establece que el Estado Colombiano implementará políticas con el fin de que la población vulnerable pueda acceder de manera igualitaria y prioritaria a atención especializada. Artículo 48. Seguridad social con carácter obligatorio, que se prestará bajo la dirección del Estado Artículo 49. El acceso y la atención en salud es un servicio público a cargo del Estado. Artículo 50. Amplía el derecho de todo niño menor de un año a la protección o seguridad social por parte del Estado. Artículo 58. Función social de la propiedad privada. Expropiación por motivos de utilidad pública e interés social.

Continúa

Artículo 67. Derecho fundamental a la educación. Artículo 74. Derecho a obtener pronta resolución a las peticiones formuladas a las autoridades. Artículo 79. Derecho a gozar de un ambiente sano. Artículos 53, 93, 94, 101, 214. Bloque de constitucionalidad. Artículo 103. Mecanismo de participación ciudadana. Artículo 113. Colaboración armónica entre los órganos del Estado. Artículo 116. Los particulares pueden ser investidos transitoriamente de la función de administrar justicia en la condición de conciliadores o en la de árbitros habilitados por las partes. Artículo 118. Define que a las Personerías Municipales les corresponde la guarda y promoción de los derechos humanos y la protección del interés público. Artículo 287. Autonomía territorial. Artículo 311. Competencias del municipio. Artículo 313. Competencias del Concejo Municipal.
Leyes
Ley 56 de 1981. Se regulan las expropiaciones y servidumbres de los bienes afectados por obras públicas de energía eléctrica y acueductos. Ley 388 de 1997. Ley de Ordenamiento territorial. Procedimiento para adquisición de inmuebles por enajenación voluntaria y expropiación. Arts. 58 y ss. Ley 1682 de 2013. Gestión y adquisición prediales, gestión ambiental, activos y redes de servicios públicos, de tic y de la industria del petróleo, entre otros y permisos mineros y servidumbres. Ley 9 de 1989. Normas sobre planes de desarrollo municipal, compraventa y expropiación de bienes. (Derogada parcialmente y modificada por la Ley 388 de 1997. Ley 685 de 2001, Código de Minas, artículo 13. Declaración de utilidad pública e interés social para la industria minera. Artículos 186 a 196, procedimiento para expropiación. Ley 1742 de 2014. Proyectos de infraestructura de transporte, agua potable y saneamiento básico, y los demás sectores que requieran expropiación en proyectos de inversión que adelante el Estado. Ley 1882 de 2014. Modifica y adiciona la Ley 1682 de 2013. Ley 1448 de 2011, por la cual se dictan medidas de atención, asistencia y reparación integral a las víctimas del conflicto armado interno. Art 3. Desplazamiento interno. Ley 387 de 1997. Adopta medidas para la prevención del desplazamiento forzado; la atención, protección, consolidación y esta estabilización socioeconómica de los desplazados internos por la violencia. Ley 1523 de 2012. Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres. Ley 3ª de 1991, Vivienda de Interés Social y subsidio familiar de vivienda. Ley 640 de 2001. Modifica normas relativas a la conciliación y se dictan otras disposiciones. Ley 160 de 1994. Define la Unidad Agrícola Familiar y dicta otras disposiciones. Ley 57 de 1887, Código Civil, art. 653-663; 879-945. Concepto de bienes y definiciones, derechos y claridades sobre servidumbres. Ley 89 de 1998, art. 6. Establece el Principio de coordinación entre entidades del Estado. Ley 136 de 1994. Señala las funciones relativas a los concejos y alcaldes municipales. Ley 1712 de 2014. Establece la obligación de suministrar información a los ciudadanos de manera ágil, en condiciones iguales respetando el derecho a la equidad. Ley 1266 de 2008. Dicta las disposiciones generales del Hábeas Data y se regula el manejo de la información contenida en bases de datos personales. Ley 594 de 2008. Establece las políticas que reglamentan la función archivística del Estado y de las Entidades de carácter privado que cumplen funciones públicas. Ley 527 de 1999. Desarrolla el marco jurídico integral y general que autoriza el uso de los mensajes de datos en todas las actividades de los sectores público y privado.

Ley 115 de 1994. Regula la implementación y acceso al derecho a la educación de los residentes del territorio nacional de forma igualitaria. Ley 1098 de 2006. Garantiza el disfrute de los derechos de todos los niños, las niñas y los adolescentes y asegurar su desarrollo integral. Ley 1171 de 2007. Concede beneficios para acceder, entre otros, al derecho a la educación de la población adulta mayor de 62 años. Ley 1751 de 2015. Garantiza el derecho fundamental a la salud. Ley 1618 de 2013. Asegura el acceso de los derechos de las personas que sufren de alguna discapacidad. Ley 1098 de 2006. Establece que el Estado debe asegurar a niños y adolescentes con discapacidad escenarios y las medidas necesarias para que puedan llevar una vida en condiciones dignas y a integrarse a la sociedad. Ley 1276 de 2009. Establece nuevos criterios de atención integral del adulto mayor en los centros vida. Ley 1232 de 2008. Protege los derechos de las mujeres cabezas de familia, y establece una serie de medidas de apoyo. Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente como ente supremo de la gestión del medio ambiente.
Decretos y resoluciones Decreto-ley 151 de 1998. Compensación en tratamiento de conservación. Decreto reglamentario 2569 de 2000 establece que es desplazado quien se haya visto forzado a migrar por el conflicto armado interno. Decreto 1420 de 1998. Indemnización en caso de expropiación. Resolución 620 de 2008, del IGAC, Avalúo de inmuebles. Decreto 1077 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. Decreto 4165 de 2011, artículo 17 numeral 12, establece la obligación para la ANI de realizar una reglamentación para gestión predial, social y ambiental. Resolución 077 de 2012 de la Agencia Nacional de Infraestructura ANI sobre reasentamiento poblacional en los proyectos de infraestructura. Decreto 1888 de 1998. Expide el Estatuto de los mecanismos alternativos de solución de conflictos. Decreto 3600 de 2006. Reglamenta las disposiciones relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo. Decreto-ley 019 de 2012. Establece la obligación de incorporar la gestión del riesgo en la revisión de los planes de ordenamiento territorial. Decreto 1807 de 2014. Reglamenta lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial. Decreto-ley 2150 de 1995, art. 16. Establece la obligación de las entidades públicas de atender solicitudes oficiosas entre ellas, para la solución de un procedimiento o petición de los particulares. Decreto 1075 de 2015. Es un compendio de todos los decretos reglamentarios del sector de la educación. Decreto 4800 de 2011. Reglamenta y establece los trámite y procedimientos mediante los cuales se restablecerán los derechos de las víctimas del conflicto armado en Colombia. Decreto 2041 de 2014. Reglamenta el trámite para la obtención de una licencia ambiental ante la Autoridad de licencias Ambientales. Resolución 2206 de 2016 de ANLA. Adopta los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de explotación de proyectos mineros. Decreto 1076 de 2015. Decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible.

Continúa

Normas internacionales
Declaración Universal de los Derechos Humanos. Artículo 17. ONU 1948. ONU. Convención sobre el Estatuto de los Refugiados de 1951 y su protocolo de 1967. Convención Americana de los DD. HH. de San José de Costa Rica Adoptada por Ley 16 de 1972. OEA. Declaración de Cartagena sobre Refugiados de 1984. OIT —Organización Internacional del Trabajo— Convenio 169 sobre pueblos indígenas y tribales de 1989 Principios Rectores de los Desplazamientos Internos de la ONU. 1998. Banco Mundial La Política Operacional OP 4.12 y las Normas de Procedimiento del Banco BP 4.12 sobre Reasentamiento Involuntario. 2001. Actualizadas en agosto de 2016, con el Marco Ambiental y Social (MAS). Estándar Ambiental y Social 5: adquisición de tierras, restricciones sobre el uso de la tierra y reasentamiento involuntario Corporación Financiera Internacional. Normas de Desempeño sobre Sostenibilidad Ambiental y Social, 2012. Norma de Desempeño 5: Adquisición de tierras y reasentamiento involuntario. Norma de Desempeño 1: Consulta y participación informada.
Jurisprudencia
Sentencia C-153 de 1994. Sentencia T-617 de 1995. Sentencia C-1074 de 2002. Sentencia T-025 de 2004. Sentencia C-476 de 2007. Sentencia T-585 de 2008. Sentencia C-1199 de 2008. Sentencia T-235 de 2011. Sentencia T-348 de 2012. Sentencia T-135 de 2013. Sentencia T-462A de 2014. Sentencia C-344 de 2017.

Como puede verse en cuadro anterior, los procesos de reasentamiento en Colombia presentan una gran complejidad, por la falta de una política pública y de una legislación nacional específica. A partir del texto constitucional, que señala como competencia municipal la reglamentación del uso del suelo (Constitución Política de Colombia, 1991, art. 311 y 313), se le concede un amplio margen de discrecionalidad a los entes territoriales para ejecutar, cuando es su competencia, procesos de reasentamiento que, en muchos casos, se realizan sin protocolos o procedimientos debidamente regulados (Castro-Buitrago y Vélez Echeverri, 2018) o sin participación de la población, falta de acceso a la información y asesoría jurídica o ausencia de atención psicológica para enfrentar los efectos del desarraigo.

En el caso de los reasentamientos por obras públicas o proyectos de desarrollo, la normatividad colombiana se centra en el tema de la adquisición

de predios, tanto por enajenación voluntaria como por expropiación, regulando que la compensación recibida por el propietario del inmueble sea la adecuada. En cuanto a los temas de acompañamiento psicosocial, restauración del tejido social, restablecimiento de medios económicos, debe acudir a normas y guías internacionales, así como a las lecciones aprendidas por experiencias previas, tanto exitosas como no exitosas.

4. Normas constitucionales

Según la definición del artículo 1.º, “Colombia es un Estado Social de Derecho”, lo cual implica la obligación para el Estado de buscar la justicia social en cada una de sus actuaciones. El artículo 2.º de la Carta establece como fines esenciales del Estado servir a la comunidad, promover la prosperidad general y garantizar la efectividad de los principios, derechos y deberes consagrados en la Constitución. Por su parte, el artículo 5.º consagra la primacía de los derechos inalienables de la persona y ampara a la familia como institución básica de la sociedad (Constitución Política de Colombia, 1991).

Es este marco de garantías, con el que tiene que armonizarse el artículo 58 de la Constitución, que garantiza la propiedad privada y los demás derechos adquiridos, pero que le confiere una función social que implica obligaciones, una función ecológica en primer lugar. Este mismo artículo establece que “por motivos de utilidad pública o de interés social definidos por el legislador, podrá haber expropiación mediante sentencia judicial e indemnización previa” (Constitución Política de Colombia, 1991, art. 58). Este artículo es desarrollado después en una sentencia de la Corte Constitucional, estableciendo que la adquisición de inmuebles vía de enajenación voluntaria o expropiación administrativa o judicial de un bien por motivos de utilidad pública e interés social debe respetar los valores fundamentales del Estado social de derecho de: 1) principio de legalidad, 2) debido proceso, 3) acceso a la justicia y 4) una indemnización justa (Sentencia C-153, 1994).

En el caso de la industria minera y en desarrollo del artículo 58 constitucional ya citado, mediante el artículo 13 (Ley 685, 2001) —Código de Minas—, el legislador declaró de utilidad pública e interés social la industria minera en todas sus ramas y fases, señalando que, en consecuencia, podrían decretarse a su favor, a solicitud de la parte interesada

y por los procedimientos establecidos, las expropiaciones de la propiedad de los bienes inmuebles y demás derechos constituidos sobre los mismos, que sean necesarios para su ejercicio y eficiente desarrollo.

5. Normas legales

Existe un marco normativo que reglamenta la enajenación voluntaria y la expropiación, por vía administrativa y judicial (Ley 388 de 1997, que modificó la Ley 9 de 1989, y que a su vez fue modificada por la Ley 1682 de 2013 y las leyes 1742 de 2014 y 1882 de 2018), que define tanto los motivos —utilidad pública, interés social, urgencia manifiesta— como el procedimiento de adquisición de inmuebles en sus dos fases: enajenación voluntaria y expropiación judicial o administrativa. Así mismo, regula aspectos como el avalúo comercial del inmueble, y la indemnización, que contempla aspectos como daño emergente y lucro cesante, entre otros, en materia de adquisición predial para infraestructura de transporte. El precio de adquisición de los inmuebles debe incluir las compensaciones que tienen por objeto minimizar los impactos socioeconómicos generados por el desplazamiento de las familias o unidades productivas.

Más allá de estos aspectos, el tema del reasentamiento poblacional por obras públicas no está muy desarrollado a nivel normativo, aunque hay algunas entidades públicas que lo contemplan, como la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) que, a través de la Resolución 077 de 2012 (que desarrolla el Decreto 4165 de 2011), fija normas para el desplazamiento poblacional que se presente en los proyectos ejecutados por la referida agencia, normativa que sigue las principales normas internacionales sobre la materia.

En cuanto a la actividad minera, los artículos 186 y siguientes del Código de Minas establecen el procedimiento para la expropiación de los bienes que sean imprescindibles para el proyecto minero, esto es, la extracción de los minerales y las servidumbres necesarias. De hecho, el artículo 186 refiere:

Bienes expropiables. Por ser la minería una actividad de utilidad pública e interés social, podrá solicitarse la expropiación de bienes inmuebles por naturaleza o adhesión permanente y de los demás derechos constituidos sobre los mismos, que sean indispensables

para las edificaciones e instalaciones propias de la infraestructura y montajes del proyecto minero, para la realización de la extracción o captación de los minerales en el período de explotación y para el ejercicio de las servidumbres correspondientes. (Ley 685, 2001, art. 186)

La expropiación procede a solicitud de interesado ante la autoridad minera, justificando la necesidad de los bienes por expropiar. Esto, porque es la autoridad competente quien puede hacer la declaratoria de utilidad pública de los bienes, de manera que proceda el trámite de expropiación.

En donde sí ha habido mayores desarrollos jurisprudenciales es en el reasentamiento por causas naturales (Ley 1523, 2012). También, en el reasentamiento por causa del conflicto armado (Ley 1448, 2011; Sentencia T-025, 2011). Así mismo, en la reubicación debido a renovación urbana (Ley 9, 1989; Sentencia T-617, 1995).

6. Normas internacionales generales

En el contexto jurídico colombiano existe el llamado “bloque de constitucionalidad” derivado de la lectura del artículo 93 de la Constitución Política de Colombia, que reconoce la prevalencia del derecho internacional y los derechos humanos sobre la regulación interna en estos términos:

Los tratados y convenios internacionales ratificados por el Congreso, que reconocen los derechos humanos y que prohíben su limitación en los estados de excepción, prevalecen en el orden interno. Los derechos y deberes consagrados en esta Carta se interpretarán de conformidad con los tratados internacionales sobre derechos humanos ratificados por Colombia y la aplicación directa que los mismos deben tener en nuestro ordenamiento. (Constitución Política de Colombia, 1991, art. 93)

Esto significa, en la práctica, que la Constitución colombiana contempla normas que no están expresamente consignadas en ella, pero que tienen la misma validez y prelación.

Para el caso del reasentamiento, en concreto, hay que tomar como referencia el artículo 17 de la Declaración Universal de Derechos Humanos:

“Toda persona tiene derecho a la propiedad, individual y colectivamente. Nadie será privado arbitrariamente de su propiedad”, así como también el artículo 21 de la Convención Americana de los Derechos Humanos: “Ninguna persona puede ser privada de sus bienes, excepto mediante el pago de indemnización justa, por razones de utilidad pública o de interés social y en los casos y según las formas establecidas en la ley”.

Por otro lado, los Principios Rectores de los desplazamientos internos de la ONU establecen en sus artículos 6 y 7:

Todo ser humano tendrá derecho a la protección contra reasentamientos arbitrarios que le alejen de su hogar o de su lugar de residencia habitual. Se prohíben los reasentamientos arbitrarios en caso de proyectos de desarrollo en gran escala, que no estén justificados sobre un interés público superior o primordial. Antes de decidir el desplazamiento de personas, las autoridades competentes se asegurarán de que se han explorado todas las alternativas viables para evitarlo. Cuando no quede ninguna alternativa, se tomarán todas las medidas necesarias para minimizar el desplazamiento y sus efectos adversos. Las autoridades responsables del desplazamiento se asegurarán en la mayor medida posible de que se facilita alojamiento adecuado a las personas desplazadas en condiciones satisfactorias de seguridad, alimentación, salud e higiene y que no se separan a los miembros de la misma familia. Se buscará contar siempre con el consentimiento libre e informado de los desplazados. (ONU, 1998, arts. 6-7)

Mención aparte merece el Convenio 169 de la OIT sobre pueblos indígenas y tribales que, en su artículo 16 establece:

Los pueblos interesados no deberán ser trasladados de las tierras que ocupan. Cuando excepcionalmente el traslado y la reubicación de esos pueblos se consideren necesarios, sólo deberán efectuarse con su consentimiento, dado libremente y con pleno conocimiento de causa. Cuando no pueda obtenerse su consentimiento, el traslado y la reubicación sólo deberá tener lugar al término de procedimientos adecuados establecidos por la legislación nacional... Siempre que

sea posible, estos pueblos deberán tener el derecho de regresar a sus tierras tradicionales en cuanto dejen de existir las causas que motivaron su traslado y reubicación. Cuando el retorno no sea posible, tal como se determine por acuerdo o, en ausencia de tales acuerdos, por medio de procedimientos adecuados, dichos pueblos deberán recibir, en todos los casos posibles, tierras cuya calidad y cuyo estatuto jurídico sean por lo menos iguales a los de las tierras que ocupaban anteriormente, y que les permitan subvenir a sus necesidades y garantizar su desarrollo futuro. Cuando los pueblos interesados prefieran recibir una indemnización en dinero o en especie, deberá concedérseles dicha indemnización, con las garantías apropiadas. (oit, 1989, art. 16)

La enunciación de estas normas implica que en el escenario colombiano en ningún proyecto minero se puede adelantar un proceso de reasentamiento si no se tienen en cuenta los convenios internacionales relacionados con los derechos humanos, dado que forman parte del mandato jurídico consagrado en la Constitución Política de Colombia.

7. Normas y guías internacionales sobre reasentamiento involuntario

En el escenario internacional, en cuanto a reasentamiento involuntario se refiere, dos son las normas y orientaciones que sobresalen: las derivadas del Banco Mundial, y de la Corporación Financiera Internacional (IFC, por sus siglas en inglés). Ambas entidades son importantes en la medida en que hacen préstamos para que organizaciones tanto públicas como privadas obtengan los recursos para adelantar los grandes proyectos de desarrollo que se han propuesto.

Por lo anterior, intentando salvaguardar los derechos de las comunidades, publicaron sus normas de procedimiento, como un conjunto de buenas prácticas encaminadas a proteger a los pobladores de los posibles impactos negativos que puedan ocasionar los proyectos de desarrollo, especialmente a las poblaciones vulnerables y minoritarias, así como contribuir a viabilizar los proyectos. El hecho de que sean obligatorios para los proyectos que obtengan financiación por parte de alguna de las agencias garantiza, en buena medida, su cumplimiento (Smyth et al., 2015).

En relación con el Banco Mundial, sus orientaciones están consignadas en la Política Operacional OP 4.12 y las Normas de Procedimiento del Banco BP 4.12 sobre Reasentamiento Involuntario (Banco Mundial, 2001). Estas políticas fueron actualizadas en agosto de 2016, cuando el Banco Mundial adoptó un nuevo conjunto de políticas ambientales y sociales denominado Marco Ambiental y Social (MAS). Desde el 1.º de octubre de 2018, el MAS se aplica a todas las nuevas operaciones de financiamiento para proyectos de inversión del Banco Mundial. Dado que los proyectos existentes seguirán rigiéndose por las Políticas de Salvaguarda, los dos sistemas funcionarán en paralelo por aproximadamente siete años. Las directrices alrededor del reasentamiento están en el Estándar Ambiental y Social (EAS) 5: adquisición de tierras, restricciones sobre el uso de la tierra y reasentamiento involuntario (Banco Mundial, 2017).

El EAS 5 establece los requisitos que deben cumplir los prestatarios en relación con la identificación y evaluación de los riesgos e impactos ambientales y sociales derivados del reasentamiento involuntario asociados con los proyectos respaldados por el Banco a través del financiamiento para proyectos de inversión. Los objetivos del estándar son: 1) los reasentamientos involuntarios deben evitarse o reducirse al mínimo, para lo cual deben estudiarse todas las opciones viables en el diseño del proyecto; 2) evitar los desalojos forzados; 3) cuando el reasentamiento resulte inevitable, las actividades se deben concebir y ejecutar como programas de desarrollo sostenible, que proporcionen recursos suficientes para que las personas desplazadas por el proyecto puedan participar en los beneficios; 4) se debe ayudar a las personas desplazadas a mejorar sus medios de subsistencia y sus niveles de vida, o al menos devolverles los niveles que tenían antes de ser desplazados o antes del comienzo de la ejecución del proyecto; 5) concebir y ejecutar las actividades de reasentamiento como programas de desarrollo sostenible; y 6) garantizar que las actividades de reasentamiento se planifiquen e implementen con adecuada divulgación de información, consultas significativas y la participación informada de los afectados.

La norma contiene una serie de medidas para llevar a cabo el reasentamiento de manera adecuada, tales como:

- El operador del proyecto deberá demostrar que la adquisición de tierras o las restricciones sobre el uso de la tierra se limitan a

requerimientos directos del proyecto para fines claramente especificados dentro un período claramente definido.

- Ofrecer a las personas afectadas compensación al costo de reposición y otro tipo de asistencia que sea necesaria para ayudarlas a mejorar o, al menos, restablecer sus estándares de vida o medios de subsistencia.
- Involucrar a las comunidades afectadas, incluidas las comunidades anfitrionas, mediante el proceso de participación de partes interesadas, garantizando que se obtengan las perspectivas de las mujeres y se contemplen sus intereses en todos los aspectos de la planificación e implementación del reasentamiento, así como contar con un canal de quejas y reclamos, y la realización de un censo para identificar a las personas que se verán afectadas por el proyecto, y establecer un inventario de las tierras y los bienes que se verán afectados, determinando quiénes serán elegibles para recibir compensación y asistencia, y evitar que las personas no elegibles, como los ocupantes oportunistas, reclamen beneficios.
- Diseñar un plan de reasentamiento orientado a mitigar los impactos identificados del proceso, especialmente cuando se da el traslado físico, el cual debe garantizar: 1) que los desplazados recibirán asistencia durante el traslado, y 2) que recibirán viviendas o sitios para vivienda, o, sitios agrícolas con potencial productivo, ubicación y otros factores que sean, como mínimo, equivalentes a los del sitio antiguo.
- En el caso de desplazamiento económico, incluir medidas para permitir a las personas afectadas mejorar o, al menos, restablecer sus ingresos y medios de subsistencia. El plan establecerá los derechos de las personas o comunidades afectadas, prestando especial atención a aspectos de género y a las necesidades de los segmentos vulnerables de las comunidades, y garantizará que se provean de manera transparente, coherente y equitativa.
- Se deben contemplar medidas que aseguren que a las personas desplazadas se les ofrecerá apoyo después del desplazamiento, durante el tiempo que necesiten para restablecer sus medios de subsistencia y sus niveles de vida y se les proporcionará asistencia técnica y psicosocial para el efecto.

Además del Banco Mundial, la Corporación Financiera Internacional publicó en 2012 las “Normas de desempeño sobre sostenibilidad ambiental y social”, entre las que está la ND 5: Adquisición de tierras y reasentamiento involuntario. Esta norma regula tanto el reasentamiento involuntario referido al desplazamiento físico, consistente en la reubicación o pérdida de vivienda, como al desplazamiento económico, por la pérdida de bienes o de acceso a bienes, que ocasiona la pérdida de fuentes de ingreso u otros medios de subsistencia, como resultado de la adquisición de tierras, restricciones de acceso o servidumbres impuestas por el proyecto (CFI, 2012).

La Norma de Desempeño 5 se aplica durante el proceso de identificación de los riesgos e impactos ambientales y sociales del proyecto, mientras que la ejecución de las acciones necesarias para cumplir con la misma se maneja a través del sistema de gestión ambiental y social del operador del proyecto (Norma de Desempeño 1). La norma aconseja evitar, en lo posible, la expropiación y limitar al máximo la necesidad de recurrir a la autoridad gubernamental para hacer cumplir la reubicación. Se insta a los operadores a utilizar acuerdos negociados bajo los lineamientos de la Norma de Desempeño, incluso si tienen los medios legales para adquirir la tierra sin el consentimiento del vendedor. Los objetivos de la norma son:

- Evitar el desplazamiento o, cuando no resulte posible, reducirlo al mínimo.
- Evitar el desalojo forzoso.
- Anticipar y evitar o, cuando no resulte posible, reducir al mínimo los impactos sociales y económicos adversos derivados de la adquisición o restricciones al uso.
- Mejorar o restablecer los medios de subsistencia y los niveles de vida de las personas afectadas por desplazamiento económico.
- Mejorar las condiciones de vida de las personas desplazadas físicamente, brindándoles vivienda adecuada con seguridad de tenencia, esto es, protegidas del riesgo de desalojo, en los lugares de reasentamiento.

El reasentamiento se debe hacer mediante una indemnización justa que compense tanto la pérdida de bienes al costo de reposición como el

restablecimiento de los medios de vida; y garantizando que las actividades de reasentamiento se lleven a cabo con una apropiada divulgación de información, consulta y participación informada de las personas afectadas, tanto las que se desplazan como las comunidades receptoras.

La indemnización y el restablecimiento de medios de vida se aplica a los derechos consuetudinarios o tradicionales reconocidos o reconocibles por las leyes del país, casos en que los afectados no suelen tener la titularidad formal. Puede incluir ambientes fluviales y marinos, bienes comunales y recursos naturales, recursos marinos y acuáticos, productos forestales madereros y no madereros, agua dulce, plantas medicinales, cotos de caza y recolección, y áreas de pastoreo y cultivo.

Cuando las personas no tienen derechos sobre las tierras que ocupan, la norma exige que los bienes distintos de la tierra se mantengan, se repongan o se compensen; que la reubicación se realice con seguridad de tenencia, y que se restablezcan los medios de subsistencia perdidos. La norma incluye como desplazamiento económico la interrupción del acceso de mineros artesanales a depósitos minerales.

Adicionalmente a las consideraciones anteriores, la norma establece los siguientes requisitos generales para el diseño del proyecto:

- El operador considerará diseños alternativos viables del proyecto a fin de evitar o minimizar el desplazamiento físico o económico, valorando los costos y beneficios ambientales, sociales y financieros, con especial atención a los impactos sobre grupos pobres y vulnerables.
- En los casos en que no se pueda evitar el desplazamiento, se ofrecerá a las comunidades y personas desplazadas una indemnización por la pérdida de bienes al costo total de reposición, así como asistencia para ayudarlas a mejorar o restablecer su nivel de vida o sus medios de subsistencia.
- Las normas de indemnización serán transparentes y se aplicarán de manera igualitaria a todas las personas afectadas por el desplazamiento. En caso de que los medios de subsistencia dependan de la tierra o si la propiedad fuera colectiva, de ser posible se les ofrecerá compensación con tierras de reemplazo.

- El operador solamente tomará posesión de la tierra adquirida y los bienes relacionados una vez que se haya pagado la indemnización.
- También ofrecerá oportunidades para que las comunidades y personas desplazadas puedan obtener beneficios del proyecto.
- Participación comunitaria. El operador debe interactuar con las comunidades afectadas, incluidas las comunidades receptoras, mediante el proceso de participación de los actores sociales de la Norma de Desempeño 1. Los procesos de toma de decisiones relativos al reasentamiento y el restablecimiento de los medios de subsistencia deben incluir opciones y alternativas, según corresponda. La difusión de información pertinente y la participación de las comunidades y personas afectadas continuarán durante la planificación, ejecución, seguimiento y evaluación del pago de las indemnizaciones, las actividades de restablecimiento de los medios de subsistencia y el reasentamiento.
- Existen disposiciones adicionales que se aplican a las consultas con pueblos indígenas, de conformidad con la Norma de Desempeño 7.
- Se debe establecer un mecanismo de atención de quejas lo más temprano posible en la fase de desarrollo del proyecto. Esto le permitirá al cliente recabar y atender de manera oportuna inquietudes específicas acerca de la indemnización y la reubicación planteadas por las personas desplazadas o los miembros de las comunidades receptoras, estableciendo también un mecanismo para interponer recursos, destinado a resolver conflictos de manera imparcial.
- Se debe realizar un censo destinado a recopilar datos socioeconómicos de línea de base, a fin de identificar a las personas que serán desplazadas por el proyecto, determinar quiénes serán elegibles para recibir compensación y asistencia y desalentar el reclamo de beneficios por parte de personas no elegibles, como ocupantes oportunistas.
- El proceso de consulta debe garantizar que la perspectiva y los intereses de las mujeres se tengan en cuenta en todos los aspectos de la planificación y la ejecución del reasentamiento. Puede ser necesario realizar análisis internos del hogar en casos en los que los medios de subsistencia de las mujeres y los de los hombres se

vean afectados de maneras distintas. Debe establecerse medidas de protección de las mujeres, en caso de desigualdades evidentes.

8. La evaluación del reasentamiento

El proceso de reasentamiento genera una tensión de perspectivas. Están quienes tienen una mirada cortoplacista de tres a cinco años, en donde se analizan solo los aspectos económicos de quienes han sido reasentados, evaluando las mejoras en vivienda y generación de ingresos inmediatos, concluyendo de manera facilista que las personas están así (analizando las compensaciones), en “iguales o mejores condiciones” que las que tenían antes de haber sido movidas del sitio en donde habitaban antes. Sin embargo, lo que las personas consideran bienestar cambia a lo largo del tiempo, lo que hace que el calificativo de “mejores condiciones” sea relativo y complejo de evaluar. Adicionalmente, el reasentamiento implica un proceso permanente de adaptación y, muchas veces son las personas de segunda generación las que aprovechan las oportunidades que se abren con el nuevo lugar en donde se habita y con las relaciones que se tejen y los compromisos derivados del proceso (Kabra y Mahalwal, 2014).

Y es que la cuestión del tiempo es una de las variables más complejas para evaluar el éxito o no de un reasentamiento. ¿Cuándo comienza y cuándo termina el proceso de reasentamiento? No hay única respuesta ante tal interrogante, aunque hay algunas pistas, como las propuestas por Terminski:

Medir el bienestar y cómo éste cambia con el tiempo no es un proceso fácil. Evaluar el cambio en el bienestar asociado con un evento de reasentamiento involuntario que causa trauma y trastornos es aún más difícil. La bibliografía examinada anteriormente demuestra el reto que supone identificar las mediciones apropiadas (ingresos, capital social, capital natural, acceso a los servicios, satisfacción de los reasentados, etc.) y muestra cómo las medidas de bienestar pueden cambiar a lo largo de largos períodos de tiempo (10-20 años). Además, se hace hincapié en el tiempo necesario para que un nuevo estilo de vida se integre plenamente, en las respuestas diferenciales de los miembros de la comunidad y se plantea la posibilidad de que sólo en la segunda generación después del

reasentamiento algunas personas puedan aprovechar plenamente las nuevas oportunidades. Esto significa que el reasentamiento debe considerarse como un proceso de varias décadas y no como el “plan de tres a cinco años” que aparece en muchos de los planes expuestos por las compañías.

También plantea interrogantes acerca de la duración del apoyo central al reasentamiento y el restablecimiento de los medios de vida, que debería producirse preferentemente a lo largo de decenas de años, vinculado además con la distribución de beneficios, que se considera una forma de garantizar el apoyo a más largo plazo, así como con los parámetros de medición. ¿Cómo y cuándo se debe determinar si las personas están en mejores condiciones o no? ¿Cómo diferiría una evaluación después de cinco años de otra después de diez años, y cómo pueden atribuirse esos resultados específicamente al reasentamiento y no, por ejemplo, a cambios socioeconómicos locales o nacionales más amplios que afectan a todas las comunidades (como el debilitamiento o el fortalecimiento de la gobernanza nacional)? (Terminski, 2015, p. 36)

La cuestión no es solo del transcurrir del tiempo para la evaluación de los impactos, tanto positivos como negativos. Se trata también de considerar que hay tiempos diversos que se traslapan y afectan el proceso del reasentamiento. En primer lugar, están los “tiempos mineros”, es decir, la cronología del proyecto, plagado de consideraciones técnico-económicas (con el eje de la volatilidad de los precios en el mercado), en una matriz racional regida por la eficiencia, en donde se establecen unas fechas límites para lograr la reubicación de las personas (Askland, 2018). Cuando ese tiempo límite previsto está por cumplirse y no se ha logrado la adquisición de los terrenos, comienza una presión fuerte hacia los agentes de la compañía minera que están llevando al proceso, en donde se pueden tomar decisiones equivocadas que pueden traer consecuencias negativas tanto hacia la compañía como a las personas que van a ser reasentadas.

En segundo lugar, están los “tiempos sociales”, cuyo horizonte de temporalidad es la memoria y el largo plazo, con una tensión entre la inseguridad, la ruptura y la espera (un futuro no tan claro), y que por estas

características necesita un lapso cronológico mayor para poder asumir y darle sentido al proceso crítico que están viviendo, porque el reasentamiento siempre será un evento de crisis que rompe la temporalidad de las comunidades y grupos que viven el lugar (Hervé Huamaní, 2017). En el proceso de reasentamiento, el equipo o área de relaciones con la comunidad de la compañía minera es el que termina sintiendo la presión por parte de las áreas técnicas del proyecto, que no comprenden por qué no han logrado “demostrarle” a las comunidades los beneficios del reasentamiento, y son señalados de comprender el valor económico en juego y los costos en los que está incurriendo la empresa minera, generando así una tensión difícil de resolver porque, en algunas ocasiones, el equipo social es cambiado o desautorizado, apareciendo así mensajes contradictorios, con la consiguiente pérdida de confianza por parte de las comunidades, en el proceso de reasentamiento que se les está proponiendo.

En tercer lugar, están los “tiempos institucionales”, el de las autoridades, que intentan mediar entre los dos tiempos, sin que se logre exitosamente (Davidov y Nelson, 2016). Esto, porque la lógica institucional es burocrática (hay unos tiempos máximos establecidos por la ley y, generalmente, se espera hasta ese límite para emitir respuestas que esperan tanto comunidades como las compañías mineras). Además, en el proceso de reasentamiento intervienen instituciones del Estado diferentes, cada cual con sus propios tiempos, con decisiones diversas sobre el reasentamiento que inciden en el tiempo que podría tardar el proceso, ya sea retrasarlo o acelerarlo.

Estas tres tipologías temporales conllevan visiones de mundo y de vida diferentes, así como marcos de referencia distintos, marcando también ritmos distintos tanto para el reasentamiento como para otros procesos, especialmente por el mensaje de temporalidad que mande la compañía minera: cuánto estarán en el territorio, es decir, en cuánto tiempo será extraído el recurso concesionado (Wiegink, 2018). Y esa misma temporalidad también hay que incorporarla en la evaluación del reasentamiento porque, como asevera Hervé Huamaní:

Si se puede decir que el inicio de un proceso de reasentamiento empieza cuando este es oficialmente comunicado a la población, es más difícil afirmar con precisión en qué momento se termina.

Siendo un cambio de “lugar propio” de vida, consideramos que el fin de un proceso de reasentamiento no existe socialmente. Técnicamente, este sería la instalación de la última familia en la ciudad nueva. Pero en términos sociales (o pragmáticos), el fin de un reasentamiento debería ser simplemente el nuevo inicio de una vida “normal” o conveniente, lo que nos parece imposible de evaluar. El contexto de “crisis” merece un tiempo más o menos largo de resiliencia. En muchos casos, los reasentamientos en distintas partes del mundo han dado lugar a procesos memoriales a través de los cuales la población desplazada recuerda su antiguo pueblo o ciudad a través de peregrinajes. Esto sería una prueba de que, años o generaciones después, el reasentamiento deja huellas, ya sean estas buenas o malas. El reasentamiento cambia la historia de una localidad. (Hervé Huamaní, 2017, pp. 37-38)

Hacer un balance del proceso de reasentamiento, entonces, implica no homogenizar, cuestión que terminan haciendo tanto los que tienen miradas solo cualitativas, como quien se queda solo en cifras, desde la perspectiva cuantitativa. Así, el enfoque sociocultural es rechazado por los desarrolladores del proyecto minero, al exponer temas como riesgos de empobrecimiento y de legados no resueltos, así como injusticias, abusos y violaciones de derechos humanos. Por otro lado, el enfoque economicista es criticado porque se queda en el concepto de “distribución de beneficios”, sin detenerse en el costo de las externalidades para los reasentados. No obstante, uno y otro enfoque pecan de lo mismo: homogeneizar a las personas, como si al interior de las comunidades no hubiera diferencias. De ahí que se necesita de la integración y articulación de ambas miradas para determinar mejor los riesgos, impactos, costos y beneficios para la mayor parte de los involucrados en el reasentamiento (Cernea, 2015).

Sin esas distinciones entre los distintos grupos poblacionales que forman parte de la comunidad, el balance será siempre parcializado, para uno u otro lado. Una opción es construir narrativas de panorámicas de largo plazo que enfatizan y se concentran en los aspectos negativos, hablando del reasentamiento como un proceso de pérdida, de duelo, de fractura de identidad y de desvinculación del territorio, en una lógica victimal de dolor y desesperanza (Jessee, 2020). Pero olvidan que también

las comunidades son resilientes (Staupe-Delgado, 2019), que la adaptación se ve como esperanza y que también la memoria del reasentamiento se puede construir como reto para la transformación y la inclusión a condiciones de vida diferentes en donde pueden construirse bases para que las siguientes generaciones progresen y se incorporen mejor al mundo que les tocará vivir (Moomen et al., 2016).

En la otra orilla está el enfoque economicista, con una narrativa épica del reasentamiento, llenando los reportes y análisis con los datos sobre los costos de lo que fue un “buen” reasentamiento enfatizando especialmente el mayor dinero invertido per cápita, con lo cual crean una laguna interpretativa importante, al hacer evaluaciones indiferenciadas en cuanto a los grupos afectados (Nikuze et al., 2019). De esta manera, se reducen excesivamente las complejidades sobre el terreno a través de tablas y listas de verificación con una jerga técnica que deja de lado por completo las particularidades de los grupos que realmente se pudieron ver afectados negativamente (Terminski, 2015)

Al dejar de homogenizar, se puede hacer un balance ponderado del reasentamiento, con sus aciertos y fallas, así como de los beneficios y perjuicios ocasionados, desde el mismo momento de la planeación, que es donde se realiza el primer mapa de riesgos. Justamente, uno de los mayores desafíos que tiene la evaluación del reasentamiento es la identificación de los riesgos, que debe comenzar desde el momento en que se contempla la posibilidad del reasentamiento, actualizando el mapa de riesgos a través de encuentros con el grupo humano que podría ser reasentado. Gran parte de la crítica que se hace a las autoridades y a las compañías mineras es que se obsesionan con la medición del riesgo, prestando atención a supuestos criterios objetivos, cuando la mayoría de los riesgos dependen de percepciones subjetivas, que difieren de un individuo a otro, y de un grupo humano a otro, dado que son juicios intuitivos influidos por las experiencias subjetivas y las cogniciones, tanto particulares como sociales, así como por los temores, distribuidos de forma desigual entre los individuos (Wang et al., 2019).

Un ejemplo sirve para ilustrar la percepción social y valorativa del riesgo: el viajar en automóvil o en avión. Desde una perspectiva objetiva, se corre menos riesgo viajando por vía aérea, que por carretera. Sin embargo, desde una perspectiva subjetiva, la mayoría de las personas siente

más temor a volar que a desplazarse en un automotor. En relación con el desplazamiento, la percepción subjetiva del riesgo varía entre personas, incidiendo en la decisión de reubicarse o no. Por tanto, a la hora de valorar qué tanto fue exitoso o no un proceso de reasentamiento, hay que considerar si se construyó un mapa o matriz de riesgo que tuviera en cuenta no solo las valoraciones técnicas de autoridades y personal del proyecto minero, sino también las percepciones subjetivas de las personas y grupos que van a ser reasentados, cómo fueron recogidas esas percepciones y qué mecanismos se acordaron para gestionar esos riesgos.

Minimizar un riesgo porque se considere subjetivo y poco importante desde la perspectiva técnica puede llevar a decisiones que las personas consideren inadecuadas o peligrosas, por mucho que estén sustentadas en bases rigurosamente objetivas, tal como refleja Anthony de Mello en la siguiente historia, con su respectiva moraleja final:

“¿Qué demonios estás haciendo?”, le pregunté al mono cuando le vi sacar un pez del agua y colocarlo en la rama de un árbol. “Estoy salvándole de perecer ahogado”, me respondió. *Lo que para uno es comida, es veneno para otro. El sol, que permite ver al águila, ciega al búho.* (Mello, 1982, p. 21)

En otras palabras, las personas y comunidades le dan importancia a asuntos que, objetivamente, pueda que no sean relevantes. Por ejemplo, pueden mostrarse reacias a salir del lugar porque ciertas plantas medicinales se dan en el entorno que habitan y, en el nuevo lugar, no tendrán acceso a estas. Y, aunque los riesgos a la salud pueden ser gestionados con la construcción de un puesto de salud bien dotado, la tradición cultural lleva a la desconfianza hacia ciertos fármacos, por lo que la solución planteada, de manera técnica, no es percibida como una respuesta efectiva por parte de la comunidad. De ahí que se necesite de una mirada más amplia para la comprensión, interpretación e identificación de los riesgos relacionados con el proceso de reasentamiento (Kemp et al., 2017).

Sin embargo, la crítica que se hace a autoridades y compañías mineras a la hora de la identificación y comprensión de los riesgos por parte de los reasentados también les caben a las organizaciones de la sociedad civil que se oponen al proceso. La creciente resistencia local contra las consecuencias

negativas del desarrollo económico por parte de movimientos antimineros han logrado incluso la detención de proyectos. En el contexto colombiano, el caso de mayor resonancia ha sido La Colosa, ubicado en Cajamarca (Tolima), cuyas actividades de exploración fueron suspendidos por parte de la empresa AngloGold Ashanti, después de que en una consulta popular en el municipio el “no” al proyecto resultara mayoritario.

Con una visibilidad cada vez mayor —que articula movimientos de base, organizaciones no gubernamentales (ONG) y movimientos virtuales a través de internet—, estos movimientos se articulan con el interés común de oponerse al reasentamiento, no por el reasentamiento *per se*, sino porque es una lucha para detener todo el proyecto, y todos los proyectos mineros. De esta manera, hablando supuestamente en nombre de los reasentados, ignoran también los verdaderos riesgos y temores de las comunidades, porque toman la voz de estas poblaciones, con lugares discursivos comunes, pero no con las expectativas planteadas por las personas (Terminski, 2015). De esta manera, muchos de los análisis que concluyen con el fracaso del reasentamiento están respondiendo más a los intereses de los movimientos, que a las condiciones reales y efectivas de los pobladores que fueron reasentados (Hay et al., 2019).

Nuevamente, lo que aparece es una homogenización de todos los grupos, como si todos quisieran lo mismo y tuvieran la misma percepción, por lo que hay que tener en cuenta otro de los aspectos complejos relacionados con la evaluación de un reasentamiento: la participación de los involucrados. De manera genérica, tal como se enunció en las normas nacionales e internacionales, se obliga a consultar a la comunidad. La pregunta es ¿cuál comunidad? En investigaciones realizadas en comunidades tribales en África se ha encontrado que la organización social de estas comunidades tiene una estructura jerárquica rígida por lo que la única voz autorizada para negociar y decidir es el jefe del clan, y algunos hombres, de manera que la perspectiva de las mujeres y otras mayorías no se expresan o, si dejan oír su voz, es para expresar consentimiento a la decisión de su líder (Wilson, 2019). Aunque, formalmente se acudió y utilizó el mecanismo de participación, en la práctica no ocurrió tal y, a la larga, las mujeres quedan más empobrecidas después de un proceso de reasentamiento, al contrario de los jefes tribales, que acumulan más poder y dinero (Korah et al., 2019).

En otros casos, la micropolítica local se rige por “exclusiones íntimas”, es decir, que hay unas élites al interior de las comunidades que concentran el poder y realizan un ejercicio de política vertical, indicando a las personas a qué, cómo, cuándo y cuánto oponerse o ceder, para lograr mayores y mejores beneficios para los de la capa superior, no para todos. Se ve en los casos de negociación de los precios de la tierra, en donde los mayores terratenientes se oponen al inicio, mientras logran precios más altos por sus predios, centrando su interés solo en el aspecto económico. Una vez logrado el cometido, dejan de participar en las reuniones mostrando así que la exclusión y la vulnerabilidad también tienen una dimensión local, más íntima (Kabra, 2018). Nuevamente, se cumple con el proceso de participación, pero no se logra cumplir con el propósito de esta: la protección de los más vulnerables y la recolección de su punto de vista en el proceso.

El problema está en asumir que la comunidad es un grupo homogéneo, y no cientos o miles de personas con diferentes intereses y diferentes relaciones con la autoridad local. En este sentido, los impactos no son homogéneos, sino diversos y con diferentes trayectorias de desarrollo para cada familia, según su situación (Borras y Franco, 2013). Y esto dificulta, pero también enriquece los procesos de participación.

No todos los que van a ser reasentados aspiran a permanecer como agricultores rurales. Algunos de ellos preferirían abandonar la actividad agrícola porque les ha venido resultando onerosa o improductiva. Además, la diversificación (dentro del sistema agrícola, así como entre las ocupaciones familiares) es una estrategia de probada eficacia para la gestión del riesgo rural. Esto implicaría mejorar y refinar los procesos de participación atendiendo a las diferencias y no a la homogenización. “¿Debería la política de reasentamiento ser más perspicaz e identificar oportunidades para los primeros en adoptarla que puedan innovar y construir una nueva vida, en contraste con los que tienen más probabilidades de necesitar una red de seguridad? ¿Es correcto imponer a todos una única política de talla única y, de no ser así, qué sistema jurídico puede preverse que ofrezca un ‘menú’ de oportunidades sin crear desigualdad en cuanto a los derechos? Se podría dar a las personas reubicadas la posibilidad de elegir el tipo de paquete que desean, incluyendo una gama de opciones más amplia que la que se ofrece actualmente (Hay et al., 2019, p. 39).

Esta reflexión es pertinente, debido a que los campesinos actuales habitan en un contexto de nueva ruralidad, tal como lo analiza León:

Los estudios sobre migración han integrado la idea de “movilidad” más recientemente para dar cuenta de la mayor capacidad de movimiento y contacto entre poblaciones debido a las facilidades de transporte y comunicación entre espacios rurales y urbanos. Esta mayor interrelación, sumada a la relativa menor dependencia en actividades agrícolas y ganaderas en algunas zonas rurales, ha sido analizada por un conjunto de estudios sobre la denominada “nueva ruralidad”. En este contexto de migración estacional y permanente, todos los estudios reseñados indican que las minas se convierten en un factor de atracción hacia zonas rurales debido a las oportunidades de empleo, compensaciones y negocios que estos proyectos generan y las obras de infraestructura que los gobiernos locales ejecutan con los nuevos impuestos disponibles. Este regreso al lugar de origen ocasiona un conflicto político entre los residentes y los “retornantes” por la tenencia de derechos en las negociaciones por beneficios con las minas. (León, 2017, p. 14)

Atribuir, entonces, al reasentamiento la causa del cambio de actividad económica de la comunidad reubicada es inadecuado. Tampoco puede ser señalado del origen de que las generaciones más jóvenes ya no se identifiquen con la actividad agrícola. Antes de la llegada del proyecto minero ya ha habido migración en el territorio por parte de personas que buscan mejores fuentes de ingreso, y los que más se mueven son precisamente los más jóvenes.

Por eso, después de mirar todos estos aspectos, la realización de un proceso de reasentamiento de manera adecuada trasciende la voluntad de los diversos actores (comunidades, empresa minera, ONG, políticos locales). Su éxito o fracaso depende, en la mayor parte, en la fortaleza institucional del Estado. Como asevera Terminski: “En los países con formas de gobierno democráticas, una protección adecuada de los derechos de propiedad de los ciudadanos y una amplia participación de los ciudadanos como actores políticos, el reasentamiento inducido por el desarrollo no es un problema social visible” (Terminski, 2015, p. 33).

Es el Estado, desde su capacidad institucional, el que vela por que el reasentamiento se realice con absoluto respeto por los derechos humanos por parte de las empresas, especialmente de aquellas mineras que enarbolan el seguimiento de los estándares emanados al respecto por las Naciones Unidas (Ploeg y Vanclay, 2017).

9. Casos de reasentamiento en Colombia

El adelantamiento de procesos de reasentamiento en Colombia no es algo nuevo. Procesos como el de Guatavita y Guavio son ampliamente conocidos. Sin embargo, estos y otros casos similares tienen en común que, en ese entonces, las agencias multilaterales no habían desarrollado políticas de reasentamiento, el Estado colombiano no contaba con una base legal sólida, ni con políticas ni instituciones apropiadas para enfrentar y manejar tales procesos (Mejía Botero, 2000). Por eso, se presentarán algunos casos, para exponer la complejidad del reasentamiento y lo que ha pasado en estos.

9.1. Gramalote: reasentamiento por eventos naturales catastróficos

Por las fuertes lluvias que se presentaron a raíz del llamado fenómeno de La Niña, un deslizamiento ocurrido los días 16 y 17 de diciembre de 2010 destruyó el casco urbano del municipio de Gramalote, Norte de Santander. La emergencia se atendió de manera oportuna, evitando víctimas mortales. El reasentamiento fue incluido como uno de los proyectos prioritarios dentro del Plan Integral de Acción específico para el manejo de la emergencia generada por el fenómeno de La Niña 2010-2011. El municipio fue evacuado en su totalidad y sus habitantes, unas mil familias, distribuidos y atendidos en diferentes lugares. Una primera valoración técnica indicó que el casco urbano se encontraba en un sitio de alto riesgo no mitigable, por lo que no procedía su reconstrucción, aconsejando su traslado, ante lo cual el Gobierno Nacional hizo la declaratoria de desastre, desalojo y posterior demolición del antiguo casco urbano (Fondo Adaptación, s. f.).

Para superar la emergencia, atender a los damnificados y acompañar todo el proceso, se emitió el Decreto 1150 de 2011 (actualmente derogado), y se conformó la Comisión Intersectorial de apoyo a Gramalote, para darle continuidad al trabajo de construcción colectiva de la Mesa de Trabajo de Gramalote —creado por Decreto-Ley 4819 de 2010, como instrumento

para superar la crisis del fenómeno de La Niña—, conformada por la alcaldía, la gobernación de Norte de Santander, el concejo municipal, la parroquia, la personería municipal, un representante de la comunidad, un representante de las juntas de acción comunal, la Veeduría municipal y el Fondo Adaptación.

Durante los primeros cuatro años se hizo la selección del lote, así como la elaboración de diseños para el nuevo casco urbano, con la participación de las autoridades locales y las comunidades. El traslado de la cabecera municipal al sector de Miraflores se formalizó mediante la Ordenanza Departamental 002 del 27 de febrero de 2014 y la aprobación de la revisión excepcional del Esquema de Ordenamiento Territorial, por Acuerdo 019 del Concejo Municipal de octubre de 2014.

La metodología de formulación del plan de reasentamiento, adoptado en marzo de 2015, tuvo en cuenta otras experiencias de reasentamientos en el contexto nacional e internacional, las recomendaciones de expertos y académicos, datos de entrada como línea de base social, estudios de títulos de predios, así como el análisis del marco normativo y documentos de referencia, como las normas del IFC y del Banco Mundial (Minhacienda y Fondo Adaptación, 2015).

Los principios que orientaron la ejecución del Plan son: 1) *libre elección*: las familias afectadas optaron de manera voluntaria por el reasentamiento colectivo o la reubicación individual. La libertad de elección no incluyó aquella de permanecer en la zona afectada bajo riesgo de desastre; 2) *diversidad*: el proceso respeta la diversidad cultural, social y económica de las personas y hogares reasentados; 3) *participación*: las familias que hacen parte del proceso tienen derecho a participar en las decisiones concernientes al mismo (Ministerio de Hacienda y Fondo Adaptación, 2015).

El Plan de reasentamiento fue planteado como un plan integral que comprende no solamente la reposición de la vivienda e infraestructura perdidas, sino también del proyecto de vida, medios económicos de subsistencia y acompañamiento psicosocial de la población reasentada. Está estructurado en seis componentes: acceso a un hábitat sostenible y seguro; reconstrucción del tejido social para una comunidad resiliente; desarrollo económico con enfoque regional, integral y sostenible; gobernanza y fortalecimiento del gobierno local y mecanismos de comunicación efectiva y permanente, que tienen en cuenta tanto a la población desplazada como a

las comunidades receptoras. El plan comprende cuatro fases: 1) estructuración y pretraslado; 2) construcción de infraestructura y preparación para el traslado; 3) traslado; 4) postraslado (Ministerio de Hacienda et al., s. f.).

La fase de estructuración y pretraslado se diseñó en dos componentes: técnico y social. El componente técnico comprende la selección del área para el nuevo casco urbano, la habilitación del suelo y la elaboración del diseño urbano, tanto de viviendas como de infraestructura, así como los estudios necesarios para contratación de las obras.

El tema social comprende la atención inmediata de la población vulnerable, tanto a nivel económico como psicosocial, así como los estudios necesarios para su futuro traslado. En esta etapa se elaboró un censo socioeconómico detallado de la población afectada y se hizo un inventario de los predios del antiguo casco urbano.

La segunda fase —construcción de obras de infraestructura y preparación para el traslado— tuvo un componente técnico, esto es, la construcción de las obras de vivienda, infraestructura y la preparación para el traslado. El componente social se centró en la construcción de la IPS y del centro de servicios “Andrés Entrena Parra”, la formulación del plan de vida para cada familia reasentada, así como planes de emprendimiento económico. En cuanto a vivienda, se realizó el saneamiento jurídico de los títulos de propiedad y su transferencia al municipio, la asignación de viviendas a propietarios y los planes de vivienda para no propietarios.

El plan de vivienda incluye tres tipos de vivienda, uno de 70 metros cuadrados y un lote de 150 metros cuadrados, establecido para propietarios, un segundo de 50 metros cuadrados, como plan de vivienda para tenedores y arrendatarios y, finalmente, un plan de autoconstrucción, también para tenedores y población rural. En los trabajos de construcción se dio prioridad a la mano de obra de Gramalote, de acuerdo con el censo (Ministerio de Hacienda y Fondo Adaptación, 2015).

En cuanto a la fase de traslado, el componente técnico comprende la entrega de las obras a medida que se van culminando, la puesta en operación de los servicios públicos, así como de los servicios básicos sociales y económicos que viabilizan la residencia en el nuevo casco urbano. La finalización de la construcción de viviendas en sus tres modalidades se previó para esta etapa, pero el traslado se fue haciendo a medida que terminaron las obras.

El componente social incluye el trámite de escrituración y entrega de las viviendas, las actividades colectivas de traslado, la formulación e inicio de implementación de planes de vida comunitarios, incluyendo la elaboración de manuales de convivencia barrial, el montaje de emprendimientos en el nuevo casco urbano y demás servicios institucionales y sociales necesarios. El traslado al nuevo casco urbano se inició en 2017, cuando se entregaron las primeras casas, así como la infraestructura institucional (Fondo Adaptación, 2017).

Actualmente, el reasentamiento está en su última fase —postraslado—, que prevé un acompañamiento temporal, tanto a las autoridades como a la población, hasta verificar el cumplimiento del plan de reasentamiento, la construcción de tejido social y el restablecimiento adecuado de los medios económicos de subsistencia de los habitantes del municipio.

El componente técnico incluye el mejoramiento de la infraestructura vial terciaria y productiva del municipio, mientras que el componente social apunta a la consolidación de emprendimientos en el nuevo casco urbano, los planes vida familiares y comunitarios, así como la consolidación de la oferta de servicios sociales y económicos para la población.

En una evaluación que el Banco Mundial (2016) realizó de este proceso se identificaron varias lecciones aprendidas que fueron claves para el éxito que ha tenido el reasentamiento de Gramalote, en medio de algunas dificultades y retos. Los aspectos mencionados pasan por lo institucional, lo económico, lo comunitario y el proceso de relacionamiento.

La primera lección resaltada es que la definición de las estrategias de reactivación económica que permitan la generación de ingresos de la población es clave para la sostenibilidad del proceso. De ahí que uno de los tropiezos iniciales fue que las personas no tenían claridad de las posibilidades de ocupación y empleo, y el diseño de los programas al respecto tampoco eran claros para las personas. Una vez lograda la certeza, la resistencia de las personas disminuyó y se generaron ideas alrededor de proyectos productivos, ocupación y empleo, logrando así una perspectiva de aceptación a las nuevas situaciones del reasentamiento.

La segunda lección es de corte estratégico. El proceso de planeación de cada una de las fases del reasentamiento debe ser muy cuidadoso, para no incurrir en costos adicionales y en desfases muy amplios de tiempo durante la ejecución de la intervención. En efecto, las estimaciones económicas

iniciales, así como el cronograma planteado tuvo variaciones que hubieran podido identificarse si la planeación hubiera sido más detallada y cuidadosa, ya que se enfatizó tanto el aspecto de amenazas geológicas, que se pasaron por alto otros aspectos valorados por los actores sociales, como el de apropiación de nuevos espacios, réplica de espacios significativos existentes en el antiguo poblado, etc.

La tercera lección aprendida gira alrededor del relacionamiento. El ejercicio de encuentro y diálogo con la comunidad construyó vínculos de confianza de largo plazo, lo que permitió que, a pesar de los cambios de gobierno, el proceso de socialización con la comunidad se mantuviera sin mayores cambios, y no fuera aprovechado con fines políticos. No obstante, el relacionamiento interinstitucional es más complejo, porque había perspectivas y medidas, a veces dispares, que generaban escepticismo en la comunidad.

Por último, el estudio resalta la importancia de la caracterización inicial de la población, para ofrecer alternativas diferenciales. En el caso de Gramalote fue importante ofrecer alternativas a los habitantes que no eran propietarios o poseedores, como los arrendatarios, quienes generalmente deben salir sin garantía de encontrar unidad habitacional y, en tal medida, pueden sufrir afectaciones importantes a sus derechos fundamentales.

9.2. Corredor minero del Cesar: reasentamiento *ex post*

Este caso se trata de un reasentamiento ordenado por una autoridad ambiental, ante las quejas de las poblaciones asentadas en medio del corredor minero por la calidad del aire, reasentamiento que se está adelantando en la actualidad y que es responsabilidad de tres empresas de gran minería de carbón, minas que llevan ya mucho tiempo en operación, por lo que se trata de un caso más bien atípico que, además, ha tenido seguimiento por parte de ONG ambientales y de DD. HH., y un cubrimiento mediático muy crítico con los operadores obligados a este.

Por Resolución 0970 de 20 de mayo de 2010, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) ordenó el reasentamiento de las poblaciones Plan Bonito y El Hatillo del municipio de El Paso, y Boquerón, del municipio de la Jagua de Ibirico, Cesar, localizados en el área de influencia de las minas La Francia, El Descanso, Pribbenow (La Loma), Calenturitas, El

Hatillo, Cerrolargo y Proyecto de Integración Minera La Jagua. Estas explotaciones mineras corresponden a las empresas Drummond Ltd., Grupo Prodeco y Colombian Natural Resources (CNR), empresas que, por disposición de la autoridad ambiental, que fijó los porcentajes correspondientes a cada una, debieron asumir de manera mancomunada el traslado de las referidas poblaciones.

En uno de los considerandos, establece la resolución:

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, consciente de la problemática ambiental existente en el área minera del departamento del Cesar, ha venido emitiendo una serie de actos administrativos cuya finalidad es la de reducir los niveles de contaminación atmosférica de la zona mediante la aplicación de medidas ambientales tendientes a atenuar la emisión generada, lo cual ha permitido disminuir los niveles de contaminación en algunas de las zonas afectadas por la actividad minera; no obstante, en otras, estos niveles no han presentado modificaciones de importancia o se han incrementado. (Resolución 0970, 2010)

Adicionalmente, fijó un término de dos años, contados a partir de la aprobación del plan de reasentamiento, para el efectivo traslado de la población, estableciendo medidas provisionales de mejoramiento de calidad de vida, priorizando el traslado del asentamiento de Plan Bonito, en donde los niveles de contaminación resultaban críticos. Aunque la Resolución fue objeto de recursos de reposición, estos fueron resueltos por la Resolución 1525 de 5 de agosto de 2010, que confirmó lo decidido en esta (Resolución 1525, 2010).

Por otro lado, la Resolución fija los objetivos del reasentamiento:

(i) Generar mecanismos de información, comunicación, participación y concertación, para involucrar a la población impactada (directa y receptora), y a las autoridades locales y regionales, en todas las etapas del plan participativo de reasentamiento. (ii) Restituir los medios de producción y las actividades productivas de las comunidades afectadas, de acuerdo con las formas de tenencia, individual o colectiva (tierras, cultivos e infraestructura agraria).

(iii) Apoyar la consolidación de nuevas redes sociales, políticas, económicas y culturales a nivel vecinal, ínter vecinal y regional de las familias que deberán ser reasentadas. (iv) Diseñar un programa de atención a la población receptora, para minimizar el impacto potencial generado por la llegada de los nuevos pobladores. (Resolución 0970, 2010)

Los actos administrativos referidos anteriormente se profririeron con base en mediciones de calidad de aire realizadas en diversos puntos del área de influencia de las explotaciones mineras, sin contemplar un estudio epidemiológico más detallado o un censo de población afectada. La declaratoria tuvo un efecto de llegada de población no residente originalmente en los asentamientos, con altas expectativas respecto del proceso de reasentamiento (Mateus, 2018).

Este hecho supuso una dificultad añadida al proceso, siempre complejo, de trasladar poblaciones con arraigo en un territorio. La ruta metodológica seguida por las empresas responsables ha tenido los siguientes pasos: 1) fase de diagnóstico: incluye levantamiento topográfico, censo socioeconómico y conformación de espacios de diálogo; 2) fase de diseño y formulación del plan de reasentamiento: incluye un diseño preliminar de plan de acción de reasentamiento y un plan de transición, destinado a mejorar las condiciones sociales y económicas de la población a reasentar; 3) fase de validación y concertación del plan de reasentamiento PAR con las comunidades; 4) fase de implementación del PAR.

Dado que en los tres asentamientos a ser reubicados el proceso se ha venido realizando de manera independiente, se hará una descripción de la evolución y resultados de cada uno de ellos de forma separada.

9.3. Plan Bonito

Plan Bonito fue un asentamiento rural informal compuesto por 96 familias de escasos recursos. Desde las resoluciones del Ministerio de Ambiente se priorizó, por presentar los niveles de contaminación más altos, tanto por el polvillo de carbón, en especial en épocas de sequía, como por la vía de acceso no pavimentada y por las cocinas de leña que utilizaban, generando enfermedades pulmonares crónicas en los residentes. Es el único de los tres reasentamientos en que ya se ha realizado el traslado

físico. Sus pobladores optaron por un reasentamiento individual, que se realizó desde 2014, aunque todavía está vigente la última fase del proyecto, referente a la restitución de los medios de vida de las familias reasentadas.

El proceso podría resumirse en línea de tiempo, así:

2010. Ministerio de Ambiente ordena el reasentamiento.

2011. Se inició la fase de diagnóstico, a cargo de Fonade con interventoría de Cetec. Censo, levantamiento topográfico y espacios de diálogo social.

2012. Se suspendió el diálogo social por inconformidades de la comunidad. Se cambió el operador contratado para el proceso (Replan).

2013. Por alianza con la Universidad del Norte, que actuó como mediadora, se reanudaron los diálogos con la comunidad y se realizó el proceso de concertación, con acompañamiento psicosocial.

2014. Se constituyó un Equipo Técnico para el reasentamiento, se discutió y aprobó el PAR y se realizaron los traslados individuales de las familias.

2015. Se dio inicio al Plan de Restitución de medios de vida, vigente en la actualidad, que incluye capital semilla para emprendimientos, acompañamiento al adulto mayor, asistencia técnica y seguimiento a unidades de negocio y apoyo a la educación superior (Comunidad Plan Bonito, s. f.).

9.4. El Hatillo

Esta comunidad, compuesta por 196 familias rurales, presenta un alto grado de conflictividad asociada al reasentamiento, inconformidades que han contribuido a que el proceso se haya dilatado en el tiempo. Actualmente el PAR está en fase de implementación, con un plan de transición vigente.

En línea de tiempo, se resume el proceso de la siguiente manera:

2010. Ministerio de Ambiente ordena el reasentamiento.

2011. Se inició la fase de diagnóstico, a cargo de Fonade con interventoría de Cetec. Censo, levantamiento topográfico y espacios de diálogo social.

2012. Se cambió el operador (Replan). Se Conformaron espacios de diálogo social, se realizó el censo socioeconómico, el levantamiento topográfico y el primer borrador del PAR.

- 2013. Se dio inicio al Plan de Transición destinado a mejorar las condiciones de vida de la población.
- 2014. Conformación y puesta en marcha del Equipo técnico de reasentamiento.
- 2015. Se iniciaron los Proyectos productivos en alianza con PNUD, desarrollando competencias para la generación de ingresos, se cambió el operador al actual socYA y se actualizó el censo.
- 2016. El operador socYA elaboró el proyecto del Plan de Reasentamiento para presentar a la comunidad para su validación.
- 2017. Proceso de Concertación del PAR.
- 2018. Refrendación y firma del PAR.
- 2019. Comienza a implementarse el PAR.

De acuerdo con el informe de avance presentado por el operador a la ANLA en diciembre de 2019, entre los avances del proceso aparecen: 187 familias, de 196, han aceptado el resultado de los avalúos y marco de compensaciones. 184 familias cerraron el proceso de información y consulta, de las cuales 96 optaron por el reasentamiento colectivo y 88 por el reasentamiento individual; 175 de las 184 familias que cerraron el proceso de información y consulta han firmado el contrato de restablecimiento integral de sus condiciones de vida, dando continuidad al proceso de acompañamiento integral. De las 175 familias/hogares que han firmado contrato de transacción, 93 optaron por reasentamiento colectivo y 82 por reasentamiento individual, se han adelantado avalúos para la selección del predio para reasentamiento colectivo, negociación que continúa en la actualidad. En cuanto a los traslados individuales, durante el cuarto trimestre del 2019 el Operador brindó toda la asesoría y el acompañamiento a cuarenta (40) familias/hogares para la búsqueda de predios definidos como opción para el restablecimiento de su hábitat, de un total de ochenta y dos (82) familias/hogares que han optado por esta modalidad de reasentamiento (Drummond et al., 2019).

9.5. Boquerón

Boquerón es un corregimiento del municipio de La Jagua de Ibirico, compuesto por 562 familias. Tiene una infraestructura urbana más

estructurada, con un centro educativo, espacios institucionales y espacio público, así como servicios esenciales. Ha sido el proceso más complejo de los tres, tanto porque comporta la reubicación de un mayor número de personas como por la conflictividad social del mismo, asociada al reasentamiento, que ha llevado a frecuentes rupturas de los espacios de diálogo. Este proceso es el que presenta un cronograma más atrasado, ya que solamente se ha llegado a establecer el censo socioeconómico necesario para identificar a los beneficiarios.

En línea de tiempo, el proceso puede resumirse como sigue:

2010. Ministerio de Ambiente ordena el reasentamiento.

2011. Se inició la fase de diagnóstico, a cargo de Fonade con interventoría de Cetec. Censo, levantamiento topográfico y espacios de diálogo social.

2012. Se consolidan espacios de diálogos. Se cambia al operador (Replan).

2013. Desacuerdo por el polígono del levantamiento topográfico provoca ruptura del diálogo con la comunidad.

2014. Se conforma el Equipo Técnico para el reasentamiento y se hace la concertación sobre el área afectada del levantamiento topográfico.

2015. Se cambia el operador a SOCYA y se continúa el levantamiento topográfico.

2016. Nueva interrupción de diálogos, por desacuerdos sobre levantamiento topográfico.

2017. Se presenta una crisis de representatividad de la comunidad, que desconoce a sus representantes. El diálogo se suspende hasta que los representantes de la comunidad son tarificados.

2018. Cierre de ruta metodológica para la implementación del censo.

2019. Aplicación de censo.

De acuerdo con el informe del avance presentado conjuntamente por las empresas responsables a la ANLA, a diciembre de 2019, se viene desarrollando el Plan de Intervención social conjunto, se ha dado apoyo a la educación y al emprendimiento, así como al programa socioambiental “Boquerón Recicla” (Drummond et al., 2019).

9.6. Lecciones aprendidas de estos procesos

Al analizar los casos anteriores, entendiendo que es un proceso que se está dando todavía, se puede hacer un balance en forma de lecciones aprendidas que está dejando lo acontecido hasta ahora. Estas lecciones se respaldan con datos identificados en otros procesos evaluados e investigados y que aparecen también en estos casos.

La primera lección es el enfoque diferencial que hay que tener para el diseño de acciones tendientes al restablecimiento de condiciones de vida-subsistencia, especialmente en mujeres y jóvenes. En culturas profundamente patriarcales, mujeres y jóvenes expresan expectativas de mejoramiento de sus condiciones, que no habían sido posibles en el lugar de procedencia, lo cual les genera mayor bienestar psicológico, al tener un mayor empoderamiento (García Uribe, 2015). Sin embargo, este empoderamiento hay que trabajarlo también con los hombres, para que asuman esta dinámica desde la perspectiva del apoyo y la colaboración mutuas, y no traten de imponerse desde una supuesta autoridad que el varón tiene sobre la mujer.

Derivado de lo anterior, el enfoque diferencial también tiene que ver con los roles y funciones que existen en la población, previa al reasentamiento, que hará que tenga visiones diferentes sobre las valoraciones positivas o negativas del proceso. A pesar de la homogeneidad cultural, generalmente los comerciantes tienen expectativas favorables hacia el reasentamiento, mientras los agricultores manifiestan mayor resistencia ante la posibilidad de pérdida o desmejora de tierras de cultivo o de ganadería (Tumbama, 2019). Sin unas conversaciones comunitarias explícitas sobre los impactos percibidos, se fraguan divisiones al interior de la comunidad, culpando al reasentamiento como causa de tales divisiones, siendo inconscientes de que lo que subyace son diversos proyectos de vida, que son previos al proceso (Stürner y Bendel, 2019).

Otra lección muy importante es la que tiene que ver con los paradigmas de comunicación que se ponen en juego en estos procesos (Marí Sáez, 2020). Especialmente para las autoridades, el imaginario de comunicación dominante es el de “transmisión de información”. Se entiende que tengan que ejercer control y seguimiento al reasentamiento, pero terminan preocupándose por datos y listados de verificación, que llevan

a que muchas de las conversaciones se pierdan en el laberinto de datos, y no en los horizontes de sentido que las personas van construyendo con el equipo social que acompaña el reasentamiento.

Pero, por el otro lado, se da un paradigma de comunicación “persuasiva”, especialmente en personal de la compañía minera y de algunos grupos poblacionales. El objetivo de este esquema de comunicación es el de posicionamiento de mensajes para convencer. La empresa insiste en que se debe insistir en las bondades que tiene el reasentamiento para todos. Y algunos grupos poblacionales, desde una mirada instrumental de la comunicación, buscan captar mayores recursos para sus propósitos futuros, ya sea de proyectos productivos, o mayor valor por sus predios, entre otros.

Entre esos dos esquemas de comunicación, las comunidades y parte del personal de la empresa tienen un modelo de comunicación para el “desarrollo”, es decir, el privilegio de acciones de encuentro y flujo de mensajes que buscan la transformación de la realidad (en este caso para mejor), mostrando al mismo tiempo tensiones y temores que emergen en un diálogo respetuoso y abierto sobre las consecuencias del reasentamiento, tanto positivos como negativos.

La lección aprendida respecto de la comunicación en estos procesos de reasentamiento es la de privilegiar la comunicación para el desarrollo, sin desconocer la existencia de los otros paradigmas comunicacionales, que hay que atenderlos de manera funcional, pero no enfatizarlos, para lograr el horizonte que se quiere con el reasentamiento: que las condiciones de vida de las comunidades mejoren tras el proceso (Smyth et al., 2015).

10. Proyecto de reasentamiento: proyecto Soto Norte

Para el caso específico de proyectos auríferos, en Colombia no se ha dado proceso de reasentamiento, porque en oro no ha habido un proyecto de gran minería, ni tampoco se ha dado la necesidad de hacerlo. Sin embargo, en el caso del proyecto Soto Norte, operado por Minesa, en su Estudio de Impacto Ambiental (EIA) identifican una población potencialmente sujeta a reasentamiento. Este documento es presentado en 2019 y, ante observaciones y requerimientos que hace la autoridad ambiental, fue presentado nuevamente en 2020 al ANLA.

En dicho documento, Minesa expresa:

Siendo el traslado involuntario de población un impacto significativo, Minesa ha concebido el proyecto Soto Norte considerando la menor área de huella optimizando tanto la huella física como la ambiental; lo cual limita el área requerida y con ello el número de unidades sociales impactadas por traslado involuntario por el Proyecto Explotación Subterránea de Minerales Auroargentíferos “Soto Norte” (con respecto a otros proyectos mineros), como consecuencia de la ubicación de la infraestructura en zonas que se caracterizan por la baja densidad poblacional rural, el patrón de poblamiento predominantemente disperso, el carácter ausentista de parte de los propietarios de predios y la falta de coincidencia de las zonas a intervenir con zonas de uso intensivo agrícola o con núcleos poblados o caseríos consolidados.

El área de análisis de la población potencialmente sujeto de traslado, corresponde a un conjunto de 175 predios en los que están proyectadas las distintas obras e intervenciones, superficiales y subterráneas; de éstos, se identifica que 91 de ellos son requeridos para el desarrollo en virtud de obras de infraestructura del Proyecto o afectación ambiental no mitigable. Es pertinente aclarar que, de los 91 predios, dos son propiedad de Minesa y en ellos no se identifican unidades sociales relacionadas, por lo que el análisis se concreta en 89 predios con 220 unidades sociales asociadas a éstos y 26 trabajadores no residentes. (Minesa, 2020, §5.3.9)

Lo interesante de este caso es que refleja lo expresado anteriormente: la decisión del reasentamiento ha sido tomada después de haber considerado otras opciones, y sin querer llegar a la expropiación. El propósito es, entonces, minimizar la huella física del proyecto, pero, dada la necesidad de realizar obras en parte de los predios que hoy están habitados, se hace una caracterización de la población, a través de un censo, el cual arroja, entre otros, los siguientes datos: familias nucleares biparentales (36%); familias monoparentales (7%), familias extensas (20%) y familias unipersonales (personas solas) el 22%. Adicionalmente, la tenencia de los predios es

mayoritariamente de propiedad o posesión (90%), mientras el 10% es de tenencia como arrendatarios, mayordomos, cuidanderos (Minesa, 2020, §5.3.9.1; §5.3.9.6).

Esa caracterización también tiene en cuenta lo socioeconómico, encontrando que la producción agropecuaria corresponde a una economía de autoconsumo y la incorporación de maquinaria, equipos e infraestructura, al igual que la aplicación de tecnologías para la producción se limita al emplazamiento de instalaciones rudimentarias, galpones, estanques, corrales y trapiches, acompañados de herramientas manuales como guadañas, pica pastos y compresores. En casos muy excepcionales, se utiliza un tractor para labores complementarias. El escaso uso de equipos y de infraestructuras, y la baja tecnología utilizada en los sectores agrícola y pecuario se traduce en niveles bajos de productividad, bajos rendimientos, escasa diversificación y escasa utilización de mano de obra contratada, la cual es predominantemente de tipo familiar (Minesa, 2020, §5.3.9.9).

Además de los anteriores factores (y otros datos sociodemográficos como la edad, nivel educativo alcanzado, relaciones de parentesco, etc.), se caracteriza también la infraestructura comunitaria existente, organizaciones sociales, programas de servicios sociales que se están desarrollando, aspectos culturales, así como vulnerabilidades (tales como discapacidad o condiciones de salud especiales; nivel de alfabetismo; inasistencia escolar; dependencia económica del jefe de hogar, entre otros) y expectativas ante la posibilidad del reasentamiento (entre las que sobresalen la de obtener el pago de un buen precio por los predios; empleos permanentes para los miembros de la vereda; proyectos productivos, apoyo psicosocial, entre otros). Con esta información se elaboran matrices, para acordar cómo se gestionarán las vulnerabilidades más relevantes (Minesa, 2020, §5.3.118; §5.3.122).

Lo que busca la propuesta de reasentamiento de Minesa es: 1) el restablecimiento de condiciones de vida existentes de la población a reasentar: vivienda, acceso a servicios públicos y sociales, relaciones sociales y bienes comunitarios; 2) el restablecimiento de fuentes de ingresos y actividades económicas de las unidades sociales a trasladar; 3) la incorporación de la población trasladada a su nuevo territorio; 4) la preservación de la memoria

histórica y fortalecimiento de las prácticas culturales en las familias cuya opción sea la del reasentamiento (Minesa, 2020a).

Para lograr esos propósitos, se han diseñado siete subprogramas: 1) adquisición y restablecimiento de propiedades; 2) restablecimiento de actividades económicas; 3) adaptación al nuevo entorno y fortalecimiento de redes sociales; 4) relacionamiento, comunicación y participación; 5) acompañamiento a población en condición de vulnerabilidad; 6) población que se queda residiendo en el área de influencia del traslado involuntario; 7) población receptora (Minesa, 2020a).

La información elaborada por la compañía recoge muchos de los elementos que se trabajaron en los apartados anteriores. En ese sentido, hay una articulación entre aspectos cuantitativos y cualitativos, así como el abordaje directo a las personas que podrían ser reasentadas, recogiendo algunas de sus percepciones en torno a los riesgos y a las que tienen sobre el proceso. Por supuesto que es una propuesta, pero, como hoja de ruta inicial, está mostrando lo que ya se ha dicho: que el reasentamiento por parte de una compañía minera no se hace a la ligera, ni improvisadamente, sino que se siguen unos parámetros.

Por otro lado, muestra también que la institucionalidad es fundamental. Mientras la autoridad correspondiente no conceda la licencia ambiental, Minesa no podrá realizar el reasentamiento, lo que no significa que se paraliza. Lo que se hace es continuar fortaleciendo el relacionamiento y construyendo confianza con las comunidades, para trazar cursos de acción que ayuden a que el reasentamiento se haga de la mejor manera posible, y genere la menor intensidad de crisis que se pueda entre las personas que podrían ser reasentadas.

El otro caso, el del corredor minero del Cesar, pone de manifiesto cómo el reasentamiento es una medida orientada a la protección de las personas cuando estas se encuentran en situación de riesgo o de alta vulnerabilidad. Contrario a lo que se afirma sobre las consecuencias terribles del reasentamiento, el papel de las entidades del Estado es crucial. Al ejercer autoridad, participan y vigilan el proceso, solicitando informes de avance, así como visitas a las comunidades, para corroborar que el reasentamiento se esté realizando, siguiendo la normatividad colombiana y las normas y guías internacionales al respecto.

Conclusiones

Cada vez hay mayor producción académica alrededor del reasentamiento, buscando cómo mejorar el proceso, especialmente para que las comunidades que son objeto de este camino salgan lo mejor libradas posibles, porque el reasentamiento no es algo deseable: es un mecanismo de última instancia. Por eso, siempre hay que estar alertas de que las compañías mineras, en este caso, no olviden eso, para que no sea considerado como algo normal e inevitable, como un costo más del desarrollo, que quienes terminan pagándolo son las comunidades que se reubican (Hay et al., 2019).

Por eso, para que el reasentamiento no pierda su norte, debe tener articulado tres aspectos, que son mencionados en la mayoría de las investigaciones que se hacen sobre casos de reasentamientos ya realizados. Dichos componentes son: 1) el control del proceso de planificación, 2) el enfoque de la remediación, y 3) el seguimiento y rendición de cuentas del proceso (Owen y Kemp, 2016). La planeación es fundamental para tratar de minimizar los daños y gestionar adecuadamente los riesgos; el enfoque de remediación le agrega un plus a la planeación: el cuidado y respeto de los derechos humanos de los reasentados; y, la rendición de cuentas genera transparencia y concreta la responsabilidad que pregonan la mayoría de las empresas mineras. Si esa responsabilidad de las compañías mineras está presente a lo largo del ciclo de vida del proyecto minero que está realizando, ganan y mantienen legitimidad. Dado que la actividad minera es dependiente de los precios del mercado, y este es volátil, la decisión del reasentamiento puede darse en cualquier parte del ciclo del proyecto, lo cual aumenta la complejidad del proceso, ya que puede acontecer sobre comunidades adyacentes a los proyectos mineros, en donde algunas veces los titulares han ignorado a estas comunidades y ahora acuden a ellas para proponerles ser reasentadas, con un discurso de progreso y mejora de condiciones de vida que difícilmente va a ser creído, porque no han sido vecinos ejemplares de estas comunidades, y ven más riesgos que beneficios a la hora de aceptar ser movidas del lugar que habitan (Owen y Kemp, 2017).

El concepto de “reasentamiento involuntario” se ha vuelto insuficiente y no refleja la complejidad del proceso en la industria minera. Por eso, cada vez está tomando más fuerza en la producción académica el concepto

de “reasentamiento inducido por la actividad minera” para poder mostrar las particularidades que tiene el sector minero en el avance de los proyectos, y evitar, a su vez, desgastarse en discusiones sobre el desarrollo, especialmente propiciada por grupos ambientalistas antiglobalización (Kemp et al., 2017).

A pesar de las aseveraciones que circulan en contra de los procesos de reasentamiento en Colombia, cada vez hay una mejor comprensión del mecanismo, una institucionalidad dedicada a vigilar y hacerle control a todas las etapas del proceso y aplicar correctivos cuando las personas y comunidades siguen sufriendo las consecuencias negativas de la aplicación del mecanismo (Cernea y Maldonado, 2018).

Referencias

- Adam, A. B., Owen, J. R. y Kemp, D. (2015). Households, Livelihoods and Mining-induced Displacement and Resettlement. *The Extractive Industries and Society*, 2, 581-589.
- Askland, H. H. (2018). A dying village: Mining and the experiential condition of displacement. *Extractive Industries and Society*, 5(2), 230-236.
- Banco Mundial. (2001). *Manual de Operaciones. Políticas Operacionales OP 4.12*. Banco Mundial.
- Borras, S. M. y Franco, J. C. (2013). Global land grabbing and political reactions “from below”. *Third World Quarterly*, 34(9), 1723-1747.
- Castro-Buitrago, E. y Vélez Echeverri, J. (2018). Procesos de reasentamiento en Colombia: ¿una medida de adaptación y protección de derechos humanos de las víctimas del cambio climático? *Vniversitas*, 67(136), 1-23.
- Cernea, M. M. (2015). Landmarks in development: The introduction of social analysis. En S. Price y K. Robinson (Eds.), *Making a Difference?: Social Assessment Policy and Praxis and Its Emergence in China* (pp. 35-59). Nueva York: Berghahn Books.
- Cernea, M. M. y Maldonado, J. K. (Eds.). (2018). *Challenging the Prevailing Paradigm of Displacement and Resettlement: Risks, Impoverishment, Legacies, Solutions*. Londres: Routledge.
- CFI (2012). *Normas de Desempeño sobre Sostenibilidad Ambiental y Social*. IFC.
- Comunidad Plan Bonito. (s. f.). Reasentamientos Cesar. Recuperado de <https://reasentamientoscesar.com/comunidades/plan-bonito>

- Congreso de la República de Colombia. Constitución Política de Colombia (1991).
- Congreso de la República de Colombia. Ley 9 de 1989. “Por la cual se dictan normas sobre planes de desarrollo municipal, compraventa y expropiación de bienes y se dictan otras disposiciones”.
- Congreso de la República de Colombia. Ley 685 (2001). “Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones”.
- Congreso de la República de Colombia. Ley 1448 (2011). “Por la cual se dictan medidas de atención, asistencia y reparación integral a las víctimas del conflicto armado interno y se dictan otras disposiciones”.
- Congreso de la República de Colombia. Ley 1523 (2012). “Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones”.
- Corte Constitucional de Colombia. Sentencia C-153, (1994).
- Corte Constitucional de Colombia. Sentencia T-617, (1995).
- Corte Constitucional de Colombia. Sentencia T-025, (2011).
- Davidov, V. y Nelson, I. L. (2016). Introduction: It’s about time: Temporality as a lens for NGO studies. *Critique of Anthropology*, 36(1), 3-12.
- Drummond, Prodeco y CNR. (2019). *Reasentamiento corredor minero del Cesar. Informe Trimestral: Octubre-diciembre 2019*.
- Fondo Adaptación. (s. f.). *Gramalote*. Fondo Adaptación.
- Fondo Adaptación. (2017). *Regresamos a Gramalote*. https://storage.googleapis.com/fnad-www-storage/images/Gramalote_web/Presentacion_Marzo2017.pdf
- García Uribe, K. (2015). *Sentido de comunidad y bienestar psicológico de mujeres en situación de reasentamiento urbano: el programa de las mil viviendas gratis en Villas de San Pablo-Barranquilla*. Universidad del Norte, División de Humanidades y Ciencias Sociales, Maestría en Desarrollo Social. Barranquilla, Colombia.
- González, P. C. (2020). Desplazamiento forzado por conflicto armado: una década de investigación en el Eje Cafetero. *Análisis Jurídico-Político*, 1(2), 137-147.
- Hammar, A. (2016). The Concept and Paradoxes of Displacement. En K. Havnevik, T. Oestigaard, E. Tobisson y T. Virtanen (Eds.), *Framing African development: Challenging concepts* (pp. 111-134). Leiden: Brill.

- Hay, M., Skinner, J. y Norton, A. (2019). *Dam-Induced Displacement and Resettlement: A Literature Review*. The University of Manchester.
- Hernández, E. (2018). Minería y desplazamiento: el caso de la multinacional Cerrejón en Hatonuevo, La Guajira, Colombia (2000-2010), “Nuestra tierra es nuestra vida”. *Ciencia Política*, 13(26), 97-125. <https://doi.org/10.15446/cp.v13n26.68300>
- Hervé Huamaní, B. (2017). El reasentamiento en contexto minero. Entre la sugestión y la imposición de un nuevo orden. *Debates en Sociología*, 44, 31-65.
- Jessee, N. (2020). Community Resettlement in Louisiana: Learning from Histories of Horror and Hope. En S. Laska (Ed.), *Louisiana's Response to Extreme Weather. Extreme Weather and Society* (pp. 147-184). Springer, Cham.
- Kabra, A. (2018). Displacement, resettlement, and livelihood restoration: Safeguard standards in practice. *Development in Practice*, 28(2), 269-279.
- Kabra, A. y Mahalwal, S. (2014). Impact of conservation-induced displacement on host community livelihoods: Complicating the DIDR narratives. *Land Use Policy*, 41, 217-224.
- Kemp, D., Owen, J. R. y Collins, N. (2017). Global perspectives on the state of resettlement practice in mining. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 35(1), 22-33.
- Korah, P. I., Nunbogu, A. M., Cobbinah, P. B. y Akanbang, B. A. (2019). Analysis of livelihood issues in resettlement mining communities in Ghana. *Resources Policy*, 63, N/A. <https://doi.org/10.1016/j.resour-pol.2019.101431>
- León, C. (2017). Reasentamiento de poblaciones en el Perú por proyectos mineros y de infraestructura: diálogo entre prácticas y teoría social. *Debates en Sociología*, 44, 5-30.
- Marí Sáez, V. M. (2020). Lessons on communication, development, and evaluation from a Freirean perspective. *Development in Practice*. <https://doi.org/10.1080/09614524.2020.1755232>
- Mateus, R. (2018, noviembre 20). *Entrevista Hatillo* [Mp3].
- Mejía Botero, M. C. (2000). Introducción: la experiencia colombiana en reasentamiento. En W. Partridge, *Reasentamiento en Colombia* (pp. 13-34). Banco Mundial.

- Mello, S.J., A. de. (1982). *El canto del pájaro*. Sal Terrae.
- Minesa. (2020a). *Restablecimiento Integral de Condiciones de Vida: Nuestra Familia – Proyecto de Vida Integral*.
- Minesa. (2020b). *Términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental —EIA— Proyecto de explotación subterránea de minerales auroargentíferos «Soto Norte»*.
- Ministerio de Hacienda y Fondo Adaptación. (2015). *Plan de reasentamiento de la población habitante del casco urbano de Gramalote*. <http://storage.googleapis.com/fnad-www-storage/images/macroyectos/PlanReasentamientoGramalote%20VF%2005-05-15.pdf>
- Ministerio de Hacienda, Fondo Adaptación y Aecom. (s. f.). *Cartilla. Plan de Reasentamiento del casco urbano de Gramalote*. Recuperado de http://storage.googleapis.com/fnad-www-storage/images/Gramalote_web/CARTILLA%20PLAN%20DE%20REASENTAMIENTODEL%20CASCO%20URBANO%20DE%20GRAMALOTE.pdf
- Moomen, A.-W., Dewan, A. y Corner, R. (2016). Landscape assessment for sustainable resettlement of potentially displaced communities in Ghana's emerging northwest gold province. *Journal of Cleaner Production*, 133, 701-711.
- Muggah, R. (2015). The Invisible Displaced: A Unified Conceptualization of Population Displacement in Brazil. *Journal of Refugee Studies*, 28(2), 222-237.
- Nikuze, A., Sliuzas, R., Flacke, J. y Maarseveen, M. van. (2019). Livelihood impacts of displacement and resettlement on informal households. A case study from Kigali, Rwanda. *Habitat International*, 86, 38-47.
- Owen, J. y Kemp, D. (2015). Mining-induced displacement and resettlement: A critical appraisal. *Journal of Cleaner Production*, 87, 478-488.
- Owen, J. y Kemp, D. (2017). *Extractive Relations: Countervailing Power and the Global Mining Industry*. Greenleaf Publishing.
- Owen, J. R. y Kemp, D. (2016). Can planning safeguard against mining and resettlement risks? *Journal of Cleaner Production*, 133, 1227-1234.
- Penz, P., Drydyk, J. y Bose, P. (2011). *Displacement by development: Ethics, rights and responsibilities*. Cambridge University Press.

- Ploeg, L. van der y Vanclay, F. (2017). A human rights based approach to project induced displacement and resettlement. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 35(1), 34-52.
- Price, S. (2015). A no-displacement option? Rights, risks and negotiated settlement in development displacement. *Development in Practice*, 25(5), 673-685.
- Ramsay, R. B. (2017). *Disturbance preceding displacement: Development practice in preparation for mining and resettlement* [Tesis doctoral]. The University of Queensland.
- República de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 0970 de 20 de mayo de 2010.
- República de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Resolución 1525 de 5 de agosto de 2010.
- Rogers, S. y Wilmsen, B. (2019). Towards a critical geography of resettlement. *Progress in Human Geography*, 44(2), 256-275. <https://doi.org/10.1177/0309132518824659>
- Satiroglu, I. y Choi, N. (2015). *Development-Induced Displacement and Resettlement. New perspectives on persisting problems*. Londres: Routledge.
- Scudder, T. y Colson, E. (1982). From Welfare to Development: A Conceptual Framework for the Analysis of Dislocated People. En A. Hansen y A. Oliver-Smith (Eds.), *Involuntary Migration And Resettlement: The Problems and Responses of Dislocated People* (pp. 267-287). Londres: Routledge.
- Smyth, E., Steyn, M., Esteves, A. M., Franks, D. M. y Vaz, K. (2015). Five 'big' issues for land access, resettlement and livelihood restoration practice: Findings of an international symposium. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 33(3), 220-225.
- Staupe-Delgado, R. (2019). Can Community Resettlement be Considered a Resilient Move? Insights from a Slow-Onset Disaster in the Colombian Andes. *The Journal of Development Studies*, 56(5), 1-13. <https://doi.org/10.1080/00220388.2019.1626836>
- Stürner, J. y Bendel, P. (2019). *Valuing Local Ownership: Refugees and Municipalities as Actors in the Search for Sustainable Solutions to Displacement*. FAU University Press.

- Tabé, T. (2019). Climate Change Migration and Displacement: Learning from Past Relocations in the Pacific. *Social Sciences*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/socsci8070218>
- Terminski, B. (2015). *Development-Induced Displacement and Resettlement: Causes, Consequences, and Socio-Legal Context [Desplazamiento y reasentamiento inducidos por el desarrollo: Causas, consecuencias y contexto legal]*. Stuttgart: Ibidem-Verlag.
- Tumbama, L. (2019). *An exploration of lived experiences of 11 resettled families in Mazabuka district, Zambia, by a Nickel mine project*. [Master of Philosophy specializing in Sustainable Mineral Resource Development]. University of Cape Town.
- UNGRD, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2015). *Marco de política de reasentamiento. Plan todos somos pacífico Tumaco y Guapi*. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- Vásquez Santamaría, J. E. (2019). Reasentamiento y reubicación: Supuestos por regular un país donde sobran las normas. *Jangwa Pana: Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 18(2), 277-303.
- Wang, H., Shi, G., Zhang, R., Xu, J. y Shangguan, Z. (2019). Risk perceptions and mining-induced displacement and resettlement: A case study from Anhui Province, China. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/14615517.2019.1684082>
- Wiegink, N. (2018). Imagining booms and busts: Conflicting temporalities and the extraction-‘development’ nexus in Mozambique. *The Extractive Industries and Society*, 5(2), 245-252.
- Wilmsen, B. y Wang, M. (2015). Voluntary and involuntary resettlement in China: A false dichotomy? *Development in Practice*, 25(5), 612-627.
- Wilson, S. A. (2019). Mining-induced displacement and resettlement: The case of rutile mining communities in Sierra Leone. *Journal of Sustainable Mining*, 18, 67-76.
- Zibechi, R. (2014). El estado de excepción como paradigma político del extractivismo. En C. Composto y M. L. Navarro, (Eds.), *Territorios en disputa. Despojo capitalista, luchas en defensa de los bienes comunes naturales y alternativas emancipatorias para América Latina* (pp. 76-88). México D.F.: Bajo Tierra Ediciones.

Capítulo 9

Beneficios económicos de la minería de oro en Colombia

Tomás González^{*}
Álvaro Ponce-Muriel^{**}
Daniela Escobar^{***}
Patricia Gamba^{****}

Resumen

La conveniencia de desarrollar en el país proyectos auríferos a nivel industrial suele ser cuestionada argumentando que sus escasos beneficios no compensan sus potenciales impactos negativos. Frente a este tipo de opiniones, en el presente capítulo se analizan el ciclo y los impactos económicos de esta clase de proyectos, su contribución a las finanzas públicas y las usuales prácticas empresariales en materia de responsabilidad social. En tal sentido,

* Economista, Ph.D. en Economía, exministro de Minas y Energía. EConcept y profesor de Economía Energética de la Universidad de los Andes. Correo electrónico: t.gonzalez22@uniandes.edu.co

** Geólogo consultor y analista sectorial. Correo electrónico: poncemuriel@gmail.com

*** Economista, máster en Economía. EConcept y Universidad de los Andes. Correo electrónico: d.escobar12@uniandes.edu.co

**** Economista, magíster en ciencias económicas y especialista en Análisis, Gestión y Resolución de Conflictos Socioambientales. Experiencia en planeación y diseño de políticas públicas y en iniciativas de buena gobernanza y transparencia del sector minero-energético colombiano. Correo electrónico: gpatricia.gamba@gmail.com

se examinan las cifras de la última década (2009-2019) de los principales indicadores macroeconómicos (PIB, exportaciones, inversión extranjera, pagos de regalías e impuestos y generación de empleo) asociados a la minería aurífera en general y a la producción industrial de oro en particular. A la fecha, son cinco las empresas que vienen produciendo oro a nivel industrial y su participación agregada en la producción total nacional registra durante los últimos diez años una tendencia creciente, al pasar del 6,5% en 2010 al 31,0% en 2019. También en el presente se conoce de cinco proyectos de producción industrial de oro (como producto principal o accesorio) que podrían entrar en operación en algún momento de la presente década. Para tener una apreciación integral de lo que podrían ser las contribuciones de estos proyectos, se utilizó una metodología que incorpora al cálculo tanto la aleatoriedad propia de las variables que las determinan como el hecho de que ellas interactúan simultáneamente a lo largo del horizonte de análisis. Las estimaciones muestran que en la próxima década la producción industrial de oro en Colombia debería estar entre 5,44 y 8,24 millones de onzas, con unas contribuciones fiscales anuales (correspondientes a impuesto de renta, IVA, ICA y regalías) que oscilarían, a precios de hoy, entre 1,6 billones y 2,97 billones de pesos.

Palabras clave: oro Colombia, minería industrial, aporte económico, proyecciones.

Introducción

Es común que en las discusiones sobre la conveniencia de la minería de oro en el país se argumente que los beneficios económicos que genera son muy bajos en comparación con sus potenciales impactos negativos. De acuerdo con esta visión, las contribuciones fiscales y los bajos niveles de empleo serían insuficientes para compensar los efectos adversos de los proyectos sobre el ambiente y las comunidades, y esto debería ser por lo tanto una razón para oponerse a ellos.

Infortunadamente, y más allá de evidencia anecdótica y noticias asiladas, es difícil encontrar en Colombia información sistemática y adecuadamente construida para caracterizar las percepciones sobre la minería. La Brújula Minera (BM) —un proyecto anual de medición de

opinión pública sobre el sector que comenzó en 2014— es una excepción notable. En ella puede verse que efectivamente hay percepciones críticas a la minería como las mencionadas, y que estas varían de acuerdo con los niveles de información e influencia de los ciudadanos.

Así por ejemplo, la mitad de los encuestados en la última medición¹ cree que la minería es el sector que más afectaciones genera al medio ambiente, tres veces más personas en los municipios mineros que en los no mineros creen que los recursos de las regalías van a financiar la corrupción y no la inversión social, y casi el 40% de la opinión pública quiere que la minería sea una actividad prohibida en todo el territorio nacional.

A esto se suma que apenas una cuarta parte de los funcionarios públicos entrevistados cree que las empresas saben comunicar los proyectos a sus grupos de interés, que solo la tercera parte de los líderes de opinión tiene un conocimiento significativo de la minería y que menos del 30% del público en general tiene confianza en las instituciones y empresas mineras². Aun así, llama la atención que el 57% de la opinión pública general tenga una imagen positiva —aunque decreciente en los últimos cinco años— de la minería, lo mismo que el 75% de los líderes de opinión.

El propósito de este capítulo es examinar de manera objetiva los beneficios económicos que trae la minería de oro en Colombia. Se trata de establecer —y dimensionar— su magnitud de manera que sirvan de punto de referencia para contrastar las percepciones y determinar hasta qué punto ellas son consistentes con las cifras que arroja la actividad³.

Para ello el capítulo consta de siete secciones. La primera corresponde a esta introducción; la segunda y la tercera explican, respectivamente, el ciclo y los impactos económicos de los proyectos auríferos; la cuarta revisa prácticas empresariales en materia de responsabilidad social para ilustrar el tipo de acciones que en estas áreas toman las empresas responsables de los

¹ Medición realizada entre el 18 de enero y 9 de marzo de 2019, que incluyó 2400 encuestas en municipios mineros y no mineros del país, así como entrevistas a 172 líderes de opinión, 264 directivos de empresas mineras y 260 funcionarios de gobiernos nacionales y locales.

² Este último dato fue tomado de la BM 2018, cuya muestra es similar y cuyo trabajo de campo se realizó también entre enero y marzo.

³ Este capítulo se concentra en los beneficios económicos. Los potenciales perjuicios son materia de los capítulos anteriores del libro.

proyectos; la quinta hace un balance de la producción aurífera colombiana a nivel industrial; y la sexta presenta una proyección de la producción de oro que el país podría tener en la próxima década, así como de sus beneficios asociados. En la última sección se presentan las conclusiones.

Es indispensable aclarar que, para efectos de este capítulo, los proyectos de minería de oro considerados son solo aquellos ejecutados por empresas que lo hacen de manera industrial, ya que no se dispone de información sobre los que son llevados a cabo por pequeñas empresas que también cumplen con los procesos de licenciamiento ambiental y minero vigentes en Colombia. Esta distinción es fundamental dada la prevalencia en el territorio nacional de producción por fuera de la legalidad y con estándares altamente cuestionables que elevan significativamente los impactos negativos y reducen los positivos⁴.

1. Etapas y beneficios de un proyecto minero de oro⁵

El punto de partida para determinar los beneficios económicos que los proyectos de minería de oro podrían traer al país es su ciclo de vida. La figura 1 muestra de manera integral cuáles son las etapas y riesgos de un proyecto, y cómo estos cambian a lo largo del tiempo dando lugar a diferentes tipos de impactos.

Los proyectos comienzan con la fase de *exploración* que recoge todas las actividades de investigación necesarias para determinar la presencia de recursos de interés en el subsuelo, su magnitud y el grado de dificultad para extraerlos. Dependiendo de la complejidad del proyecto, esta fase

⁴ A pesar de inconsistencias en las cifras oficiales y de las dificultades para identificar con certeza su procedencia, es posible ilustrar la magnitud de la producción de este tipo de oro en el país. En 2018, por ejemplo, de acuerdo con el DANE se exportaron 45 toneladas y de acuerdo con la ANM se produjeron 35. Esta diferencia no puede imputarse a las importaciones que fueron inferiores a 200 kilogramos y, dada su magnitud, difícilmente puede explicarse por reducciones de inventarios existentes. En cualquier caso, las operaciones mineras con título dan cuenta de 20.1 toneladas que, sumadas a la producción que harían los barequeros registrados en el RUCOM si alcanzaran la mayor productividad autorizada por la ley, supondría 15,2 toneladas adicionales. Esto deja sin explicar el 22% de las exportaciones legales (casi 10 toneladas). Ver detalles en Escobar, A. y González, T. (2019). "Participación del Banco de la República en la comercialización de oro en Colombia". Recuperado de <https://www.banrep.gov.co/es/participacion-del-banco-republica-comercializacion-oro-colombia>

⁵ Esta sección toma partes de González (2020).

puede llegar a superar los diez años. Si en ella se confirma la viabilidad económica de su explotación, se pasa a la fase de *construcción y montaje* que puede tomar de cinco a siete años, cuyo propósito es asegurar la infraestructura y equipos requeridos para la extracción y comercialización de los recursos identificados.

Luego, se inicia la fase de *producción* donde el proyecto se concentra en asegurar la extracción continua del recurso para ser llevado al mercado. Es la fase que marca el inicio de la rentabilidad del proyecto y normalmente es la más larga, pudiendo superar los treinta años en proyectos con yacimientos de gran envergadura.

Por último, una vez agotados los depósitos comercialmente viables, el proyecto entra en la fase de *cierre*, que se ocupa de desarrollar planificadamente el cese de operaciones, del desmantelamiento de la infraestructura y equipos y la rehabilitación de los terrenos utilizados en las fases anteriores. Al igual que en las otras, su duración depende del tipo de proyecto y fácilmente puede alcanzar los diez años.

Las fases sirven también para ilustrar que un proyecto es una sucesión de etapas en las que se va ganando certidumbre y reduciendo el nivel de riesgo hasta llevarlo a un mínimo que nunca llega a cero. La figura 1 muestra como el mayor nivel de riesgo se da al inicio, cuando el riesgo *exploratorio* es el de mayor peso. El descenso en el nivel de riesgo durante esta fase refleja el hecho de que a medida que el proyecto obtiene información del subsuelo puede determinar con mayor precisión la existencia o no de recursos, y si las cantidades encontradas y el grado de dificultad técnica para extraerlas hacen posible su explotación comercial.

Si la respuesta es afirmativa, la fase de construcción se concentra en enfrentar los riesgos *técnicos* y de *financiamiento*. Los primeros se refieren a riesgos de diseño e ingeniería, uso de tecnología y disponibilidad de información, equipos y sistemas. Los segundos, a los de acceso oportuno a la financiación requerida para sacar adelante el proyecto. En la medida en que se aseguren los recursos financieros y la efectividad de los diseños pueda verificarse conforme avanza la construcción, se reduce el nivel de riesgo total del proyecto.

La fase de producción es dominada por los riesgos operativos y de entorno. Los primeros se refieren a los de seguridad industrial y salud, a los de control financiero y a los de manejo de las cadenas logísticas y

de abastecimiento. Los de entorno incluyen políticos, como los marcos regulatorios, fiscales y de inversión a los que están sujetos los proyectos; de mercado, como el nivel y la volatilidad de los precios del recurso y de variables como inflación, tasas de cambio o de interés; y sociales, referidos a los potenciales conflictos asociados a la legitimidad del proyecto en las comunidades del área de influencia y en la opinión pública.

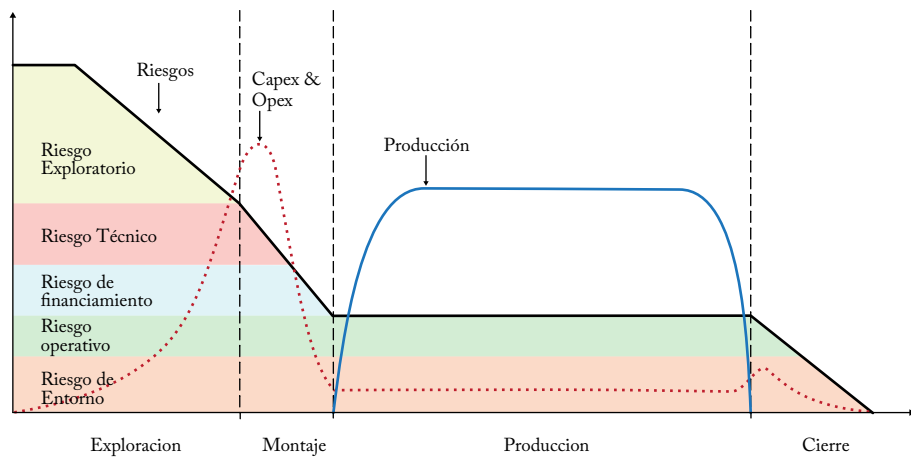


Figura 1. Ciclo estilizado de un proyecto aurífero

Fuente: González (2020), con base en información de "A systematic and preliminary portrait of mining risks". *International Journal of Safety and Security*. Badri et al. (2012) y de LS Group.

Finalmente, las fases permiten también caracterizar los requerimientos de recursos de operación y capital a lo largo del ciclo del proyecto. Estos, representados por la línea punteada, crecen al comienzo dominados por las necesidades de capital para financiar la exploración, alcanzan su punto más alto con los gastos asociados al montaje y caen hasta el inicio de la producción, donde pasan a dominar los gastos operativos en insumos, salarios y servicios. Al final, hay un aumento para financiar las actividades de cierre.

La naturaleza de las etapas descritas y sus riesgos asociados permite establecer los retos que enfrentarán los países como consecuencia del desarrollo de proyectos extractivos de metales. Ellos se originan en los potenciales impactos que puede tener cada fase y en la necesidad de los países de manejarlos. Teniendo presente que las acciones que tomen

Tabla 1. Impactos de los proyectos auríferos

	Exploración	Montaje	Producción	Cierre
Potenciales impactos positivos	IED Impuestos	IED Impuestos	IEO Impuestos Regalías Exportaciones Gasto público	
	Compra de bienes y servicios locales Empleo local Inversión social del proyecto Desarrollo de habilidades Transferencia de tecnología Encadenamientos productivos	Compra de bienes y servicios locales Empleo local Inversión social del proyecto Desarrollo de habilidades Transferencia de tecnología Encadenamientos productivos	Compra de bienes y servicios locales Empleo local Inversión social del proyecto Desarrollo de habilidades Transferencia de tecnología Encadenamientos productivos	Compra de bienes y servicios locales Empleo local Inversión social del proyecto
Potenciales impactos negativos	Desajuste macroeconómico	Desajuste macroeconómico	Desajuste macroeconómico Sostenibilidad del gasto Calidad del gasto Corrupción	Sostenibilidad del gasto Calidad del gasto
	Deterioro ambiental migraciones Distorsiones a los mercados locales Inseguridad Conflictos sociales	Deterioro ambiental migraciones Distorsiones a los mercados locales Inseguridad Conflictos sociales	Deterioro ambiental migraciones Distorsiones a los mercados locales Inseguridad Conflictos sociales	Conflictos sociales

Continúa

	Exploración	Montaje	Producción	Cierre
Determinantes de los impactos	Prospektividad			
	Marco macroeconómico	Marco de inversión	Marco de inversión	Marco macroeconómico
	Marco de inversión	Capacidad de licenciamiento	Capacidad de licenciamiento	Marco de inversión
	Capacidad de monitoreo y control	Capacidad de monitoreo y control	Capacidad de monitoreo y control	Capacidad de licenciamiento
	Calidad del monitoreo y control	Calidad del monitoreo y control	Calidad del monitoreo y control	Capacidad de monitoreo y control
	Calidad política I+D	Calidad política I+D	Calidad política I+D	Calidad política I+D
	Infraestructura de soporte	Infraestructura de soporte	Infraestructura de soporte	
	Servicios de soporte	Servicios de soporte	Servicios de soporte	
	Mecanismos de participación	Mecanismos de participación	Mecanismos de participación	Mecanismos de participación
	Estabilidad normativa	Estabilidad normativa	Estabilidad normativa	Estabilidad normativa
	Cumplimiento de la ley	Cumplimiento de la ley	Cumplimiento de la ley	Cumplimiento de la ley

Fuente: González (2020).

los proyectos para manejar los riesgos tendrán una incidencia directa sobre el nivel de los impactos generados, los gobiernos buscarán incidir en los determinantes de dichos impactos para maximizar los positivos y minimizar los negativos.

La tabla 1 muestra los principales impactos positivos y negativos para cada fase de un proyecto extractivo, así como los mecanismos (determinantes) para manejarlos. De esta manera, por ejemplo, marcos de inversión confiscatorios pueden llevar a caídas aceleradas en la producción y el recaudo, mientras que marcos fiscales adecuadamente estructurados pueden convertir la riqueza minera en fuente de sostenibilidad macroeconómica. Lo mismo sucede en materia ambiental y social, donde de lo adecuadas que sean las herramientas para manejar los impactos dependerá la magnitud final de los beneficios que traigan los proyectos.

De esta manera, la diversidad de las herramientas requeridas para manejar las diferentes fases de los proyectos les imponen a los países la necesidad de ser capaces de responder simultáneamente en diversos frentes. El marco macroeconómico, por ejemplo, incluye la política de precios o subsidios y la gobernanza de las empresas públicas sectoriales; los marcos de inversión incluyen el marco institucional relevante y la regulación ambiental, técnica y económica aplicable; la minería informal e ilegal se asocia con la conflictividad social y la inseguridad; los catastros y sistemas de información y fiscalización de la actividad dependen de la capacidad de licenciamiento, monitoreo y control; la divulgación de información y construcción de confianza hacen parte de mecanismos de participación; y los encadenamientos productivos se impulsan con la política industrial, la de I+D y la de infraestructura y servicios de soporte.

Dejando de lado los impactos negativos que son materia de otros capítulos de este libro, la tabla permite ver de manera concreta el origen y la diversidad de los potenciales beneficios económicos de un proyecto aurífero. A nivel agregado se concentran en la generación de impuestos y regalías que permiten financiar la inversión pública, en la generación de flujos de inversión y exportaciones y, como consecuencia de ambos, en su contribución al equilibrio macroeconómico que es fundamental para impulsar la productividad y al crecimiento. A nivel local, los mayores beneficios se centran en la generación de empleo, en la compra de bienes y servicios, en las transferencias de conocimiento y habilidades, en la

inversión directa que hagan las empresas responsables de los proyectos y en los encadenamientos productivos que sean capaces de generar.

Cómo medirlos y qué tan significativos han sido estos beneficios en Colombia se discutirá en las siguientes secciones.

2. Contribuciones actuales de la minería aurífera

Esta sección presenta la evolución durante la última década (2009-2019) de la producción de oro en Colombia y de las cifras de sus diferentes aportes al país, los cuales se evidencian a través de las contribuciones en los principales indicadores macroeconómicos (PIB, exportaciones, inversión extranjera y empleo) y en otros pagos como regalías e impuestos que realiza dicha industria. De esta manera, se puede dimensionar su importancia relativa en la generación de ingresos para la Nación, así como para los departamentos y municipios, quienes a su vez perciben impuestos locales por los proyectos alojados en sus territorios y recursos provenientes del sistema general de regalías (SGR) producto de la explotación minera⁶. En todos los casos se incluyen comparaciones que permitan dimensionar la magnitud de la contribución.

Es oportuno indicar al lector que la medición objetiva de las contribuciones del subsector oro, mediante las cifras oficiales como el PIB, la IED, las exportaciones y el pago de regalías, aunque son las variables más consistentes, las mismas presentan limitaciones en su estimación, dado el alto impacto que tienen las operaciones productivas al margen de la ley en este sector, las cuales se escapan del control y por su puesto de la exhaustividad y precisión estadística requerida, por lo tanto, se tiende a

⁶ Es importante aclarar que en este capítulo no se hace referencia a la participación del Estado en el sector o *government take* (GT). El GT corresponde a la diferencia entre el valor presente de un proyecto sin participación del gobierno y el valor presente con participación del gobierno, dividido por el valor presente del proyecto sin gobierno. Como tal no es un beneficio económico, sino una aproximación a lo que se lleva el gobierno como porcentaje del valor del proyecto y, aunque no está desprovista de problemas, frecuentemente se utiliza para medir la capacidad de un país para atraer inversión al sector frente a sus competidores. Hacer un análisis de las bondades del GT como indicador de la competitividad minera y sus niveles para Colombia trascienden el alcance de este capítulo; sin embargo si se incluyen los distintos elementos que lo conforman como impuestos y regalías.

subestimar o desconocer los aportes reales y pagos de ley que debe realizar un productor formal de oro, principalmente en sus instancias locales⁷.

2.1. Evolución y procedencia de la producción aurífera durante la última década

El volumen “registrado”⁸ como producción de oro en el país durante los últimos diez años sumó un total 1.682.242 onzas promedio anual. Sin embargo, desde el año 2017 dicha producción decrece a casi la mitad respecto a lo registrado en 2012 (máximo histórico de 2.129.093 onzas), dicha reducción se da como consecuencia de los mayores controles a la producción de origen ilícito, sin que esto implique que el comercio de esta producción no continúe llevándose a países vecinos⁹ sin registro (figura 2).

Respecto a la procedencia de la producción de oro, los principales departamentos productores en Colombia son: Antioquia, Chocó, Bolívar y Caldas, los cuales como en la mayoría de los departamentos, presentan bastante irregularidad en su registro. En el caso de Antioquia se pasó de producir 27,4 toneladas de oro en 2012 a 20,7 toneladas en 2019 (con una participación promedio del 51% sobre el total, decrece el 24%), mientras que en el departamento del Chocó —con 83% de sus municipios registrando producción y una participación promedio del 26% sobre el total— pasa de 24,4 toneladas en 2012 a producir 4,8 toneladas (decrece el 80%) en 2019 (figura 3).

⁷ Ver Escobar y González (2020) para una discusión sobre los problemas de registro y consistencia de las cifras de la producción y comercialización de la cadena del oro en Colombia.

⁸ La producción registrada de oro hace referencia a la producción declarada para el *pago de regalías*, por lo tanto, son cifras sobrevaloradas, pues se estima que entre el 78% al 85% de dicho registro tiene un origen informal que a su vez se mezcla con una producción de origen ilícito o ilegal. Hecho que fue subestimado hasta llegado el *boom* de precios del oro (año 2010-2012) donde estas operaciones se hicieron más evidentes dada la problemática ambiental ocasionada al dragado descontrolado de los ríos y a un aumento inusitado de la contaminación por uso del mercurio.

⁹ Los controles empezaron a ser más efectivos desde la entrada del decreto 1102 del 27 de junio de 2017, por el cual se establecen medidas relacionadas con la comercialización de minerales, que entre otros establece toques al volumen máximo de producción de la minería de subsistencia.

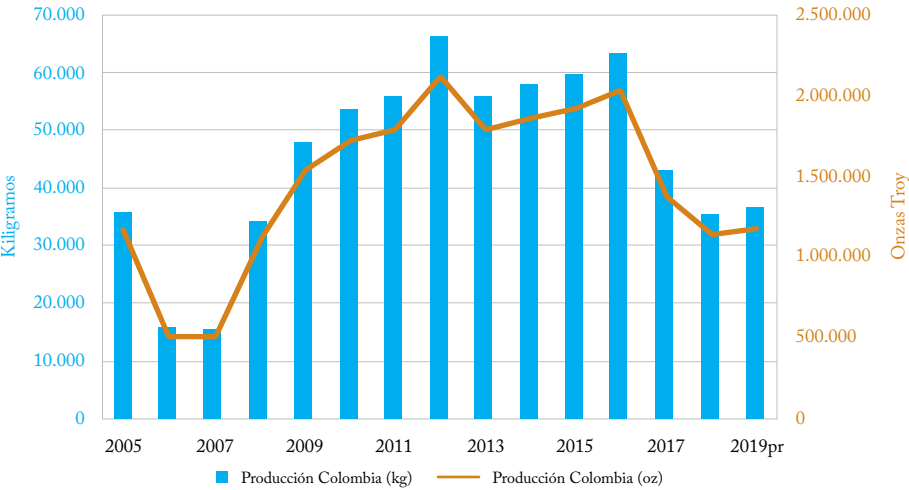


Figura 2. Producción registrada de oro 2005-2019 (kilogramos, onzas)

Fuente: Ingeominas, ANM.

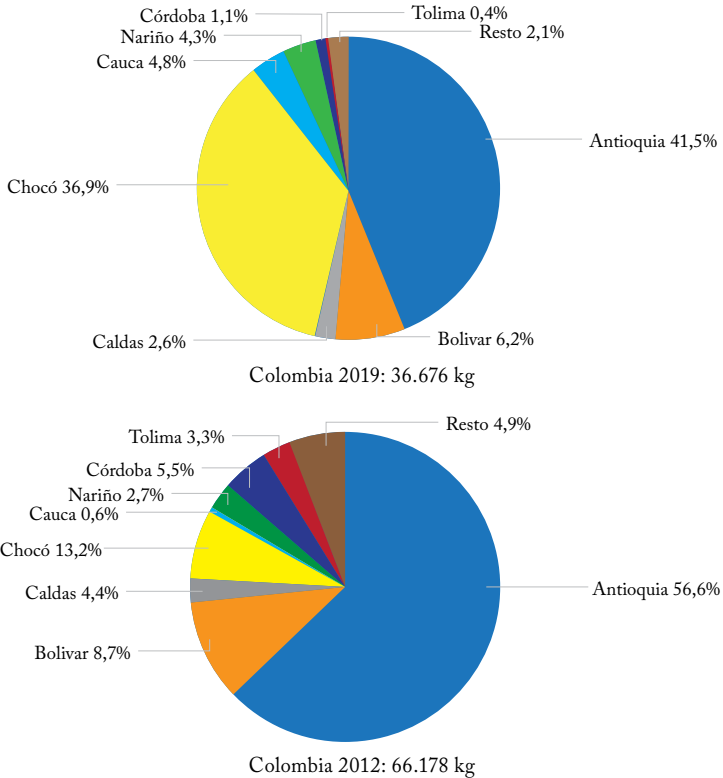


Figura 3. Distribución de la producción de oro por departamentos 2012 y 2019

Fuente: ANM.

De los comportamientos descritos, se confirma la irregularidad en los volúmenes registrados de producción de oro, los cuales están asociados con el hecho de que en Colombia son pocas las unidades formales que cumplen con el registro minero y la licencia ambiental en etapa productiva, mientras que la producción de oro del segmento industrial¹⁰ aportó el 16% del total durante la última década (250.000 onzas al año). Se resalta que en los últimos tres años esta participación se incrementó hasta un 27%, debido a los menores niveles registrados por el resto de los productores.

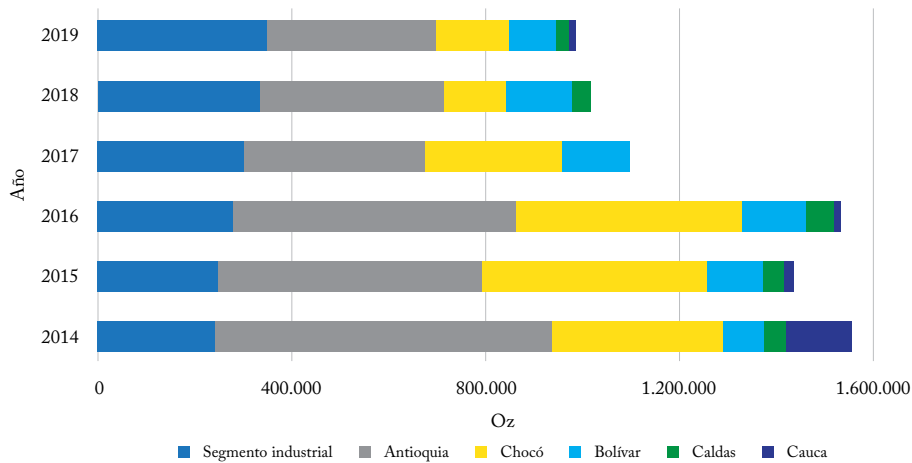


Figura 4. Producción de oro del segmento industrial y los principales cinco departamentos 2014-2019 (onzas)

Fuente: Ingeominas, ANM y Reportes empresas.

Con base en lo anterior, se pueden suscitar dos reflexiones, una, sobre la complejidad que resulta tener tan variados productores de oro en Colombia, no solo en tamaños y técnicas de operación, sino que, sumando a las condiciones geográficas y políticas del país, es una actividad fácilmente operada por sujetos al margen de la ley, que traen consigo las peores prácticas tanto en lo técnico (uso de mercurio, por ejemplo) como en lo social (sometimiento de personas adultas y menores a trabajar en condiciones inaceptables). Lo otro es que, a raíz de estas circunstancias,

¹⁰ El segmento industrial del oro se refiere a unidades productivas que dan agregación de valor a la explotación aurífera, mediante transformación química o mecánica del material extraído, cumpliendo con las obligaciones económicas, ambientales y sociales exigidas por el Estado.

se estigmatiza en la generalidad a una actividad legítima, que, operada con buenos estándares, genera aportes y que está en manos de la política pública tener mayor incidencia y llevar a buen término el desarrollo de una actividad que deja mayores beneficios a todos los colombianos que dejar enterrada una oportunidad de bienestar.

2.2. Reseña de los principales indicadores del aporte a la economía nacional

A continuación se presentan los principales indicadores macroeconómicos alrededor de la industria del oro y se finaliza con una reseña sobre otros aportes que realiza dicha industria. El sector minero colombiano contribuye al fisco mediante el pago de impuestos y regalías y en los agregados macroeconómicos como el PIB, las exportaciones y en la inversión extranjera, y de manera un poco más directa a sus regiones de operación, con el pago de impuestos locales, la compra de insumos y suministros, las remuneraciones a la mano de obra empleada directa e indirectamente y en el desarrollo y transferencias de tecnologías y habilidades, entre otros.

En este contexto, se tiene que los principales aportes que realiza la industria del oro se perciben en los conceptos señalados en la figura 5 (la mayoría basados en obligaciones y contraprestaciones de ley).

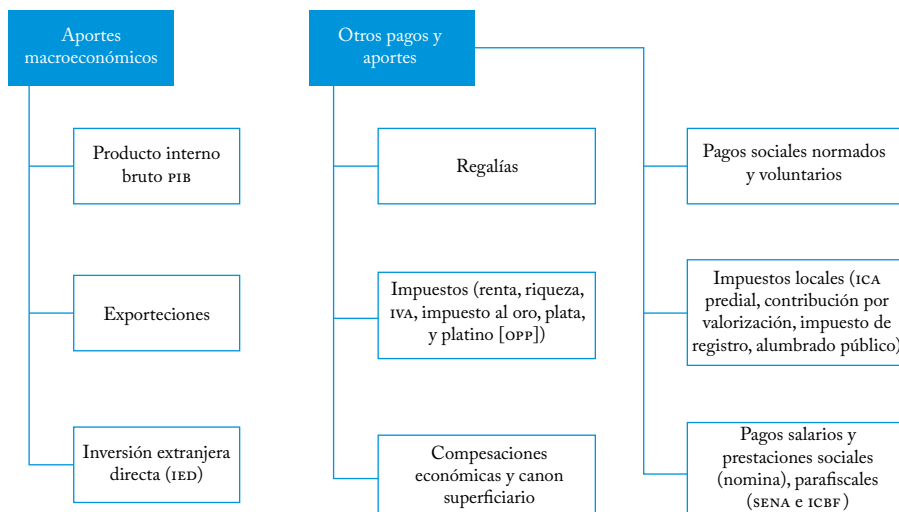


Figura 5. Pagos y aportes que realiza la producción de oro en Colombia

Fuente: elaboración propia.

A continuación se presenta el comportamiento de las principales variables que permiten vislumbrar los aportes generales de esta industria en los agregados macroeconómicos y en otros pagos locales y parafiscales y voluntarios.

2.3. Aportes de la minería aurífera a la economía nacional

PIB. El indicador de producto interno bruto (PIB), utilizado para estimar el aporte de las actividades económicas al interior de un país registra en Colombia un crecimiento promedio anual del 3,5% durante la última década, donde su sector de minas e hidrocarburos tiene una participación del 5,8%, generando en promedio 44 billones de pesos al año. En este contexto, el subsector aurífero aportó 3,3 billones de pesos¹¹, que comparado con el valor generado de las actividades como la elaboración de productos de café y productos de cacao equivale a casi el doble¹².

Exportaciones. Las exportaciones como variable macroeconómica es uno de los principales mecanismos generadores de divisas para un país que se da por la demanda externa por productos de origen nacional, en Colombia estas sumaron un total de 44.587 millones de dólares en el período 2009/2019, con un ritmo de crecimiento anual por encima del 20% en promedio. En este período, las exportaciones de oro¹³ registran su máximo histórico en el año 2012, alcanzando los 3.385 millones de dólares (participación del 4,3% sobre el total exportado), lo que equivalió en su momento a dos veces las exportaciones de café, cuatro veces las de banano y tres veces las exportaciones de flores. En adelante, las exportaciones de oro se han mantenido en un promedio de 1.623 millones de dólares al año, cuyos principales destinos son: Estados Unidos y Suiza, centros de refinación mundial.

¹¹ Valor estimado a partir de las matrices oferta utilización a seis dígitos del Sistema de Cuentas Nacionales del DANE. En: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-anuales#cuadros-oferta-utilizacion-y-matrices-complementarias>

¹² Cifras oficiales del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), actualizada al IV Trimestre de 2019, <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales>.

¹³ Al interpretar estas cifras, hay que tener en cuenta los problemas de registro mencionados al comienzo de la sección.

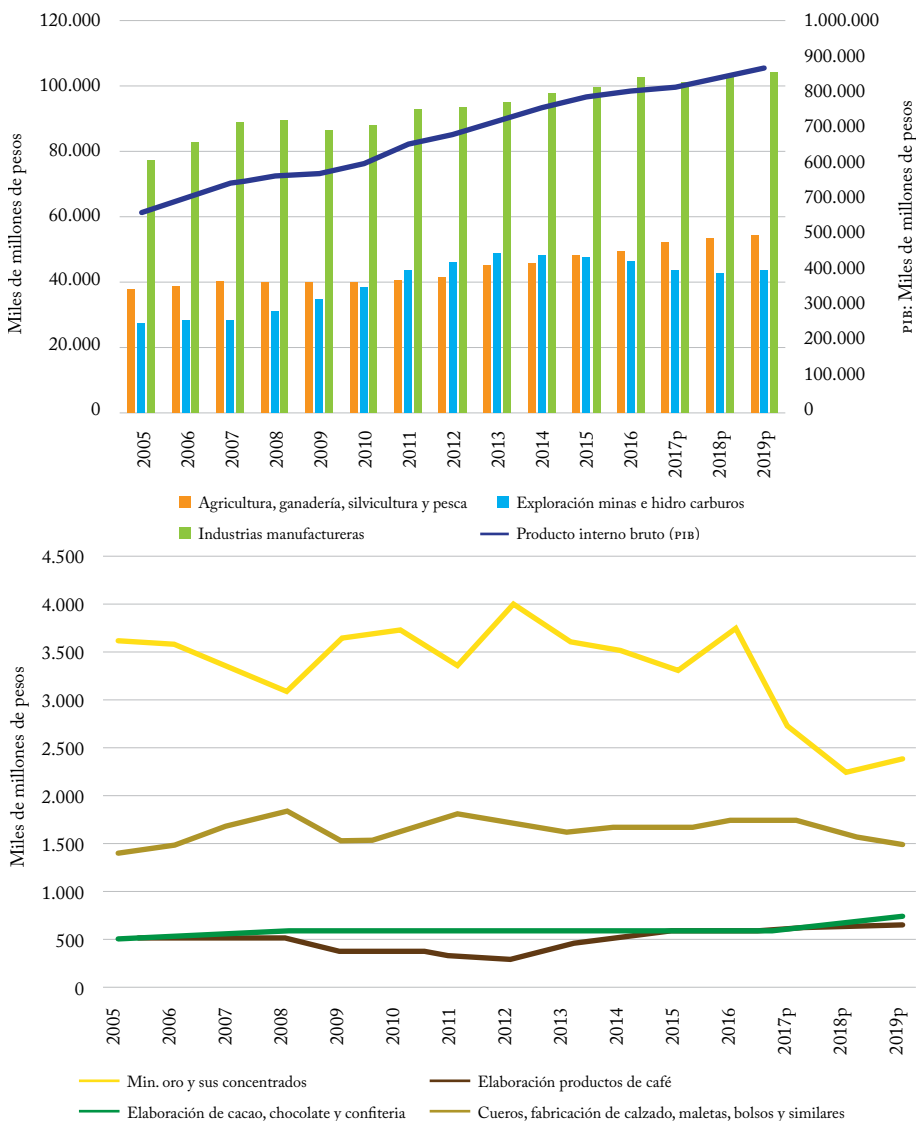


Figura 6. Evolución PIB nacional, agricultura, ind. manufacturera, explotación minas e hidrocarburos y otros subsectores: café y sus derivados, oro y sus concentrados, cacao, chocolate y confitería y cueros 2005-2019 (miles de millones cop)

Fuente: elaboración propia sobre datos del DANE.

Inversión extranjera directa (IED). La inversión extranjera directa (IED) es un medio que permite apalancar diferentes actividades económicas para que emprendan y desarrollen proyectos productivos respaldadas por

capitales provenientes del extranjero. Es así como Colombia ha captado inversiones

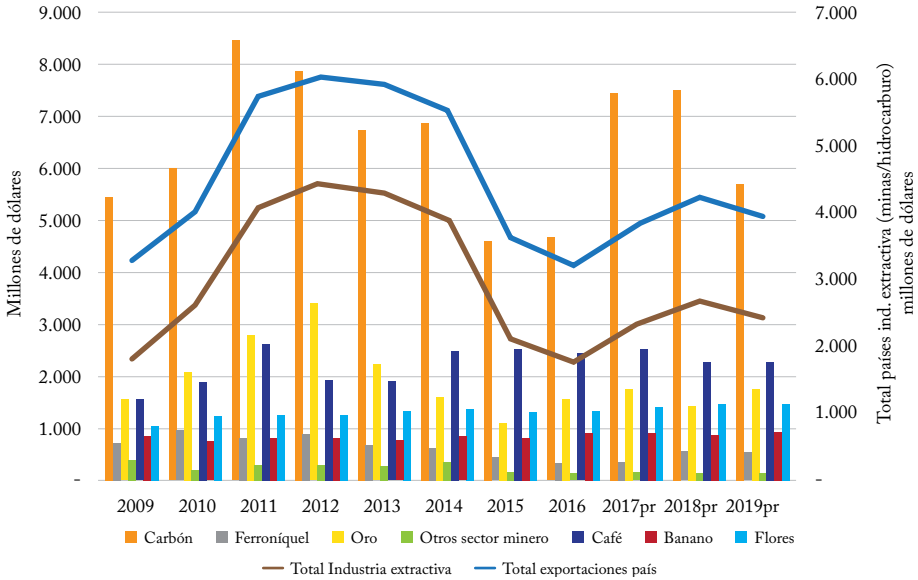


Figura 7. Exportaciones 2009-2019 (millones de dólares)

Fuente: elaboración propia sobre datos del Banco de la República.

por valor de 12.906 millones de dólares promedio anual en los últimos diez años, dirigiéndose al sector de minerales metalíferos (para oro, en especial) un estimado de 300 millones de dólares al año que representa el 2,5% del total de la IED país¹⁴. En ese período las inversiones del sector aurífero se encaminaron hacia la ampliación de proyectos existentes y la adquisición de proyectos con permisos y licenciamiento ambiental aprobados. Es de precisar que las inversiones atraídas para otros sectores económicos como el eléctrico o el de la construcción, si bien representan en promedio un menor flujo que lo atraído para oro (casi dos veces menos), su tendencia es más constante en el tiempo, dado que las inversiones en el sector oro son mucho más volubles debido a que reaccionan al comportamiento del precio de este producto en el mercado internacional que a nivel mundial demarca la entrada o salida de proyectos productivos.

¹⁴ Cálculos Dirección de Minería Empresarial (MME), sobre la información del Banco de la República, Subgerencia de Estudios Económicos, Balanza de Pagos.

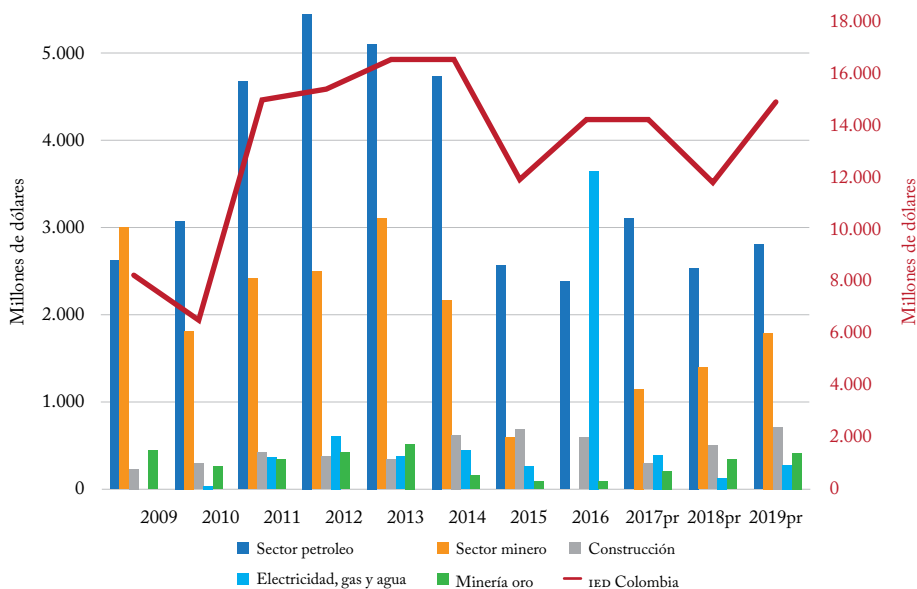


Figura 8. Inversión extranjera directa 2009-2019 (millones de dólares)

Fuente: elaboración propia sobre datos del Banco de la República.

2.4. Pagos y otros aportes de los productores de oro

2.4.1. Regalías

Las regalías son las contraprestaciones económicas obligatorias que los operadores o titulares de derechos de explotación de recursos no renovables pagan al Estado por el desarrollo productivo de esta actividad¹⁵. En este sentido, se configura un ingreso exclusivo que ninguna otra actividad económica le genera al país.

En 2019 el total de la industria extractiva (minería e hidrocarburos) pagó un poco más de 8 billones de pesos, lo que significa haber pagado con dichos recursos el gasto público social aprobado en 2019 para agua potable y saneamiento básico (3 billones), vivienda social (2,3 billones)

¹⁵ El pago de las regalías se soporta en la Constitución Política (art. 360): “La explotación de un recurso natural no renovable causará a favor del Estado, una contraprestación económica a título de regalía, sin perjuicio de cualquier otro derecho o compensación que se pacte”. Y en la Ley 685 de 2001 (art. 227): “... toda explotación de recursos naturales no renovables de propiedad estatal genera una regalía como contraprestación obligatoria”.

y cultura, deporte y recreación (1,3 billones) (Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 2019).

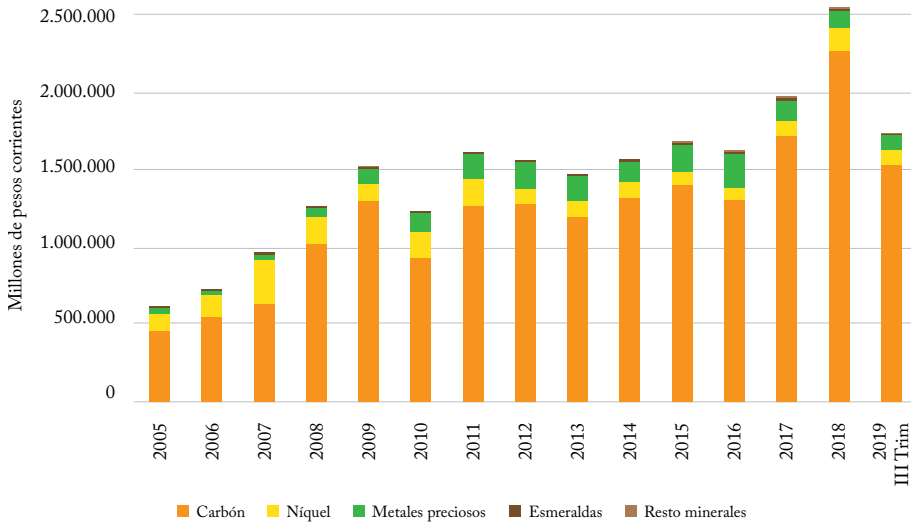


Figura 9. Regalías pagadas por los subsectores mineros. 2005-2019 (millones cop)

Fuente: Ingeominas, ANM.

El sector minero en su conjunto históricamente ha aportado un poco más del 20% del total recaudado por concepto de regalías de la industria extractiva (minería e hidrocarburos), alcanzando en el período 2005-2019 un promedio de 1.686 mil millones de pesos al año. La industria del oro aportó 143.000 millones de pesos, siendo el segundo producto después del carbón. Al tercer trimestre de 2019, el recaudo de regalías de oro fue de 96.075 millones de pesos, valor que se asemeja al presupuesto ejecutado por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) en 2019 (90.226 millones de pesos) (ANLA, 2000).

Como se puede observar, no son menores los recursos que genera para el país la producción aurífera, recursos que contribuyen a financiar el gasto público nacional y el de varias instancias territoriales, y que difícilmente podrían ser generados por otras actividades como el “cultivo intensivo del aguacate”, que si bien es importante promoverlas, su alto consumo de agua no le permitiría alcanzar el volumen necesario para llegar a sustituir los aportes asociados a la producción industrial del oro. Tampoco el turismo puede alcanzar a ser una fuente de ingresos como lo es la industria aurífera,

pues si —como ejercicio comparativo— asumimos que durante el presente año 4,9 millones de turistas aportarán 37,3 billones de pesos al PIB del país, es decir que cada visitante aportará en promedio 7,6 millones al año, tenemos que la industria aurífera —representada en cuatro grupos empresariales—, al ritmo de producción de 353.000 onzas anuales, podría generar ingresos de operación cercanos a 1,6 billones de pesos¹⁶.

2.4.2. Impuestos, otras obligaciones y aportes voluntarios

De acuerdo con el último reporte de EITI Colombia año 2018, se estima que como mínimo el subsector oro pagó en conceptos diferentes a regalías, impuestos nacionales e impuesto al oro, plata y platino, un valor cercano a los 22.520 millones de pesos, valores con los que se podría cubrir el acceso

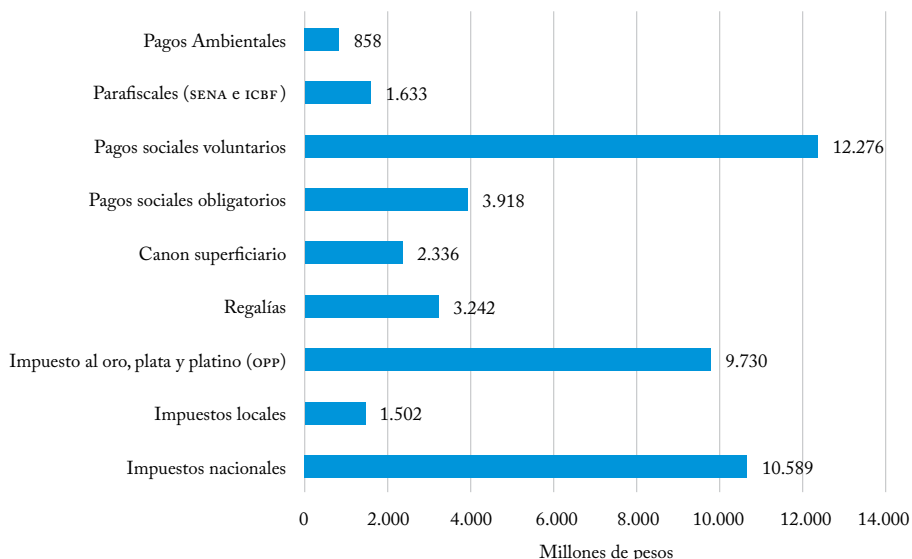


Figura 10. Otros pagos realizados por empresarios formales del subsector oro 2018 (millones cop)

Nota: al año 2019, los grupos empresariales del sector minero participantes de EITI Colombia suman 10: carbón (4), níquel (1), hierro (1), esmeraldas (1) y las empresas productoras de oro (3) son: Mineros (2013-2019), Continental Gold (2017-2019) y AngloGold Ashanti (2019).

Fuente: estimaciones propias con base en el Reporte de Administrador Independiente, en http://www.eiticolombia.gov.co/media/filer_public/f6/17/f6173858-328e-4973-992f-13a76457da32/informe_eiti_vigencia2018_bg.pdf.

¹⁶ En la última sección de este capítulo se hace una estimación de los potenciales beneficios económicos.

de 8.900 estudiantes al sistema educativo nacional o al pago de nómina de 532 docentes de estos establecimientos en el año 2019 (Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 2019). Los valores de impuestos pagados por la totalidad de esta rama minera pueden obtenerse de la Dirección de Impuestos y Aduanas de Colombia (DIAN) que reporta, para el último año disponible al momento de elaboración del libro, el pago de \$123.086 millones por concepto de impuesto de renta. Por su parte, la Asociación Colombiana de Minería (ACM) reporta pagos por concepto de regalías e impuesto al oro por \$151.995 millones.

Como se observa, fuera de los pagos de ley en impuestos y regalías o parafiscales, esta industria hace pagos por conceptos ambientales (inversiones del 1% por uso de agua, tasas de aprovechamiento forestal, retributiva y de uso del agua, entre otros) y en aportes sociales voluntarios que suman 13.133 millones de pesos en un año. Este valor puede ser equivalente al 33% de lo que puede recibir un municipio, que en el caso de El Bagre, que aloja una de las principales empresas productoras del oro del país, fue un tercio del presupuesto de inversión y funcionamiento aprobado en el año 2018.

2.4.3. Empleo

De acuerdo con las cifras de la Gran Encuesta Integrada de Hogares del DANE, en 2019 la extracción de metales preciosos en Colombia empleó un total de 65.593 personas. Por su parte, y de acuerdo con EITI, el segmento industrial del oro empleó de manera directa a cerca de 2.000 personas en un año, cifra similar al número de habitantes de la cabecera municipal de Providencia en el Archipiélago de San Andrés. Este último, como se muestra a continuación, cobra una importancia especial por sus características frente a otros tipos de empleo disponible en las zonas de influencia de los proyectos.

Parte fundamental del análisis de los beneficios que puede traer las operaciones mineras industriales a las poblaciones locales se puede medir a través de la calidad del empleo que genera. Para esto, se utiliza la Gran Encuesta Integrada de Hogares para el año 2019, la cual tiene cobertura nacional, y permite hallar resultados representativos para zona urbana, zona rural y 13 ciudades con sus áreas metropolitanas. Con lo anterior en mente, se procesan los datos para obtener proporciones de las variables en zona rural, y para la actividad económica “extracción de metales preciosos”,

de acuerdo con el código CIU Rev. 3. No sobra decir que esta actividad es predominantemente aurífera, como bien lo demuestran las cifras mencionadas anteriormente de pago de regalías. En particular, estudiamos cuatro dimensiones que caracterizan los beneficios del empleo generado por la minería: ingresos, estabilidad, calidad y encadenamientos productivos.

Como primera dimensión, se analiza el tiempo promedio de duración, diferenciando por el tamaño de la operación minera. La figura 11 permite entrever que los ocupados en minería unipersonal o de pequeño tamaño duran un promedio de 12 años en su empleo, frente a 6,2 años en la minería mediana y 4,8 años en la de gran tamaño. Resalta que sea en la minería pequeña en la que se encuentran los tiempos más largos de permanencia, incluso frente al promedio rural. Esto puede indicar que, contrario a ser un indicador de estabilidad laboral, el tiempo de permanencia en el trabajo muestra la poca movilidad de la cual disponen los pequeños mineros. En contraste, aquellos en grandes operaciones mineras gozan de los beneficios que trae la posibilidad de la movilidad laboral.

No obstante los resultados de la figura 11, otros posibles indicadores de estabilidad en el empleo pueden provenir de las características mismas de la contratación. La figura 12 muestra el porcentaje de empleados que, por un lado, tienen algún tipo de contrato laboral con su empleador, y, por el otro, el tipo de contrato (verbal o escrito). Se encuentra que la proporción de trabajadores con algún tipo de contrato en el área rural es de 39,1%;

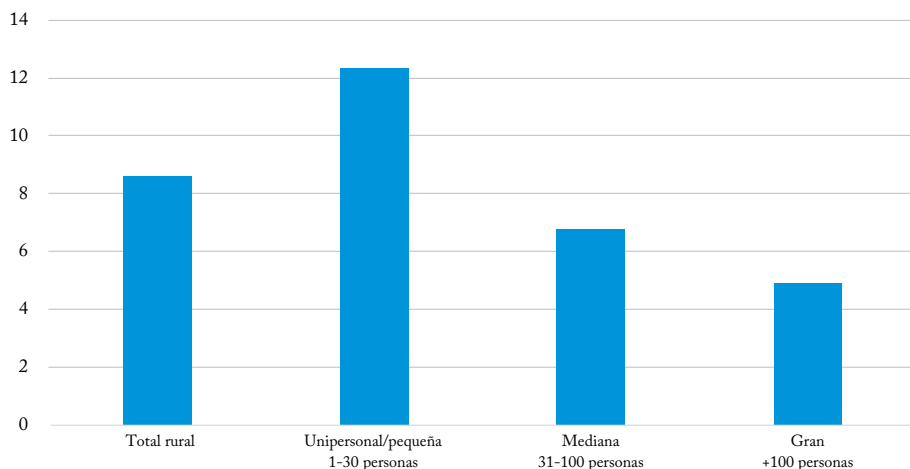


Figura 11. Tiempo promedio de duración en el trabajo (años)

Fuente: GEIH, 2019 (DANE). Elaboración propia.

para la minería pequeña o unipersonal este valor cae al 24%, mientras que para la minería mediana y a gran escala esta proporción es de 85,6% y 98,9%, respectivamente. De los que afirman tener un contrato, se observa que mientras que para la minería a gran escala casi la totalidad posee un contrato escrito, este porcentaje es menor al 10% en la minería pequeña y cercano al 33% en la zona rural.

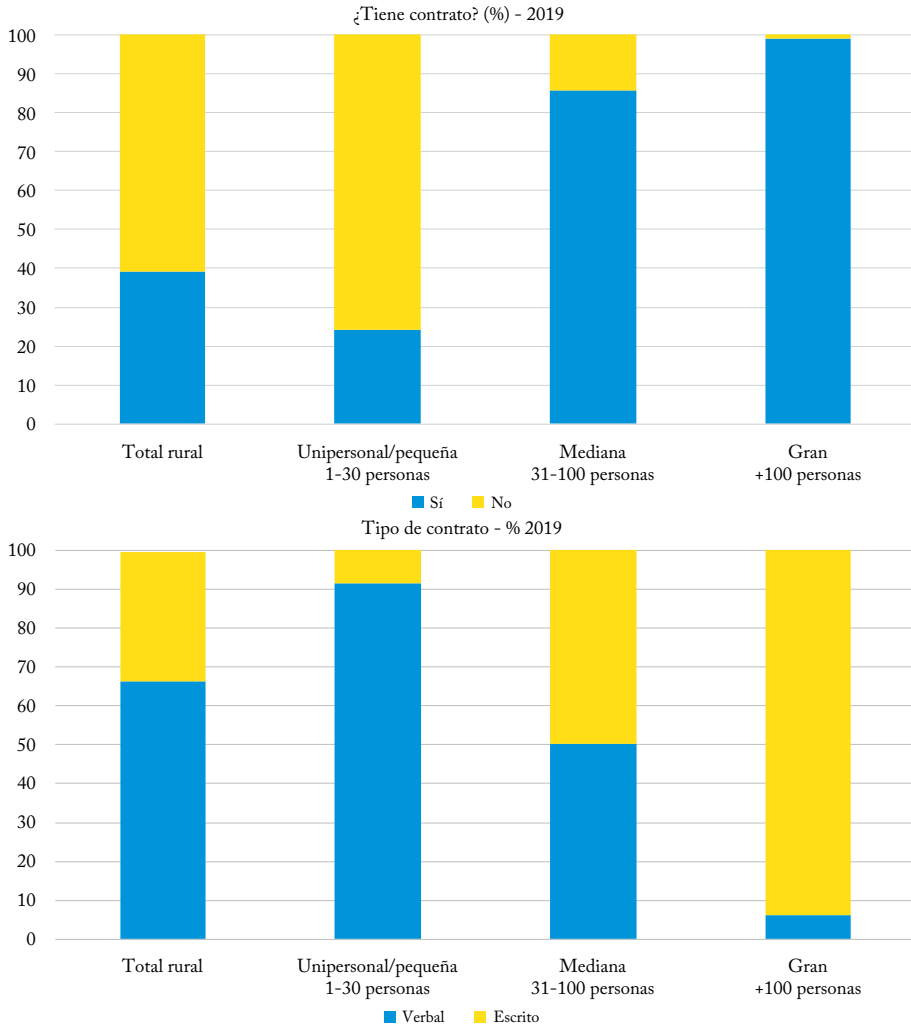


Figura 12. Características de la contratación

Fuente: GEIH, 2019 (DANE). Elaboración propia.

Tener un contrato laboral, y que este sea escrito puede aproximar la (in)estabilidad laboral a la que se enfrentan los ocupados. Por un lado, tener un contrato laboral o de prestación de servicios garantiza que se cumplan ciertos mínimos de calidad, o que por lo menos sean plausibles. De la mano con lo anterior, que el contrato sea escrito, y no verbal, es un seguro frente a potenciales malas condiciones laborales y abusos. En ese sentido, es muy significativo que las operaciones más grandes sean las que “mejores” contratos ofrezcan, pues acercan a los trabajadores a tener un mínimo de condiciones laborales, entre todo lo demás, ausentes de la mayoría de los empleos en el sector rural.

En lo referente a la afiliación al Sistema General de Seguridad Social en Salud (sgsss), se observa que los resultados del sector minero difieren de manera importante en función del tamaño de la operación minera. Por un lado, aquellos que trabajan en minería unipersonal o en operaciones de hasta 100 personas presentan comportamientos de afiliación similares a los observados en el área rural: existe entre un 6% y un 8% que no se encuentran afiliados al sgsss. En contraste, el 100% de las personas empleadas en minería de gran escala se encuentran afiliadas al sistema de salud. Ahora bien, de los que están afiliados, se encuentra que en las operaciones de menor tamaño más del 92% de los trabajadores están en el régimen subsidiado, mientras que para la mediana minería este valor es del 47% y para la gran minería es del 6,2%. Que más del 93% de los empleados de las grandes operaciones mineras estén afiliados al régimen contributivo es muy diciente en términos de las condiciones de contratación. En particular, da una aproximación sobre la formalidad de los empleados.

Las figuras 12 y 13 permiten observar que, en lo que a formalidad y seguridad jurídica y laboral se refiere, la minería de gran escala ofrece mejores condiciones frente a operaciones más pequeñas y frente al área rural en general. En otras palabras, la actividad minera, cuando se desarrolla acorde con la ley, ofrece mejores condiciones que el promedio de los otros sectores en zona rural dispersa.

La figura 14 presenta el ingreso laboral promedio de los trabajadores en función del tamaño de la operación minera. En línea con variables anteriores, los ingresos laborales de los mineros unipersonales y de pequeña escala son muy similares al promedio del área rural. En cambio, las operaciones de entre 31 y 100 empleados presentan un promedio de

ingresos laborales de cerca de 860.000 pesos, y las de gran escala superan el 1.200.000 pesos.

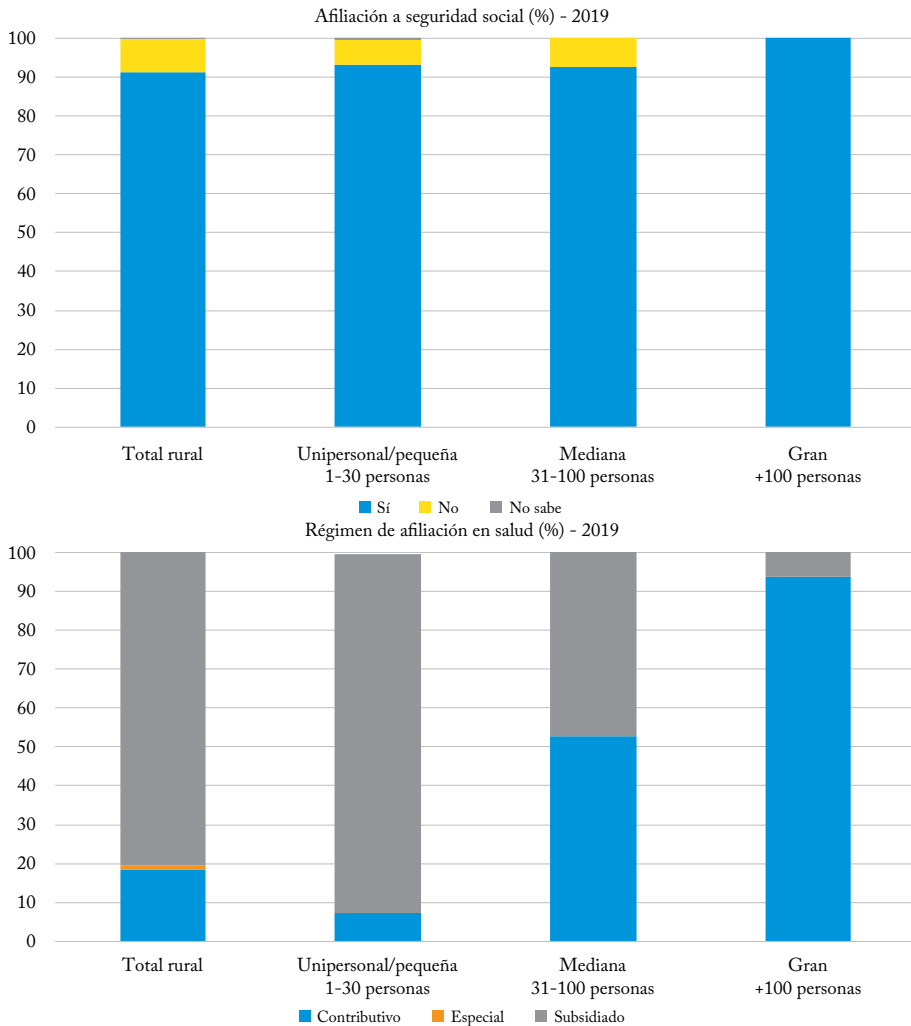


Figura 13. Afiliación al sgss

Fuente: GEIH, 2019 (DANE). Elaboración propia.

A su vez, la figura 15 compara el promedio de años de educación del sector rural frente al promedio de los ocupados en operaciones mineras de diferente tamaño. Se observa, por un lado, que el promedio de escolaridad entre el área rural y los mineros unipersonales y de pequeña escala no difiere significativamente. En contraste, los trabajadores en operaciones

medianas y grandes poseen 2,9 y 2,4 años más de educación, respectivamente, que su contraparte en minería pequeña y unipersonal. Nótese que la minería de mediana escala posee trabajadores con una escolaridad un tanto superior a la observada en los trabajadores de minería de gran escala.

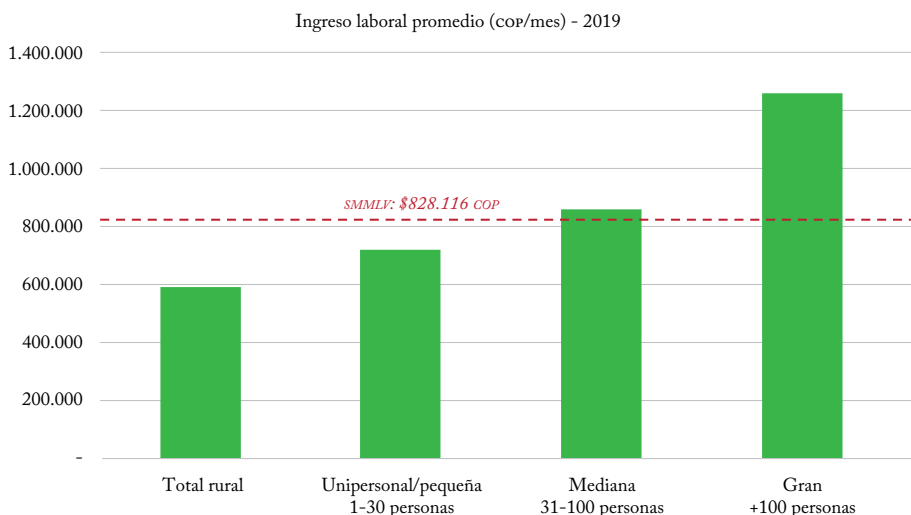


Figura 14. Ingreso laboral promedio

Fuente: GEIH, 2019 (DANE). Elaboración propia.

Una posible explicación para la diferencia en la escolaridad promedio entre la minería de mediana escala frente a la de gran escala puede relacionarse con la demanda por diversidad de habilidades y trabajadores. En efecto, a medida que la escala de la operación aumenta, también se incrementa la necesidad de mano de obra especializada y la división de tareas. Esto se puede evidenciar parcialmente en el panel inferior de la figura 15, que muestra el porcentaje de trabajadores según el máximo nivel de educación reportado en la encuesta.

Dos cosas saltan a la vista: la primera se relaciona con la distribución relativa de los ocupados en la zona rural, que está altamente concentrada en los niveles más bajos de escolaridad: 15% reportan no tener ninguna educación o educación preescolar, 43% educación básica primaria, 20% educación básica secundaria y el restante 20% se dividen entre educación media y superior. Un comportamiento similar se observa en la población minera que trabaja en operaciones de menor envergadura. En contraste,

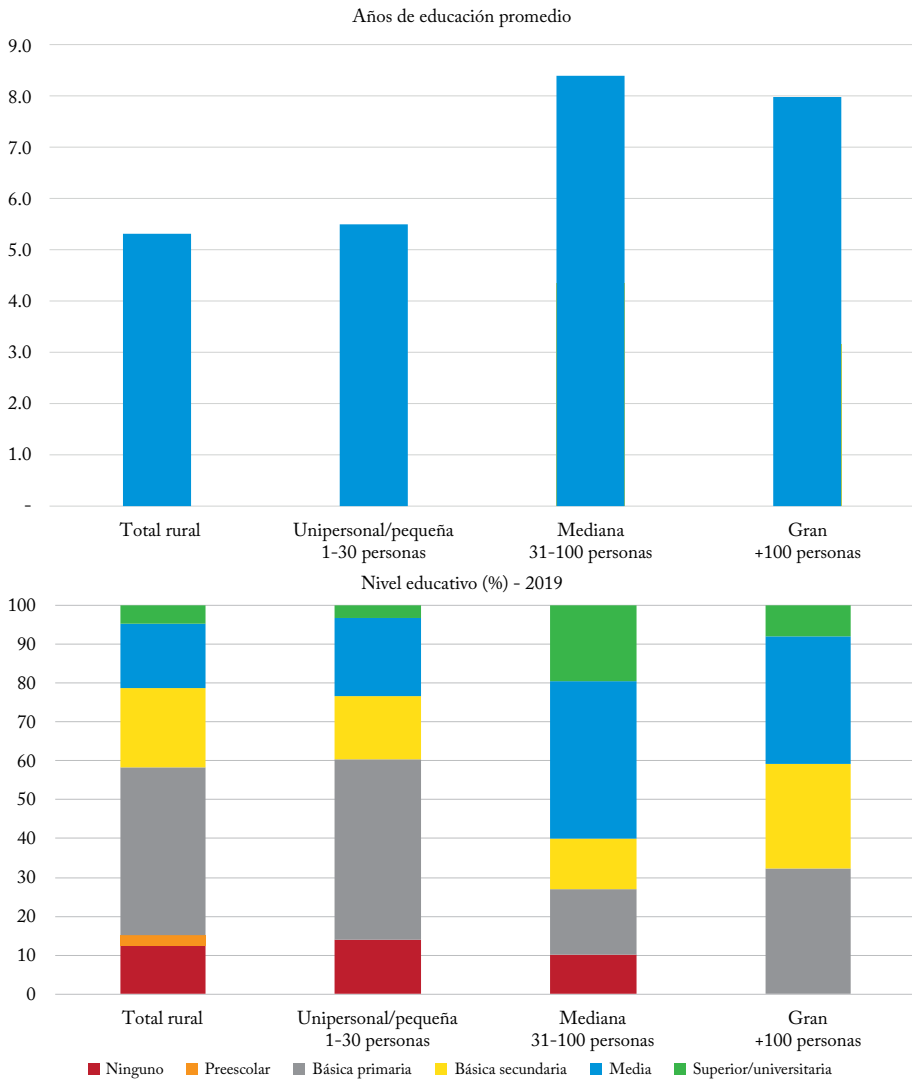


Figura 15. Años promedio de educación y nivel educativo

Fuente: GEIH, 2019 (DANE). Elaboración propia.

en las operaciones de minería de mediana escala, si bien presentan un 10% de ocupados sin ningún tipo de estudios, también concentran más de un 40% con educación media y casi un 20% con educación superior. Finalmente, para operaciones de más de 100 empleados, se encuentra que no hay personas sin ningún tipo de educación o educación preescolar. En cambio, los ocupados están distribuidos de manera aproximadamente

uniforme entre el nivel de educación básica primaria, básica secundaria y media, con un 7% con educación superior.

Por último, y como se mencionó en la introducción de esta sección, un último indicador de los beneficios generados por las operaciones mineras a nivel local, y que se relaciona con el empleo, son los encadenamientos productivos. Ahora bien, en este punto debemos notar que extraer información sobre encadenamientos productivos en zonas rurales y apartadas donde se ejecutan las operaciones mineras plantea una dificultad que supera los esfuerzos de esta investigación. Sin embargo, una posible forma de estudiar este punto es a través de la contratación misma. En particular, utilizando los números de la distribución de los niveles educativos alcanzados surge una luz sobre la posibilidad de formar encadenamientos productivos en los municipios en los cuales se desarrolla la actividad minera.

Por un lado, se tiene que las operaciones más grandes tienen el potencial de desarrollar encadenamientos productivos de mayor significancia, dadas sus necesidades de mano de obra, insumos y bienes y servicios. Esto, en contraposición a la minería pequeña y unipersonal que se hace, en la mayoría de los casos, de forma tradicional y para subsistencia. De la mano con lo anterior está el hecho de que la minería a gran escala tiene los mejores resultados en educación, especialmente cuando se analiza el personal en términos del título alcanzado. Solo este segmento de la actividad minera presenta trabajadores con títulos de posgrado otorgados. Todo esto para decir que este segmento de la población empleada en la minería a gran escala tiene un alto potencial de consumo y demanda de servicios y bienes, consolidando y promoviendo aún más la generación de encadenamientos productivos.

En conclusión, se puede afirmar que, en promedio, las condiciones laborales, medidas a través de las cuatro dimensiones mencionadas, ofrecidas por la extracción de metales preciosos son superiores que el promedio en la zona rural. Conjugando, además, los indicadores de características de la contratación y la seguridad social junto con los de educación e ingresos se logra apreciar la consistencia interna de los resultados. Por un lado, se tiene que los mayores niveles de contratación formal están en la minería que opera a gran escala mientras que los peores indicadores en términos de calidad de empleo y contratación están en la minería unipersonal y de pequeña escala. En este orden de ideas, para que el empleo creado por

la minería sea de mejores condiciones que el promedio en zonas rurales, se deben tener operaciones constituidas de acuerdo con la normatividad vigente. En efecto, los mejores indicadores en condiciones laborales y de contratación, así como de nivel de ingreso y escolaridad se presentan en las operaciones de mayor escala, a las cuales es más fácil vigilar y controlar.

3. Responsabilidad social y transparencia en la industria minera

A medida que en los años noventa se generalizaba en el mundo el concepto de desarrollo sustentable y las empresas mineras requerían intensificar la exploración y apertura de nuevas minas, la industria minera consideró necesario mejorar su desempeño ambiental y social, pensando no solo en lograr una mayor rentabilidad para sus accionistas, sino en contribuir al progreso de las comunidades del entorno de sus proyectos, con inversiones voluntarias e independientes de los aportes legales vigentes. Así, se generalizó en el medio minero el concepto de responsabilidad social, con cuyo desarrollo y aplicación se ha podido superar la desconfianza de la comunidad y obtener una ganancia intangible que llegó a calificarse como una licencia social para operar.

En Colombia, para ejercer legalmente la minería es necesario contar con una licencia ambiental que obliga a los operadores mineros a ejecutar un conjunto de acciones encaminadas a subsanar todos los impactos sobre el medio natural, social y económico que puedan generar las prácticas mineras. Adicionalmente, a partir de 2015, en virtud del artículo 122 de la Ley 1753 expedida ese año, los contratos de concesión que suscriba la autoridad minera nacional incluyen la obligación del concesionario de elaborar y ejecutar planes de gestión social que incluyan los programas, proyectos y actividades que determine dicha autoridad.

A partir de estos antecedentes, como se cita, alrededor del mundo la industria minero energética ha establecido principios éticos, códigos de conducta y creado diferentes estándares, con el fin de que las operaciones de este sector contribuyan al desarrollo responsable de la actividad, y al mejoramiento y sostenibilidad de la calidad de vida de las comunidades, es así como a continuación se destacan las principales iniciativas que a manera ilustrativa permiten confirmar el compromiso voluntario de los productores del oro con presencia en el país, de hacer una minería

sostenible más allá de lo técnico, con reportes ambientales y sociales que permitan una mejor comprensión de sus actividades y la construcción de confianza con la sociedad.

3.1. Iniciativa de Reporte Global (GRI)

Con el apoyo del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se creó en 1997 la institución denominada Global Reporting Initiative (GRI), cuyo propósito fue establecer estándares para que las empresas comprometidas con los principios del desarrollo sostenible mostraran periódicamente a sus grupos de interés los resultados de su gestión en torno a sus compromisos voluntarios en materia de responsabilidad social. Entre las varias empresas mineras que en Colombia se vincularon a esta iniciativa figura Mineros S. A., empresa perteneciente al segmento de la industria minera aurífera.

Desde 2008 Mineros S. A. viene presentando informes anuales de sostenibilidad bajo la metodología GRI y ellos permiten visualizar las inversiones que año a año destina esta firma al cumplimiento de las diferentes líneas de acción contempladas en su modelo de sostenibilidad, el cual propicia el desarrollo de las comunidades locales asentadas en las zonas de influencia de sus proyectos y el mejoramiento del entorno ambiental de los mismos. A manera de ejemplo, en la tabla 2 se compilan las inversiones que entre 2008 y 2018 ha destinado esta empresa a sus programas de responsabilidad social y de gestión ambiental.

Tabla 2. Inversiones de Mineros S. A. en responsabilidad social y gestión ambiental (millones de pesos)

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Responsabilidad social	1.490	2.137	2.682	2.647	2.800	3.846	3.109	5.271	3.948	4.023	3.916
Gestión Ambiental	2.183	1.157	3.354	4.728	5.065	4.393	6.794	8.959	12.486	12.368	12.721

Fuente: Mineros S.A. Informes de Sostenibilidad, 2008 a 2018.

3.2. Estándares de desempeño del ICMM

El International Council on Mining and Metals (ICMM) es una organización internacional creada en 2001 para promover que la industria minera y

metalúrgica se guíe por unos principios que permitan gestionar de manera sostenible los recursos naturales del planeta y mejorar el bienestar de las comunidades locales. Con tal propósito el ICMM publicó en 2003 una guía basada en diez principios de desarrollo sustentable, que incluyen prácticas ambientales, sociales y de gobernanza, a cuyo cumplimiento y medición periódica de desempeño se comprometieron todos sus miembros corporativos. Al ICMM pertenecen actualmente 27 empresas y 36 asociaciones regionales y nacionales. Entre esas empresas figura AngloGold Ashanti, empresa que desarrolla actividades exploratorias auríferas en Colombia.

Cuadro 1. Principios de desarrollo sustentable. ICMM 2020

1. Prácticas éticas de negocios.- Implementar y mantener prácticas éticas de negocios y sistemas sólidos de gobierno corporativo y transparencia para respaldar el desarrollo sostenible.
2. Proceso de toma de decisiones.- Integrar los temas de desarrollo sustentable a la estrategia y el proceso de toma de decisiones de la empresa.
3. Derechos humanos.- Apoyar los derechos humanos fundamentales y el respeto por culturas, costumbres y valores, en la relación con los empleados y otros grupos afectados por nuestras actividades.
4. Gestión de riesgo.- Implementar estrategias de gestión de riesgo basadas en información válida y una sólida base científica, y que tengan en cuenta las percepciones de las partes interesadas en relación con los riesgos.
5. Salud y seguridad.- Buscar el mejoramiento continuo de nuestro desempeño en salud y seguridad con el objetivo último de lograr la ausencia total de daños.
6. Desempeño ambiental.- Buscar el mejoramiento continuo de nuestro desempeño ambiental, por ejemplo en el ámbito de la gestión del agua, el consumo de energía y el cambio climático.
7. Conservación de la biodiversidad. Contribuir a la conservación de la biodiversidad y a enfoques integrados de planificación territorial.
8. Producción responsable.- Facilitar y estimular el diseño, uso, reutilización, reciclaje y disposición responsables de nuestros productos que contengan metales y minerales.
9. Desempeño social.- Contribuir al desarrollo social, económico e institucional de las comunidades situadas en nuestras áreas de operación.
10. Participación con las partes interesadas.- Implementar con nuestras partes interesadas mecanismos de información, comunicación y participación que sean efectivos, transparentes y verificables independientemente.

Fuente: ICMM, Principios mineros. Estándares de desempeño, 2020. Descargado el 15/02/2020 en: https://www.icmm.com/website/publications/es/principios-mineros/principios-mineros_es.pdf?fbclid=IwAR1bB6lZTiBPK_9pysuDt8UEa3B5erymgTPFO6uwC7woFZwociBOQjsXUtw

3.3. Iniciativa para la Transparencia de las Industrias Extractivas (EITI)

La Iniciativa para la Transparencia de las Industrias Extractivas (EITI) tuvo origen en la Cumbre Mundial para el Desarrollo Sostenible reunida en Johannesburgo en 2002.

El EITI establece un estándar para promover a nivel mundial una gestión transparente de los recursos naturales y con rendición de cuentas, que genere confianza por parte de los gobiernos y la sociedad. Colombia presentó su candidatura para formar parte de EITI en 2013 y para dar cumplimiento a los postulados de esta organización ha presentado los informes de rendición de cuentas correspondientes a las vigencias fiscales de 2014, 2015, 2016, 2017 y 2018.

En Colombia la estructura encargada de la dirección, control y seguimiento de la iniciativa, es el Comité Tripartito Nacional (CTN), conformado por representantes del Gobierno Nacional, del sector productivo y de la sociedad¹⁷.

Entre las empresas mineras actualmente adheridas a esta iniciativa figuran 3 del segmento aurífero: Mineros S. A., AngloGold Ashanti y Continental Gold.

El aporte más significativo de esta iniciativa al país se materializa en dos vías, una es que generó un espacio de diálogo con los tres representantes clave de esta industria: sociedad civil, empresarios y gobierno; y la segunda vía es la presentación pública mediante informes del ejercicio de cotejo —realizado por un tercero independiente—, entre las cifras pagadas por las empresas respecto a lo que recibió el Estado, en los rubros más representativos de esta industria, según se muestra en la tabla 3.

¹⁷ El Gobierno está representado por el Ministerio de Minas y Energía, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y la Dirección de Impuestos Nacional (DIAN) y con el apoyo técnico del Ministerio de Ambiente, la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), la Agencia Nacional de Minería (ANM), la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Por el sector productivo participan 24 grupos empresariales (con 41 empresas adheridas) de las industrias de minas e hidrocarburos, así como la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP) y Asociación Colombiana de Minería (ACM). La sociedad civil está representada por la Mesa de la Sociedad Civil para la Transparencia en las Industrias Extractivas, el Observatorio Colombiano de Minería, la Alianza por la Minería Responsable y la organización Crudo Transparente.

Pese a que el sector aurífero registra exportaciones que superan los 1.600 millones de dólares al año, dicho reporte no permite desagregar lo específico al caso del subsector de oro, sin embargo, se puede dilucidar que seis años de pagos en los rubros de canon superficiario e impuestos para oro, plata y platino —que son las contribuciones casi exclusivas de este subsector dentro del resto de sus aportes— equivalen al pago de más de 64.000 personas remuneradas con el salario mínimo de año 2020, o a la contribución de 564 viviendas de interés social para los colombianos.

Tabla 3. Pagos reportados por el Gobierno por parte de las empresas mineras adheridas EITI (millones de pesos)

Rubro	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Impuesto de Renta	445.688	260.626	332.479	533.836	1.574.388	1.617.350
Impuesto Equidad CREE	200.333	110.628	187.843	302.353	Art. 376, Ley 1819 de 2016, eliminó el impuesto sobre la renta para la equidad CREE.	
Impuesto al Patrimonio	127.636	127.636	Este impuesto desaparece en el 2015, reemplazado por el impuesto a la Riqueza.			
Impuesto a la Riqueza	Creado por la Ley 1739 de 2014 con vigencia 2015-2018, reemplazando al impuesto al patrimonio.		114.837	101.243	41.805	N. A.
Regalías minería	1.126.219	1.173.154	1.257.695	1.197.289	1.514.837	1.733.584
Compensaciones económicas	245.195	181.658	228.159	200.261	405.796	602.507
Canon superficiario y administración	8.101	3.194	3.186	7.127	5.578	6.154
Impuesto al Oro Plata y Platino (OPP)	8.836	8.026	9.645	11.572	10.812	9.708
Subtotal minería	2.162.008	1.864.922	2.133.844	2.353.681	3.553.216	3.969.303

Nota: al año 2019, los grupos empresariales del sector minero participantes de EITI Colombia suman 10: carbón (4), níquel (1), hierro (1), esmeraldas (1) y las empresas productoras de oro (3) son: Mineros (2013-2019), Continental Gold (2017-2019) y AngloGold Ashanti (2019).

Fuente: informes EITI Colombia. <http://www.eiticolombia.gov.co/es/>

4. La producción aurífera colombiana a nivel industrial

Como ya se ha indicado, el oro producido en Colombia proviene de fuentes con muy diferentes características y de solo las empresas que operan a

nivel industrial se cuenta con información específica disponible en medios digitales de acceso público, por cuanto su tipo de estructura empresarial así lo exige. En este sentido, presentamos a continuación la información básica de las empresas que actualmente operan proyectos industriales y de las que esperan hacerlo en el corto plazo.

4.1. Proyectos actualmente en producción

Las empresas que en el presente registran producción industrial de oro son Mineros S.A. y Gran Colombia Gold que vienen operando desde hace varios años, Continental Gold que produce pequeños volúmenes desde 2013, Antioquia Gold que empezó a producir en 2019 y Minera El Roble S.A. que lo produce como elemento accesorio. La participación de la producción agregada de estas empresas en el total de la producción nacional muestra una tendencia creciente a lo largo de los últimos once años, según se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Producción aurífera de la industria minera

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Producción industrial (koz)	112,7	207,3	219,3	219,4	232,2	241,5	274,2	292,9	329,2	365,5*
Producción nacional (koz)	1.723,5	1.797,5	2.127,6	1.792,2	1.833,1	1.903,4	1.987,1	1.320,4	1.143,3	1.179,1
Participación de produc. ind. (%)	6,5	11,5	10,3	12,2	12,7	12,7	13,8	22,2	28,8	31,0

* Dato provisional.

Fuente: informes de las empresas y ANM.

Los datos básicos de los proyectos que vienen operando de manera industrial las mencionadas empresas son los siguientes:

4.1.1. Grupo Mineros S.A.

Desde 2004 Mineros S.A. asumió la explotación de los depósitos auríferos aluviales localizados en el valle del río Nechí, en un área que abarca zonas de los municipios de Zaragoza, El Bagre y Nechí (Antioquia). Esta explotación se extendería hasta el año 2031 según el plan de producción diseñado por la empresa (Mineros S.A., 2019a.). Desde 2009 también

extrae oro y plata de la mina subterránea denominada La Y, localizada en el municipio de Zaragoza, la cual es operada por su subsidiaria Operadora Minera S. A. S. Según ha informado Mineros S. A., esta firma será vendida próximamente a la brasilera Para Resources Inc. (ahora Soma Gold Corp) (Mineros S. A., 2020a).

Los resultados de las dos operaciones productivas del Grupo Mineros S. A. en el periodo 2014-2018 son los siguientes se indican en la tabla 5.

Tabla 5. Producción aurífera de Mineros S. A. durante los últimos años

Operación	2014	2015	2016	2017	2018	2019*
Aluvial (oz)	95.493	86.253	89.851	89.709	80.542	84.301
Subterránea (oz)	23.284	20.810	5.609	13.664	17.379	17.524
Total (oz)	118.777	107.063	105.460	103.373	97.921	101.825

* Producción proyectada.

Fuente: Mineros S.A., Informe Financiero 2018.

En el yacimiento aluvial las reservas de oro probadas se estimaron a diciembre de 2017 en 879.000 oz y los recursos medidos e indicados (M&I) en 686.000 oz (Mineros S. A., 2019b).

En la mina La Y las reservas de oro probadas y probables (P+P) se estimaron a 31 de diciembre de 2018 en 23.700 oz y los recursos medidos e indicados (M&I) en 84.500 oz (Mineros S. A., 2019b).

4.1.2. Gran Colombia Gold Corp.

Gran Colombia Gold ha operado durante la última década dos proyectos de mucha tradición histórica. El primero es Segovia que incluye cuatro minas subterráneas: tres (El Silencio, Providencia y Sandra K) ubicadas en el municipio de Segovia (Antioquia) y una (Carla) en el municipio de Remedios (Antioquia). El segundo corresponde a la mina subterránea denominada Marmato Zona Baja, localizada en el municipio de Marmato (Caldas). En esta mina la empresa concluyó en 2019 el estudio de prefactibilidad de la expansión de sus operaciones mineras y espera empezar a aumentar paulatinamente su producción a partir de 2023 y hasta 2038. En el área denominada Marmato Zona Alta, Gran Colombia avanza en un proyecto de exploración encaminado a la apertura de una nueva mina.

La producción registrada durante los últimos cinco años en las dos zonas mineras de Gran Colombia Gold se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Producción aurífera de Gran Colombia Gold durante los últimos años

Minas	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Segovia (oz)	74.506	92.894	126.261	148.659	193.050	214.241
Marmato (oz)	24.116	23.963	23.447	25.162	24.951	25.750
Total (oz)	98.622	116.857	149.708	173.821	218.001	239.991

Fuente: Gran Colombia Gold, Informes anuales corporativos.

Las reservas auríferas probadas y probables (P+P) estimadas por Gran Colombia para el conjunto de minas de Segovia a 31 de diciembre de 2018 fueron de 687,9 koz y a su vez los recursos medidos e indicados (M&I) se estimaron a esa fecha en 702 koz (Gran Colombia Gold Corp, 2019a).

Para el proyecto Marmato Zona Baja la empresa ha divulgado un estimativo de recursos medidos e indicados (M&I) actualizado a 31 de julio de 2019 de 2.899 koz (Gran Colombia Gold, 2019b).

4.1.3. Continental Gold

Continental Gold es la empresa propietaria del proyecto Buriticá, el cual se halla localizado en el municipio antioqueño del mismo nombre y abarca seis zonas mineralizadas conocidas como Veta Sur, Yaguará, Orión, Electra, Perseus y Laurel. Este proyecto fue adquirido por Continental Gold en 2007 y ya había sido explorado preliminarmente por sus anteriores propietarios. Continental Gold, empresa cuya propiedad accionaria ha sido traspasada a Zijin Mining Group, ha anunciado que a finales de 2020 iniciará la producción a gran escala en las zonas Veta Sur y Yaguará, las cuales estarán en producción durante 14 años, al tiempo que continuará con la exploración y evaluación de las otras zonas.

Desde 2012 Continental Gold empezó a producir pequeñas cantidades de oro en Buriticá, provenientes tanto del proceso de construcción de la mina como de varios contratos de formalización minera que propició dentro del área de su concesión.

Tabla 7. Producción aurífera de Continental Gold durante los últimos años

	2014	2015	2016	2017	2018	III-2019
Proyecto Buriticá (oz)	5.539	6.843	7.500	4.790	1.945	999

Fuente: Continental Gold, Reportes anuales.

Los estimativos de Continental Gold sobre los recursos minerales y reservas mineras existentes en el proyecto (Veta Sur y Yaguará), según cálculos actualizados a enero de 2019 (Continental Gold, 2019), son los siguientes: Recursos medidos e indicados (M&I) de 5,32 Moz de oro y de 21,00 Moz de plata. Reservas probadas y probables (P+P) de 3,71 Moz de oro y 10,72 Moz de plata.

4.1.4. Antioquia Gold

Antioquia Gold es la empresa operadora y propietaria del proyecto Cisneros, el cual está conformado por varias concesiones localizadas en los municipios de Cisneros y Santo Domingo (Antioquia). Las actividades exploratorias de este proyecto las inició Antioquia Gold en 2009 y actualmente, al tiempo que avanza en el estudio de factibilidad, realiza actividades preliminares de explotación en las minas Guaico y Guayabito, al tiempo que avanza en el montaje de una planta de beneficio.

La producción en las mencionadas minas se inició en enero de 2019 y durante ese año produjo un total de 12.192 oz de oro (Antioquia Gold Inc., 2020). Los recursos medidos e indicados (M&I) estimados para el Proyecto Cisneros en septiembre de 2017 fueron de 126.241 oz (Antioquia Gold Inc., 2017).

4.1.5. Miner S.A. - Atico Mining Corporation

Atico Mining es la propietaria mayoritaria de Miner S.A. y también la operadora del proyecto El Roble que se encuentra localizado en Carmen de Atrato, Chocó. Desde los años noventa en El Roble se produce concentrado mineral de cobre, el cual contiene una significativa proporción de oro. Este proyecto viene desarrollando desde 2013 un proceso de ampliación que incluye la exploración y evaluación de nuevas áreas mineralizadas. En la tabla 8 se muestra la producción aurífera que ha tenido Atico Mining durante los seis años que viene operando este proyecto (Atico Mining Corporation, 2020).

Tabla 8. Producción aurífera de Miner S. A. durante los últimos años

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
El Roble (oz)	9.538	10.994	11.519	10.923	11.344	10.480

Fuente: Atico Mining (2020).

Los recursos medidos e indicados (M&I) que Atico Mining estimó para oro a 30 de junio de 2018 fueron de 130.446 oz (Atico Mining Corporation, 2018).

4.2. Proyectos programados para entrar en producción en el mediano plazo

En la actualidad se tiene conocimiento de cinco proyectos para producción de oro (como producto principal o accesorio) con posibilidades de iniciar su producción industrial en algún momento de la presente década, por lo cual no se descarta que a lo largo de ella se tornen factibles proyectos que en el presente se encuentran en las primeras fases de la etapa exploratoria. Las principales características de los cinco proyectos con alta posibilidad de entrar en etapa de producción antes de 2029 son las siguientes:

4.2.1. Proyecto Soto Norte

Minesa – Sociedad Minera de Santander S. A. S. adelanta el proyecto Soto Norte para explotar en forma subterránea un yacimiento de minerales de oro, plata y cobre localizado en el municipio de California (Santander) y que contará con planta de beneficio localizada en el municipio de Suratá, a la cual será conducido el mineral extraído de la mina a través de dos túneles de 5,6 km. En esta planta de beneficio se obtendrá un concentrado mineral que será exportado para ser procesado fuera del país.

Este proyecto se encuentra actualmente en etapa de factibilidad y sobre su potencial Minesa ha divulgado (Minesa, 2020) el siguiente estimativo de Recursos Indicados, considerando una ley de corte de 1,5 g/t de Au, de 7,052 Moz de oro, 34,339 Moz de plata y 151,617 Mlb de cobre. Al mismo tiempo, se estiman unos Recursos Inferidos de 5,531 Moz de oro, 35,443 Moz de plata y 119,286 Mlb de cobre.

Según el Plan de Manejo Ambiental que actualmente se tramita para Soto Norte (Minesa, 2020), el proyecto iniciará su etapa productiva luego de llevar a cabo el desarrollo de la infraestructura requerida, proceso que tomará cuatro años. La etapa de producción se extenderá por un periodo de 21 años y su producción anual será en promedio de 410.000 oz de oro.

4.2.2. Proyecto Gramalote

Gramalote es un proyecto de propiedad de las empresas Anglo Gold Ashanti y B2Gold. Se encuentra localizado en el municipio de San Roque (Antioquia) y se propone explotar a cielo abierto tres zonas mineralizadas: una de tamaño grande —denominada Gramalote— y dos de menor tamaño —denominadas Trinidad y Monjas—, así como el montaje de una planta de beneficio.

En los primeros días de 2020, B2Gold ha divulgado un adelanto de los resultados de la evaluación económica preliminar del proyecto (B2Gold – News, 2020), según los cuales de la sola zona Gramalote se podrían extraer un total de 3,85 Moz de oro, a un promedio anual de 283.990 oz, durante un periodo de 13,6 años.

B2Gold anunció también que durante 2020 se realizarán más perforaciones en las zonas de Trinidad y Monjas, a fin de tener un estimativo completo de los recursos existentes en el proyecto y así concluir la evaluación económica del mismo a finales de este año.

4.2.3. Proyecto Quebradona

Quebradona es un proyecto que adelanta Anglo Gold Ashanti en el municipio de Jericó (Antioquia) para explotar un yacimiento de cobre que contiene también una fracción de oro y plata. El proyecto está diseñado para producir un concentrado polimetálico que se exportará para ser beneficiado en otro país. Este concentrado tendrá mineral de cobre con una ley de 27,9%, oro 9,99 g/t y plata 115 g/t.

Según el PMA del proyecto (AngloGold Ashanti - Minera de Cobre Quebradona, 2019), la construcción y montaje de este proyecto tomará un tiempo de 4 años y la explotación de la mina se llevará a cabo durante un lapso de 21 años.

4.2.4. Proyecto San Matías

San Matías es un proyecto de cobre, oro y plata, localizado en el municipio de Puerto Libertador (Córdoba), que Cordoba Minerals Corp. viene explorando desde 2017 y en el cual ha identificado plenamente cuatro depósitos minerales denominados Alacrán, Montiel Este, Montiel Oeste y Costa Azul, siendo Alacrán el considerado más promisorio. Cordoba Minerals concluyó a mediados de 2019 la evaluación económica preliminar

(Preliminary Economic Assessment, PEA) del proyecto (Cordoba Minerals Corp., 2019) y actualmente avanza en el estudio de prefactibilidad que espera terminar en marzo de 2021, así como en la elaboración del estudio de impacto ambiental (EIA) que planea presentar en junio de ese año (Cordoba Minerals Corp., 2020).

De acuerdo con el mencionado PEA, los Recursos Indicados estimados para este proyecto son de 1.142,7 Milb de cobre, 942.900 oz de oro y 8.887.2000 oz de plata, al tiempo que los Recursos Inferidos son de 27,2 Milb de cobre, 29.900 oz de oro y 185.300 oz de plata.

Para el aprovechamiento de los yacimientos de este proyecto en el PEA se propone operaciones mineras a cielo abierto, en las cuales se estima que pueden producirse 417.300 toneladas de Cu, 724.500 onzas de Au y 5.930.000 onzas de Ag a lo largo de 23 años.

4.2.5. Proyecto San Ramón

El proyecto San Ramón está localizado en el municipio de Santa Rosa de Osos (Antioquia). La empresa que exploró el yacimiento e inició la construcción de la mina en 2015 fue la canadiense Red Eagle Mining. Con recursos medidos e indicados (M&I) de oro estimados en 479.000 oz y unas reservas probadas y probables (P+P) de 405.000 oz (Red Eagle Mining Corporation, 2014), Red Eagle inició la explotación de esta mina en enero de 2018 y esperaba continuar haciéndolo a lo largo de ocho años.

Sin embargo, una deuda que Red Eagle había contraído con Orion Fund JV se tornó impagable para la empresa, ante lo cual dicho fondo procedió a asumir la propiedad de la mina por cuanto ella era la prenda de garantía del crédito Red Eagle Mining Corporation (2018). En estas condiciones, es incierta la fecha en que podrá reactivarse este proyecto.

5. Beneficios futuros

Las secciones anteriores dan cuenta de los niveles que los beneficios de la minería aurífera pueden tener en la actualidad. Esto, si bien permite dimensionarlos, no tiene en cuenta cómo podrían cambiar en el futuro, máxime con el desarrollo de nuevos proyectos industriales. Estimar los beneficios futuros resulta indispensable para tener una apreciación integral de lo que podrían ser las contribuciones del sector y, por esta vía, para informar las actitudes y creencias sobre lo que debe ser la política pública minera.

Estimar estas contribuciones supone varios retos. En primer lugar, establecer los valores futuros de las variables que determinan los beneficios como cantidades producidas, fechas de entrada de los nuevos proyectos, la certidumbre sobre los diferentes tipos de reservas o los precios internacionales. En segundo lugar, reconocer que cada una de ellas no es determinística, sino que tiene un posible rango de variación con unas probabilidades de ocurrencia asociadas. Y, finalmente, que dichas variables actúan simultáneamente, por lo que su interacción debe ser tenida en cuenta explícitamente en cualquier ejercicio de proyección.

Teniendo en cuenta lo anterior, la metodología de estimación de los beneficios utilizada incorpora estas consideraciones para dar una idea del nivel que ellos podrían tener en el futuro. El resto de la sección se divide en dos partes: la primera explica la metodología de estimación y la segunda los resultados y sus implicaciones.

5.1. Metodología

El punto de partida es la ecuación para determinar el valor de los beneficios futuros. Esta está dada por:

$$B_t = [\sum_{i=1}^n (Q_{i,t}^E C_{i,t}^E) + \sum_{j=1}^m (Q_{j,t-R}^N C_{j,t}^N)] [(RTA_t + IVA_t) + (REG_t + ICA_t)] Tc_t, \quad (1)$$

donde B son los beneficios en pesos; Q es la producción de oro en onzas; C son los castigos a la producción; R es el retraso en el inicio de los nuevos proyectos; RTA es el impuesto de renta en dólares por unidad de producción; IVA es el impuesto al valor agregado en dólares por unidad de producción; REG son las regalías en dólares por unidad de producción; ICA es el impuesto de industria y comercio en dólares por unidad de producción; y Tc es la tasa de cambio en pesos por dólar.

Los superíndices E y N se refieren, respectivamente, a la producción existente y a la que vendrá de los nuevos proyectos. En cuanto a los subíndices, t se refieren al período de tiempo que incluye los diez años comprendidos entre 2020 y 2029; i y j , respectivamente, a los n proyectos existentes y a los m proyectos que se supone entrarán en el período de proyección; y R a los retrasos que podrían sufrir los nuevos proyectos para iniciar su producción.

De esta manera, la ecuación (1) define los beneficios como el producto de la producción de oro efectivamente realizada en un año específico,

multiplicada por los pagos de impuestos y regalías correspondientes y convertida a pesos con la tasa de cambio vigente.

Es importante tener en cuenta que estos beneficios subestiman los beneficios totales efectivamente generados por los proyectos en la medida en que no incluyen impuestos no asociados con la producción como los aranceles; pagos municipales que típicamente hacen las empresas formales como predial o alumbrado; pagos en las fases previas a la producción como el canon superficiario; y los impuestos del oro que pagan las explotaciones de propiedad privada. Si bien todos ellos pueden no ser tan significativos, la razón para excluirlos de las estimaciones tiene que ver menos con esto y más con la dificultad para encontrar información suficiente y de calidad para hacer las estimaciones respectivas.

A continuación se describe cada una de las variables utilizadas en las estimaciones, comenzando con las cantidades producidas.

Producción: En línea con lo descrito en la sección anterior, para los proyectos existentes la producción se toma de los informes financieros oficiales de las compañías que contienen las proyecciones a cinco años. Para los cinco años restantes se toma el valor del último año creciendo con el promedio de los cinco años anteriores. Dado que el capítulo se restringe a la producción industrial, los proyectos existentes corresponden a aquellos llevados a cabo por Gran Colombia Gold, Mineros S. A., Atico Mining, Antioquia Gold y Continental Gold.

Con el mismo criterio, la producción de los nuevos proyectos corresponde a la del proyecto *Soto Norte* de Minesa, al proyecto *Gramalote* de las empresas Anglo Gold Ashanti y B2Gold, al proyecto *Quebradona* de la empresa Anglo Gold Ashanti, al proyecto *San Matías* que adelanta la empresa Córdoba Minerals Corp y al proyecto *San Ramón* que antes pertenecía a la empresa Red Eagle y que ahora está en manos del fondo financiero Orion Fund. Las cantidades por producir se toman también de los informes públicos de las compañías, teniendo como fecha de inicio las que resultarían de los tiempos que contempla la regulación para las fases que a cada uno le falta completar.

Vale la pena anotar que ante la incertidumbre frente a los tiempos de transición por el cambio de dueño se toma como 2021 la fecha de entrada

de Continental; y como 2024 la de San Ramón por los tiempos que tomará la definición de un nuevo operador.

Las cantidades de oro esperadas y las fechas de entrada para cada uno de los proyectos se muestran en la tabla 9. En ella puede verse cómo, en ausencia de retrasos, la producción industrial total se multiplicaría 5,5 veces al pasar de 340.000 onzas en 2020 —un poco menos de la tercera parte de la producción total del país¹⁸— a 1,86 millones al final de la década cuando ya deberían haber entrado Quebradona y Soto Norte. En el agregado de la década, la mayor producción por fuera de las existentes —que aportan un poco más de la tercera parte— vendría de Buriticá con un 25%, y de Soto Norte y Quebradona con el 15% y el 13%, respectivamente. En total, si no se presentaran retrasos ni desviaciones en las estimaciones de reservas, el país produciría 8.6 millones de onzas a partir de este tipo de proyectos entre 2020 y 2029.

Tabla 9. Proyección industrial esperada de oro (oz)

Año	Existentes	Buriticá	San Ramón	Soto Norte	Quebradona	Gramalote	San Matías
2020	340,627						
2021	307,203	17,400					
2022	270,692	291,500					
2023	309,548	265,500					
2024	350,813	281,600	70,000				
2025	363,299	253,400	78,000				
2026	347,026	287,200	52,000	41,000			
2027	321,422	276,900	48,000	410,000	103,800		
2028	304,616	273,700	54,000	410,000	505,600	28,300	43,700
2029	307,349	273,000	37,000	410,000	505,600	283,900	433,900

Fuente: cálculos de los autores a partir de informes de las empresas.

Ajustes: Para efectos de hacer más realistas las proyecciones es indispensable tener en cuenta que las cantidades de la tabla 2 pueden estar

¹⁸ Ver Escobar y González (2019) para una aproximación a cómo podría descomponerse la producción.

sujetas a variaciones. En el caso de las existentes estas pueden deberse a factores técnicos de la operación o a factores de entorno que lleven a disrupciones. Se asume, por lo tanto, que la producción efectiva puede tener un ajuste o castigo de hasta 10% en la producción esperada. Para la nueva, sobre todo aquellos proyectos que no han terminado la fase de exploración, se asume un castigo de entre el 10% y el 40% —excepto para Buriticá, sobre el que hay mayor certidumbre y por lo tanto se le aplica el mismo castigo que a las existentes.

Retrasos: Además de los castigos en producción, los proyectos nuevos pueden retrasarse. Aunque ello puede responder a la materialización de cualquiera de los riesgos descritos en la figura 1, la experiencia reciente ha mostrado que estos frecuentemente están asociados a factores de entorno como procesos de licenciamiento, consultas populares o problemas de orden público. En consecuencia, se asume que frente a la fecha de entrada contemplada en la tabla 2, los proyectos pueden tener retrasos de {0, 1, 2} años. Para Buriticá, dada la mayor certidumbre, no se suponen retrasos. Así mismo, y una vez iniciado un proyecto, se asume que los flujos de producción serán los dados en la tabla 2, pero ajustados a la fecha de entrada correspondiente al respectivo retraso.

Impuestos nacionales: Los beneficios agregados de la minería se dividen en las contribuciones a la nación y los recursos recibidos por los Entes Territoriales (ET). Como se dijo atrás, las contribuciones administradas por el Gobierno Nacional están representadas en el impuesto a la renta corporativa y el IVA. Para determinar los valores correspondientes a estos impuestos se toma primero la información reportada por la DIAN para la actividad económica de “extracción de metales preciosos” correspondiente a ingresos brutos operacionales y a recaudo por impuesto de renta e IVA. Con estos valores se calcula una tasa promedio de tributación por impuesto de renta y una tasa promedio por IVA como porcentaje de los ingresos brutos operacionales.

En segundo lugar, dado que la actividad económica utilizada agrupa las contribuciones de la extracción del oro, la plata y el platino, se obtiene la participación promedio del oro dentro de esta actividad a partir de su importancia relativa dentro del pago de regalías que, en promedio, resulta ser de 97,5%. Este cálculo se realizó para cada uno de los años

del período 2000-2018 buscando capturar el comportamiento de las dos últimas décadas de historia del sector.

En tercer lugar, se halla una tasa promedio para renta y una para IVA en los 19 años. El resultado es una tarifa promedio de impuesto de renta de 4,77% y una tarifa de IVA de 0.54% sobre los ingresos brutos operacionales. Finalmente, estos porcentajes se multiplican por los precios internacionales del oro para obtener los valores correspondientes a los impuestos nacionales que cada onza de oro producida le generaría a la Nación.

A este respecto, se consideran para la estimación precios del oro entre US\$1200 y US\$1400 por onza. El rango se obtuvo de los valores utilizados en modelos económicos de todos los proyectos que registraron informes técnicos NI 43-101 ante la autoridad económica de Canadá entre enero y marzo de este año¹⁹.

Aportes locales: Para capturar los beneficios que reciben los ET por las operaciones mineras industriales, se utilizan el pago de regalías y el recaudo por el impuesto de industria y comercio (ICA). Para el caso de las regalías, se determinó la relación entre el pago de regalías por unidad producida y el precio internacional. Para ello se utilizaron los datos trimestrales de pago de regalías por extracción de oro desde el 2012 hasta el 2019 y del precio internacional del oro reportado por el *World Gold Council*. Específicamente se realizó un análisis de regresión tomando como variable dependiente el logaritmo de las regalías por onza, y como independiente el precio por onza en dólares²⁰, dado que esta forma funcional permite ver el impacto marginal de los precios del oro sobre el pago de regalías como porcentaje²¹.

¹⁹ El NI 43-101 es el instrumento nacional para las Normas de Divulgación de Proyectos Mineros de propiedad o cuya exploración la llevan cabo empresas que tienen la obligación de reportar sus resultados en los mercados de valores canadienses. El objetivo de dichos informes es evitar que información errónea, fraudulenta o engañosa relacionada con proyectos mineros sea entregada a inversionistas en los mercados bursátiles vigilados por la Autoridad de Valores de Canadá.

²⁰ Para calcular las regalías en dólares por onza, se utiliza la tasa de cambio promedio del trimestre y el factor de conversión de 31.1gr por oz troy.

²¹ La regresión genérica es: $\text{Log}(Y) = \beta_0 + \beta_1 X$, donde en una unidad adicional en X tiene un impacto de $100 \cdot \beta_1\%$ en Y.

El resultado de esta regresión da lugar a la ecuación que se utiliza en el cálculo de los beneficios para estimar el pago de regalías por onza²² dado que permite aproximar la respuesta de las regalías generadas por onza a diferentes niveles del precio internacional del oro.

En cuanto al impuesto de industria y comercio, que es administrado por las alcaldías municipales, se encontró una tarifa promedio a partir de las tasas reportadas por cada una de las alcaldías en los municipios en los cuales se encuentran las concesiones mineras incluidas en las proyecciones. Esta tarifa promedio se consultó directamente a las alcaldías y corresponde a 6.9×1000 sobre el valor bruto de la producción. Al multiplicar este valor por el correspondiente precio internacional se obtiene el valor que cada onza de oro debería generar por concepto de ICA.

Al igual que para el cálculo de los impuestos nacionales, y por las mismas razones allí expuestas, también se utilizó un rango de variación de precios del oro entre US\$1200 a US\$1400 por onza.

Tasa de cambio: Dada su enorme volatilidad de corto plazo y los horizontes de tiempo que usualmente utilizan los ejercicios de programación macroeconómica, no es común encontrar proyecciones de largo plazo para la tasa de cambio. Para efectos del presente ejercicio se utilizó un rango de \$3.200 a \$3.700 pesos por dólar que busca capturar tanto los niveles actuales de equilibrio como las diferencias esperadas en la inflación de los dos países. Cabe anotar que este rango es consistente con las proyecciones de analistas nacionales y extranjeros para 2020 y 2021 que recopila el Banco de La República²³.

El último aspecto de la metodología tiene que ver con el tratamiento de la incertidumbre. Tal como se dijo al comienzo de la sección, las variables utilizadas son de naturaleza aleatoria y pueden variar simultáneamente dentro de los rangos descritos para cada una de ellas. Para incorporar este elemento en el cálculo de los beneficios se utilizó un análisis de Montecarlo a partir de 100.000 simulaciones para cada una de las variables para cada año de proyección. No obstante, dado que no se conoce la distribución de

²² Específicamente, la expresión es $\exp \left[\ln \left(\frac{\text{Regalías}_{\text{USD}}}{\text{oz}} \right) \right] = 2.477 + 0.0008 \frac{\text{Precio}_{\text{USD}}}{\text{oz}}$.

²³ Ver Banco de la República, en <https://www.banrep.gov.co/es/proyecciones-macroeconomicas-analistas-locales-y-extranjeros>. Consultado el 16 de marzo de 2020.

probabilidad de las variables y para evitar imponer arbitrariamente una estructura *a priori*, se supuso que las variables siguen una distribución uniforme dentro de su rango de variación²⁴.

5.2. Resultados

La naturaleza de la metodología empleada implica que los resultados no son estimaciones puntuales sino las distribuciones de probabilidad producto de la variación conjunta de las variables utilizadas. El caso de la producción se muestra en la figura 16.

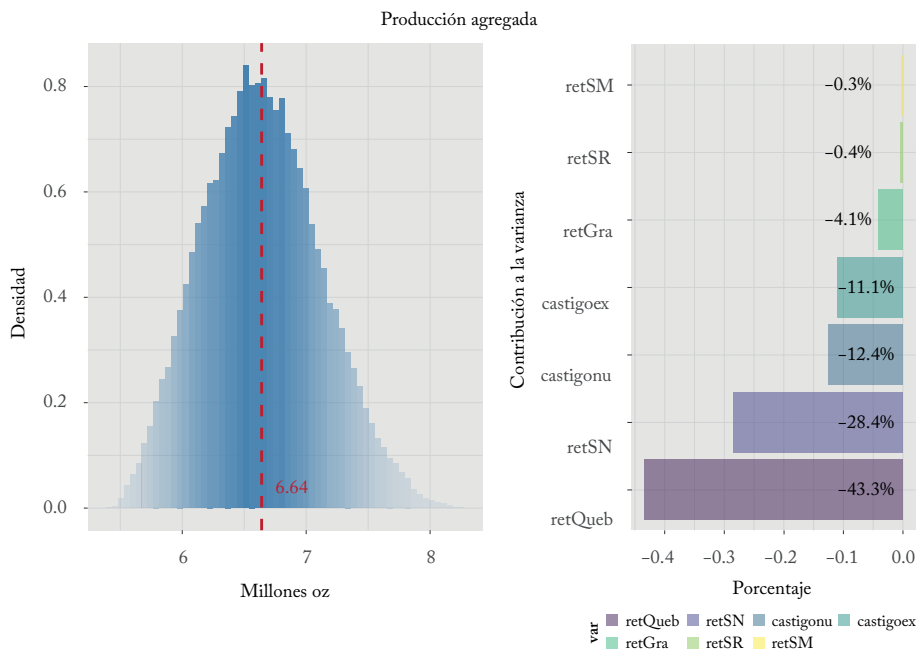


Figura 16. Proyección industrial agregada de oro 2020-2029

Fuente: elaboración propia.

El panel izquierdo muestra cómo la producción industrial para la década puede variar entre 5,42 y 8,27 millones de onzas, con una media de 6,64 millones. Esta producción es menor que la de la tabla 2 porque a diferencia de aquella que es determinística, esta incorpora el efecto de los

²⁴ Las simulaciones de Montecarlo y su análisis se realizaron en R, versión 3.6.2.

posibles retrasos en los nuevos proyectos junto con los ajustes a las cantidades. Dicho impacto se ilustra en el panel de la derecha que descompone la varianza de la producción atribuible al retraso y a los ajustes o castigos en cada uno de los proyectos²⁵. El proyecto que más pesa es Quebradona con más del 43% no solo por ser el de mayor volumen de producción, sino porque su fecha de entrada hace que los retrasos posibles determinen si alcanza o no a producir en el período de proyección. El signo de su contribución refleja el hecho de que hay una correlación negativa entre el retraso en este proyecto y la cantidad producida.

Le sigue Soto Norte con un 28,4% negativo que, aunque significativo, es un poco menor, y que refleja la importancia del tamaño de su producción así como el hecho de que aún con el peor retraso alcanzaría a aportar algo a las cantidades producidas. En conjunto, los dos proyectos explican casi tres cuartas partes de la variación en la producción durante la década. Los retrasos de los demás proyectos también tienen una correlación negativa, pero dado su menor tamaño relativo y sus fechas de entrada tienen una incidencia mucho menor en el nivel de producción agregada. No puede decirse lo mismo de los castigos que, combinados, explican casi el 23,5% de la variación en las cantidades, con un mayor peso de los castigos a los nuevos por ser de mayor magnitud y por aplicarse a proyectos que tienen mayor variabilidad en los retrasos.

La evolución de los proyectos a lo largo de la década y su interacción con las variables financieras da lugar a diferentes niveles de beneficios a lo largo de la década. Estos se muestran en la figura 17 donde puede verse que los beneficios fiscales en pesos corrientes comenzarían con un promedio de \$124,8 mil millones en 2020 y crecerían más de cuatro veces hasta un promedio de \$490,7 mil millones al final de la década. En los primeros años de proyección la distribución es más o menos simétrica, reflejando un rango de variación relativamente constante.

A partir de 2024 la distribución va perdiendo su simetría a medida que los nuevos proyectos comienzan a entrar. En 2027 el efecto es tan fuerte que la distribución se torna bimodal como consecuencia del efecto

²⁵ Los nombres de las variables tienen la siguiente convención: para los retrasos los nombres están compuestos de *ret* seguido del nombre del proyecto y para los ajustes o castigos por la palabra *castigo* seguido de las letras *ex* para la producción existente y *nu* para la producción proveniente de los proyectos nuevos.

combinado de los potenciales retrasos y castigos a la producción de los proyectos más grandes —Quebradona y Soto Norte— que deberían entrar ese año. La joroba de la derecha refleja el alza en la producción que vendría en el tercio de los casos en que los proyectos entrarían a tiempo y traerían un aumento significativo en la producción y los beneficios. Para 2028 se generan tres picos que nuevamente reflejan los retrasos potenciales de estos proyectos que deberían estar en su segundo y tercer año pero podrían no haber comenzado o apenas estar arrancando, así como la potencial entrada de Gramalote y San Matías. En 2029 ya los proyectos grandes han entrado en la mayoría de los casos y la distribución se acerca nuevamente a una unimodal, pero con un sesgo la derecha por aquellos casos en los que no se presentaron retrasos.

La figura 18 muestra los llamados *fan charts* tanto para la producción como para los beneficios agregados. Estas gráficas muestran los rangos de variación posible para las proyecciones a lo largo del tiempo dada la incertidumbre de las variables utilizadas para su estimación. De esta manera, los colores permiten ver los intervalos de confianza de las variables estimadas con su correspondiente porcentaje de probabilidad, la franja amarilla, por ejemplo, recoge el 50% de los casos. En ambos casos, hay una trayectoria similar en la medida en que los beneficios se generan a partir de la producción y con un rango de incertidumbre que aumenta en el tiempo. Sin embargo, la incertidumbre es mayor para los beneficios porque para estos, además de los retrasos y castigos que afectan a la producción, hay que sumarle la incertidumbre de las variables financieras.

Esto último puede verse en detalle en la figura 19. El panel de la izquierda muestra que los beneficios agregados para la década se moverían entre \$1,61 billones y \$2,97 billones de 2020, con una mediana de \$2,17 billones que es ligeramente inferior a la media de \$2,18 billones resaltada en la figura. La asimetría de la distribución —hay \$242.000 millones más de variación en la mitad superior— refleja de nuevo el efecto del aumento en beneficios que traería la entrada a tiempo de los nuevos proyectos. En cualquier caso, las estimaciones indican que la minería industrial de oro estaría en capacidad de generarle al país un entre \$161.000 millones y \$297.000 millones en promedio por año durante una década. Cuál sea el valor final dependerá de cómo se comporten las variables utilizadas en la estimación.

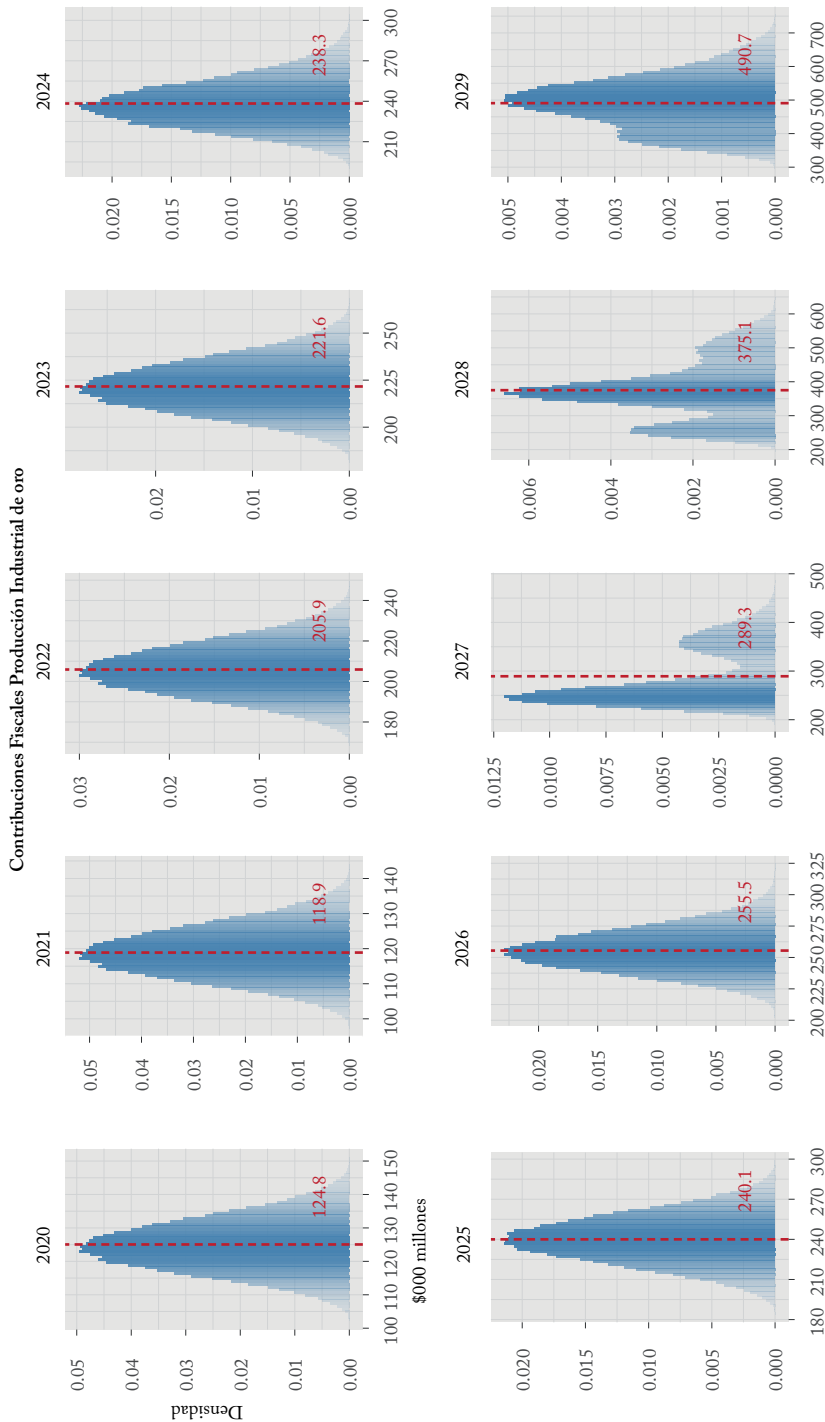


Figura 17. Beneficios fiscales producción industrial de oro

Fuente: elaboración propia.

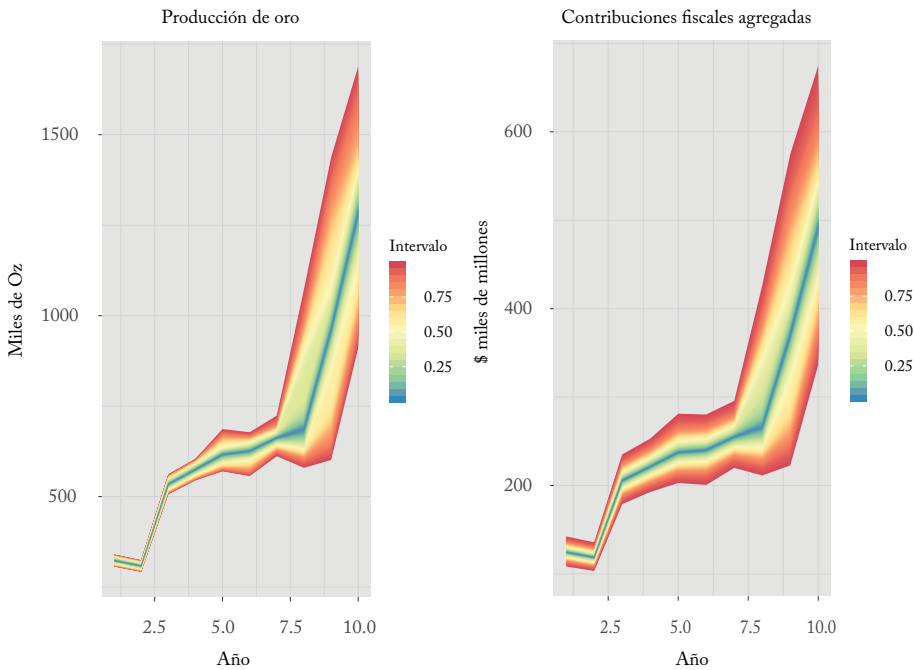


Figura 18. *Fan charts* producción industrial de oro y beneficios fiscales

Fuente: elaboración propia.

Ello se ilustra en el panel de la derecha que permite ver las contribuciones a la variación de los beneficios de cada una de las variables utilizadas en la estimación. La de mayor impacto positivo es la tasa de cambio (*tc*) que explica casi una cuarta parte, seguida de los precios internacionales que a través de su efecto en los impuestos (*tx*) y las regalías (*reg*) explican el 15% de la variación. En el otro extremo están las de incidencia negativa, donde el mayor peso lo tienen los retrasos en la entrada de los proyectos con Quebradona (*retQueb*) y Soto Norte (*retSN*) explicando casi el 45% de la variación en los beneficios. Los castigos a la producción también tienen un impacto negativo como es de esperarse, y su contribución a la varianza es de magnitud similar pero con un mayor peso de la producción nueva (*castigonu*), dados los mayores valores que pueden tomar.

Tomados en su conjunto, estos resultados muestran la influencia relativa de las variables en el nivel de beneficios por tipo de variable: las financieras el 39%, los castigos a la producción el 15% y los retrasos el 45%. De estos tres grupos de variables dependerá dónde se ubiquen los

beneficios totales para la década e indicarán las palancas con las que cuenta el país para incidir en ellos.

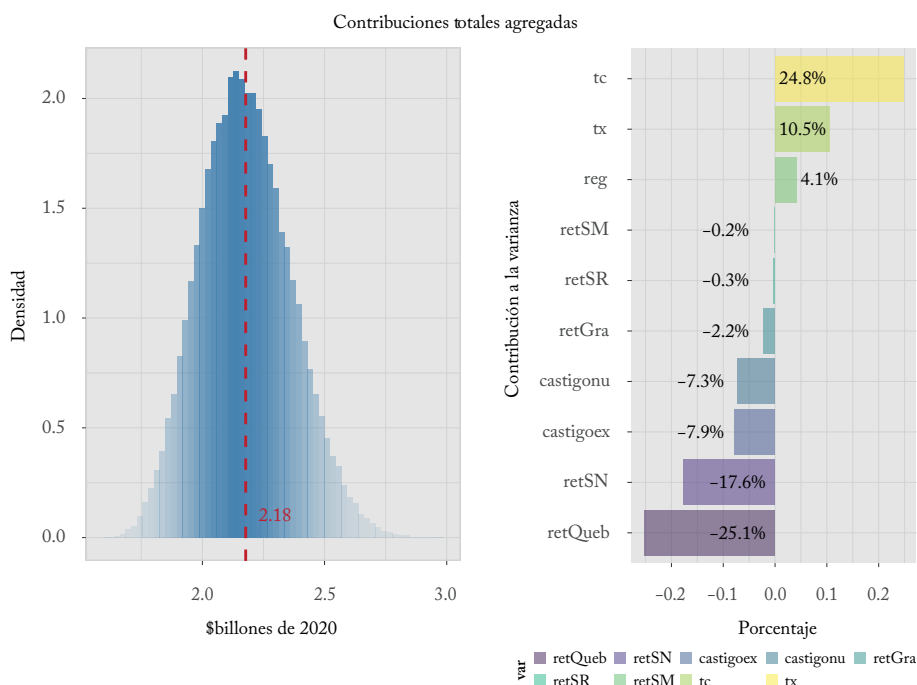


Figura 19. Beneficios fiscales agregados 2020-2019

Fuente: elaboración propia.

A partir de los beneficios fiscales estimados cabe preguntarse cómo podrían distribuirse entre la Nación y las regiones. Esto puede verse en las figuras 20 y 21. La primera muestra como los impuestos nacionales tendrían una media de \$1,34 billones, con un rango de variación entre \$0,97 billones y \$1,85 billones. Su distribución es similar a la de los beneficios agregados, pero con algunas diferencias en la descomposición de su varianza. En el panel de la derecha puede verse que si bien los órdenes de magnitud de las contribuciones a la varianza son similares al caso de los beneficios agregados para casi todas las variables, en este caso los precios internacionales tienen una mayor participación que se acerca a la cuarta parte.

El caso de los aportes regionales es similar. La figura 21 muestra que el pago de regalías e ICA puede variar, a precios de hoy, entre \$612.000

millones y \$1,13 billones para la totalidad del período —con una media de \$833.000 millones—. El orden de magnitud de las contribuciones a la varianza también es semejante al de los beneficios totales, salvo en el caso del pago de regalías por onza que refleja la variación de los precios internacionales del oro que tiene una incidencia mucho mayor y que también se acerca a la cuarta parte.

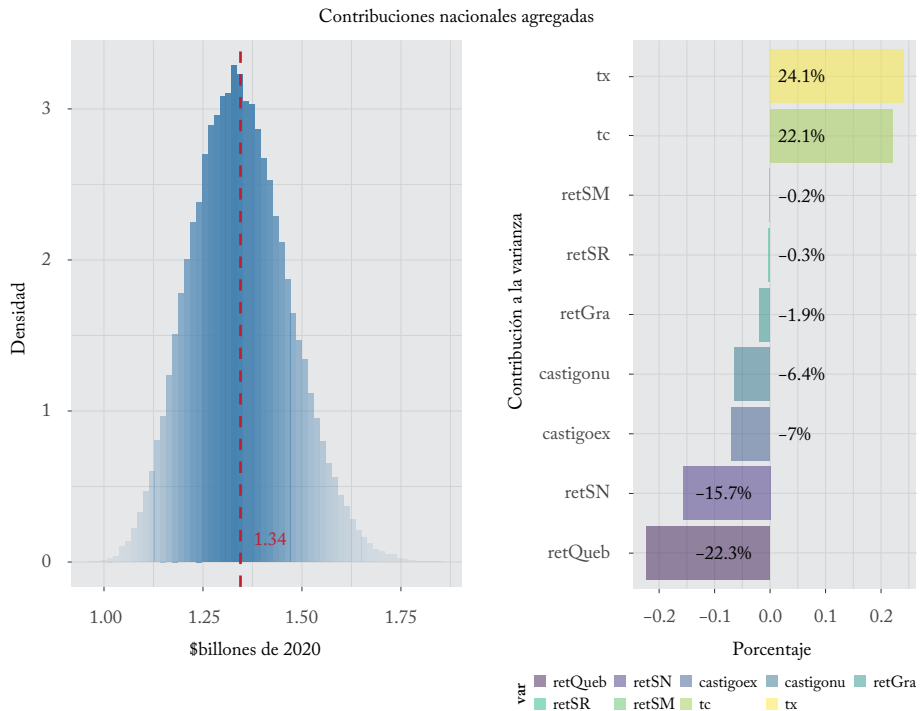


Figura 20. Impuestos nacionales 2020-2029

Fuente: elaboración propia.

A partir de las figuras es posible calcular cómo se dividirían los beneficios totales generados: cerca de dos terceras partes irían a la Nación y el resto a las regiones. Esta relación es bastante estable en el tiempo, como lo muestran los *fan charts* de la figura 22. Ambas contribuciones crecen de manera muy parecida, pero con las respectivas diferencias de nivel, y su variabilidad se explica de manera similar a la de los beneficios totales.

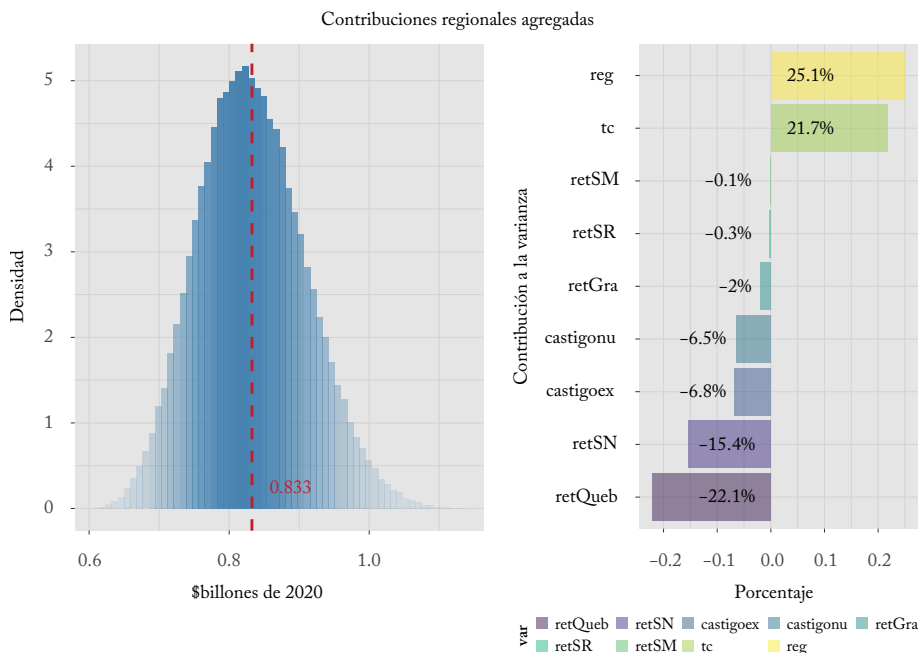


Figura 21. Aportes regionales 2020-2029

Fuente: elaboración propia.

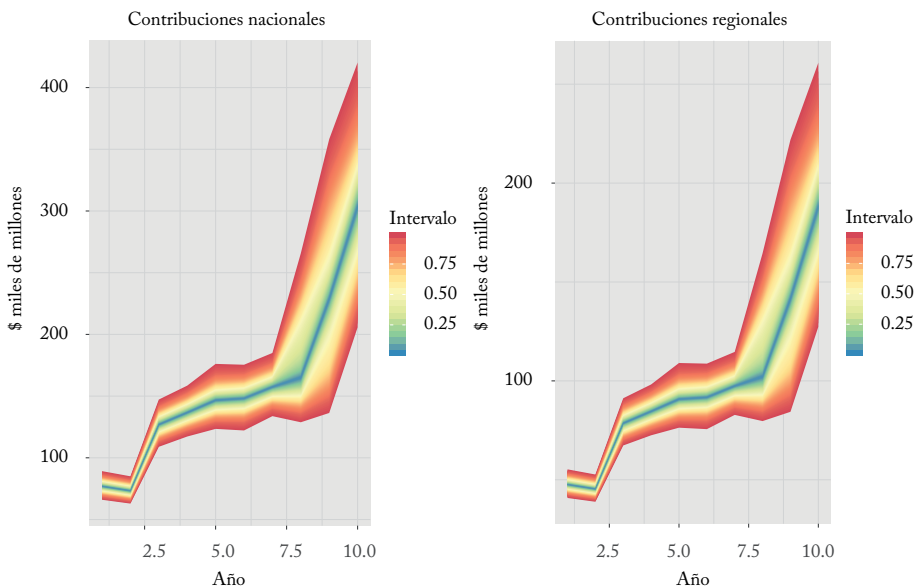


Figura 22. Aportes regionales 2020-2029

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El propósito de este capítulo ha sido examinar los beneficios económicos de la producción industrial de oro, que se diferencia del resto de la producción aurífera en Colombia por su tamaño, formalidad y tecnología de producción. Las cifras presentadas muestran que la minería de oro le genera hoy al país importantes contribuciones en materia fiscal, de inversión extranjera y de exportaciones. A nivel local, son una fuente de empleo de mayor calidad que la que ofrecen otras opciones; son una fuente de encadenamientos a partir de las compras de bienes y servicios; y son una base para la transferencia de conocimiento dados los requerimientos de calificación que tiene frente a los de otras opciones productivas. Y también son más propensos a formar parte de iniciativas que buscan fomentar la transparencia, la protección de derechos humanos o los estándares sociales de operación como EITI, Principios Voluntarios o GRI.

Estos aportes, sin embargo, deben dimensionarse teniendo en cuenta tanto el tamaño relativamente bajo que el sector industrial de oro tiene hoy frente a su potencial, así como el aporte real que podría hacer en el mediano plazo. Con este propósito se analizaron los principales proyectos que comenzarían su producción en la década actual y que se sumarían a los existentes para estimar las posibles contribuciones fiscales. La metodología empleada permite incorporar al cálculo tanto la aleatoriedad propia de las variables que las determinan como el hecho de que ellas interactúan simultáneamente a lo largo del horizonte de análisis.

Los resultados permiten sacar varias conclusiones acerca de los beneficios que el país podría obtener en los siguientes diez años. En primer lugar, que en la próxima década la producción industrial de oro en Colombia debería estar entre 5,44 y 8,24 millones de onzas, con unas contribuciones fiscales correspondiente que deberían oscilar, a precios de hoy, entre \$1,6 billones y \$3 billones. Si tomamos la media, el país produciría 6,6 millones de onzas que traerían un promedio de \$218.000 millones de pesos al año en impuesto de renta, IVA, ICA y regalías.

Para tener una idea de la relevancia de este valor, los recursos que en promedio se generarían cada año son equivalentes a la tercera parte de lo

que toda la agricultura paga por impuesto de renta²⁶ y serían suficientes para financiar la totalidad del presupuesto anual de manejo de áreas protegidas, de políticas de gestión ambiental y conservación de la biodiversidad, de conocimiento hidrológico, meteorológico y de monitoreo ambiental y climático, y los aportes al Fondo de compensación ambiental (Presupuesto General de la Nación, 2020). Sin embargo, al final de la década, cuando se alcanza la mayor producción, los recursos generados serían suficientes para duplicar este presupuesto o para financiar por más de un año la totalidad de la inversión ambiental que realiza el Gobierno Nacional.

De la misma manera, es importante anotar que una tercera parte de estos recursos irían a las regiones a través de regalías e ICA. Teniendo en cuenta los niveles de recaudo del tipo de municipios donde se desarrollarían los proyectos, estos recursos pueden ser una fuente significativa de financiamiento para su gasto social.

Una segunda conclusión tiene que ver con las herramientas a disposición del gobierno para incidir en los beneficios fiscales. Dada la aleatoriedad de las variables que los determinan, los beneficios tienen una distribución cuya varianza depende en diferente grado de los valores que estas tomen. En este sentido, los resultados muestran que casi la mitad de la variación en los beneficios depende de la entrada a tiempo de los proyectos y que un 15% adicional depende de los ajustes que se le hagan a la producción.

El Gobierno Nacional y los gobiernos locales pueden incidir en que los beneficios se muevan a la parte alta de la distribución utilizando las herramientas de su competencia para evitar retrasos en la entrada en operación de los proyectos y facilitar que se tenga certidumbre sobre la magnitud de las reservas. Las compañías, por supuesto, deben hacer lo mismo. Cabe anotar que en cualquier caso hay una variabilidad en los beneficios que es difícilmente gestionable en la medida en que cerca del 40% depende de la tasa de cambio y del precio internacional del oro.

Una tercera conclusión tiene que ver con el grado en que los beneficios estimados logran capturar su verdadera dimensión. Tres elementos condicionan este punto. El primero es que la estimación realizada se limita a la producción industrial de oro y no incluye ni el resto de la producción

²⁶ Ver datos consolidados de recaudo fiscal, DIAN 2019.

formal ni las pérdidas de beneficios por producción ilegal. El segundo es que los beneficios se circunscriben a aquellas contribuciones fiscales para las que existe información confiable y suficiente. Si bien los impuestos de renta, IVA, ICA y las regalías son las principales, hay otros que no se incluyen y que pueden ser importantes a nivel local. Y por último, que no se incluyen proyectos ya identificados cuya incertidumbre es tal que es muy difícil asignarles una fecha de entrada con un nivel de certeza razonable.

El principal ejemplo a este respecto es el proyecto *La Colosa* en el departamento del Tolima. De acuerdo con el informe más reciente de la compañía que lo desarrollaría, el proyecto tendría reservas del orden de 15,5 millones de onzas²⁷. Si mantenemos los supuestos utilizados en las estimaciones de los beneficios, esta cifra equivaldría a 2,33 veces el promedio de producción estimada para la década, lo cual implicaría \$5,5 billones de contribuciones fiscales en el subsuelo.

Como puede verse, la naturaleza y el nivel de los beneficios económicos que es capaz de generar la producción industrial de oro son significativos y deberían ser parte fundamental de los elementos sobre los que la opinión pública construya sus percepciones. Deberían servir también para diferenciar los distintos tipos de minería, para contrastarlos frente a sus potenciales impactos negativos y para que las discusiones sobre proyectos y política minera se hagan con mayor objetividad.

Referencias

- Agencia Nacional de Minerales (2020). Producción Nacional de Minerales y Contraprestaciones Económicas. Trimestral: Datos Abiertos Colombia. Recuperado de <https://www.datos.gov.co/Minas-y-Energ-a/ANM-Producci-n-Nacional-de-Minerales-y-Contraprest/r85m-vv6c/data>
- Alcaldía de Buriticá. (12 de octubre de 2013). Acuerdo 014 de 2013. Buritucá, Antioquia, Colombia.

²⁷ De acuerdo con el último informe de la empresa —Anglo Gold Ashanti, 2018, *Mineral resource and ore reserve report*—, el proyecto cuenta con 28.3 millones de onzas de recursos, de los cuales 23.35 millones son indicados y 4.98 millones inferidos. Si este valor se ajusta, como es usual en la valoración de proyectos mineros para dar cuenta de la incertidumbre, multiplicándolos por 0.6 y 0.3 respectivamente se obtienen 15.5 millones de onzas.

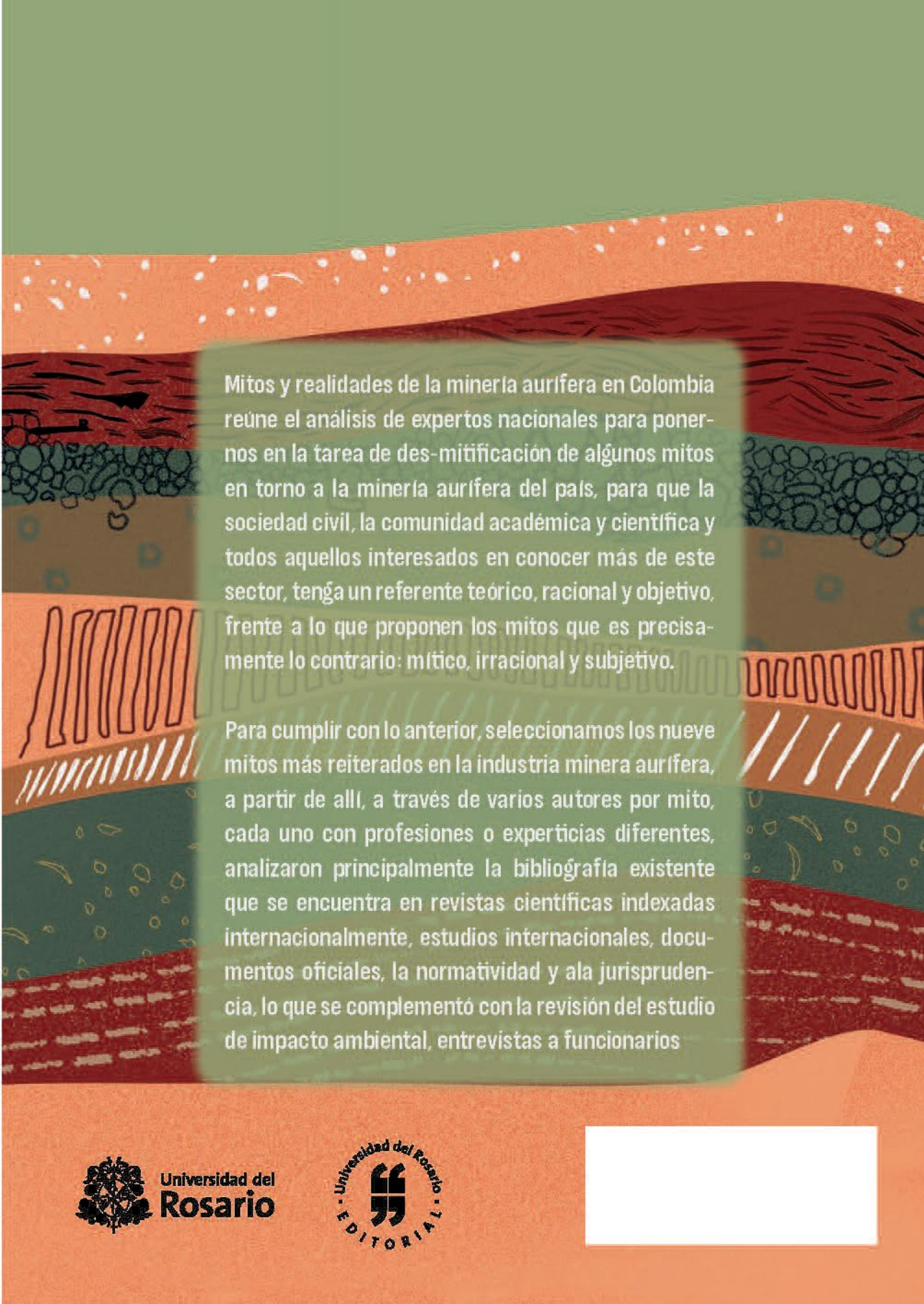
- Alcaldía de California. (13 de diciembre de 2012). Acuerdo 038 de 2012. California, Santander, Colombia.
- Alcaldía de El Bagre. (13 de octubre de 2017). Acuerdo 005 de 2017. El Bagre, Antioquia, Colombia.
- Alcaldía de El Carmen de Atrato. (18 de marzo de 2015). Acuerdo 004 de 2015. El Carmen de Atrato, Chocó, Colombia.
- Alcaldía de Jericó. (Diciembre de 2017). Acuerdo 013 de 2017. Jericó, Antioquia, Colombia.
- Alcaldía de Marmato. (2015 de diciembre de 2015). Acuerdo 057 de 2015. Marmato, Caldas, Colombia.
- Alcaldía de Nechí. (28 de noviembre de 2012). Acuerdo 021 de 2012. Nechí, Antioquia, Colombia.
- Alcaldía de Puerto Libertador. (9 de diciembre de 2017). Acuerdo 008 de 2017. Puerto Libertador, Córdoba, Colombia.
- Alcaldía de Remedios. (30 de noviembre de 2017). Acuerdo 024 de 2017. Remedios, Antioquia, Colombia.
- Alcaldía de San Roque. (10 de diciembre de 2012). Acuerdo 012 de 2018. San Roque, Antioquia, Colombia.
- Alcaldía de Santa Rosa de Osos. (2017). Acuerdo 022 de 2017. Santa Rosa de Osos, Antioquia, Colombia.
- Alcaldía de Segovia. (9 de octubre de 2018). Acuerdo 012 de 2018. Segovia, Antioquia, Colombia.
- Alcaldía de Zaragoza. (19 de diciembre de 2016). Acuerdo 017 de 2016. Zaragoza, Antioquia, Colombia.
- Anglo Gold Ashanti - Minera de Cobre Quebradona (2019). Estudio de Impacto Ambiental. Noviembre de 2019. Consultado el 17 de febrero de 2020, de https://www.anglogoldashanticolombia.com/wp-content/uploads/2020/02/3_Descripcion_Proyecto.pdf
- Anglo Gold Ashanti (2018). Mineral Resource and Ore Reserve Report. Recuperado de <https://www.anglogoldashanti.com/investors/annual-reports/>
- Antioquia Gold Inc. (2017). Cisneros Gold Project, Antioquia Department, Colombia, NI 43-101 Technical report on updated mineral resource estimate and Preliminary Economic Assessment. 24 de septiembre de 2017. Consultado el 24 de enero de 2020, de <https://www.sedar.com/>

- GetFile.do?lang=EN&docClass=24&issuerNo=00007788&issuerType=03&projectNo=02730851&docId=4260167.
- Antioquia Gold Inc. (2020). Antioquia Gold Cisneros Operations Updated. 4 de febrero de 2020. Consultado el 14 de febrero de 2020, de www.antioquiagoldinc.com/s/news.asp?ReportID=865300.
- Atico Mining Corporation (2018). El Roble mine updated mineral resource and initial mineral reserve estimates, El Carmen de Atrato, Chocó Department, Colombia. 28 de diciembre de 2018. Consultado el 16 de febrero de 2019, de <https://www.sedar.com/GetFile.do?lang=EN&docClass=24&issuerNo=00032350&issuerType=03&projectNo=02841655&docId=4443432>
- Atico Mining Corporation (2020). Corporate Presentation. Enero de 2020. Consultado el 28 de enero de 2020, de http://aticomining.com/_resources/presentations/corporate-presentation.pdf.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) (2020). Presupuesto General de la Nación (PGN) a 30 diciembre de 2019. Recuperado de http://www.anla.gov.co/documentos/institucional/03_presupuesto/01_ejecucion_presupuestal/presupuesto_2019/31%20DIC%20ANLA%20%20FONAM%20Y%20REGALIAS%20FINAL.pdf
- B2Gold – News (2020). B2Gold Corp. Announces Positive Results from the Updated Preliminary Economic Assessment for the Gramalote Project in Colombia and Assumes Role of Manager of the Gramalote Joint Venture, Vancouver. 21 de enero de 2020. Consultado el 24 de enero de 2020, de https://www.b2gold.com/news/index.php?content_id=891.
- Badri, A., Nadeau, S. y Gbodossou, A. (2012). “A systematic and preliminary portrait of mining risks”. *International Journal of Safety and Security*, 2(2), 145-166.
- Banco de La República (2020). Proyecciones macroeconómicas de analistas locales y extranjeros. Recuperado de <https://www.banrep.gov.co/es/proyecciones-macroeconomicas-analistas-locales-y-extranjeros>
- Canadian Securities Regulatory Authorities (2020). System for Electronic Document Analysis and Retrieval database Sedar. Recuperado de https://www.sedar.com/search/search_en.htm
- Centro Nacional de Consultoría, Jaime Arteaga y Asociados, y Revista Mundo Minero (2018). Brújula Minera 2018.

- Centro Nacional de Consultoría, Jaime Arteaga y Asociados, y Revista Mundo Minero (2019). Brújula Minera 2019.
- Constitución Política de Colombia (1991). Artículo 330. Recuperado de http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html
- Continental Gold (2019). NI 43-101 Buriticá Mineral Resource 2019-01, Antioquia, Colombia. 18 de marzo de 2019. Consultado el 7 de enero de 2020, de https://www.continentalgold.com/wp-content/uploads/2019/03/2019_03_18_CGI_NI43101_SM.pdf
- Cordoba Minerals Corp. (2019). NI 43-101 Technical Report and Preliminary Economic Assessment, San Matías Copper-Gold-Silver Project, Colombia. 29 de julio 29 de 2019. Consultado el 9 de enero de 2020, de <https://www.sedar.com/GetFile.do?lang=EN&docClass=24&issuerNo=00030266&issuerType=03&projectNo=02966154&docId=4590231>.
- Cordoba Minerals Corp. (2020). Cordoba Minerals Announces 2020 Work Program. 20 de enero de 2020. Consultado el 14 de febrero de 2019, de <https://www.sedar.com/GetFile.do?lang=EN&docClass=8&issuerNo=00030266&issuerType=03&projectNo=03008592&docId=4653224>
- DANE (2020). Encuesta anual manufacturera (EAM). Recuperado de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-enam>
- DANE (2020). Gran encuesta integrada de hogares (GEIH) Mercado laboral. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/index.php/categoria-economicas/178-english/sociales/cultura/2921-gran-encuesta-integrada-de-hogares>
- DANE (2020). Matrices oferta utilización a seis dígitos del Sistema de Cuentas Nacionales. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-anuales#cuadros-oferta-utilizacion-y-matrices-complementarias>
- DANE (2020). Producto Interno Bruto (PIB) Base 2015. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales>
- DIAN (2020) Estadísticas de los tributos administrados por la DIAN. Recuperado de <https://www.dian.gov.co/dian/cifras/Paginas/EstadisticasRecaudo.aspx>

- EITI – Colombia (2020). Reporte de Administrador Independiente 2018. Recuperado de http://www.eiticolombia.gov.co/media/filer_public/f6/17/f6173858-328e-4973-992f-13a76457da32/informe_eiti_vigencia2018_bg.pdf
- EITI – Colombia (2020). Representantes del Comité Tripartito Nacional (CTN). Recuperado de <http://www.eiticolombia.gov.co/es/participantes/>
- El Espectador (2020). Turismo, dinamizador la economía colombiana. Impreso 15 de enero de 2020.
- Escobar, A. y González, T. (2019). Participación del Banco de la República en la comercialización de oro en Colombia. Recuperado de <https://www.banrep.gov.co/es/participacion-del-banco-republica-comercializacion-oro-colombia>
- González, T. (2020). El BID y el sector extractivo. Documento privado utilizado con permiso del Banco Interamericano de Desarrollo.
- Gran Colombia Gold Corp (2019a). Amended NI 43-101, Technical Report Prefeasibility Study Update, Segovia Project Colombia. 8 de julio de 2019. Consultado el 11 de julio de 2019, de [http://s21.q4cdn.com/834539576/files/doc_downloads/TechnicalReports/Segovia_Amended_PFS_Update_NI43-101TR-_20190708-\(Website\).pdf](http://s21.q4cdn.com/834539576/files/doc_downloads/TechnicalReports/Segovia_Amended_PFS_Update_NI43-101TR-_20190708-(Website).pdf)
- Gran Colombia Gold Corp (2019b). NI 43-101, Technical Report Preliminary Economic Assessment Marmato Project Colombia. 27 de noviembre de 2019. Consultado el 16 de febrero de 2020, de <https://www.sedar.com/GetFile.do?lang=EN&docClass=24&issuerNo=00003116&issuerType=03&projectNo=02993690&docId=4631893>
- ICMM (2020), Principios mineros. Estándares de desempeño, 2020. Recuperado de https://www.icmm.com/website/publications/es/principios-mineros/principios-mineros_es.pdf?fbclid=IwAR1bB6lZTiBPK_9pysuDt8UEa3B5erymgTPFO6uwC7woFZWociBOQjsXUtw
- Ley 685 (2001). Artículo 227. Recuperado de https://leyes.co/codigo_de_minas.htm
- Mineros S. A. Informes de Sostenibilidad 2008 a 2018. Recuperado de <https://mineros.com.co/Sostenibilidad/Responsabilidad-Social>
- Mineros S. A. (2019a). Un productor de oro latino en crecimiento. Presentación corporativa de junio 2019. Consultado el 2 de enero de 2020, de https://drive.google.com/file/d/1d_UA1U7dL-OxqB50oHAICd-vksdTaxV2g/view

- Mineros S. A. (2019b). Informe Financiero 2018. Descargado el 2 de enero de 2020, de <http://www.mineros.com.co/pdf/2018-informe-financiero.pdf>
- Mineros S. A. (2020a). Enajenación de bienes, Boletín de prensa. 31 de enero de 2020. Consultado el 20 de febrero de 2020. Consultado el 20 de febrero de 2020, de <https://mineros.com.co/Boletines/enajenaci243n-de-bienes>
- Mineros S. A. (2020b). Informe Financiero 2019. Consultado el 6 de abril de 2020, de <https://mineros.com.co/Inversionistas/Informaci%C3%B3n-Financiera>
- Minesa (2020). Estudio de Impacto Ambiental para el Proyecto de explotación subterránea de minerales auroargentíferos “Soto Norte”. Enero de 2020. Documento suministrado a los autores por Minesa.
- Ministerio de Hacienda y Crédito Público: Presupuesto Ciudadano 2019. Ejes funcionales. <http://www.pte.gov.co/WebsitePTE/Documentos/PresupuestoGeneralNacion2019.pdf>
- Red Eagle Mining Corporation (2014). Amended NI 43-101, Technical Report Feasibility Study of the Santa Rosa Gold Project. 27 de octubre de 2014. Consultado el 14 de septiembre de 2015, de www.redeaglemining.com
- Red Eagle Mining Corporation (2018). *Red Eagle Mining Received Default Notice*. Vancouver, British Columbia. 9 de noviembre de 2018 (Globe Newswire). Descargado el 14 de noviembre de 2018, de <https://www.globenewswire.com/news-release/2018/11/09/1649270/0/en/Red-Eagle-Mining-Received-Default-Notice.html>
- World Gold Council (2020). Precios del Oro. <https://www.gold.org/goldhub/data/gold-prices>



Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia reúne el análisis de expertos nacionales para ponernos en la tarea de des-mitificación de algunos mitos en torno a la minería aurífera del país, para que la sociedad civil, la comunidad académica y científica y todos aquellos interesados en conocer más de este sector, tenga un referente teórico, racional y objetivo, frente a lo que proponen los mitos que es precisamente lo contrario: mítico, irracional y subjetivo.

Para cumplir con lo anterior, seleccionamos los nueve mitos más reiterados en la industria minera aurífera, a partir de allí, a través de varios autores por mito, cada uno con profesiones o experticias diferentes, analizaron principalmente la bibliografía existente que se encuentra en revistas científicas indexadas internacionalmente, estudios internacionales, documentos oficiales, la normatividad y la jurisprudencia, lo que se complementó con la revisión del estudio de impacto ambiental, entrevistas a funcionarios



Universidad del
Rosario

