

GUÍA DE ECONOMÍA CIRCULAR
DE ORO
FILÓN
PARA LAS ETAPAS MINERAS



Energía



"VIGILADA MINEEDUCACIÓN"

**UNIVERSIDAD DE
CÓRDOBA**

GUÍA

DE ECONOMÍA CIRCULAR

PARA LAS ETAPAS MINERAS

DE ORO FILÓN



GUÍA DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LAS ETAPAS MINERAS DE ORO FILÓN.

Convenio Interadministrativo GGC No 1860 – 2025

Autores

Esp. Lina Paola Barrera Sterling
MSc. Sergio Reyes Sandoval
MSc. Carlos Domínguez Balmaceda
Esp. Ing. Diana Carolina Ortiz Niño
MSc. Roberth Paternina Uribe
PhD. José Luis Marrugo Negrete
PhD. Mauricio José Rosso Pinto
MSc. Ivonne Stella Negrete Sierra

Equipo de Apoyo

Ingeniero Coordinación General
MSc. Ivonne Stella Negrete Sierra

Ingeniero Coordinador Técnico de Campo

Msc. William Batista Jinete

Ingeniero Coordinador Operativo

PhD. Mauricio José Rosso Pinto

Ingeniero Coordinador

**Estructuración-Elaboración de la
Guía**

Esp. Lina Paola Barrera Sterling

Ingeniero Coordinador Proyecto Tipo

Esp. Camilo Alejandro Gómez Úsuga

Profesional Temático Minería

Esp. Mauricio Jiménez Bautista

Profesional Temático en Geología

MSc. Sergio Reyes Sandoval
Esp. Ing. Diana Carolina Ortiz Niño

Profesional Temático Ambiental

Esp. Jesús Alberto Ordoñez
Esp. Miriam Yanet Pantoja Álvarez
Ing. Edgardo Elías Cruz Montes

Profesionales de Apoyo

PhD. Carlos Gómez Ortiz
Admr. Sain José Bermúdez Vergara
MSc. Laidy Viviana Cruz Navarro

Profesionales documentales

MSc. María José Caraballo Laza
Ing. Jesús David Argel Bárcenas
Ing. Pedro José Rada Tejada

Profesionales Soporte

Administrativo

Esp. Enadis Cordero Anaya

Esp. Alexis De León Navarro
Esp. Sandra Ramos Izquierdo

Abogados

Erika María Gracia Flórez

Profesionales Laboratorio Soporte

MSc. Iván David Urango Cárdenas
MSc. Joel Aleán Flórez
Esp. Dalciris Nisperuza Pérez
Qco. Yendis Carmona Fuentes
Qco. Yuris Benavides Tirado
Qco. Senis Montiel Murillo

Diseño y diagramación

Juan Sebastian Garzón Salcedo

© Universidad de Córdoba

Las tablas, figuras o fotografías de esta guía que no están atribuidas a fuentes externas son de los autores del libro.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

Punto de atención presencial: Calle 43 N° 57 - 31 CAN.
Bogotá D.C. Colombia,
PBX: (57) +1 220 0300
Línea gratuita nacional: 01 8000 910 180
Código Postal 111321

Ministro

Edwin Palma Egea

Secretaria General Ministerio

Elkin Leonardo Pérez Zambrano

Viceministra de Minas

Sorrel Parisa Aroca Rodríguez

Director de Formalización Minera

Alexander Reina Otero

Supervisor del Convenio

Luis Alexander Sarmiento

Apoyo a la Supervisión

Martha Yaneth Montañez Chaparro
Ronnal Alexander Bello Bernal

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Sede: Carrera 6 No. 76-103. Montería, Córdoba
PBX: +57 (4) 7904050; 57 (4) 7860381; 57(4) 7860151
Código Postal: 230002

Rector PhD.

Jairo Miguel Torres Oviedo

Vicerrector de Investigación y Extensión

PhD. Deivis Luján Rhenals

Director Proyecto

MSc. Roberth Paternina Uribe

Supervisor

MSc. Dairo Pérez Sotelo

Coinvestigador Asesor

PhD. José Luis Marrugo Negrete



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"



Energía



Contenido

1	Presentación	8
	Agradecimientos	9
	Introducción	10
2	PRINCIPIOS DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LAS ETAPAS DE LA MINERÍA AURÍFERA DE FILÓN	13
3	BASES TÉCNICAS PARA LA APLICACIÓN DE LAS LÍNEAS ESTRATÉGICAS DE ECONOMÍA CIRCULAR EN LAS ETAPAS DE LA ACTIVIDAD MINERA DE ORO FILÓN	19
	3.1. APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE EXPLORACIÓN Y MODELAMIENTO DEL YACIMIENTO	21
	3.1.1. Lineamiento 1. Optimización	21
	3.1.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Reducción de estériles en la extracción del material de mina	32
	3.1.1.2. Oportunidad de Economía Circular 2: Gestión preventiva de relaves	33
	3.1.1.3. Oportunidad de Economía Circular 3: Cierre progresivo como estrategia de anticipación	36
	3.1.1.4. Oportunidad de Economía Circular 4: Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)	37
	3.1.2. Lineamiento 2. Anticipar impactos ambientales residuales a futuro	39
	3.1.2.1. Oportunidad de Economía Circular 1: Prevención de los impactos ambientales residuales a futuro	39
	3.2. APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS: ETAPA DE CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	44
	3.2.1. Lineamiento 3. Estrategias para el uso de materiales removidos en la implementación de obras	44
	3.2.1.1. Oportunidad de Economía Circular 1: Aprovechamiento de materiales generados en el proceso de infraestructura	44

3.3. APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS:	45
ETAPA DE EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO	
3.3.1. Lineamiento 4. Optimización del proceso de explotación y beneficio con eficiencia tecnológica	45
3.3.1.1. Oportunidad de Economía Circular 1: Mejoras en eficiencia energética: reducir consumo de energía utilizando energía renovable, y reducción de reactivos en el beneficio del mineral	57
3.3.2. Lineamiento 5. Valorización de subproductos	59
3.3.2.1. Oportunidad de Economía Circular 1: Aprovechar los relaves generados en el proceso de beneficio	59
3.3.3. Lineamiento 6. Mejorar la eficiencia hídrica en el proyecto minero	69
3.3.3.1. Oportunidad de Economía Circular 1: Captación y uso responsable del agua	69
3.3.3.2. Oportunidad de Economía Circular 2: Recirculación del agua en el proceso de beneficio	70
3.3.3.3. Oportunidad de Economía Circular 3: Aprovechamiento de aguas lluvias. Sistema de captación para pequeña minería	74
3.4. APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS:	76
ETAPA DE CIERRE DE MINA	
3.4.1. Lineamiento 7. Simbiosis industrial y valorización de residuos	79
3.4.1.1. Oportunidad de Economía Circular 1: Modelos regenerativos vs. rehabilitación tradicional, soluciones basadas en la naturaleza (SbN)	79
3.4.1.2. Oportunidad de Economía Circular 2: Reconversión paisajística y uso del suelo	80
3.4.2. Marco institucional de pasivos ambientales mineros	81
3.5. APLICACIÓN LÍNEA ESTRATÉGICA TRANSVERSAL PARA TODAS LAS ETAPAS MINERAS	82
3.5.1. Lineamiento 8: Establecer indicadores de monitoreo y verificación	82



GLOSARIO	89
BIBLIOGRAFÍA	96

Presentación

La Política Nacional de Formalización Minera establece que la formalización, como política de Estado debe entenderse como un proceso continuo de mejoramiento dirigido a comunidades mineras tradicionales, que ejercen su actividad bajo el amparo de un título minero y cuenten con instrumento ambiental aprobado.

En alineación con el Plan Nacional de Desarrollo, especialmente su artículo 231 y decreto reglamentario, se hace necesario desarrollar y fortalecer las estrategias y los esfuerzos en torno a los Distritos Mineros Especiales para la Diversificación Productiva, de tal forma que se generen acciones hacia el desarrollo productivo no extractivo en los territorios, respetando el ambiente y a las comunidades, para lo cual se requiere contar con recursos que permitan adelantar dichas estrategias.

De acuerdo con la Ley 2232 de 2022, la economía circular hace referencia a un modelo económico basado en sistemas de producción y consumo que promueven la eficiencia en el uso de los materiales, agua y energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas y el uso circular de flujos de materiales a través de la innovación tecnológica, colaboración entre actores y modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible. Continúa la Ley señalando que su objetivo propenderá por el mantenimiento del valor de los productos, los materiales y los recursos, de tal forma que se mantengan durante el mayor tiempo posible en la economía, así como la reducción en la generación de residuos.

Por otro lado, el artículo 12 de la Ley 2250 de 2022, *"Por medio del cual se establece un marco jurídico especial en materia de legalización y formalización minera, así como para su financiamiento, comercialización y se establece una normatividad especial en materia ambiental"*, establece el marco normativo para la economía circular en el sector minero para fomentar mejores prácticas que promuevan la circularidad de los flujos de materiales y la extensión de su vida útil a través de la implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboraciones entre actores y el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible.

En este sentido, uno de los objetivos prioritarios del Estado es la implementación de estrategias de economía circular en actividades mineras, incentivando la reducción, reutilización y reciclaje de materiales, así como la inclusión de tecnologías limpias y prácticas sostenibles, especialmente en los territorios con presencia de minería artesanal y de pequeña escala.

Por otro lado, la economía circular en el sector minero busca reducir la presión sobre los ecosistemas mediante la optimización del uso de recursos, la reincorporación de materiales al ciclo productivo, y la valorización de residuos. En el contexto de la minería, esto se traduce en:

- Reducción hasta llegar a la eliminación total de sustancias tóxicas.
- Recuperación y reutilización de materiales valiosos contenidos en relaves o residuos (si aplica).
- Implementación de tecnologías limpias para mejorar la eficiencia extractiva.
- Rehabilitación de pasivos ambientales (ley 2327 / 2023) mediante modelos regenerativos.

Estas acciones contribuyen a mitigar la degradación de suelos, cuerpos de agua y biodiversidad, especialmente en zonas de alta sensibilidad ambiental como cuencas hidrográficas y ecosistemas estratégicos.

Un proyecto de economía circular liderado desde el Ministerio de Minas y Energía permitiría:

- Fortalecer la sostenibilidad de la formalización con enfoque diferencial y territorial.
- Transferir tecnología y conocimiento para mejorar prácticas productivas.
- Generar alternativas económicas y productivas complementarias o derivadas del uso eficiente de los recursos, en el marco de la diversificación productiva.
- Mejorar la calidad de vida de comunidades mineras mediante esquemas de trabajo digno, reducción de riesgos en salud y seguridad, y acceso a mercados responsables.

En virtud de lo expuesto, la Universidad de Córdoba se constituye en un aliado estratégico para el desarrollo del proyecto de *“Asistir a comunidades mineras y/o entes territoriales en la identificación, análisis e implementación de alternativas de economía circular y/o de producción más limpia en operaciones mineras”*, en los términos anteriormente planteados.

Con el fin de dar cumplimiento a lo establecido por el Gobierno Nacional y en virtud de las funciones otorgadas al Ministerio, en particular a la Dirección de Formalización Minera, se estructuró el proyecto de inversión denominado *“Construcción e implementación de estrategias para el desarrollo de la actividad minera de pequeña escala bajo un modelo de desarrollo colaborativo”*, el cual se encuentra incluido en el Sistema Unificado de Inversiones y Finanzas Públicas – SUIFP con el Código BPIN: 202300000000362, horizonte 2024-2030 y cuyo objetivo principal es mejorar el desempeño de las operaciones mineras bajo una visión integral con el ambiente y con el territorio. Es así como para el logro de dicho objetivo se cuenta con las actividades propuestas con el Convenio Interadministrativo GGC 1860-2025 que tiene como objeto: *‘Aunar esfuerzos para identificar, analizar e implementar alternativas de economía circular en operaciones mineras de pequeña escala en distritos mineros para la diversificación productiva’*, suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad de Córdoba, para cumplir con dichos compromisos y necesidades.

Agradecimientos

El Ministerio de Minas y Energía y la Universidad de Córdoba, a través del Grupo de Investigación de Agua, Química Aplicada y Ambiental (GAQAA) y del Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental, expresan su agradecimiento a todas las personas que participaron en la elaboración de la presente guía, las cuales se encuentran relacionadas en el listado de participantes.

De igual manera, agradecen a los pequeños mineros que se vincularon activamente al proceso de aplicación de estas guías de economía circular, cuyo contenido resulta de alto interés para la implementación de alternativas sostenibles en las operaciones mineras.



Introducción

El presente documento denominado, Guía de Economía Circular para las etapas mineras de oro filón, se elaboró en el marco del Convenio Interadministrativo GGC 1860–2025, suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad de Córdoba, cuyo objeto es identificar, analizar e implementar alternativas de economía circular en operaciones mineras de pequeña escala en distritos mineros, orientadas a la diversificación productiva. En este contexto, la guía se concibe como un instrumento técnico de apoyo para el fortalecimiento de prácticas mineras más sostenibles y responsables.

La minería es una actividad estratégica y esencial para el desarrollo de un país, al proveer minerales fundamentales para todos los sistemas económicos, pero para que esta actividad económica sea viable, se debe priorizar la sostenibilidad en sus decisiones y acciones, siendo la transición a una economía circular indispensable¹.

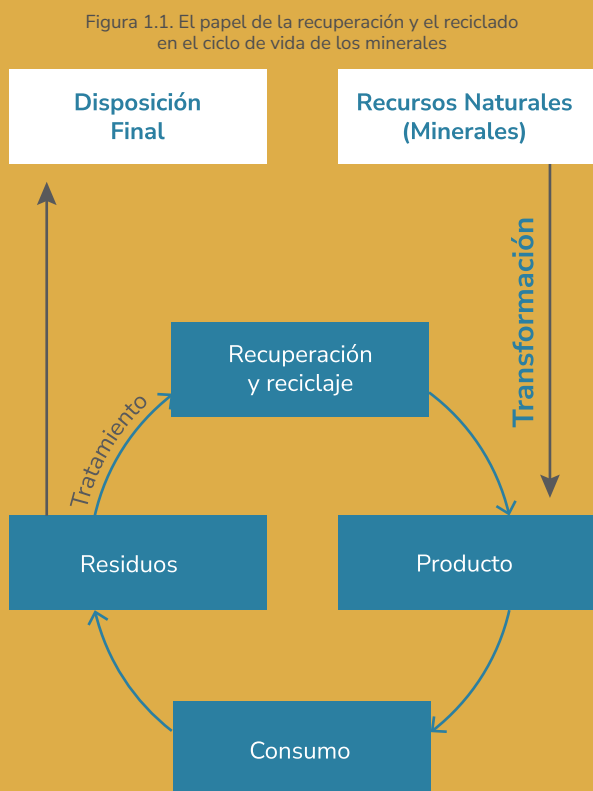
El ciclo de vida de los minerales se desarrolla de acuerdo con las siguientes etapas (figura 1.1): materia prima, transformación, producto, utilización, residuo, tratamiento del residuo y disposición final. Como lo menciona

En este sentido, la economía circular se consolida como una herramienta estratégica al promover la optimización de los recursos, la reducción de residuos y el reaprovechamiento de materiales y subproductos generados durante el proceso minero (CONPES 4011, 2020; MADS, 2021).

Walter Pardavé Livia en su siguiente diagrama, "(...) a medida que el proceso de recuperación y reciclado sea más completo y eficaz, menos habrá que acudir a los recursos naturales primarios y menor será la repercusión de los residuos finales sobre el medio ambiente (...)".

Dado el modelo de economía lineal que hoy se experimenta, surge la tendencia de la Economía circular como un modelo que opera en todo el nivel organizacional. Así mismo, previene la contaminación ambiental, protege el entorno ambiental y ofrece una ruta a la sostenibilidad, cuyo funcionamiento es regenerativo y restaurador en un sistema cerrado². Las prácticas de la economía circular no son ajenas a las operaciones mineras, pues su patrocinio se entreteje como oportunidades para minimizar y otorgar valor a los residuos, mejorar la eficiencia en las operaciones mineras (extracción y beneficio), y remediar los sitios mineros con fines productivos a futuro³.

Es así como la economía circular cuenta con múltiples



Fuente: Modificado de Walter Pardavé Livia, Reciclado industrial de metales. Una aproximación, 2006.

1 Fernando Gala Soldevilla. Vice-Presidente del Consejo de Minería de Perú. 10 Julio, 2024

2 Según Mang y Reed (2015), el diseño regenerativo es un sistema de tecnologías y estrategias basado en el entendimiento del trabajo profundo de los ecosistemas. Este elabora diseños para regenerar, más que agotar, los sistemas de soporte vitales y los recursos dentro de los conjuntos socioecológicos. Por otro lado, el diseño restaurativo es un sistema de diseño que combina el retorno de sitios contaminados, degradados o dañados, y les otorga un estado de salud aceptable a través de la intervención humana, con diseños que reconectan a las personas con la naturaleza.

3 La economía circular en la minería peruana. Dolfer Julca Zuloeta. Naciones Unidas CEPAL. Cooperación Alemana. GIZ

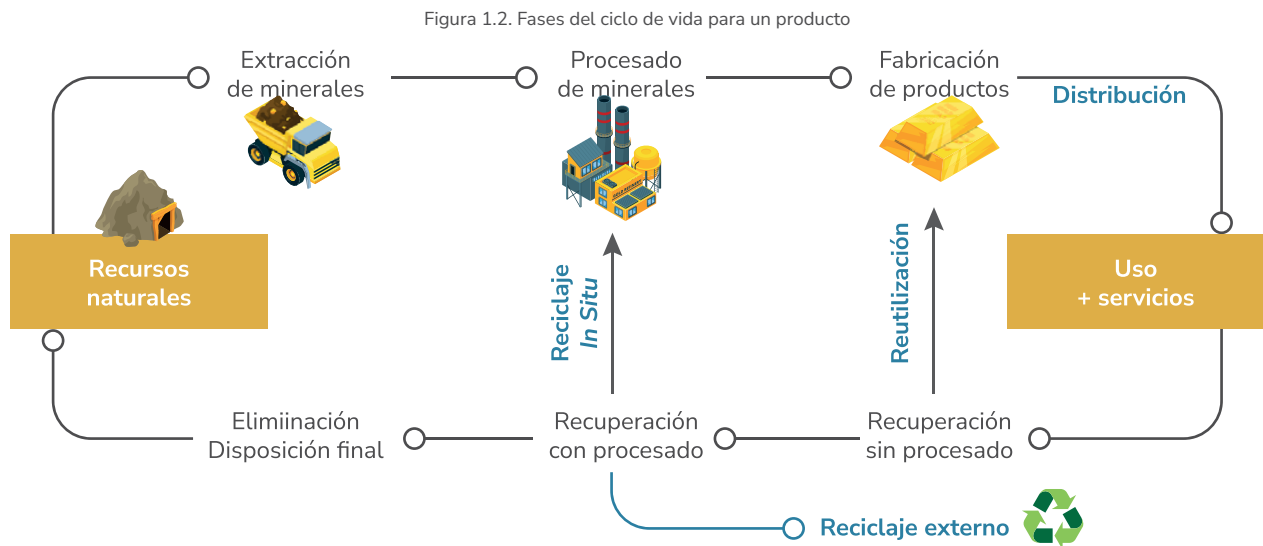
definiciones a nivel internacional, pero en términos generales se entiende como un modelo de desarrollo que busca desacoplar el crecimiento económico del consumo intensivo de recursos naturales, promoviendo sistemas productivos eficientes, regenerativos y resilientes. A diferencia del modelo lineal tradicional de extraer–producir–desechar, la economía circular propone cerrar los ciclos de materiales, agua y energía, extendiendo la vida útil de los recursos y reduciendo la generación de residuos y emisiones.

Bajo este contexto, se han propuesto distintas definiciones, entre las cuales se destacan:

"Es un sistema industrial que es restaurador o regenerativo por intención y diseño. Reemplaza el concepto de "fin de vida" con uno de restauración, cambia hacia el uso de energía renovable, elimina el uso de químicos tóxicos que perjudican la reutilización, y apunta a la eliminación de desechos a través del diseño superior de materiales, productos y sistemas" (Fundación Ellen MacArthur, 2013, p.7).

Consiste en utilizar los recursos de manera más eficiente a lo largo de su ciclo de vida, al cerrar, extender y estrechar los circuitos de materiales que podrían resultar en la disociación del consumo de materias primas necesarias para el crecimiento económico (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. OECD, 2018).

En la figura 1.2 se presenta una figura que relaciona los conceptos antes mencionados, alineado con El Plan Nacional de Desarrollo 2018 – 2022 *"Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad"*, donde se introduce la **Estrategia nacional de economía circular**, elementos para fortalecer el modelo de desarrollo económico, ambiental y social del país, a partir de la lógica de *"producir conservando y conservar produciendo"* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).



Fuente: Adaptada de Walter Pardavé Livia, Reciclado industrial de metales. Una aproximación, 2006 y de Capuz y otros, España, 2001. Convenio interadministrativo GGC 934-2024.

Con la presente guía se busca orientar al pequeño minero a alcanzar una perspectiva más amplia al ciclo de vida de su producto, que en este caso sería el oro de filón, e incluirlo con el planeamiento minero y ambiental presentado a las autoridades competentes, abordando cada una de las etapas o ciclos mineros, con el fin de generar una economía circular que beneficia al titular pero también a su entorno social y ambiental. Desde el enfoque ¿cuáles son los desechos que se pueden utilizar? Y ¿cuáles son las segundas materias primas que se generan de todo este procesamiento? Son ítems que se abordaran en esta guía, teniendo en cuenta los siguientes focos en la actividad minera:

1. ¿Cómo hacerla más eficiente?
2. ¿Cómo hacerla con el menor impacto social y ambiental?
3. Y ¿Cómo obtener el mejor provecho social de esto?





2

PRINCIPIOS DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LAS ETAPAS DE LA MINERÍA AURÍFERA DE FILÓN

La Revolución Industrial transformó profundamente la forma en que el mundo se desarrollaba, intensificando la explotación de los recursos naturales, modificando los patrones de consumo y fortaleciendo las redes logísticas y de transporte. Este proceso, impulsado por el avance tecnológico, permitió un aumento significativo en la escala de producción, en el cual la minería ha desempeñado un papel fundamental como parte integral del desarrollo industrial (Deane, 1979; Allen, 2009; Smil, 2010; UNEP, 2011).

El desarrollo industrial se ha basado históricamente en un modelo productivo lineal, caracterizado por el incremento sostenido de la extracción, producción y consumo de recursos. Sin embargo, desde la segunda mitad del siglo XX se ha evidenciado una creciente preocupación por los impactos ambientales asociados a este modelo, como el cambio climático y la degradación de los ecosistemas, sustentada en estudios científicos y análisis institucionales. Estos antecedentes han puesto de manifiesto la necesidad de transitar hacia enfoques productivos más sostenibles, que optimicen el uso de los recursos y reduzcan los impactos ambientales.

Diversos enfoques de economía circular plantean que, en los sistemas naturales, no existe el concepto de residuo en sentido estricto, ya que los materiales se transforman y reincorporan continuamente en nuevos ciclos biogeoquímicos. Este principio, ampliamente difundido por expertos en sostenibilidad como Alfredo Gallardo, constituye una base conceptual valiosa para promover el aprovechamiento eficiente de los recursos. No obstante, en el caso de los relaves de minería aurífera este enfoque debe aplicarse con precaución. La posible presencia de metales pesados y riesgos geoquímicos hace obligatorio realizar una caracterización fisicoquímica y ecotoxicológica previa, que permita determinar si el material es apto para su valorización o requiere manejo como residuo peligroso.

En la siguiente tabla vemos el comparativo y sus desafíos:

Ante estas circunstancias es que nace el concepto: La Economía Circular se basa en el ciclo de la naturaleza y tiene como objetivo el bajo consumo de materias primas, energía y desperdicio cero, caracterizándose por generar bajas emisiones contaminantes y alta eficiencia de los recursos, cuyo desarrollo ayudará para mejorar la protección del medio ambiente no solo a nivel regional sino también a nivel mundo, lo que hace que la economía circular forme parte de una estrategia integral para lograr el desarrollo sostenible (Ellen MacArthur F., 2015).

Tabla 2.1. Comparación y desafíos economía lineal vs. Economía circular

Aspecto	Economía lineal	Economía circular
Objetivo Principal	Maximizar el beneficio económico a corto plazo	Desvincular el crecimiento económico del consumo de recursos y regenerar sistemas naturales.
Gestión de residuos	Desecho al final del ciclo	Reducción, Reutilización, Reparación, Recuperación, Valorización, Regeneración y Sustitución con innovación
Eficiencia	Baja eficiencia, con pérdida de material de baja ley y en los procesos	Alta eficiencia, con aprovechamiento de recursos y optimización de procesos
Retos	Contaminación y agotamiento de recursos	Obstáculos legislativos, necesidad de inversión y cambio de mentalidad

En los últimos 30 años se han ido introduciendo nuevos modelos o conceptos para el manejo o gestión de estos residuos en la minería e industria. Las 3R o 4R o las necesarias para el modelo de economía circular se convirtieron en indicadores y estándares de gestión ambiental en la minería, cuyos resultados conllevan a mejorar criterios o conceptos de gestión que deben ser transferidos como conocimiento u oportunidad en el entorno social.

Con base en lo antes mencionado, el objetivo de la presente guía es pasar de un modelo de economía lineal a uno circular de “Reducir, Reutilizar, Reparar, Recuperar, Revalorizar, Regenerar/Rehabilitar/Restaurar y

Reemplazar” (Ver Figura 2.1. Principios de la Economía Circular) analizando las etapas de las operaciones de minería de oro, tal como se ilustra en la siguiente figura 2.3. Transición de un modelo tradicional a un modelo de Economía Circular Sostenible en la Actividad Minera, enfocando en extender la vida útil de los recursos, innovar en procesos, valorizar los residuos mineros y fomentar la colaboración entre diferentes actores. Esto implica pasar del modelo “tomar, producir desechar” a uno donde los materiales de mina puedan permanecer en el ciclo productivo o de transformación o beneficio el mayor tiempo posible teniendo procesos eficientes, minimizando los residuos y maximizando el valor.

Figura 2.1. Principios de la economía circular

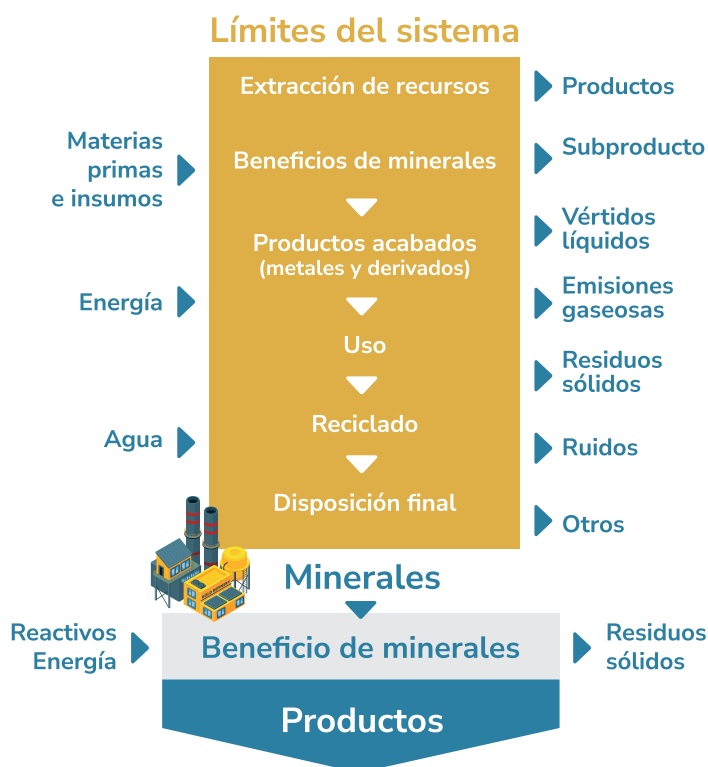


Las fuentes de suministro en la actividad minera deben ser de la **reutilización de los recursos**, como se puede observar en el siguiente esquema general de un análisis de ciclo de vida aplicado a la industria del procesamiento de minerales propuesto por el autor Walter Pardavé Livia, que conlleva a una recopilación y evaluación de las entradas y salidas y los potenciales impactos medioambientales del sistema del producto a lo largo de su ciclo de vida: (ver figura 2.2. Proceso de beneficio de minerales).

Dado lo mencionado anteriormente, se dan las siguientes **ESTRATEGIAS claves para la transición:**

- Incorporar la circularidad desde la concepción del proyecto minero para prolongar la vida útil de los recursos desde el principio, donde se incorporen o se integren las variables ingenieriles (técnicas) con la dinámica biológica de la naturaleza y de los seres vivos. (Ellen MacArthur Foundation (2019), United Nations Environment Programme – UNEP (2020), Azapagic, A. (2004).
- Propiciar la Economía Circular Colaborativa, es decir la oportunidad que surge a partir de los residuos o elementos residuales de la industria minera de oro junto con las actividades humanas o del entorno. (European Commission (2020), Van Buren et al. (2016), CEPAL (2021)).
- Pensar más en la Economía Funcional, maximizando la eficiencia de los procesos para optimizar el uso de materiales e insumos. (OCDE (2019))
- Si la naturaleza es dinámica y cíclica, los costos no deben mirarse como gastos del presente, si no como inversión del futuro, ya que es difícil estimar en términos de ahorro, la eficiencia de la naturaleza. (TEEB (2010), Daily et al. (1997)).
- Economía Circular no es sólo aprovechar los desechos que generamos, también es aprovechar lo que la naturaleza nos brinda de modo gratuito. Solo tenemos que observar y entender. (Ellen MacArthur Foundation (2017), Costanza et al. (2014)).
- Continuar impulsando la investigación aplicada y el desarrollo de soluciones tecnológicas y modelos de negocios circulares que sean económicamente viables, socialmente aceptables y ambientalmente sostenibles como las oportunidades que aquí en esta guía se presentan y se exponen de acuerdo a estudios realizados en diferentes zonas del país y a nivel internacional.

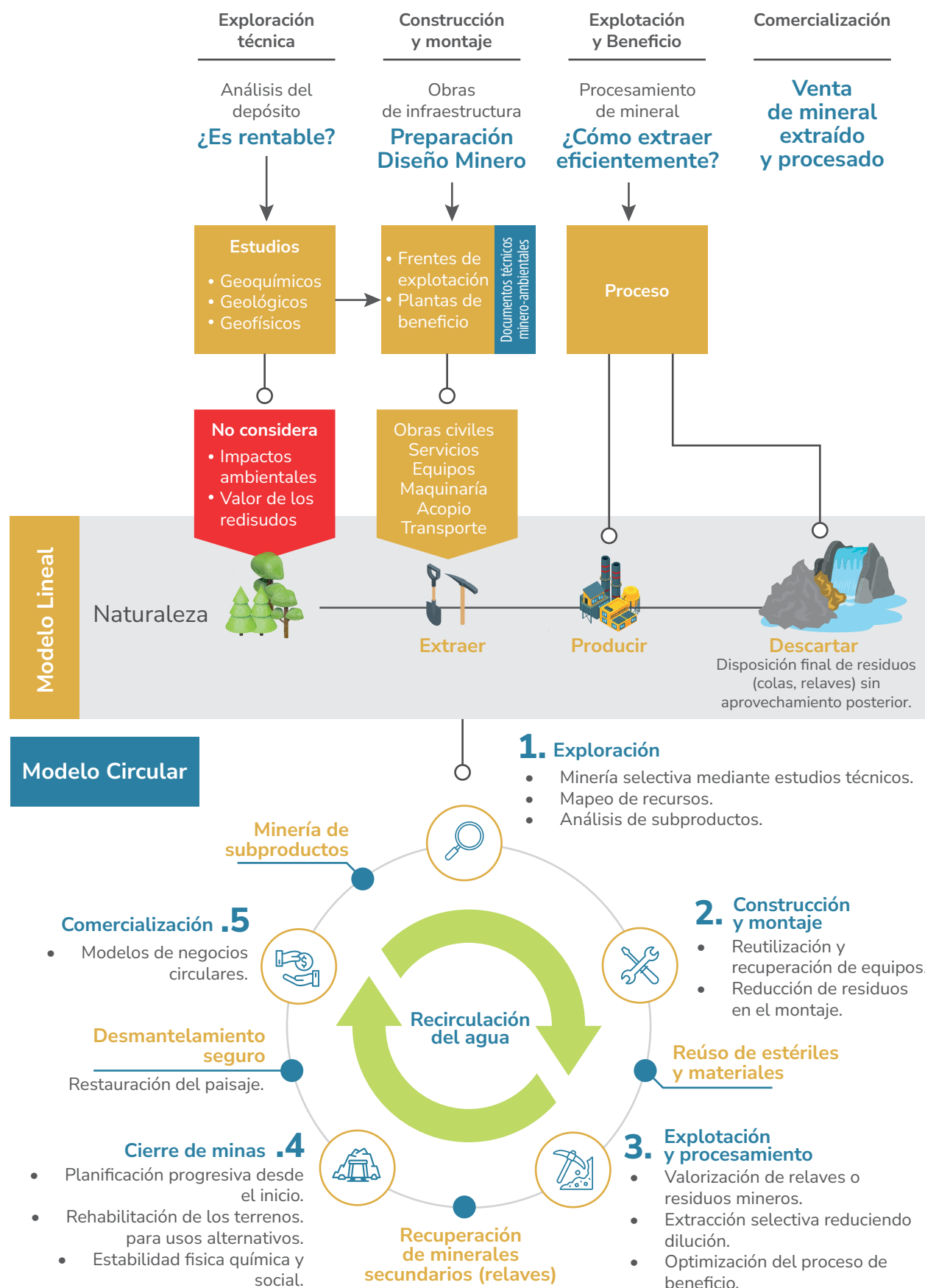
Figura 2.2. Proceso de beneficios de minerales



Fuente: Fuente: Adaptada de Walter Pardavé Livia, Reciclado industrial de metales. Una aproximación, 2006 y de Capuz y otros, España, 2001.



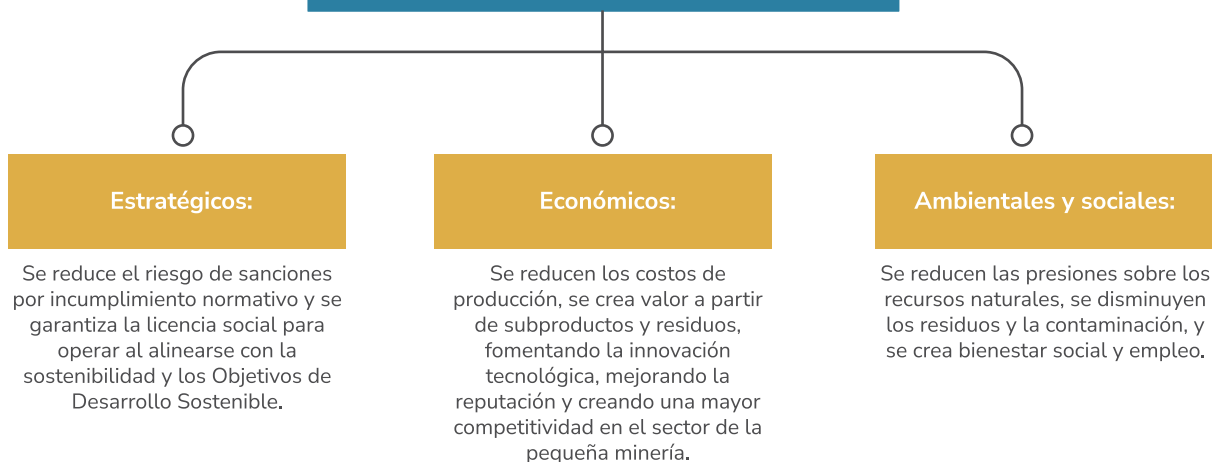
Figura 2.3. Transición de un modelo tradicional a un modelo de economía circular sostenible en la actividad minera



Dichas Estrategias, conllevan a unas **OPORTUNIDADES**:

- **Diseño circular:** planificar las operaciones mineras con la economía circular en mente, pensando en la vida útil de las instalaciones y en cómo los materiales pueden ser reutilizados al final de su vida útil.
- **Materiales sostenibles:** priorizar el uso de materiales reciclados, ya sea para la construcción de la mina o para infraestructuras como carreteras, banquetas y bases de la mina o del lugar donde se llevará a cabo la etapa de explotación y beneficio. En lugar de depender completamente del cemento y agregados vírgenes para las estructuras, se utilizaría por ejemplo concreto con agregados reciclados y otros materiales de construcción de desecho para las bases, sub-bases y otros elementos no estructurales.
- **Recuperación de residuos:** desarrollar tecnologías y procesos u optimizar las existentes, para extraer minerales valiosos de los relaves y otros residuos, transformándolos en nuevas fuentes de materia prima. Los residuos de la minería (relaves) se considerarían una nueva “reserva minera”, donde se buscarían y extraerían minerales aún presentes para su procesamiento y reintroducción en la cadena productiva.
- **Simbiosis industrial:** crear “encadenamientos productivos”, donde los residuos de la minería (como las escorias) se conviertan en materia prima para otras industrias, como la construcción, agricultura, etc.
- **Logística inversa:** se implementaría dicha logística para recuperar y reutilizar componentes de maquinaria, como las bolas de acero de los molinos, o reciclar materiales de equipos obsoletos, para crear nuevas partes, reduciendo la necesidad de fabricar nuevas piezas.

Dichas oportunidades permitirán dar cumplimiento a **BENEFICIOS** de la transición como son:





3

BASES TÉCNICAS PARA LA APLICACIÓN DE LAS LÍNEAS ESTRATÉGICAS DE ECONOMÍA CIRCULAR EN LAS ETAPAS DE LA ACTIVIDAD MINERA DE ORO FILÓN

Las líneas estratégicas o lineamientos definidos en el presente documento constituyen la base para la identificación de oportunidades de economía circular en cada una de las etapas de la minería de oro filón. A partir de estos lineamientos, es posible reconocer prácticas, tecnologías y alternativas de gestión que permiten aplicar los principios de la economía circular mencionados en el anterior capítulo de manera concreta, considerando las particularidades técnicas y operativas de cada fase del ciclo minero en esta sección.

Figura 3.1. Estructura de contenido consecutivo para leer la guía



3.1. APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE EXPLORACIÓN Y MODELAMIENTO DEL YACIMIENTO

3.1.1. Lineamiento 1. Optimización en la planeación del proyecto minero

Cuando se habla de CIRCULARIDAD, es importante empezar cuestionando y analizando:

¿Qué hay? Si es que hay, ¿Cuánto hay? ¿En dónde está? Descubrir si hay agua al lado subterránea, si hay comunidades aledañas, sus vías de acceso, si tienen disponibilidad de agua, energía y demás componentes bióticos, abióticos y socioeconómicos que se analizan.

¿Cómo lograrlo? Para ello es importante tener en cuenta las fases de un proyecto minero:

Exploración y modelamiento del yacimiento



Permite caracterizar el mineral conociendo el mineral en sus dimensiones, profundidad y características fisicoquímicas, mineralógicas del yacimiento, con métodos directos (geología - geomorfología) e indirectos (geoquímica - geoquímica). Esto es información base para la evaluación técnico-económica del proyecto (aprovechamiento del depósito con método de explotación apropiado) y una planificación ambiental en la vía del desarrollo sostenible.

Así mismo permite determinar si los minerales adheridos o adyacentes a éste, pueden ser igualmente económicamente explotables, pero ya desde el punto de vista de otra opción comercial o negocio de economía circular.

La planeación del método de explotación minera debe iniciarse desde la etapa de exploración, empleando la información geológica, mineralógica, estructural y geoquímica recolectada para anticipar los valores y volúmenes del mineral de interés y del material no aprovechable asociado.

Diseño y Desarrollo de mina (Construcción y Montaje – Explotación)



Cierres ambientales parcial o progresivo como estrategia de anticipación

Diseño estructural inteligente,

el cual se entiende como una integración de datos geológicos, mineralógicos, estructurales y geometalúrgicos que conllevan a la planeación del método de explotación y del beneficio. Al analizar estos insumos de manera integral, es posible identificar zonas de baja ley, sectores con riesgo de dilución, dominios metalúrgicos con diferente respuesta al procesamiento y áreas donde la explotación no sería eficiente. Esta síntesis técnica permite proyectar un trazado optimizado de labores mineras, evitando dirigir labores hacia zonas estériles o de baja recuperación metalúrgica, reduciendo excavaciones innecesarias y mejorando la selectividad del arranque.

La planificación temprana también requiere cuantificar la cantidad y tipo de mineral a extraer, la cantidad y tipo de material a excavar que podrá emplearse en construcción, el material apto para labores de relleno y la cantidad y tipo de suelos que deberán removerse y almacenarse. A esto se suma la identificación de residuos con potencial de recuperación o reutilización, y de materiales secundarios con posible valorización, información que orienta la organización y distribución del material desde el inicio del proyecto. Esta definición temprana de volúmenes y calidades permite establecer no solo los usos internos del estéril y del material secundario, sino también su potencial aprovechamiento en aplicaciones externas que puedan derivar en encadenamientos o modelos de negocio circulares.

Producción y beneficio



Esta fase abarca todas las actividades de extracción en los frentes de explotación, transporte interno y beneficio de mineral; una vez que comienza, se dice que la mina está en la fase de operaciones

El aporte de la mineralogía es fundamental en los estudios mineros para generar la caracterización de un depósito, implementar el mejor beneficio de minerales y así evitar la realización de operaciones innecesarias que representan costos elevados.

Cierre de Mina (Etapas que debe ser transversal en todo momento)



Es un conjunto de procesos y actividades que interactúan de manera coordinada y ordenada en procura de compensar, corregir, mitigar y prevenir los impactos generados por efecto de las actividades productivas mineras

Conocimiento del recurso mineral para optimizar la planeación minera

Una adecuada planeación minera requiere conocer la cantidad, calidad y distribución del mineral presente en el yacimiento. Esto permite diseñar una explotación más eficiente, reducir pérdidas de mineral útil, disminuir la generación de residuos y optimizar el aprovechamiento del recurso.

La planeación eficiente de una explotación minera requiere un conocimiento progresivo del yacimiento a partir de la información obtenida durante las actividades de exploración. Para ello, se recomienda que la estimación y clasificación de los recursos minerales se realice siguiendo las mejores prácticas reconocidas internacionalmente, tomando como referencia los principios establecidos en el CRIRSCO International Reporting Template (versión junio de 2024) y los lineamientos adoptados por la Agencia Nacional de Minería, dado que en Colombia la clasificación de recursos y reservas debe realizarse conforme al Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales (ECRR), el cual está alineado con CRIRSCO.

De manera general, los recursos minerales pueden clasificarse como Inferidos, Indicados o Medidos, dependiendo del nivel de confianza geológica y de la calidad de la información disponible. Un mayor conocimiento del yacimiento permite mejorar la planeación minera, optimizar la extracción del mineral útil, reducir pérdidas, disminuir la generación de estériles y fortalecer la aplicación de estrategias de economía circular durante el ciclo de vida del proyecto minero.

Para ello, la información obtenida durante las actividades de exploración debe ser utilizada para estimar y clasificar los recursos minerales de acuerdo con el nivel de confianza geológica disponible. De manera general, los recursos minerales pueden clasificarse en:

Categoría	Descripción para el pequeño minero
Recurso Inferido	Existe evidencia geológica que sugiere la presencia de mineral, pero la información disponible aún es limitada. El nivel de confianza es bajo.
Recurso Indicado	Se cuenta con información suficiente para estimar con mayor confianza la continuidad y características del mineral. El nivel de confianza es moderado.
Recurso Medido	Existe información geológica y de muestreo detallada que permite estimar con alta confianza la cantidad y calidad del mineral. El nivel de confianza es alto.

¿Por qué es importante esta clasificación?

- Conocer el nivel de confianza del recurso permite:
- Mejorar la planeación de la explotación.
 - Reducir pérdidas de mineral.
 - Disminuir la generación de estériles.
 - Optimizar las inversiones en infraestructura y procesamiento.
 - Facilitar la toma de decisiones técnicas y económicas.
 - Promover un aprovechamiento más eficiente del recurso mineral bajo principios de economía circular.

Aplicación en minería de oro filón

En proyectos de oro filón, la estimación y clasificación de recursos contribuye a identificar las zonas con mayor potencial económico, definir secuencias de explotación más eficientes y minimizar la extracción innecesaria de material estéril, favoreciendo el uso responsable del recurso y la reducción de impactos ambientales.

Recomendación : El titular minero debe procurar que la información obtenida durante la exploración (cartografía geológica, muestreos, trincheras, labores subterráneas, perforaciones y análisis de laboratorio) sea organizada y utilizada para mejorar progresivamente el conocimiento del yacimiento y aumentar el nivel de confianza de los recursos minerales estimados, siguiendo las mejores prácticas reconocidas nacional e internacionalmente.

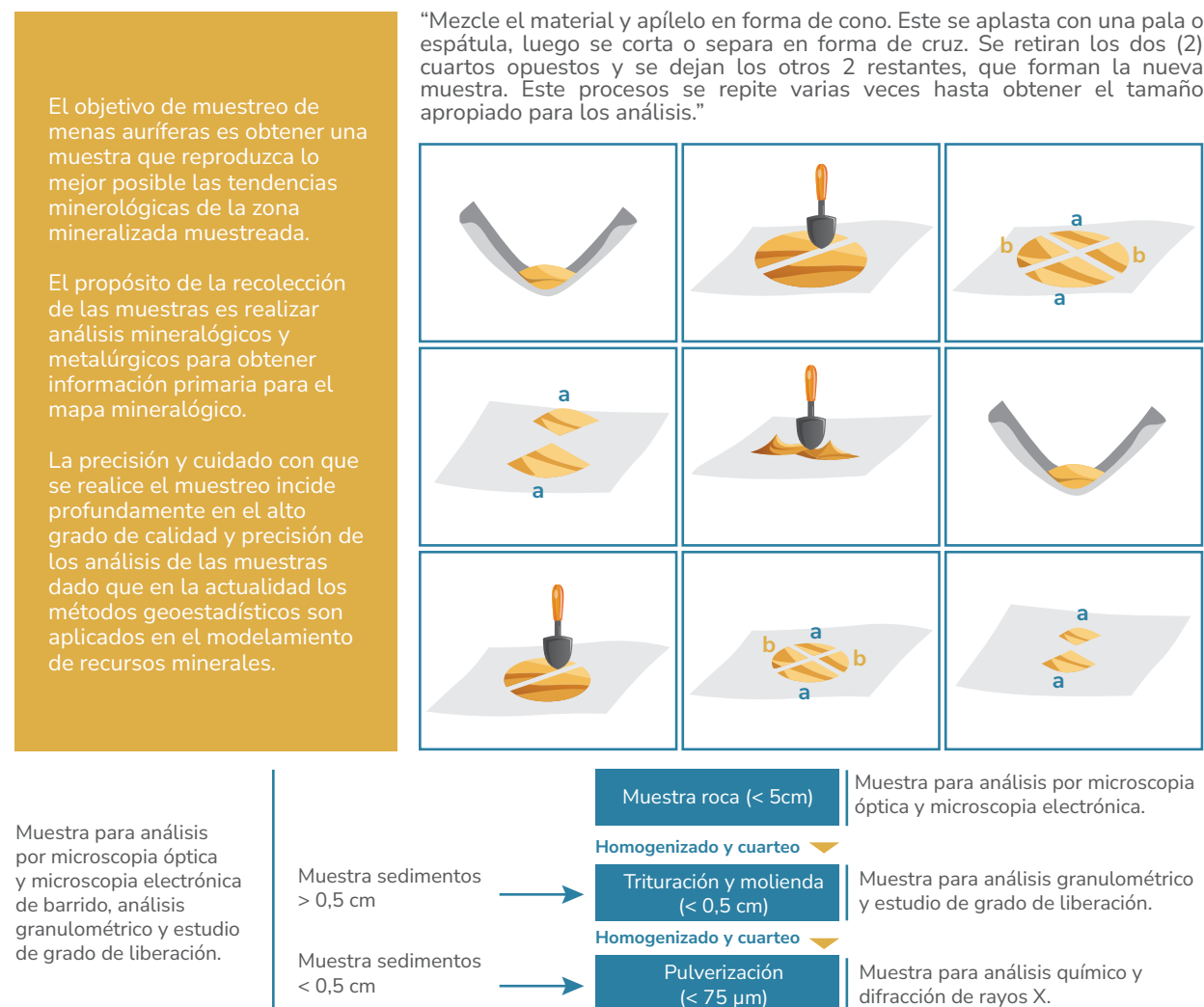
Es importante para toda la etapa de planeación tener en cuenta:

a) Procedimiento de muestreo y manejo selectivo del material

Se toman distintos tipos de muestras de roca representativas a través de una red de técnicas de muestreo para menas auríferas como la homogeneización, cuarteo y división de muestras, para la obtención de sub-muestras y alícuotas para su posterior análisis en el laboratorio.

En los diferentes estudios que involucren rocas, sedimentos y suelos, la preparación de las muestras es una etapa esencial, para ello, es importante la aplicación de procedimientos correctos que garanticen una submuestra homogénea, representativa de la muestra total y que a la vez permita la máxima trazabilidad con una mínima posibilidad de contaminación.

Figura 3.2. Procedimiento de muestreo y manejo selectivo del material

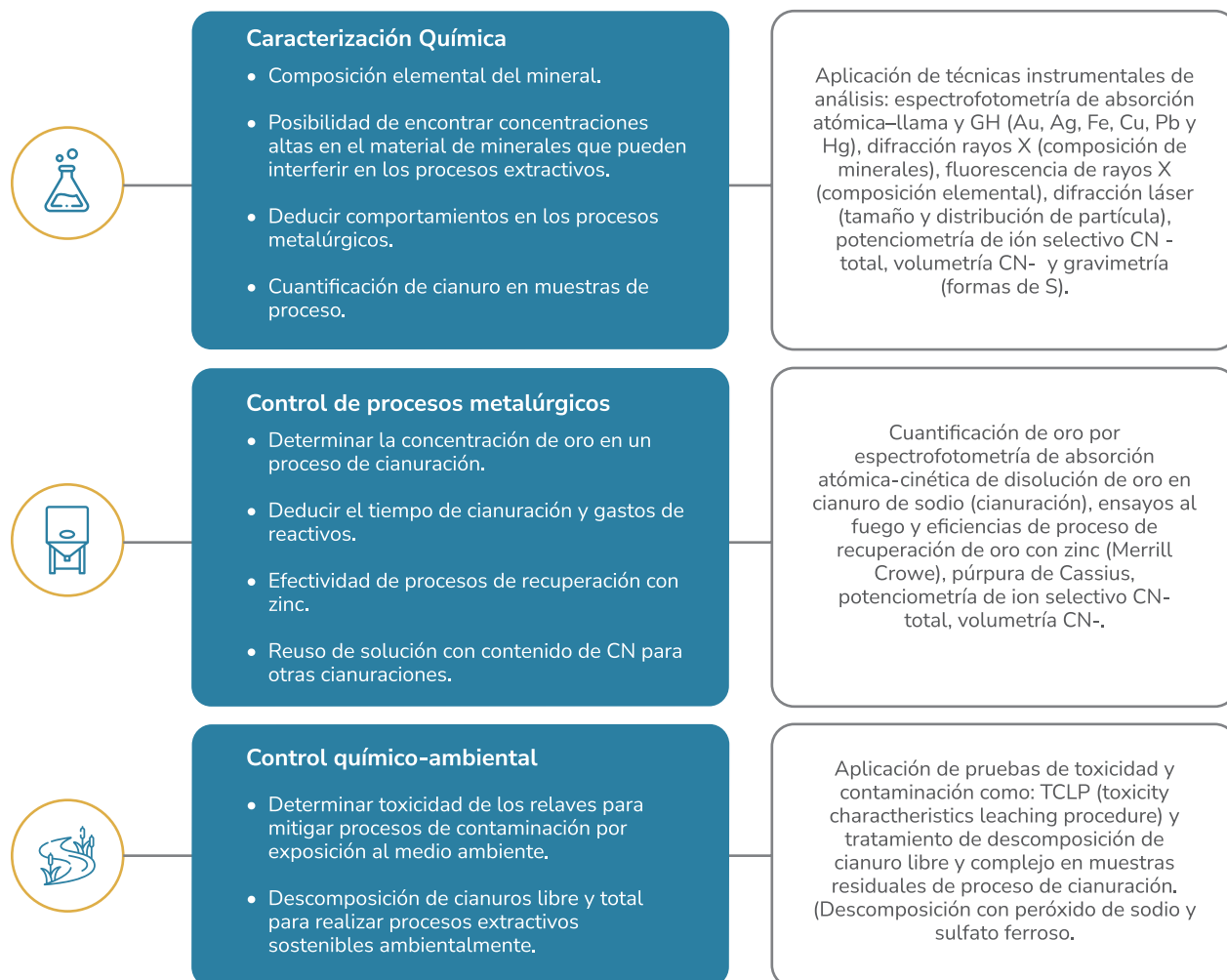


Modificado de Protocolo-de-preparacion-de-muestras-minerales-para-analisis-fisicos-quimicos-y-mineralogicos. Fundación instituto de ingeniería. Venezuela

b) Análisis de laboratorio

Con los análisis mineralógicos y químicos a los materiales de mena, de planta de beneficio y de relaves es posible determinar información relevante para la planificación temprana y eficiente.

Figura 3.3. Diferentes posibles análisis de laboratorio a realizar a variedad de muestras



Modificado de de las guías metalúrgicas del SGC

La composición mineralógica del depósito se emplean técnicas instrumentales de identificación en forma conjunta como:¹

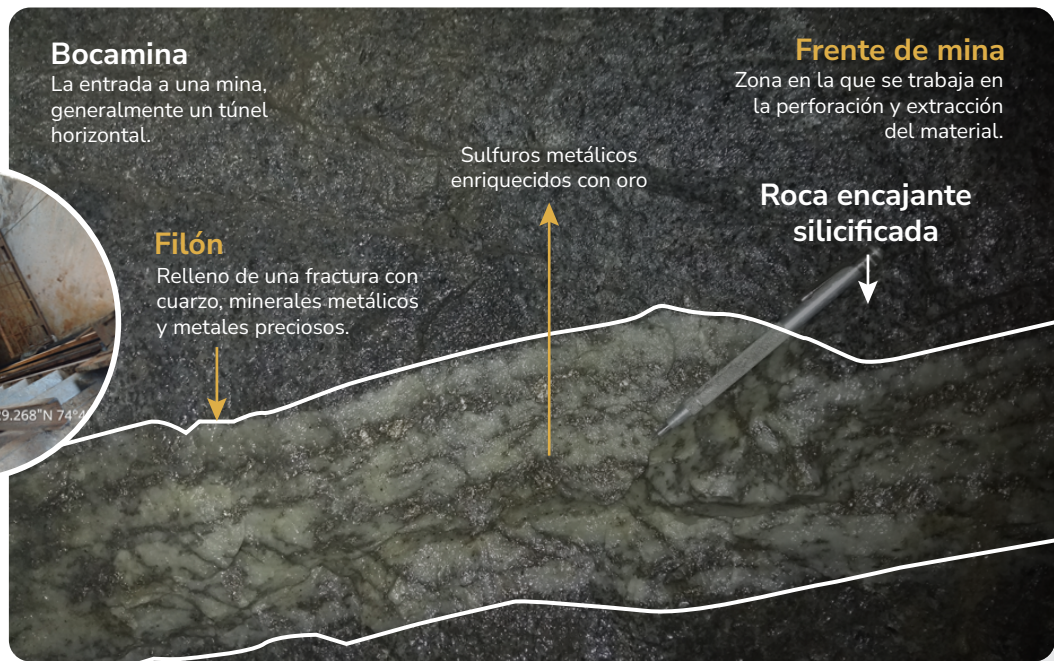
Microscopía óptica

Identificamos sulfuros, silicatos, óxidos y demás minerales contenidos. Con ello es posible establecer:

- Composición mineralógica de la mena: lo que conforma y la proporción entre cada uno de ellos
- Ocurrencia del oro: la forma como ocurre el oro en los depósitos, incide en la refractariedad de la mena
- Distribución de tamaño del grano de oro: el conteo sucesivo de los granos de oro, sus dimensiones y su asociación a otros minerales permite caracterizar la ocurrencia de oro en el depósito e indica la recuperación esperada
- Tipo de minerales huésped y ganga: la determinación precisa de minerales huésped del oro es primordial, ya que de ello depende el manejo de materiales durante los procesos de trituración, molienda y concentración.

1 Guía Metodológica. Técnicas mineralógicas, químicas y metalúrgicas para la caracterización de menas auríferas. Ingeominas – Jica. Bogotá, Colombia. Primera edición 2010

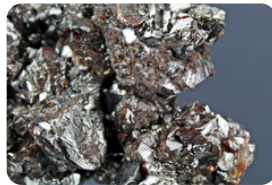
Figura 3.4.
Identificación de
minerales en un
frente de mina
y según análisis
de laboratorio



Minerales asociados a la mena



Pirrotina - Po
(sulfuro de hierro
deficiente en azufre)
Fórmula: $\text{Fe}(1-x)\text{S}$
Dureza: 3,5-4,5 Mohs
Color: Bronce, marrón
oscuro.



Esfalerita - Sp
(sulfuro de zinc)
Fórmula: ZnS
Dureza: 3,5-4 Mohs
Color: varía entre
amarillento y gris



Calcopirita - Cp
(mena de cobre)
Fórmula: CuFeS_2
Dureza: 3,5-4 Mohs
Color: amarillo latón.



Pirita - Py
(bisulfuro de hierro)
Fórmula: FeS_2
Dureza: 6-6,5 Mohs
Color: amarillo latón.



Galena - Gn
(mena de plomo)
Fórmula: PbS
Dureza: 2,5 Mohs
Color: gris plomo



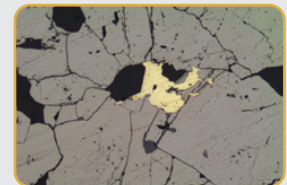
Arsenopirita - Aspy
(sulfoarseniuro de Hierro)
Fórmula: FeAsS
Dureza: 5,5-6 Mohs
Color: blanco a gris

Ocurrencia de oro en mena

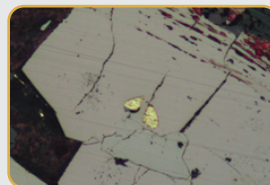
Indica la forma, tamaño y estructura como se presenta
el oro en la mineralización



Oro libre
(Fácil liberación)



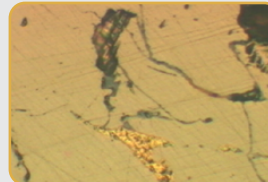
**Oro asociado
a minerales**
Oro asociado a pirita y cuarzo



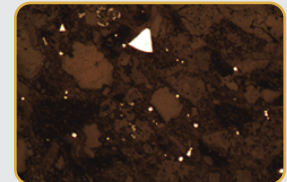
**Oro incluido
en minerales**
Oro incluido en pirita



**Oro en los límites de los
cristales**



**Oro en relleno
de fracturas**
Oro rellenando una fractura
de pirita



**Oro diseminado
en minerales**

- Distribución de tamaños de grano de los minerales huésped y ganga
- Asociaciones minerales: permite conocer las reacciones que tengan lugar durante la lixiviación del oro. Algunos minerales incrementan la refractariedad, como los generadores de ácidos o consumidores de cianuro y oxígeno, entre los cuales se pueden mencionar arsenopirita, pirrotina y telururos de oro y plata
- Relaciones texturales y secuencias de depositación: la relación intergranular entre los minerales que conforman la mena y las texturas que presentan, indica las condiciones de formación del depósito y las secuencias de depositación de minerales. Estas mismas características intervienen en el comportamiento de los procesos de preparación de la pulpa para la cianuración y eventualmente inciden como factor de refractariedad física. Ej: el encapsulamiento, la distribución granulométrica y el grado de liberación
- Liberación de partículas y liberación de oro: se dispone de información sobre la reducibilidad o flotabilidad de los minerales. Es necesario conocer la relativa cantidad de granos libres del mineral para proceder a beneficiarlo.

Microscopia Electrónica

Se realizan microanálisis químicos elementales de tipo puntual, areal y lineal, los cuales permiten caracterizar químicamente los minerales presentes en una mena. Ej: caracterización de minerales de difícil detección, como los telururos. Es de gran importancia porque permite:

- Localizar el oro submicroscópico en los sulfuros, y otros minerales
- Determinar la presencia de metales pesados como Cd, Cr, Pb, Bi, Hg, en los minerales de mena, que pueden ser de interés económico o causar problemas de contaminación en los sólidos o las aguas residuales
- Identificar el oro que forma telururos o arseniuros
- Determinar la calidad del oro (relación Au/Ag) y la presencia de otros metales preciosos, como paladio, rodio.

Conocer la composición, distribución y asociación mineralógica del oro en el depósito aurífero permite conocer qué tenemos, qué podemos aprovechar y qué tratamiento se podría realizar para su extracción y poderlo incluir adecuadamente dentro de la planeación en la exploración realizada.

Difractometría de rayos X (DRX) acompañado de Fluorescencia de rayos X (FRX)

Es posible identificar los minerales de mena asociados y los minerales finogranulares de alteración hidrotermal en depósitos auríferos.

Tabla 3.1. Cuadro comparativo: DRX vs FRX en minería de oro

Criterio	DRX – Difractometría de Rayos X	FRX – Fluorescencia de Rayos X	Criterio	DRX – Difractometría de Rayos X	FRX – Fluorescencia de Rayos X
¿Qué es?	Técnica que identifica minerales cristalinos presentes en una muestra	Técnica que identifica elementos químicos y su concentración	Aplicación en beneficio de oro	Ayuda a elegir el método de beneficio según los minerales	Control químico del proceso y de relaves
¿Qué analiza?	La estructura cristalina de los minerales	La composición química elemental	Tipo de muestra	Polvo fino, seco y homogéneo	Polvo, pastilla prensada o análisis directo
¿Qué responde?	¿Qué minerales hay?	¿Qué elementos hay y cuánto?	Tiempo de análisis	Medio (laboratorio)	Rápido (laboratorio o portátil)
Tipo de resultado	Lista de minerales (cuarzo, pirita, calcita, feldspatos, etc.)	Porcentaje o ppm de elementos (Fe, S, Ca, As, Cu, Pb, Zn, etc.)	Uso en campo	✗ No	✓ Sí, con equipos portátiles
Relación con el oro	Identifica minerales que alojan o acompañan al oro (pirita,	Identifica elementos asociados al oro, pero no el oro directamente	Costo relativo	Medio	Bajo a medio
Detección directa de oro	✗ No detecta oro libre o en bajas concentraciones	✗ No mide bien oro en concentraciones bajas	Nivel técnico requerido	Medio – alto	Bajo – medio
Uso en drenaje ácido de mina	Identifica minerales PAF y NAF (sulfuros, carbonatos)	Cuantifica azufre total y elementos neutralizantes (Ca, Mg)	Limitaciones principales	No detecta minerales amorfos ni oro fino	No identifica minerales ni la forma química
Clasificación de estériles y relaves	Permite diferenciar materiales generadores o no de acidez	Apoya la clasificación química del material	Complementariedad	Se complementa con FRX y ensayos geoquímicos	Se complementa con DRX y ensayo al fuego

Todos estos análisis de laboratorio nos permite llegar a conclusiones como por ejemplo, según el estudio publicado en la Revista de Metalurgia denominado: Recursos y alternativas de tratamiento para los minerales de Teluro de Sonora (Mexico), Aguayo et al. (1996), señalan:

“(…)los tratamientos de telururos dependen de la composición química, cantidades y propiedades de los elementos asociados. La propiedades físicas y químicas del teluro, por otro lado, determinan los métodos de extracción. (...) En el caso del procesamiento de metales preciosos se recomienda un pre-tratamiento para evitar la interferencia del teluro en la cianuración convencional”.

Conclusión:

Si el oro está encapsulado en pirita u otros minerales “refractarios”, a menudo se requiere un pretratamiento, como la oxidación o la tostación del mineral, antes de la lixiviación con cianuro. Todo este análisis se realiza previo a la explotación para determinar los respectivos ecodiseños prácticos, sostenibles, eficientes y rentables.

c) Gestión eficiente del agua: balance hídrico

El recurso hídrico participa en todas las etapas del ciclo de vida de un proyecto minero, allí la importancia de realizar una gestión circular del agua en minería aurífera, la cual se fundamenta en el principio de “cerrar el ciclo”: el agua que sale de un proceso debe retornar como insumo a otro, minimizando tanto la extracción de fuentes naturales como los vertimientos (Universidad de Córdoba, 2025).

La tasa retributiva por vertimientos en el presente proyecto se rige por el Decreto 1553 de 2024, el cual actualiza la reglamentación para el cobro por la utilización directa e indirecta del recurso hídrico como receptor de vertimientos puntuales, sustituyendo disposiciones anteriores como el Decreto 2667 de 2012. Esta norma establece que el cobro se realiza con base en la carga contaminante vertida, bajo un esquema anual, e incorpora variables ambientales, económicas y regionales, siendo aplicado por la autoridad ambiental competente como instrumento para incentivar la reducción de la contaminación hídrica.

Figura 3.5. Gestión circular del agua en minería aurífera



Los siguientes ejes estratégicos son importantes para el pequeño minero en la planeación de su proyecto de minería de oro filón:

Tabla 3.2. Ejes estratégicos en la gestión eficiente del agua

Eje Estratégico	Descripción	Acciones clave para PM	Meta Sugerida	Cómo Medir
1. Aumento de la eficiencia en la gestión del recurso	Priorizar la reducción del consumo y la optimización de los flujos internos de agua.	• Construir piscinas de sedimentación en serie (cascadas) • Instalar bombeo de bajo caudal para retomar agua clarificada al molino • Cubrir piscinas con malla sombra • Revestir con geomembrana HDPE	Recirculación >70% año 1, >85% año 3	Litros recirculados ÷ litros totales × 100
2. Soluciones colaborativas y tecnológicas	Esquemas compartidos de tratamiento con comunidades, otros mineros y autoridades de cuenca.	• Asociarse con mineros vecinos para planta compartida • Compartir costos de análisis de laboratorio (pH, SST) • Participar en mesas de agua que realizan las autoridades ambientales • Buscar apoyo técnico del SGC o universidades	Al menos 1 acuerdo con vecinos o participación en mesa de cuenca	N° de acuerdos firmados o reuniones de cuenca asistidas
3. Fuentes alternativas de suministro	Utilizar fuentes que no compitan con el consumo humano: aguas lluvias, aguas de desagüe de mina tratadas.	• Instalar canaletas en techos para captar agua lluvia (tanques mín. 5.000 L) • Usar agua de desagüe de mina para molienda • Segregar aguas según calidad • Evitar captar de quebradas en época seca	>20% del agua proveniente de fuentes alternativas	Litros lluvia o desagüe ÷ litros totales × 100
4. Generación de conocimiento y reportabilidad	Asegurar transparencia, trazabilidad y toma de decisiones basada en datos. El ICMM exige "reporte público del desempeño hídrico usando métricas consistentes" (ICMM, 2017).	• Llevar bitácora diaria: litros captados, recirculados, pH • Medir caudal con balde y cronómetro • Calcular indicador de recirculación mensual • Análisis de laboratorio cada trimestre	Registro completo para ICA y PUEAA	% de días con registro completo / días del mes

Fuente: Elaboración propia con base en ICMM Water Stewardship Framework (2023), SGC (2017), MME & ATG (2022), CEPAL (2020), Universidad de Córdoba (2025), Guía Minero Ambiental de Explotación (2002).

Figura 3.6. elementos clave para la captación de agua en la pequeña minería dentro de la planeación minera

Importante: el PUEAA (Programa de uso eficiente y ahorro del agua)
Es un requisito de la autoridad ambiental cuando un minero solicita o tiene una concesión de aguas (quebrada, río, pozo, manantial).

Su objetivo es que el minero use solo el agua necesaria, la cuide y no la desperdicie.

¿Para qué le sirve al pequeño minero?

- Cumplir la norma ambiental
- Evitar sanciones o suspensión de la concesión
- Demostrar manejo responsable del agua
- Reducir costos de operación

☐ **1. Identificar de dónde toma el agua**
río, quebrada, pozo, lluvia

☐ **2. Decir para qué la usa**
beneficio del mineral, lavado, riego de vías, uso doméstico.)

☐ **3. Medir o estimar cuánta agua usa**
con aforos simples, horas de bombeo o capacidad del tanque

☐ **4. Aplicar medidas de ahorro**
Recircular el agua del beneficio
Reparar fugas
Usar canales y tuberías cerradas
Aprovechar agua lluvia cuando sea posible

☐ **5. Proteger la fuente de agua**
No botar relaves ni aguas sucias al cauce
Mantener franjas de protección
Evitar captaciones directas sin control

☐ **6. Hacer seguimiento**
Revisar periódicamente que el consumo no aumente y que las medidas funcionen.

La Guía Minero Ambiental de Explotación (2002) establece que “se deberá hacer un inventario de las posibles fuentes de captación de agua. Dentro de la etapa de Exploración Minera es importante determinar las diferentes fuentes de abastecimiento que incluye cuerpos de agua superficial o subterránea y aguas corrientes o estáticas”, y analizar las características.

Marco Normativo: La Resolución 631 de 2015, establece los límites permisibles de vertimientos para actividades mineras; la Resolución 1256 de 2021 y la Resolución 1207 de 2014, que regulan el reúso de aguas residuales tratadas; el Decreto 1076 de 2015 y el Decreto 1090 de 2018, que establecen el marco para el uso, concesión y ordenamiento del recurso hídrico; y la Ley 373 de 1997, que obliga a implementar el Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA), en concordancia con los lineamientos de economía circular promovidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Tabla 3.3. Elementos clave para la captación de agua en la pequeña minería dentro de la planeación minera

	Tipo de fuente	Características	Requisitos legales
1. Identificación de la fuente hídrica	Superficial (ríos, quebradas)	Más accesible pero sujeta a variabilidad estacional. Requiere aforo de caudales mínimos. Riesgo de conflicto con otros usuarios. Vulnerable a contaminación aguas arriba.	Concesión de Aguas Superficiales (Decreto 1076/2015, Art. 2.2.3.2.9.1). Formato Único Nacional. Estudio técnico de balance oferta-demanda. PUEAA obligatorio.
	Subterránea (pozos, aljibes)	Mayor estabilidad de caudal pero costosa de desarrollar. Requiere estudio hidrogeológico. Riesgo de agotamiento sino se gestiona adecuadamente. Puede estar conectada a acuíferos regionales.	Permiso de explotación + Concesión de Aguas Subterráneas (Decreto 1076/2015, Art. 2.2.3.2.16.13). Prueba de bombeo. Evaluación de recarga de acuífero. Excepción: uso doméstico sin derivación no requiere concesión.
	Agua lluvia	Fuente gratuita y de buena calidad. No compite con otros usuarios. Depende de régimen de precipitación local. Requiere infraestructura de captación y almacenamiento. Potencial de 40 - 60% de reposición en zonas de alta precipitación.	No requiere concesión si se capta en el predio propio y no forma cauce que atraviese otros predios. (Decreto 1076/2015, Art. 2.2.3.2.16.2). Se puede construir obras de almacenamiento sin perjuicio a terceros.
	Agua de desagüe de mina	Generada por infiltración en labores subterráneas. Puede contener sedimentos o ser ácida (DAM). Requiere tratamiento previo según calidad. Fuente disponible sin afectar otras captaciones.	Si se usa internamente, no requiere permiso adicional. Sise descarga, aplica permiso de vertimientos (Res. 631/2015). Caracterizar calidad antes de usar en proceso.
	Agua residual tratada	Proveniente de procesos previos o de terceros. Requiere tratamiento para cumplir criterios de calidad. Alineada con principios de economía circular.	Resolución 1256 de 2021 reglamenta el reúso de aguas residuales tratadas. Requiere caracterización y cumplimiento de parámetros físico-químicos y biológicos según su uso.
	Evaluar disponibilidad estacional (época seca vs. lluviosa), vulnerabilidad a la contaminación, e identificar usuarios aguas arriba y abajo. Realizar aforo de caudal en el sitio de captación propuesto. Si se trata de acuíferos, valorar la capacidad de suministro según características geológicas. Revisar registros históricos de caudal del IDEAM si existen.		
2. Caudal ecológico	El IDEAM establece como caudal mínimo ecológico aproximadamente el 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente (Resolución 865 de 2004). Este caudal NO puede ser captado y debe permanecer en la fuente para mantener el ecosistema acuático. La captación permitida = Caudal disponible - Caudal ecológico - Otros usos prioritarios.		
3. Permisos y obligaciones regulatorias	Concesión de Aguas otorgada por la Autoridad Ambiental, según Decreto 1076 de 2015, Art. 2.2.3.2.7.1. Requisitos: caudales característicos de la corriente, inventario de usuarios aguas abajo, diseños de captación y conducción, ubicación georreferenciada. Para uso minero se requiere además el estudio de factibilidad del proyecto.		
4. Balance hídrico local	Calcular: $\text{Oferta hídrica} = \text{Precipitación} + \text{Escorrentía} + \text{Recarga de acuíferos}$ $\text{Demanda} = \text{Consumo proceso} + \text{Evaporación} + \text{Pérdidas}$ El balance debe demostrar que la captación solicitada no genera déficit hídrico en la cuenca, especialmente en época seca. Presentar análisis mensual considerando variabilidad climática.		
5. Uso responsable y eficiente	Reducir al mínimo técnico la captación de agua fresca. Priorizar recirculación (meta >70%). Control de pérdidas mediante revestimiento de canales y tanques. Mantenimiento preventivo de bombas y tuberías. Un sistema bien diseñado permite reducir la captación de agua fresca hasta en un 70-80% respecto a un circuito abierto (Universidad de Córdoba, 2025).		
6. No afectación de usos prioritarios	Verificar que la captación no afecte: acueductos veredales, bocatomas municipales, sistemas de riego agrícola, abrevaderos de ganado, usos recreativos. Coordinar con la comunidad los horarios de captación en época de estiaje. Cumplimiento del ODS 6 – Agua Limpia y Saneamiento.		

Fuente: Elaboración propia con base en Decreto 1076 de 2015, Guía Minero Ambiental de Explotación (2002), Universidad de Córdoba (2025)

d) Diagramas generales de circularidad en un proyecto minero

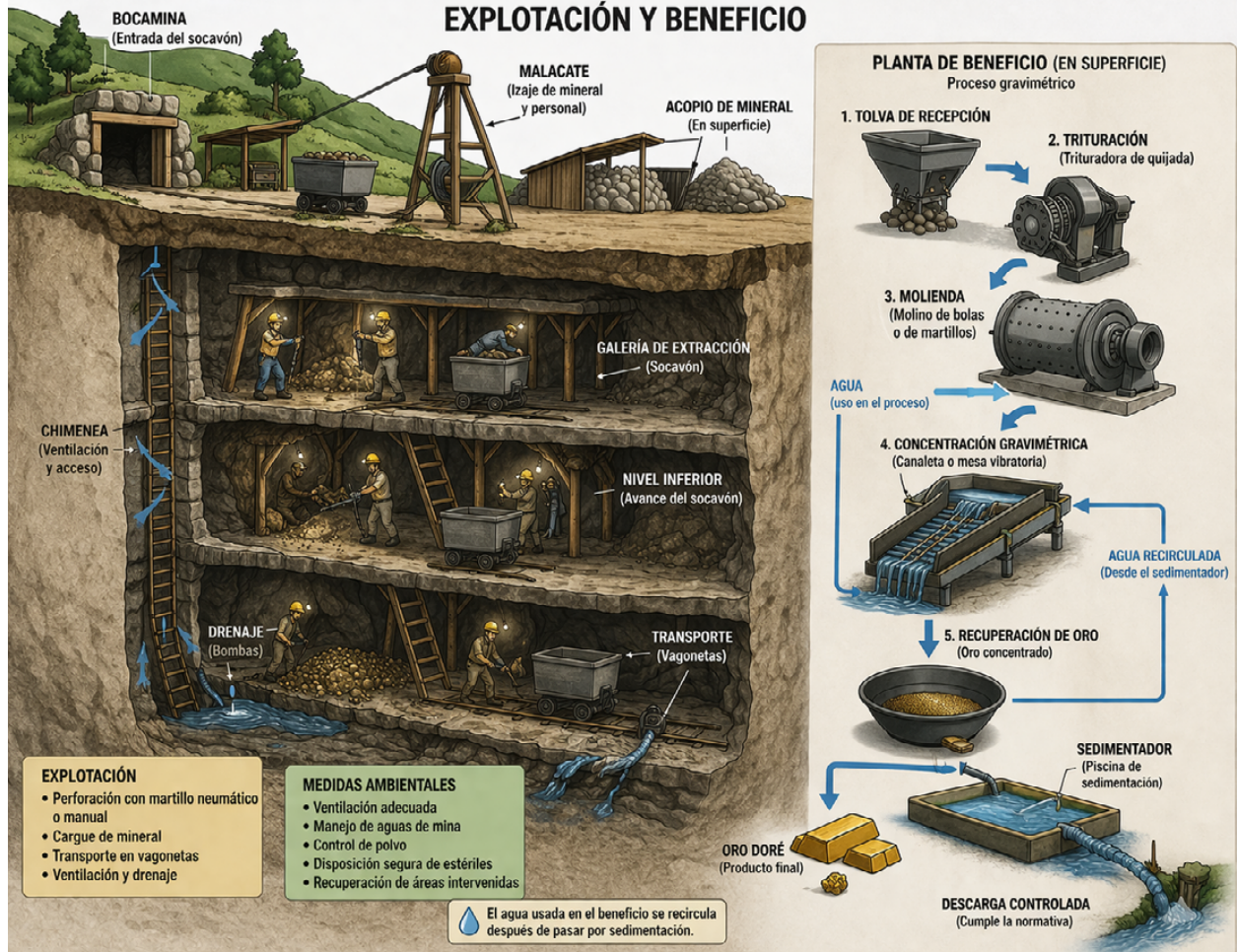
A continuación se presenta, el análisis integrado de las etapas de exploración, explotación y cierre de la minería de oro de socavón a pequeña escala donde se evidencia que cuando se gestiona de manera técnica a lo largo de todo su ciclo (exploración–explotación–cierre), puede evolucionar hacia un modelo de economía circular, donde los recursos se optimizan, los residuos se reincorporan al sistema y los impactos ambientales se minimizan progresivamente.

Al incorporar los principios de economía circular y sostenibilidad permite optimizar el uso de los recursos, reducir la generación de impactos ambientales y promover la rehabilitación progresiva de las áreas intervenidas. La implementación de tecnologías limpias, la recirculación de agua, el aprovechamiento de materiales y la restauración del terreno configuran un modelo de operación minera más eficiente, responsable y alineado con la normativa ambiental vigente, garantizando no solo la viabilidad técnica del proyecto, sino también su sostenibilidad a largo plazo.

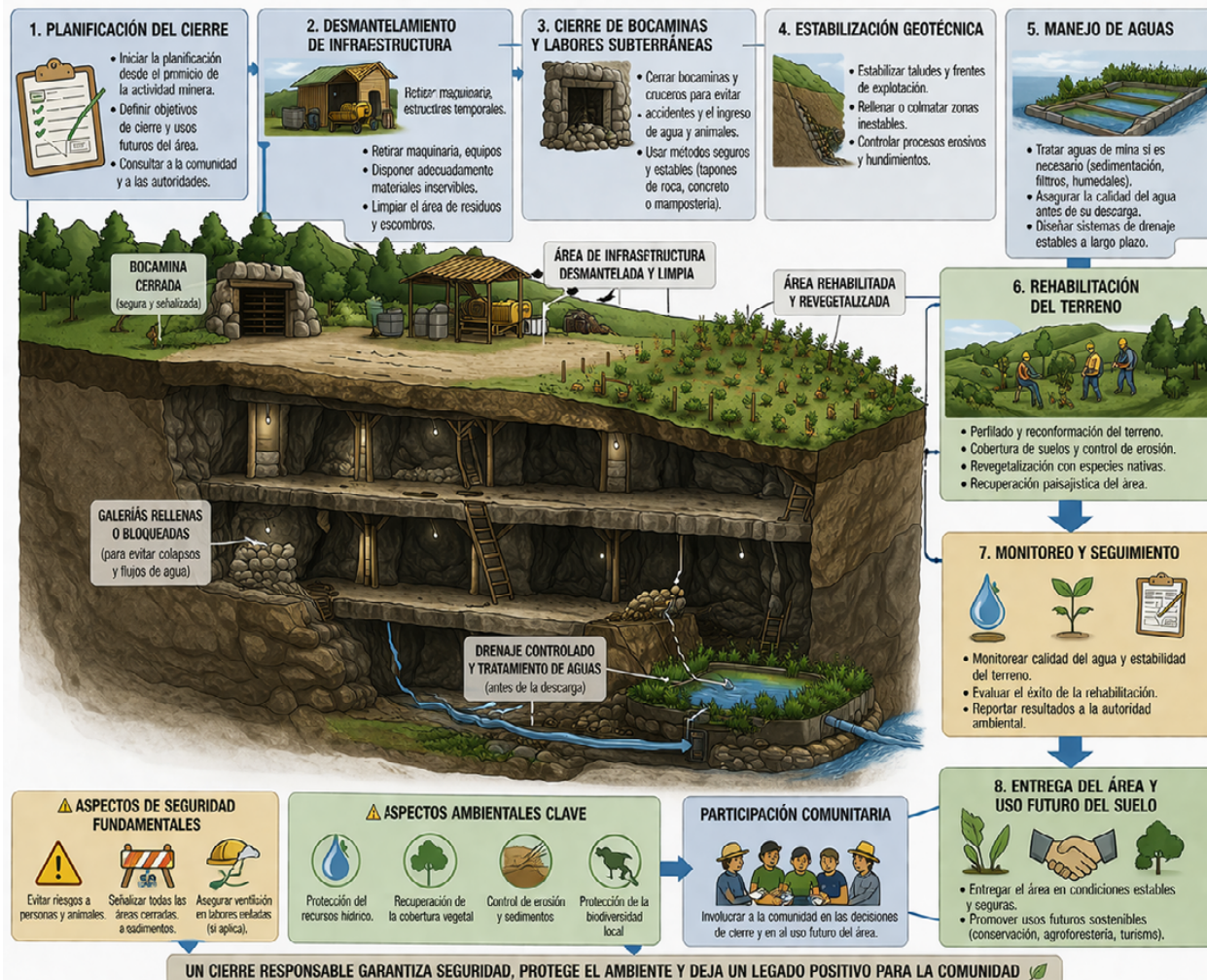
Figura 3.7. Diagramas de circularidad en un proyecto minero



PEQUEÑA MINERÍA DE ORO DE SOCAVÓN EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO



ETAPA DE CIERRE DE MINA EN PEQUEÑA MINERÍA DE ORO DRE SOCAVÓN ASPECTOS CLAVE A TENER EN CUENTA



3.1.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Reducción de estériles en la extracción del material de mina

La información temprana alimenta un análisis integrado de planeación; este análisis se traduce en un diseño estructural inteligente con un trazado de labores coherente con la mineralización; y este diseño, al reducir estériles y optimizar la selectividad, habilita oportunidades circulares como la disminución de residuos desde el origen y el aprovechamiento de material limpio para usos complementarios.

La siguiente figura muestra los puntos claves y la implementación de un diseño estructural inteligente en la etapa de exploración y explotación.

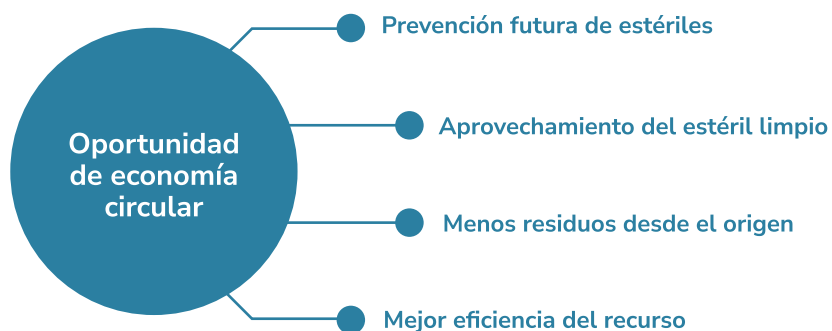
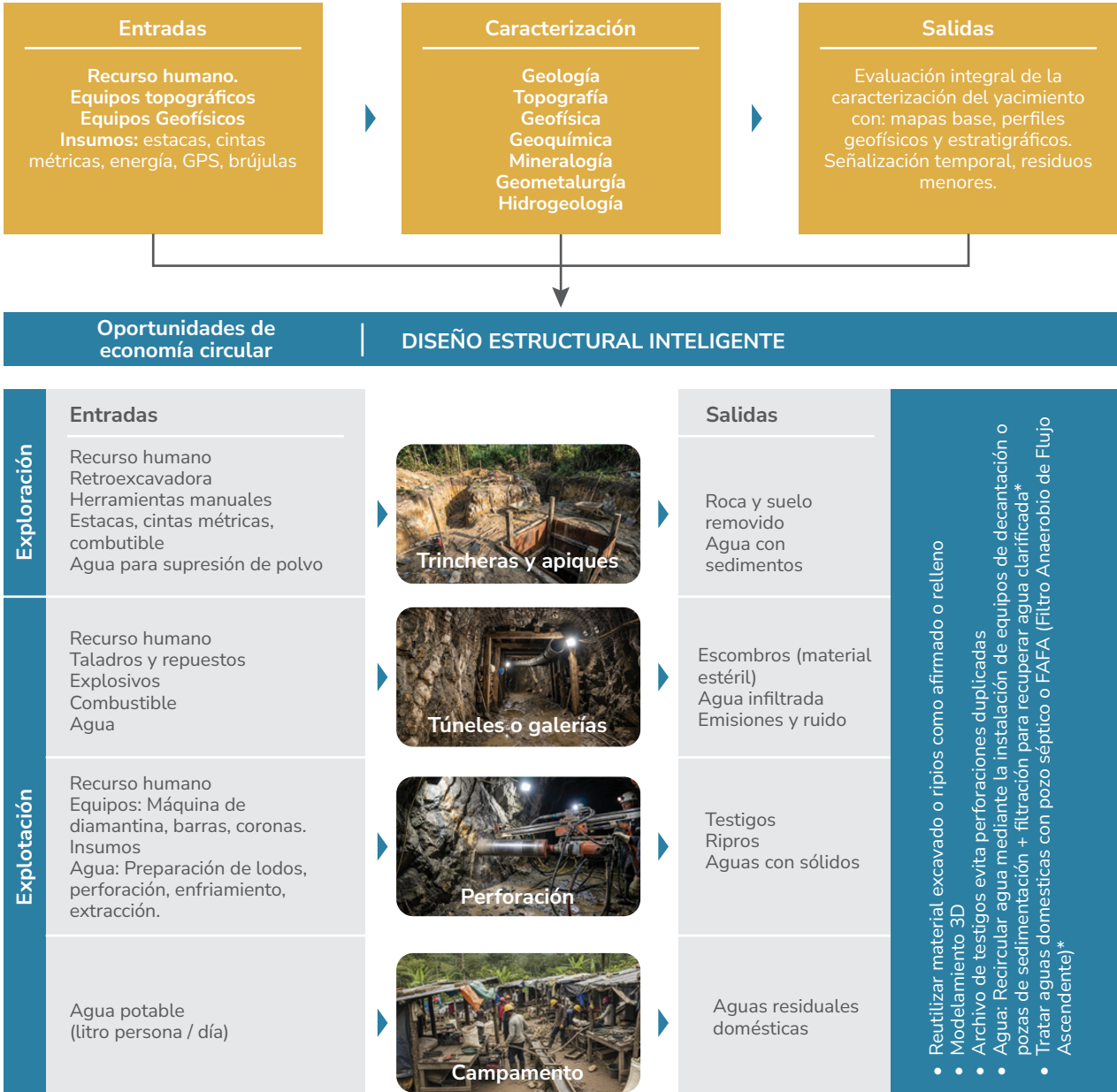


Figura 3.8. Diagrama de determinación de flujos de entradas, procesos y salidas de las diferentes operaciones en la etapa de exploración y modelamiento del yacimiento con oportunidades de economía circular



3.1.1.2. Oportunidad de Economía Circular 2: Gestión preventiva de relaves

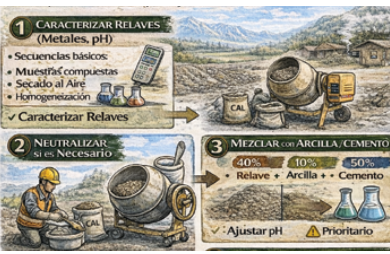
Los relaves constituyen el principal residuo volumétrico de las operaciones mineras. En la minería de pequeña escala, la gestión inadecuada genera impactos ambientales residuales significativos (MINEM, 2005), especialmente donde el uso de mercurio y cianuro añade complejidad geoquímica (IGF, 2025).

Los relaves son una oportunidad de economía circular: pueden valorizarse como materiales de construcción, usarse como relleno de labores subterráneas, o reprocesarse para recuperar valores residuales.

a) Acciones preventivas para gestión de relaves

Tabla 3.4. Acciones preventivas para gestión de relaves en minería de pequeña escala

Acción Preventiva	Descripción y Mecanismo	Cómo Implementar	Viab.	Costo
Pozas de Sedimentación en Cascada 	Sistema de 3-4 pozas escalonadas que aprovechan la gravedad. Primera poza retiene gruesos (>100 µm), segunda y tercera capturan finos. Permite recuperar 60-80% del agua.	Cómo Implementar 1. Excavar 3-4 pozas en serie 2. Profundidad: 1.0-1.5 m cada una 3. Impermeabilizar con arcilla 20-30 cm o geomembrana HDPE 1-1.5 mm 4. Conectar con tubos o canales 5. Tiempo retención: >24 horas total 6. Limpiar sedimentos periódicamente: para Relaves PAF: control pH semanal, neutralizar con cal 1-3 kg/m³ si pH<5, objetivo pH>6.5 en recirculación. Cuando Aplicar • OBLIGATORIO desde inicio • Todo tipo de operación • Antes de cualquier descarga • Clima: cualquiera • Suelo: cualquiera (con arcilla)	☑ ALTA	MUY BAJO
Playas de Secado Solar (Dry Stack Artesanal) 	Disposición de relaves espesados en capas delgadas sobre superficie impermeable. La evaporación solar reduce humedad a <20%. Elimina riesgo de falla de presas. Técnica validada internacionalmente.	Cómo Implementar 1. Base plana impermeabilizada + drenaje perimetral 2. Espesar relaves (pozas) a 45-55% sólidos 3. Disponer capas 10-20 cm, pendiente 2-5% 4. Cubrir con lona entre volteos 5. Voltear cada 2-3 días hasta <20% humedad 6. Monitorear pH semanal, neutralizar si <5.5 7. Riego ligero para control de polvo 8. Apilar cuando humedad <20% Cuando Aplicar SOLO si E/P > 2:1 y lluvia < 1500 mm/año • Cuando hay personal para monitoreo semanal • Alternativa a presas en climas áridos • Después de sedimentación • NO viable en climas húmedos • Requiere cobertura final 105-120 cm al cierre	☑ ALTA	MUY BAJO
Relleno de Labores Subterráneos (Backfill) 	Retorno de relaves deshidratados al interior de labores mineras agotadas. Elimina pasivos superficiales, estabiliza excavaciones y reduce riesgo de subsidencia. Puede ser simple o cementado.	Cómo Implementar 1. Deshidratar relave (<25% humedad) 2. Mezclar con cal 5-10% (básico) 3. Opcional: +cemento 3-8% (cementado) 4. Transportar por gravedad o carretilla 5. Disponer en capas compactadas 6. Dejar curar antes de nueva capa Cuando Aplicar • Minería subterránea • Labores agotadas disponibles • Para estabilizar excavaciones • Reducir DAM subterráneo • Durante operación	☑ ALTA	BAJO
Co-disposición con Estéril (Commingling) (Cubierta para sellar materiales sulfurosos y prevenir la contaminación) 	Mezcla de relaves deshidratados con roca estéril NAF (material no acidificante). Genera material geotécnicamente estable con mejor drenaje interno. Reduce área de depósito en 50%. Mejor comportamiento sísmico.	Cómo Implementar 1. Deshidratar relaves (<30% humedad) 2. Mezclar: 60-70% estéril NAF 3. Mezclar: 30-40% relave 4. Disponer en capas alternadas 5. Compactar cada capa 6. Un solo depósito integrado Cuando Aplicar • Estéril NAF disponible • Zona lluviosa • Escasez de terreno • Cuando hay grandes volúmenes • Durante toda la operación	☑ ALTA	BAJO
Control de Efluentes y Circuito Cerrado 	Sistema de recirculación que maximiza recuperación de agua (>80%) y minimiza vertimientos. Esencial para operaciones con cianuración. Incluye degradación de CN por UV solar o H₂O₂.	Cómo Implementar 1. Poza de clarificación final 2. Canal perimetral de recolección 3. Bomba manual o solar (fotovoltaica) para retorno 4. Degradación CN: exposición UV 5. Alternativa: H₂O₂ 1-2 kg/m³ 6. Meta: descarga cero época seca Cuando Aplicar • OBLIGATORIO con cianuración • Recomendado siempre • Para reducir consumo agua • Zonas con escasez hídrica • Durante toda la operación	⚠ MEDIA	BAJO

Acción Preventiva	Descripción y Mecanismo			Viab.	Costo
Cobertura y Sellado para Cierre 	Sistema multicapa que aísla relaves del ambiente, previene infiltración y limita DAM. Diseño 'store-and-release' para climas húmedos. Incluye revegetación para estabilidad a largo plazo.	Cómo Implementar	1. Reconformar superficie (pend. 2-5%) 2. Capa caliza opcional (20 cm) 3. Arcilla compactada (50 cm) 4. Suelo vegetal (30 cm) 5. Revegetar con nativas 6. Instalar canales perimetrales	● MEDIA	MEDIO
Valorización como Material de Construcción 	Transformación de relaves en ladrillos, bloques o agregados. Tecnología validada en Perú (Minera Poderosa). Requiere neutralización previa y caracterización. Genera ingreso adicional.	Cómo Implementar	1. Caracterizar relaves (metales, pH) 2. Neutralizar si es necesario 3. Mezclar con arcilla/cemento 4. Moldear ladrillos o bloques 5. Secado al sol (7-14 días) 6. Opcional: horneado (mayor resistencia)	● MEDIA	MEDIO
Recuperación Secundaria (Scavenging) 	Reprocesamiento de relaves históricos para recuperar oro residual (20-40% del contenido original). Doble beneficio: ingreso económico + eliminación de pasivo ambiental.	Cómo Implementar	1. Muestrear y analizar relaves 2. Evaluar contenido Au residual 3. Mesa gravimétrica Wilfley 4. Alternativa: flotación artesanal 5. Alternativa: cianuración controlada 6. Disponer residuo final adecuadamente	● MEDIA	MEDIO
		Cuando Aplicar	• Relaves históricos con valor • Contenido Au >0.3 g/t • Pasivos ambientales existentes • Con apoyo técnico disponible • Como proyecto específico		

Viabilidad: 🟢 **ALTA** (implementable con recursos) | 🟡 **MEDIA** (viable con apoyo) | 🔴 **BAJA** (requiere industria)

Recomendaciones de implementación

1. Caracterizar los relaves antes de seleccionar tecnología: análisis de metales pesados, potencial de generación de ácido (ABA), granulometría, contenido de cianuro (CN) si aplica.
2. Priorizar tecnologías de alta viabilidad como primera línea de acción (1-4). Son de bajo costo e implementables con recursos propios.
3. Implementar circuito cerrado de agua (5) como requisito mínimo obligatorio para cualquier operación con cianuración.
4. Buscar alianzas institucionales (universidades, CAR, cooperación internacional) para acceder a tecnologías de valorización (7-8) y financiamiento.
5. Planificar el cierre desde el inicio: incluir la acción 6 (cobertura y sellado) en el plan de manejo desde la etapa de diseño, no como medida de última hora.
6. Documentar todo: llevar bitácoras de volúmenes dispuestos, ubicación, características, mantenimiento realizado. Esto facilita el cierre y cumplimiento normativo.

3.1.1.3. Oportunidad de Economía Circular 3: Cierre progresivo como estrategia de anticipación

El cierre progresivo es una aplicación del principio de “Regenerar la Naturaleza” de la economía circular, que consiste en rehabilitar áreas intervenidas de manera simultánea a la explotación.

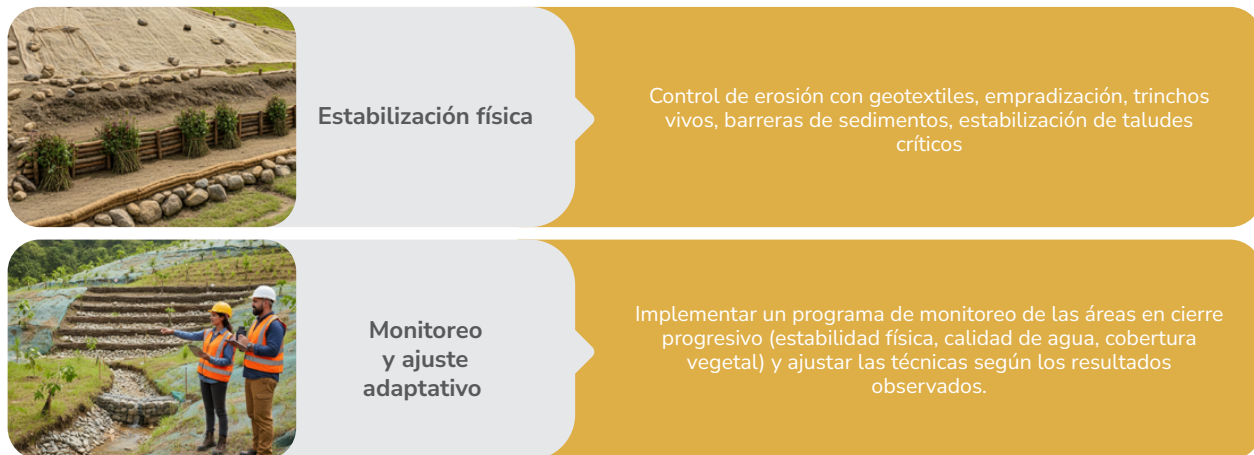
a) Componentes técnicos del cierre progresivo

La rehabilitación progresiva requiere la implementación de componentes técnicos específicos, adaptados a las condiciones del sitio y los resultados de la caracterización geoquímica:

Marco Normativo: Ley 685 de 2001 (Art. 84, 11 y 95): obligación de incluir el plan de cierre en el Programa de Trabajos y Obras (PTO) y deberes de recuperación geomorfológica, paisajística y forestal. Decreto 1076 de 2015: Plan de Manejo Ambiental. Ley 99 de 1993 (Art. 60, solo cielo abierto): garantía mediante póliza de cumplimiento o garantía bancaria para la restauración ambiental. Resolución 2206 de 2022 ANLA: términos de referencia EIA para minería con exigencias en plan de cierre y abandono.

Tabla 3.5. Componentes técnicos del cierre progresivo

	Reconformación topográfica inmediata	Reperfilado de taludes a pendientes estables ($\leq 2H:1V$), suavizado de crestas, relleno de depresiones, utilizando materiales NAF (No Generadores de Acidez) para reconformar botaderos y tajos agotados, replicando perfiles topográficos naturales que faciliten el drenaje superficial y la integración paisajística circundante.
	Preservación y Manejo de suelo	Preservación de suelo orgánico (topsoil) durante construcción, retirar y almacenar el topsoil antes de cualquier intervención, manteniéndolo en pilas de altura $< 2m$ con cobertura vegetal temporal, para su posterior uso en áreas a revegetar con espesor mínimo 15-30 cm.
	Control de infiltración y drenaje superficial	Implementar canales perimetrales, cunetas de coronación, estructuras disipadoras de energía y estructuras de derivación de aguas limpias fuera de áreas intervenidas para limitar el contacto de aguas de escorrentía con materiales PAG (Potencialmente Generadores de Acidez).
	Coberturas técnicas progresivas	Utilizar materiales NAF ($\geq 0.5m$) como primera capa de cobertura, capa de material fino de baja permeabilidad, capa de suelo vegetal, según caracterización geoquímica previa. Es decir, Aplicar coberturas temporales en áreas expuestas mientras avanza la operación, evitando la oxidación de sulfuros y la generación de DAM (Drenaje ácido minero).
	Revegetación con especies nativas	Selección de especies nativas adaptadas a la zona desde el inicio del proyecto para siembra o plantación con densidad adecuada, fertilización orgánica inicial, riego de establecimiento si es necesario, priorizando especies pioneras para estabilización inicial y especies de sucesión tardía para la restauración ecológica.



Fuente: Elaboración propia con base en MEND (2004), GTK Finland (2024), INAP GARDGuide (2009).

3.1.1.4. Oportunidad de Economía Circular 4: Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) son acciones que utilizan procesos ecológicos para resolver problemas ambientales de manera costo-efectiva (UICN, 2016). Para la minería de pequeña escala, las SbN ofrecen alternativas accesibles que no requieren equipos costosos, energía externa ni insumos químicos continuos.

Las SbN transfieren el trabajo a los sistemas naturales, reduciendo costos de operación a largo plazo mientras generan beneficios adicionales como control de erosión, mejora del paisaje y recuperación de biodiversidad.

Figura 3.9. SbN viables para la pequeña minería



Coberturas vegetales con gramíneas nativas (*Paspalum spp. L.*)

Siembra directa o hidrosiembra de gramíneas locales para control de erosión, su mecanismo de cobertura + estabilización tolerando cualquier metal presente.

Aplicación

Taludes, áreas reconformadas, depósitos cerrados.

Cuándo aplicar

Cierre progresivo, inmediatamente después de reconformar. Época de lluvias.

Viab. © MUY ALTA



Control de erosión con Vetiver

Barreras vivas con *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty., con mecanismo de fitoestabilización + erosión permanente, en contenido de metales Pb (plomo), Zn (zinc), Cd (cadmio), Cu (cobre), As (arsenico).

Aplicación

Taludes, bermas, canales de drenaje, curvas de nivel.

Cuándo aplicar

Inmediatamente después de conformar taludes. Todo el año.

Viab. © MUY ALTA



Vivero de especies nativas

Producción local de plantas para revegetación usando semillas del entorno.

Aplicación

Suministro para todas las áreas a rehabilitar.

Cuándo aplicar

Desde inicio de construcción. Producción continua.

Viab. © MUY ALTA



Compostaje de residuos orgánicos

Transformación de residuos del campamento en sustrato para revegetación.

Aplicación

Producción de tecnosoles, enmienda para vivero y siembra.

Cuándo aplicar

Desde inicio de operación. Proceso continuo.

Viab. ☉ MUY ALTA



Poza vegetada (humedal aerobio simple)

Excavación con plantas acuáticas locales (eneas, juncos) para tratamiento.

Aplicación

Efluentes neutros con Fe(hierro) / Mn(manganeso) elevados, pozas de sedimentación.

Cuándo aplicar

Operación. Para efluentes con pH >5.5. Excavación manual posible.

Viab. ☉ ALTA



Fitorremediación con *Jatropha curcas* L. (Piñon)

Plantación de piñon para inmovilizar metales pesados en suelos.

Aplicación

Suelos con contaminación por Hg (mercurio), As (arsenico), Pb (plomo), Cd (cadmio).

Cuándo aplicar

Cierre. En suelos estabilizados físicamente. Aplicable para zonas.

Viab. ☉ ALTA



Rizofiltración con buchón de agua

Uso de *Pontederia crassipes* Mart. en pozas para absorber metales del agua como Hg (mercurio), Pb (plomo), Cd (cadmio), Cu (cobre) y Zn (zinc).

Aplicación

Pozas de sedimentación, canales lentos, lagunas.

Cuándo aplicar

Operación. Plantas gratuitas. Requiere cosecha cada 2-3 meses.

Viab. ☉ ALTA



Tecnosoles con compost local

Suelo artificial mezclando compost propio, material calcáreo y suelo local.

Aplicación

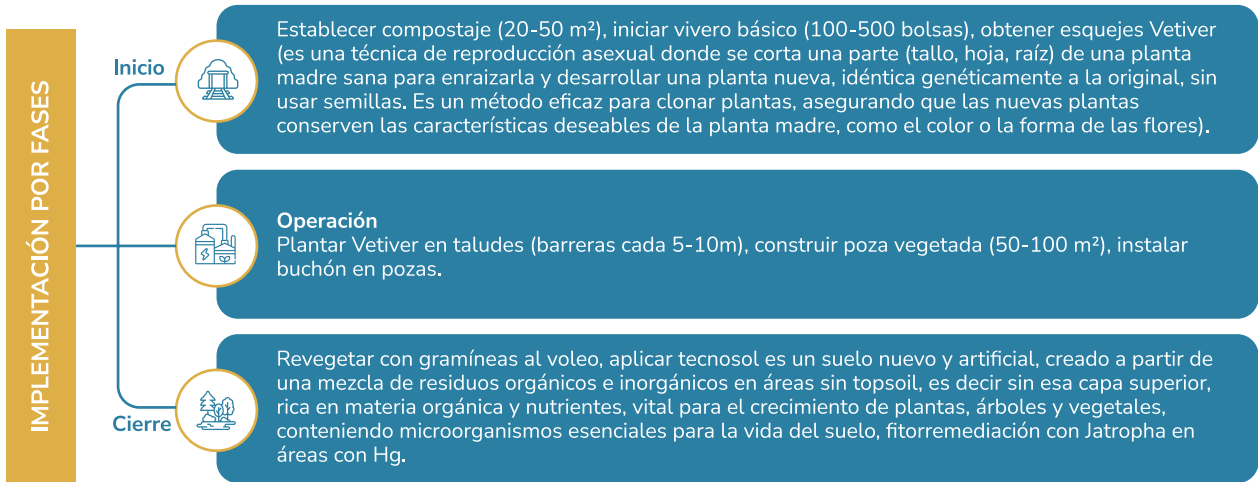
Áreas sin topsoil, botaderos, escombreras.

Cuándo aplicar

Cierre progresivo. Cuando no hay topsoil preservado disponible.

Viab. ☉ ALTA

Fuente: Elaboración propia con base en Marrugo Negrete et al. (2024), MME & ATG (2021).



3.1.2. Lineamiento 2. Anticipar impactos ambientales residuales a futuro

La anticipación de futuros pasivos requiere una visión integrada que contemple el ciclo de vida completo de los materiales y residuos mineros, reconociendo que el costo de la prevención es siempre inferior al costo de la remediación (Rötting et al., 2008; MADS & DNP, 2019). Las decisiones tomadas durante la exploración y explotación determinarán la magnitud de los impactos potenciales que heredará la operación al momento del cierre.

3.1.2.1. Oportunidad de Economía Circular 1: Prevención de los impactos ambientales residuales a futuro

Durante la exploración, es obligatorio identificar el comportamiento ácido o neutro de los materiales, dado que la determinación temprana del potencial de generación de drenaje ácido es clave para prevenir impactos ambientales (MME & ATG, 2021).

a) Pruebas geoquímicas requeridas

La prevención de pasivos ambientales materializa el principio de “Eliminar residuos y contaminación” de la economía circular. La caracterización temprana es el primer paso del diseño circular: conocer los materiales permite planificar su valorización o su manejo preventivo, evitando que se conviertan en impactos ambientales residuales a futuro.

Tabla 3.6. Pruebas geoquímicas para caracterización de materiales

Tipo de prueba	Metodología	Resultado esperado	Cuándo aplicar
Pruebas ABA (Acid-Base Accounting)	Pruebas ABA: Análisis de laboratorio obligatorio que mide: (1) azufre que genera acidez, (2) carbonatos que neutralizan, y (3) resultado neto (PNN y ratio PN/PA) para clasificar el material como seguro (NAF) o peligroso (PAF). Estándares: ASTM D5744, MEND 1.20.1.	Clasificación como NGA (No Generador de Ácido) o PGA (Potencialmente Generador de Ácido). Ratio NP/AP objetivo >3:1	Fase de exploración avanzada. Obligatorio antes de iniciar cualquier movimiento de tierras. Muestreo representativo de todos los litotipos.
Pruebas cinéticas	Pruebas cinéticas: Análisis de 5-18 meses que confirma si el material genera acidez en el tiempo. Se monitorea pH, metales y sulfatos semanalmente hasta estabilización. Solo necesario cuando pruebas ABA dan resultados dudosos. Norma: ASTM D5744.	Evolución temporal de pH, sulfatos y metales disueltos. Verificación del comportamiento real del material.	Después de pruebas ABA, cuando se identifiquen materiales PGA o con ratio NP/AP <3:1. Duración mínima 20 semanas. Iniciar en fase de exploración para tener resultados antes de operación.
Análisis mineralógico y granulométrico	DRX (Difracción de Rayos X), microscopía óptica, microscopía electrónica para identificar fases minerales.	Identificación de sulfuros (pirita, arsenopirita), carbonatos neutralizantes y minerales valorizables como subproductos. Comportamiento del material, drenaje y compactación.	Fase de exploración, simultáneo con caracterización del yacimiento. Esencial antes de definir método de procesamiento y para identificar oportunidades de valorización de subproductos.
Lixiviación de metales	TCLP, SPLP u otros protocolos estandarizados para evaluar movilidad de metales pesados.	Determinación de riesgo de lixiviación de As (arsénico), Pb (plomo), Cd (cadmio), Hg (mercurio) y otros elementos tóxicos.	Antes de la disposición final de relaves y estériles. Obligatorio para definir el manejo y clasificación de residuos. Repetir si cambian las características del mineral procesado.

Fuente: Elaboración propia con base en ANLA (2016), Price (2009), Sobek et al. (1978).

La prevención del DAM mediante encapsulación de estériles sulfurados o co-disposición con materiales alcalinos es la estrategia más eficaz, con menor costo y mayor sostenibilidad ambiental. La tendencia de P+L se centra en tratamientos pasivos de bajo costo.

b) Prevención del drenaje ácido de mina (DAM)

El Drenaje Ácido de Mina es uno de los pasivos ambientales más críticos y costosos en la minería aurífera. Cuando materiales sulfurosos (especialmente pirita) se exponen al oxígeno y al agua, se desencadenan reacciones que pueden acidificar aguas superficiales y lixiviar metales pesados durante décadas (Singer & Stumm, 1970; Sobek et al., 1978). Sus impactos son considerados en muchos casos prácticamente irreversibles sin medidas tempranas de control.

La estequiometría química detrás de este proceso se sintetiza a continuación, mostrando que la oxidación neta libera 4 mol H^+ por mol de pirita oxidada.

ESTEQUIOMETRÍA DE OXIDACIÓN DE PIRITA

Procesos químicos que generan drenaje ácido de mina

1	$FeS_2 + 7/2 O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2 SO_4^{2-} + 2 H^+$	Oxidación primaria por O_2 La pirita se oxida en presencia de oxígeno y agua, liberando acidez.
2	$Fe^{2+} + 1/4 O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + 1/2 H_2O$	Oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} Paso limitante en la generación de acidez.
3	$FeS_2 + 14 Fe^{3+} + 8 H_2O \rightarrow 15 Fe^{2+} + 2 SO_4^{2-} + 16 H^+$	Ataque autocatalítico El Fe^{3+} oxida la pirita, regenerando Fe^{2+} y produciendo más acidez.
4	$Fe^{3+} + 3 H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3 H^+$	Hidrólisis del hierro El Fe^{3+} se hidroliza formando precipitados de hidróxidos y liberando acidez.

Balance neto: 4 mol H^+ por mol FeS_2 . Factor 31,25 del AP.

Singer & Stumm, 1970; Sobek et al., 1978

El DAR no es estático: evoluciona en tres etapas químico-microbiológicas con condiciones de pH y dominio bacteriano característicos. La efectividad de las estrategias preventivas (Tabla 3.7) depende de la etapa en que se intervenga.

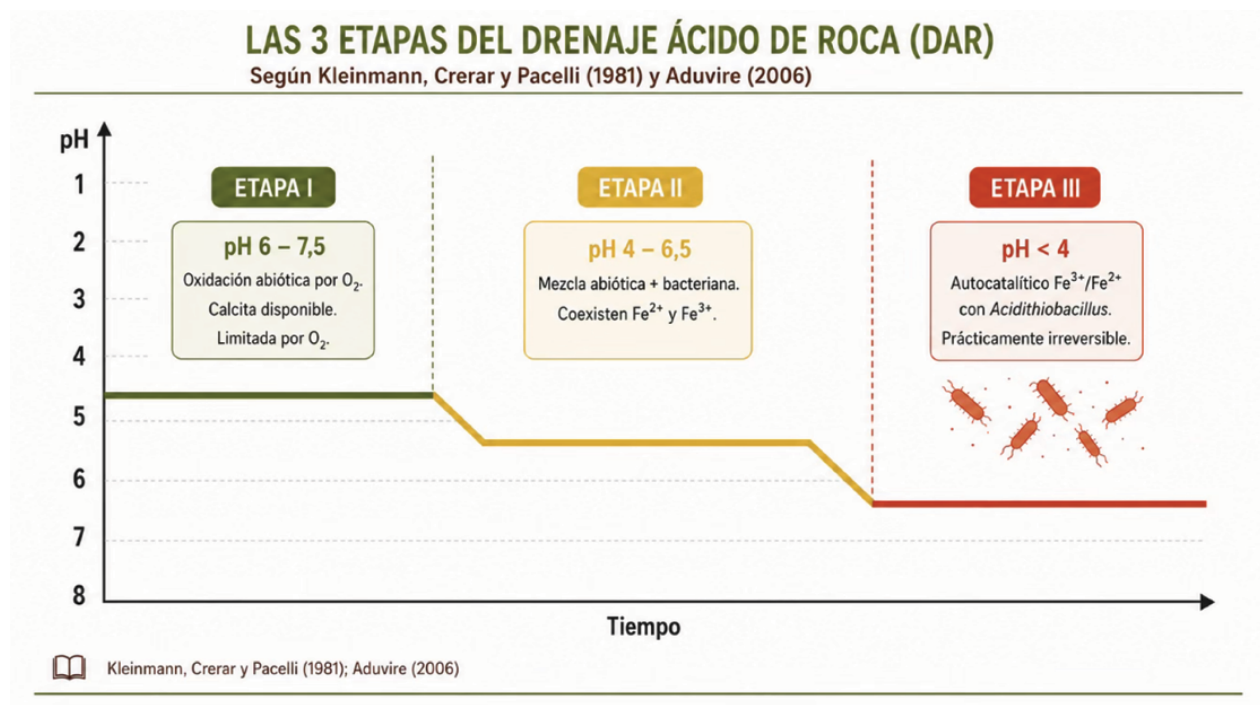
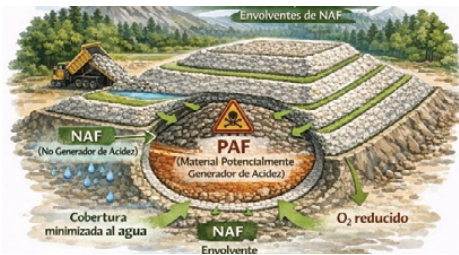


Tabla 3.7. Estrategias de prevención del Drenaje Ácido de Mina (DAM)

Estrategia	Descripción Técnica	Aplicación en Pequeña Minería	Viab.
Segregación controlada de estériles  ✓ Botaderos diferenciados para material NAF y PAG ● Evita volcado indiscriminado en un solo talud ● Requiere caracterización ABA previa del material	Botaderos diferenciados para material NAF (No Generador de Acidez) y PAG (Potencialmente Generador de Acidez). Requiere caracterización ABA previa del material. Cómo clasificar los materiales según laboratorio: NAF (Seguro): $NNP > +20$ Y $PN/PA > 3$ → Disposición normal PAG (Peligroso): $NNP < -20$ O $PN/PA < 1$ → Requiere encapsulación Incierto: Valores intermedios → Necesita más análisis Nota: Materiales con azufre	• Definir 2-3 celdas claramente separadas • Señalización básica visible • Registro volumétrico en bitácoras • Capacitación a operadores	☑ ALTA
Disposición encapsulada del PAG (Potencialmente Generador de Acidez) 	PAG ubicado en núcleo interno del botadero, rodeado por NAF. Minimiza exposición al O_2 y agua. Encapsulación PAG: Material peligroso enterrado en núcleo rodeado por material seguro (NAF) compactado de 1.5-3 m de espesor. Incluye drenajes perimetrales y cobertura final de 4 capas (135 cm total). Evita contacto con oxígeno y agua para prevenir generación de acidez.	• Evitar exposición de PAG en taludes y coronas • Construcción por bancos con NAF (No Generador de Acidez) envolvente • Cobertura progresiva durante operación • Compactación de capas NAF (No Generador de Acidez)	☑ ALTA
Co-disposición con materiales alcalinos 	Co-disposición: Mezclar material PAG con caliza triturada (< 2 mm, $> 90\%$ $CaCO_3$). Proporción: 4 partes de caliza por 1 parte de acidez ($PN/PA = 4:1$). Mezcla homogénea preferible; si son capas, PAG máximo 10-15 cm compactadas intercaladas con caliza 30-50cm.	• Usar calizas locales o dolomita disponible • Relaves neutralizados como alternativa • Cal agrícola si no hay caliza • Verificar disponibilidad regional	Ⓞ MEDIA
Manejo diferenciado de relaves sulfurosos 	La pirita en relaves está en partículas muy finas (< 50 micras) que no se ven a simple vista, otros sulfuros (arsenopirita, pirrotita, calcopirita) también generan acidez pero NO son dorados, los relaves molidos son una pulpa donde es imposible identificar minerales individuales.	Caracterización de relaves: • Obligatorio análisis de laboratorio (Nunca visual). • Muestreo + análisis de azufre + pruebas ABA. • Si azufre sulfuro $> 0.3\%$ → relaves PAG requieren neutralización con cal o encapsulación. ASTM E1915.	⊗ BAJA
Coberturas de baja permeabilidad 	Suelos finos (arcillas, limos) compactados. Reduce infiltración de agua y difusión de oxígeno. Diseño 'store-and-release' para climas húmedos.	• Cobertura mínima ≥ 0.5 m de suelo fino • Pendiente 2-5% para escorrentía • Revegetación con especies nativas • Compactación manual o con maquinaria liviana.	☑ ALTA

Viabilidad: ☑ ALTA (implementable con recursos) | Ⓞ MEDIA (viable con apoyo) | ⊗ BAJA (requiere industria)

Fuente: Elaboración propia con base en Aduvire (2006, 2019), INAP GARDGuide (2009), MEND (2004), Skousen et al. (2017).

c) Tratamientos del Drenaje Ácido de Mina

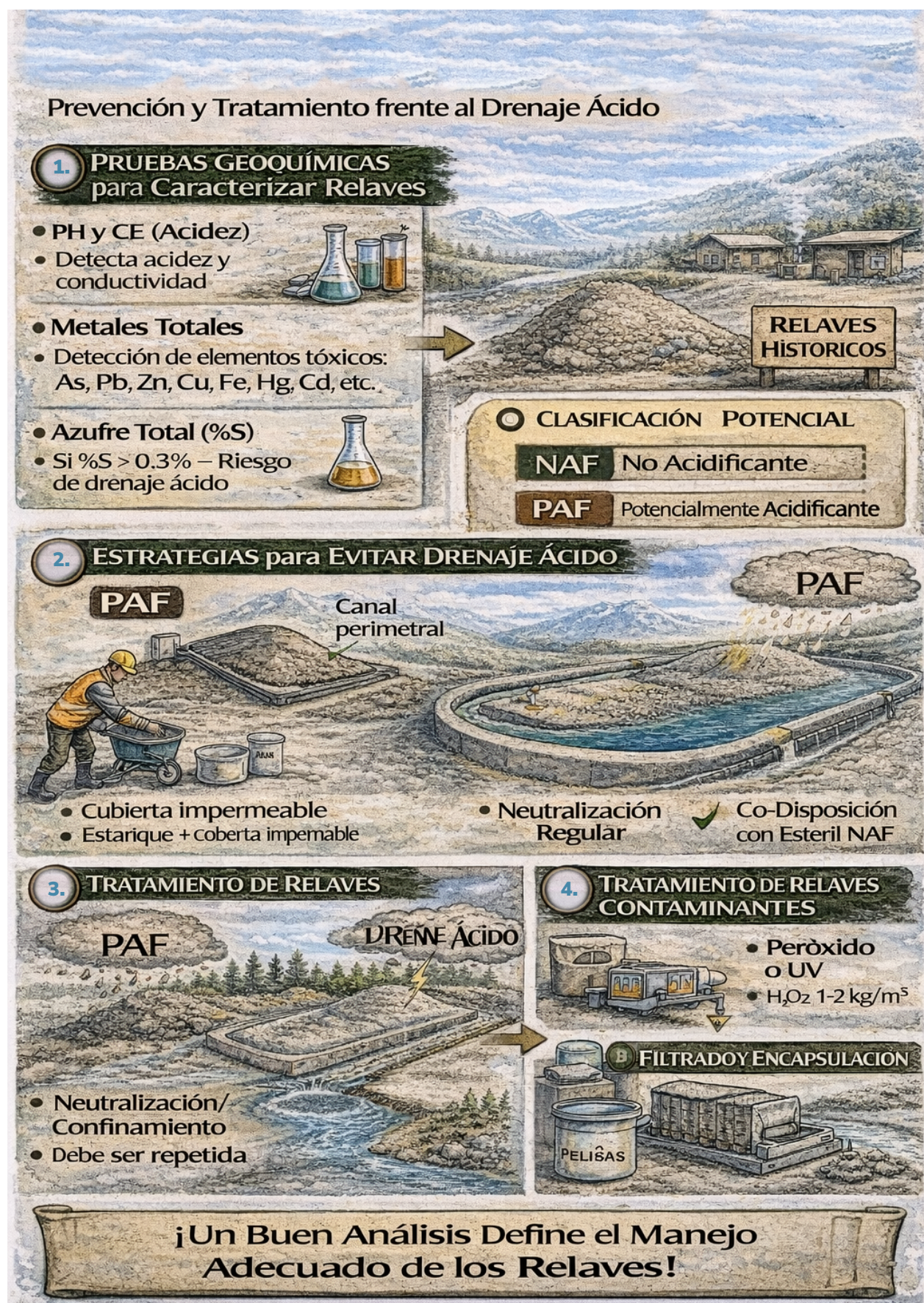
Una vez generado el DAM, se requieren técnicas de tratamiento. La Economía Circular promueve tratamientos pasivos de bajo costo y mantenimiento que cierren el ciclo de los contaminantes de forma más natural y regenerativa.

Tabla 3.8. Tratamientos para el Drenaje Ácido de Mina (DAM)

Tratamiento	Mecanismo / Descripción	Aplicación en PM	Limitaciones / Consideraciones	Viab.	Costo
OLC (Open Limestone Channel) Canal Óxido Calizo	•Canal abierto relleno de caliza (>90% CaCO₃). •El agua ácida fluye lentamente sobre y entre las piedras calizas expuesta al aire, precipitando lodos rojizos por la oxidación del hierro (óxidos e hidróxidos de hierro) •La disolución de carbonatos eleva el pH. •Pendiente recomendada: >20% para auto-limpieza. •OLD: es un drenaje cerrado o cubierto con caliza, donde el agua fluye sin contacto con el oxígeno	•Construcción muy simple (zanja + caliza). •Ideal para pequeños caudales (<5 L/s) con pendiente suave •La caliza puede obtenerse localmente. •No requiere cobertura ni sellado. •Mantiene efectividad con armado parcial (50-90%). Ideal como tratamiento inicial del Drenaje ácido de mina o de relaves y puede complementarse con humedales construídos u otros sistemas pasivos para mejorar la calidad final del agua.	•No apto para Fe³⁺ (forma oxidada del hierro) o Al (aluminio) elevados. •La acumulación de lodos puede cubrir la caliza y reducir su eficiencia. •Requiere limpieza o reemplazo periódico del material calizo. •No es recomendable para aguas con alta carga de sólidos o flujos turbulentos o pH extremadamente bajo.	✓ ALTA	BAJO
Drenaje Anóxico Calizo (ALD)	•Sistema enterrado y cubierto con suelo o material impermeable. •Relleno de piedra caliza limpia (1-2 m profundidad). •Flujo de agua continuo y controlado en condiciones anóxicas (sin O₂). •La caliza disuelve sin armarse con Fe (hierro). •Genera alcalinidad hasta 300 mg/L CaCO₃. •Tiempo de retención: 15-24 horas óptimo.	•El agua ácida entra al drenaje a través de una tubería o canal cerrado, (zanja excavada) + caliza + cobertura arcilla. •Al no haber oxígeno, la caliza se disuelve sin que se formen lodos que tapen el sistema. •La caliza libera calcio, lo que neutraliza la acidez y eleva el pH. •El agua sale con menor acidez y mejor calidad para tratamientos posteriores. •Construcción sencilla con materiales locales. •Funciona por gravedad (sin bombeo). •Vida útil: 10-20 años si bien diseñado. •Ideal para aguas de socavón. Se puede ubicar dentro de galerías.	•Requiere: Hedlin et al. 1994; O₂ <1 mg/L (idealmente <0.5), Fe³⁺ <1 mg/L, Hedlin et al. 1994; Al <1 mg/L cementa la caliza en meses. •No apto para aguas con Fe³⁺ (forma oxidada del hierro) o Al (aluminio) elevados. •El Al (Aluminio) precipita y obstruye el sistema. •Necesita cobertura impermeable. •Preferir aguas de interior de mina porque requiere que es agua no tenga mucho oxígeno ni sólidos •Normalmente se complementa con humedales u otros sistemas	✓ ALTA	BAJO
Humedal Aerobio Construído	•Consiste en canales poco profundos con piedras, arena y plantas locales acuáticas como Typha (totorá), Juncus y algas, por donde el agua de la mina circula lentamente antes de ser descargada. •Las plantas oxigenan el agua vía raíces precipitando hierro y metales •Bacterias aceleran la oxidación.	•Usar especies nativas locales. •Excavación simple + arcilla de base. •No usa electricidad ni químicos. •Se puede construir con materiales locales (piedra, grava, tierra, plantas nativas). •Fácil de operar, sin necesidad de personal especializado, con mano de obra local •Canal de ingreso con control de caudal •Caldas en serie (2-4) para mayor eficiencia •Profundidad baja (20-40 cm) •Pendiente suave (<1%) •Zona de sedimentación inicial •Vertimiento final con agua parcialmente o totalmente neutralizada •Combinarlo con otras medidas simples (canales de desvío de aguas limpias). •Requiere solo mantenimiento básico (limpieza de sedimentos cada cierto tiempo).	•Requiere gran superficie de terreno. •Remoción Mn (Manganeso) es 20-40x más lenta que Fe. •NO efectivos si pH < 4.5 (plantas mueren). Obligatorio pre-tratamiento con OLC/ALD primero. Diseño: profundidad 20-40 cm, permanencia 5-20 días, forma alargada (L:A > 4:1). Fe se remueve pH > 5.5. Mn requiere pH > 7.5 (muy lento). Usar 3 humedales en serie para múltiples metales. •Dependiente de condiciones climáticas. •Usar el sistema para caudales pequeños y constantes. •Construirlo en terreno con pendiente suave. •Proteger el humedal de sobrecargas de lodo o relaves sólidos. •Necesita mantenimiento periódico (retiro de lodos metálicos)	● MEDIA ALTA	BAJO
Humedal Anaerobio / Balsa Orgánica	•Substrato orgánico (compost, estiércol, turba). •Sobre capa de caliza triturada. •Bacterias sulfato-reductoras (Desulfovibrio). •Generan H₂S que precipita metales como sulfuros. •Produce alcalinidad vía bicarbonatos.	•Usar materiales orgánicos locales. •Estiércol, residuos agrícolas, aserrín. •Lámina agua >30 cm (mantener anoxia). •Regenera alcalinidad continuamente. •Apto para metales pesados (Cu, Zn, Pb).	•Requiere reponer materia orgánica. •Más complejo que humedal aerobio. •Bacterias se inhiben a pH<5. •Necesita diseño cuidadoso del flujo. •Mejor rendimiento en clima templado.	● MEDIA	BAJO / MEDIO
SAPS (Sistema de Producción Sucesiva de Alcalinidad)	•El sistema es vertical: agua, capa orgánica, caliza y drenaje inferior, permitiendo que el agua se vaya neutralizando paso a paso, sin uso de químicos ni energía (Kempier &amp; McCleary 1994). •Diseñado para aumentar gradualmente el pH y reducir los metales presentes •Flujo vertical descendente (1-3 m). •Capa orgánica sobre caliza. •El agua atraviesa ambas capas. •Genera alta alcalinidad (>300 mg/L).	•Trata DAM con Fe³⁺ y Al. •Sistema más robusto que ALD solo. •Menor área que humedales simples. •Se puede instalar en serie. •Permite purga de lodos acumulados.	•Construcción más compleja. •Requiere sistema de drenaje inferior. •Necesita válvula de purga periódica. •Vida útil: 5-10 años típicamente. •Costo construcción: Considerablemente alto para pequeña minería.	⊗ BAJA	ALTO

Viabilidad: ✓ **ALTA** (implementable con recursos) ● **MEDIA** (viable con apoyo) ⊗ **BAJA** (requiere industria) Fuente: Elaboración propia con base en Aduvire (2006, 2019), INAP GARDGuide (2009), Skousen et al. (2017), López Pamo et al. (2002).

Figura 3.10. Ilustración de cómo podría llevarse a cabo la prevención y tratamiento frente al Drenaje Ácido de Mina



3.2. APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS: ETAPA DE CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

3.2.1. Lineamiento 3. Estrategias para el uso de materiales removidos en la implementación de obras

3.2.1.1. Oportunidad de Economía Circular 1: Aprovechamiento de materiales generados en el proceso de infraestructura

Durante la etapa de construcción y montaje, la infraestructura del proyecto se desarrolla con base en el instrumento o documento técnico minero y ambiental aplicable.

La planificación del sitio de extracción, separación en la fuente y el almacenamiento en los centros de acopio debe contemplar el método de disposición y procesos simples de clasificación o tamizado, la secuencia de llenado y los volúmenes de material a depositar, permiten integrar prácticas de economía circular durante la fase de construcción y montaje, como lo es el diseño de los sitios para obras donde se incorpore el manejo adecuado de la capa vegetal y la organización del material de excavación, evitando afectaciones sobre recursos minerales y reduciendo movimientos innecesarios de tierra.

Figura 3.11. Diagrama de determinación de flujos de entradas, procesos y salidas de las diferentes operaciones en la etapa de construcción y montaje con oportunidades de economía circular

Descapote y excavación y movimiento de tierra



Entradas

- Maquinaria pesada (retroexcavadora, bulldozer, volquetas).
- Combustible (diésel).
- Agua para control de polvo.
- Elementos para drenajes provisionales.
- Señalización
- Recurso humano: elementos de protección, alimentos y bebidas

Salidas

- Suelo removido (estéril suelto).
- Material orgánico superficial.
- Polvo en suspensión.
- Emisiones atmosféricas.
- Agua con sedimentos.
- Residuos de mantenimiento (aceites, trapos, filtros).

Aprovechamiento

- Reutilización de suelo orgánico para revegetación temprana y recuperación de zonas expuestas según Plan de Manejo Ambiental
- Recirculación de agua para control de polvo.
- Sedimentadores modulares reutilizables.
- Rutas optimizadas para ahorro de combustible.
- Reaprovechamiento de estéril como material de relleno técnico o conformación de plataformas, canales, bajantes, manejo de drenaje, obra civil.

Voladura (cuando aplica en apertura de accesos)



Entradas

- Explosivos (ANFO "Ammonium Nitrate Fuel Oil", emulsiones, dinamita).
- Detonadores, cordón detonante.
- Taladros/perforadoras.
- Agua para perforación.
- Recurso humano: elementos de protección, alimentos y bebidas

Salidas

- Roca fragmentada.
- Gases de voladura (NOx, CO, CO₂).
- Polvo.
- Vibraciones y onda aérea.
- Agua con sólidos.

Aprovechamiento

- Optimización de diseño de malla para reducir consumo de explosivo.
- Aprovechamiento de roca fragmentada como material de sub-base o vías.
- Sistemas de captación y reutilización del polvo de perforación.
- Reúso del agua de perforación tras sedimentación.

La estrategia de valorización debe contemplar procesos mínimos de caracterización que permitan definir el uso adecuado para cada tipo de material sobrante como: La identificación de las características propias de cada residuo o material removido (caracterización fisicoquímica), con el fin de determinar estabilidad y compatibilidad de uso. Análisis de granulometría por tamizado, que permite establecer la distribución del tamaño de partícula y su aptitud para aplicaciones específicas como drenajes, rellenos, obras civiles o recuperación de zonas expuestas.

Cargue de mineral y estériles



Entradas

- Cargadores frontales.
- Volquetas.
- Combustible.
- Mano de obra.
- Señalización.
- Recurso humano: elementos de protección, alimentos y bebidas

Salidas

- Material transportado hacia depósitos.
- Polvo en cargue y descargue.
- Emisiones atmosféricas.
- Posibles derrames o pérdidas de material.

Aprovechamiento

- Optimización de rutas internas para reducir consumo de combustible.
- Control de polvo con agua recirculada.
- Reaprovechamiento de estériles para conformación de plataformas, vías y rellenos estructurales.
- Priorización de maquinaria eficiente para reducir emisiones.

Disposición temporal o final de estériles



Entradas

- Estériles provenientes de excavación.
- Equipos de transporte.
- Equipos de compactación.
- Geotextiles y materiales para drenaje.
- Recurso humano: elementos de protección, alimentos y bebidas

Salidas

- Taludes conformados.
- Polvo.
- Escorrentía con sedimentos.
- Riesgos de inestabilidad si no se controla.
- Ocupación de áreas.

Aprovechamiento

- Clasificación granulométrica de estériles para usos diferenciados (relleno, subbases).
- Depósitos diseñados para permitir futura recuperación de materiales útiles.
- Revegetación temprana usando suelo orgánico recuperado.

Construcción de instalaciones mineras y auxiliares



Entradas

- Materiales de construcción (acero, madera, concreto, tuberías).
- Agua para mezclas.
- Energía eléctrica.
- Equipos de construcción.
- Insumos eléctricos y sanitarios.
- Pinturas y recubrimientos.
- Recurso humano: elementos de protección, alimentos y bebidas

Salidas

- Escombros y sobrantes de construcción.
- Empaques (plásticos, cartón, metal).
- Aguas residuales de obra.
- Residuos peligrosos (solventes, pinturas, adhesivos).
- Emisiones y ruido.

Aprovechamiento

- Uso de materiales modulares, prefabricados y reutilizables.
- Aprovechamiento de escombros para afirmado de vías.
- Separación en fuente y reciclaje de chatarra metálica y madera.
- Implementación de sistemas temporales de recolección y uso de aguas lluvias.
- Elección de materiales con contenido reciclado o baja huella.

3.3. APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS: ETAPA DE EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO

3.3.1. Lineamiento 4. Optimización del proceso de explotación y beneficio con eficiencia tecnológica

La optimización del proceso de explotación en minería de oro filón comienza con la ejecución disciplinada del planeamiento minero definido en el instrumento o documento técnico minero, cuya función es orientar el avance de labores, controlar la selectividad en la extracción y evitar aperturas innecesarias que incrementen

la generación de estériles. La correcta aplicación de este diseño permite mantener el desarrollo dentro de los límites mineralizados previamente identificados y reducir la remoción de material sin valor económico.

Por otro lado, la **optimización del proceso de beneficio con eficiencia tecnológica**, es determinante para aumentar la recuperación de oro, reducir las pérdidas hacia los relaves y minimizar el consumo de agua, energía y reactivos. La liberación adecuada del mineral mediante una molienda controlada, la correcta clasificación del tamaño de partícula y la operación de circuitos cerrados de conminución son prácticas esenciales para mejorar el rendimiento metalúrgico y evitar que material valioso se desperdicie en las colas.

En este contexto, selección de la tecnología adecuada depende intrínsecamente de las características geológicas y metalúrgicas específicas del oro en cada depósito de filón¹ por ejemplo, la eficiencia en la recuperación de oro fino mediante mesas vibratorias depende principalmente de la granulometría de la alimentación y de la pericia del operador, siendo un método de bajo costo, pero con una menor selectividad que los concentradores centrífugos para partículas sub-50 μm^2 . Integrar estas tecnologías en un circuito cerrado de concentración gravimétrica minimiza la pérdida de oro y el incentivo para recurrir a la amalgamación.

Las tecnologías gravimétricas modernas, concentradores centrífugos, espirales y mesas, ofrecen ventajas significativas frente a métodos tradicionales. Los equipos centrífugos, por ejemplo, utilizan fuerzas mayores a la gravedad estándar para acelerar la sedimentación del oro fino, logrando recuperaciones superiores en un tiempo reducido³. En palabras prácticas, al girar, el equipo centrífugo empuja el mineral hacia afuera con una fuerza mucho más fuerte que la gravedad normal, lo que hace que el oro fino se asiente y se separe más rápido del material estéril. Gracias a esto se logran mejores recuperaciones en menos tiempo. Esto no solo cumple con el objetivo ambiental de la eliminación del mercurio, sino que también mejora la productividad y el desempeño económico del minero artesanal, integrando el concepto de P+L al aumentar la eficiencia extractiva y reducir las pérdidas de material valioso hacia los relaves⁴.

El éxito de la concentración gravimétrica en la minería de pequeña escala radica de varios factores como la adquisición de la maquinaria, su correcta operación y mantenimiento, así como en la adecuada preparación de la pulpa mineral, la molienda óptima y la clasificación de tamaño⁵. Los procesos finales abordados desde la EC, se pueden analizar además a partir del material estéril o relave de estas etapas de concentración gravimétricas, que ya no contienen mercurio, se pueden convertir en un flujo de material más limpio y potencialmente valorizable, ya sea para reprocesamiento (Retailing) o como agregado para materiales de construcción⁶. Esto establece un ciclo virtuoso donde la eficiencia en la extracción no metálica sienta las bases para la circularidad.

En este sentido, la eficiencia tecnológica, entendida como mayor recuperación y menor generación de residuos, sienta las bases para integrar de manera efectiva las prácticas de economía circular en el procesamiento del mineral de oro filón.

La tabla 3.9, consolida estas opciones tecnológicas y ofrece una guía para apoyar la toma de decisiones en la explotación y beneficio del oro filón.

.....

1 Agencia Nacional de Minería. (2022). Guía de buenas prácticas para la exploración y estimación de recursos y reservas de depósitos de placer. Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR).

2 Polo Rodríguez, S. R., & Quiroz López, Y. (2023). Economía Circular para reducir el impacto ambiental y promover la sostenibilidad en la minera Coriwayra S.A.C-Pataz 2023. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Trujillo.

3 Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2017c). Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio del oro sin el uso del mercurio. ANDES (ANTIOQUIA). SGC - Minenergía. (Referencia: [guia-metodologica-para-el-mejoramiento-productivo-del-beneficio-del-oro-sin-el-uso-del-mercurio-andes-antioqui.pdf](#)).

4 Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2017a). Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso de mercurio. SUÁREZ, BUENOS AIRES Y EL TAMBO (CAUCA). SGC - Minenergía. (Referencia: [guia-mejoramiento-productivo-beneficio-oro-sin-mercurio-suarez-buenosaires-tam_tQzlsA5.pdf](#)).

5 Ministerio de Minas y Energía & Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda. (2022). Propuesta de Lineamientos Técnicos de Política de Buenas Prácticas para Estandarizar los procesos de Economía Circular en la actividad minera (Contrato de Consultoría GGC-606-2021).

6 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular: Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio.

La minería subterránea de oro en vetas (filón) enfrenta el reto de mover grandes volúmenes de roca estéril para extraer una cantidad pequeña de mineral, por eso se define una alta selectividad. La economía circular en esta fase no solo busca aprovechar los subproductos, sino evitar la generación de residuos desde el diseño mismo de la mina mediante la selección tecnológica del método de explotación y la optimización del beneficio.

La selección del método de explotación define cuánta roca estéril saldrá a la superficie. Desde la economía circular, el mejor residuo es el que no se genera o el que se queda dentro de la mina para cumplir una función estructural. A continuación, se analizan los métodos aplicables según la geometría del yacimiento, integrando sus ventajas, limitaciones y el cumplimiento del Decreto 1886 de 2015:

1

Método de Corte y Relleno (Cut and Fill)

Este método consiste en extraer el mineral por franjas horizontales y, a medida que se avanza hacia arriba, el vacío dejado se rellena con material estéril.

- **Criterios de selección:** Las vetas deben tener un buzamiento fuerte (inclinadas, $>45^\circ$), las cajas o roca circundante debe ser de calidad competente a moderada, y los espesores de las vetas pueden ser variables.
- **Vínculo con Economía Circular (Residuo Cero):** Es el método circular por excelencia. Permite el relleno de cámaras (backfilling) utilizando el estéril de los mismos desarrollos (túneles) o relaves/colas deshidratadas de la planta de beneficio. Esto evita sacar el estéril a la superficie, reduciendo drásticamente el tamaño de las escombreras o relaveras exteriores.
- **Seguridad Minera (Decreto 1886/2015):** Cumple con las exigencias de sostenimiento. Al rellenar el vacío, se reduce la presión de la roca y el riesgo de colapsos masivos. Exige un monitoreo estricto de la calidad y compactación del relleno para evitar el desprendimiento del techo de la cámara de trabajo.

2

Método de Cámaras y Pilares (Room and Pillar)

Se desplaza la explotación dejando bloques de roca o mineral intactos llamados pilares, que sirven de columna para sostener el techo de forma natural.

- **Criterios de selección:** Ideal para yacimientos horizontales o de bajo buzamiento ($<30^\circ$), vetas de gran espesor o mantos gruesos, y tanto el mineral como la roca caja deben ser mecánicamente competentes (muy firmes).
- **Vínculo con Economía Circular:** Su eficiencia de extracción puede ser menor porque parte del mineral queda en los pilares. Sin embargo, en fases avanzadas, los pilares de mineral pueden ser reemplazados por pilares artificiales de concreto fabricado con estériles o relaves cementados, permitiendo recuperar el oro atrapado originalmente sin perder estabilidad.
- **Seguridad Minera (Decreto 1886/2015):** El diseño de las dimensiones de las cámaras y los pilares debe estar sustentado por estudios geomecánicos rigurosos. La norma prohíbe el adelgazamiento empírico o no autorizado de los pilares por el riesgo de colapso en cadena (domino effect).

3

Método de Realce por Subniveles (Sublevel Stopping)

El mineral se arranca en grandes bloques verticales desde subniveles de perforación, dejando cámaras vacías de gran tamaño que luego se pueden rellenar.

- **Criterios de selección:** Recomendado para vetas verticales u horizontales muy inclinadas ($>50^\circ$), de gran espesor, y tanto el mineral como la roca caja deben ser altamente competentes.
- **Vínculo con Economía Circular y eficiencia tecnológica:** Permite una alta mecanización con la perforación de tiros largos y un bajo porcentaje de dilución ya que se minimiza la mezcla de mineral con estéril. El gran vacío remanente funciona como un sumidero ideal a largo plazo para albergar lodos compactados de beneficio o estériles de la región minera.
- **Seguridad Minera (Decreto 1886/2015):** Al ser un método donde el personal no ingresa directamente a la cámara vacía ya que se opera de forma remota o desde los subniveles de

acceso seguros, mitiga drásticamente el riesgo de accidentes por caída de rocas sobre el operario. Exige el control estricto de la ventilación en los subniveles debido a los gases de las voladuras masivas.

Para la etapa de beneficio y procesamiento del material en la minería de oro filón, la eficiencia tecnológica busca separar el oro utilizando la menor cantidad de energía y agua, eliminando o reduciendo los reactivos tóxicos mediante la economía de procesos. A continuación, se analizan algunos procesos recomendados para el beneficio del mineral, integrando sus ventajas, limitaciones y el cumplimiento del Decreto 1886 de 2015:

1

Molienda Eficiente y Concentración Gravimétrica Previa

- **Eficiencia Tecnológica:** Implementación de concentradores centrífugos automáticos tipo Falcon o Knelson, inmediatamente después de la molienda. Estos equipos recuperan el oro libre grueso por gravedad, sin usar químicos.
- **Enfoque Circular:** Al recuperar hasta el 60-70% del oro en un circuito gravimétrico antes de la lixiviación, se reduce el volumen de mineral que requiere tratamiento químico posterior. Esto disminuye proporcionalmente el inventario de cianuro necesario y genera colas gravimétricas limpias que pueden usarse directamente como material de construcción o relleno minero.

2

Reprocesamiento de Relaves y Minería de Relaves (Tailings Re-mining)

- **Enfoque Circular:** Los relaves antiguos o colas de procesos ineficientes del pasado suelen contener altas concentraciones de oro debido a moliendas deficientes. La incorporación de tecnologías de flotación espumosa o lixiviación intensiva en reactores cerrados permite retratar estos residuos, transformándolos en una nueva reserva económica y liberando espacio físico en las zonas de disposición.
- **Seguridad y Salud (Decreto 1886/2015 y Normas Químicas):** La manipulación de relaves cianurados o con trazas históricas de mercurio exige sistemas cerrados de neutralización (destrucción de cianuro por procesos como INCO o degradación con peróxido). El reglamento exige el monitoreo diario de gases como el Ácido Cianhídrico (HCN) en las plantas de beneficio y el control estricto de los límites de exposición de los trabajadores.

3

Deshidratación de Relaves (Relaves Filtrados) para Relleno Pasta

- **Eficiencia Tecnológica:** Sustituir las presas de lodos líquidos por sistemas de filtros prensa o filtros de banda que recuperan el agua del proceso de beneficio instantáneamente, recirculando el 90% del agua a la planta.
- **Enfoque Circular:** El relave seco o pastoso se mezcla con una pequeña dosis de cemento y se inyecta de regreso a la mina formando un relleno en pasta.
- **Seguridad (Decreto 1886/2015):** Elimina el riesgo catastrófico de ruptura de presas de relaves en superficie y proporciona un soporte estructural subterráneo superior, reduciendo la necesidad de fortificación de madera o pernos en zonas adyacentes a las cámaras rellenas.

Tabla 3.9. Matriz de selección tecnológica y circular: oro de filón

Método / Tecnología	Geometría Óptima	Ventaja Circular Principal	Riesgo Crítico de Seguridad (Decreto 1886/2015)
Corte y Relleno	Veta angosta e inclinada (>45°).	Permite internalizar el 100% del estéril de desarrollo como relleno estructural.	Desprendimiento de techos durante la perforación. Requiere ventilación auxiliar en topes ciegos.
Realce por Subniveles	Vetas potentes y verticales.	Alta productividad, baja dilución y generación de macro-vacíos para almacenar colas secas.	Estabilidad de las galerías de perforación. Exige control estricto de vibraciones por voladuras.

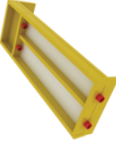
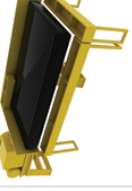
Método / Tecnología	Geometría Óptima	Ventaja Circular Principal	Riesgo Crítico de Seguridad (Decreto 1886/2015)
Concentración Gravimétrica	Aplicable a cualquier geometría (en planta).	Produce arenas residuales limpias listas para subproductos de construcción.	Fatiga y riesgos mecánicos en partes móviles. Exige guardas mecánicas y sistemas de bloqueo eléctrico.
Filtrado de Relaves	Independiente del método minero.	Recirculación total del agua del proceso minero.	Exposición a polvos químicos en la torta de filtrado seca si no hay humedad controlada.

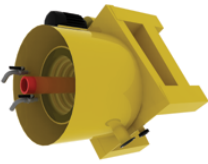
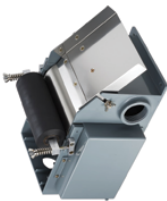


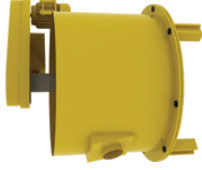
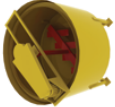
Tabla 3.10. Portafolio de tecnologías.

Operación unitaria o Actividad	Entradas	Tecnologías disponibles	Criterios de selección	Salidas	Limitantes / Consideraciones técnicas	Contribución a eficiencia EC / P+L y Aprovechamiento EC
EXPLOTACIÓN						
PREPARACIÓN (labores principales, subniveles, diagonales, perforación, voladura, cargue inicial, ventilación, prolongación de instalaciones)	- Perforadoras y jumbos. - Explosivos. - Vagonetas. - Rozadoras. - Herramientas menores. - Tuberías (aire, agua). - Elementos de ventilación. - Recurso Humano: elementos de protección, alimentos y bebidas - Energía eléctrica / neumática.	- Perforadoras neumáticas y jackleg - Perforadoras hidráulicas - Explosivos ANFO y emulsiones - Ventiladores portátiles - Winches y herramientas de cargue inicial	- Tipo y dureza de la roca: rocas más duras requieren perforación más potente. - Geometría de la veta: vetas estrechas requieren equipos más compactos. - Necesidad de ventilación: minas profundas o con gases requieren ventilación permanente. - Objetivo de la labor: si se construirá una galería principal o un subnivel, cambia la longitud y el método de perforación.	- Roca fragmentada. - Polvo. - Gases de voladura. - Aguas con sedimentos. - Residuos de mantenimiento.	- Sobrefragmentación aumenta finos y dificulta el beneficio. - Ventilación insuficiente genera riesgo de gases y polvo. - Mayor desgaste en roca muy abrasiva.	- Labores bien preparados evitan retrabajos. - Fragmentación adecuada disminuye energía en molienda. - Ventilación mejora salud y productividad del minero. - Reaprovechar roca fragmentada para rellenos o conformación de aceros. - Reuso del agua tras sedimentación para perforación y humectación. - Recuperación de tuberías y ventilación para reutilizar en nuevos frentes. - Optimización de mallas de perforación para reducir explosivos.
ARRANQUE (extracción directa en frente de trabajo)	- Pico y pala. - Martillos neumáticos. - Perforación ligera. - Aire comprimido - Iluminación portátil. - Recurso Humano: elementos de protección, alimentos y bebidas	- Mini scoop - Winches - Herramientas manuales	- Anchura del tajo: si la veta es muy angosta, se debe trabajar casi manualmente para evitar dilución. - Competencia de la roca: rocas blandas permiten mayor avance sin explosivos. - Control de dilución: entre menos estéril se mezcle, mayor eficiencia en planta.	- Crudo de mina - Estériles. - Polvo. - Ruidos y vibración. - Herramientas desgastadas.	- Riesgo de caída de roca si no está sostenido. - Espacios reducidos limitan maquinaria.	- Extracción controlada menos estéril y menos energía en planta. - Aumenta la vida útil del yacimiento al aprovechar mejor la veta. - Separación temprana de mineral y estéril para evitar transporte innecesario. - Reacondicionamiento de puntas y barrenos para extender vida útil. - Estériles usados como rellenos estructurales. - Mejora en eficiencia del uso de aire comprimido.
ENTIBACIÓN / SOSTENIMIENTO	- Maderas para entibado. - Palancas. - Pernos. - Arcos metálicos. - Material granular para relleno. - Equipos de instalación. - Recurso Humano	- Cuadros de madera - Pernos de fricción - Mallas electrosoldadas	- Estabilidad del macizo: cuanto más fracturado, más sostenimiento requiere. - Humedad: madera se deteriora más rápido en ambientes húmedos. - Profundidad: mayores esfuerzos requieren pernos y mallas.	- Maderas deterioradas. - Pernos dañados. - Restos de sostenimiento temporal. - Fragmentos de relleno.	- Incrementa costos iniciales. - Requiere personal entrenado para instalación segura.	- Garantiza continuidad del arranque. - Reduce accidentes y pérdidas de tiempo. - Mejora eficiencia general y productividad. - Reutilización de madera en zonas de baja carga. - Recuperación de elementos metálicos para reciclaje. - Uso de rellenos cementados reciclables. - Implementación de sistemas modulares de sostenimiento reutilizable.
ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO	- Tolvas - Recurso Humano - Alimentadores - Rastrillos. - Vagonetas. - Malacates. - Trenes. - Bandas transportadoras - Volquetas internas. - Energía.	- Tolvas internas - Puntos de acopio	- Flujo de producción: si el arranque produce rápido, se necesitan puntos de acopio. - Diseño de galerías: espacios angostos requieren tolvas verticales.	- Mineral transportado. - Estériles transportados - Vibraciones. - Desgaste de equipos (bandas, poleas, rieles).	Riesgo de sobrecarga si no se controla.	- Mantiene continuidad de operación. - Reduce esperas en transporte. - Minimiza pérdidas por reboso o manejo inadecuado.

Operación unitaria o Actividad	Entradas	Tecnologías disponibles	Criterios de selección	Salidas	Limitantes / Consideraciones técnicas	Contribución a eficiencia EC / P+L y Aprovechamiento EC
EXPLOTACIÓN						
CARGUE Y TRANSPORTE EN GALERÍAS PRINCIPALES		- Carros mineros - Vagones - Mini scoop - Winches	- Distancia mina-bocamina: distancias largas justifican carros o bandas. - Pendientes: pendientes altas requieren winches. - Volumen diario: si la producción es alta, se necesitan sistemas continuos.		- Humedad y lodo difficultan movilidad. - Requiere mantenimiento periódico.	- Reduce pérdidas por manipulación. - Optimiza ciclos y rutas para menor consumo de energía - Evita acumulación subterránea. - Reciclaje o reacondicionamiento de bandas transportadoras. - Revestimientos para prolongar vida útil de maquinaria.
ALMACENAMIENTO FUERA DE LA MINA Y TRANSPORTE EXTERNO	- Pilas de almacenamiento. - Silos. - Bandas exteriores. - Volquetas. - Equipos de cargue. - Sistemas de humectación. - Recurso Humano	- Tolvas externas - Patios de acopio - Volquetas / camionetas - Bandas transportadoras	- Distancia mina-planta: cuanto mayor, más robusto el sistema requerido. - Condiciones de vía: vías deterioradas aumentan pérdida de mineral. - Protección del mineral: lluvia o mezcla con estéril reduce ley.	- Mineral acopiado. - Polvo. - Aguas con sedimentos - Desgaste de equipos externos. - Estériles mal clasificados.	- Riesgo de segregación del mineral fino. - Manipulación inadecuada aumenta pérdida de oro. - Depende de clima y vías.	- Mantiene flujo continuo hacia planta. - Reduce contaminación por material ajeno. - Menos manipulación = menos pérdida de mineral. - Recolección y recirculación de escorrentías para humectación. - Cerramiento de pilas para reducir partículas y recuperar material fino. - Reciclaje de bandas transportadoras. - Aprovechamiento de estéril fino como estabilizador de vías.
Entradas de agua		Salidas de agua			Oportunidad de Economía circular	
- Agua de infiltración natural, según geología y profundidad) - Agua para perforación (si aplica): 0.5-1.5 l/min por perforadora - Agua para control de polvo en frentes de trabajo - Escorrentía superficial que ingresa por bocamina		- Agua de bombeo/desagüe de mina (principal salida) - Humedad en el mineral extraído (2-5% según tipo de roca) - Evaporación en galerías ventiladas - Pérdidas por infiltración en piso de galerías			- Usar agua de desagüe para molienda después de sedimentación - Captar y almacenar para época seca - Si pH es adecuado, usar directamente en proceso - Potencial de recuperación: 80-100% del caudal bombeado	
BENEFICIO (SISTEMA: TRITURACIÓN Y MOLIENDA)						
TRITURACIÓN	- Crudo de mina - Energía - EPP (Equipo de Protección Personal) - Lubrificantes - Repuestos y maquinaria	Trituradora de quijadas 	- Se usa cuando el mineral llega en bloques grandes desde la mina (10-30 cm). - Ideal para rocas duras y compactas. - Permite obtener un tamaño uniforme de 5-10 cm que facilita las etapas siguientes. - Si el mineral llega pequeño gracias a buena voladura, se puede prescindir de la primaria. - Se recomienda casi siempre en plantas formales por su confiabilidad y facilidad de mantenimiento.	- Mineral triturado, polvo /material particulado. - Residuos de mantenimiento.	- Puede generar finos si no se ajusta correctamente. - Produce ruido y polvo que deben controlarse. - Requiere alimentación constante con tamaño máximo predefinido.	- Reduce la energía necesaria en trituración secundaria y molienda. - Proporciona tamaño uniforme que mejora la recuperación en gravedad y flotación. - Reduce atascos en equipos posteriores. - Material grueso reutilizable como relleno o retorno al circuito - Captura de polvos para reincorporación.

Operación unitaria o Actividad	Entradas	Tecnologías disponibles	Criterios de selección	Salidas	Limitantes / Consideraciones técnicas	Contribución a eficiencia EC / P+L y Aprovechamiento EC
BENEFICIO (SISTEMA: CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA)						
PRE-CONCENTRACIÓN POR CANALETAS	- Bayetas mineras - Pulpa con mineral - Alfombras	Bayetas mineras 	- Bayetas mineras - Pulpa con mineral - Alfombras	Concentrado atrapado en alfombras, colas arenosas, aguas con sólidos		- Recirculación del agua usada - Aprovechamiento de arenas como relleno si cumplen criterios técnicos
CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA POR SACUDIMIENTO	- Pulpa clasificada - Energía	Mesa gravimétrica o vibratorías tipo Wilfley 	- Recupera oro grueso y oro medio. - Recuperación del 88-90.4% en dos etapas de concentración - En términos prácticos: - Muy buena para oro grueso ($> \sim 150$ micras / malla +100) - Aceptable para oro medio (~ 75-150 micras) - Poca eficiencia para oro fino ($< \sim 75$ micras) - No adecuada para oro ultrafino ($< \sim 40$ micras) - Separa por diferencia de densidades marcadas entre minerales usando agua y movimiento (Ejemplo: arsenopirita vs. Calcopirita) - Separación selectiva por gravedad - Se usan cuando el minero requiere un concentrado más limpio y de mayor ley. - Son muy eficientes cuando el mineral va paso por trituración y molienda adecuadas. Antes de flotación o cianuración, para mejorar la recuperación total - Requieren un operador entrenado para su debida calibración	Concentrado de oro libre (producto pesado), colas	- Requieren flujo constante y estable. - Poca eficiencia con exceso de lamas o arcillas. - Su capacidad es limitada: no son adecuadas para volúmenes muy grandes. - La calibración inadecuada genera pérdidas. - Requiere unas variables de operación como: la inclinación de la mesa, aceleración de sacudidas, caudal de agua de lavado, densidad de pulpa - Mayor selectividad que centrifugas para partículas sub-50 micras con geometría laminar	- Producen concentrado limpio sin uso de químicos. - Reducen el volumen del mineral que pasa a etapas posteriores (como flotación o cianuración). - Contribuyen a P+L al hacer más eficiente la separación física y disminuir reactivos aguas abajo. - Facilitan cierre progresivo de depósitos porque generan menos lodos o relaves *Reprocesar colas *Mejora recuperación
SEPARACIÓN GRAVIMÉTRICA HELICOIDAL (concentrador de espiral)	Pulpa	Espirales Humphrey 	- Se seleccionan cuando se desea un proceso continuo y de bajo consumo energético para recuperar oro fino-medio. - Funcionan muy bien cuando la granulometría está uniformemente clasificada generalmente tras cición. - Se usan como alternativa moderna a las canaletas cuando se requiere mayor eficiencia sin aumentar complejidad. - Son útiles en plantas con espacio reducido y operación constante. - Exigen caudal estable: si hay variación brusca, su eficiencia cae.	Pre-concentrado (con oro libre, minerales pesados) y colas	- Menor eficiencia con oro ultrafino (< 0.074 mm). - Sensibles a la variación del caudal. - No funcionan bien con arcillas o material muy viscoso. - Requieren clasificación previa para rendir al máximo.	- Mayor eficiencia que canaletas tradicionales. - No requieren energía significativa ni químicos. - Reducen pérdidas hacia relaves. - Operación continua que se traduce en menor consumo energético por tonelada procesada. - Son clave para plantas pequeñas y medianas que buscan transición a tecnologías limpias.

Operación unitaria o Actividad	Entradas	Tecnologías disponibles	Criterios de selección	Salidas	Limitantes / Consideraciones técnicas	Contribución a eficiencia EC / P+L y Aprovechamiento EC
BENEFICIO (SISTEMA: CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA)						
CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA EN CAMPO CENTRIFUGO	Pulpa fina	Concentradores centrifugos tipo bowl (Knelson, Falcon, etc.) 	- Se seleccionan cuando se necesita recuperar oro muy fino o ultrafino (partículas hasta 38 micras), que una mesa o espiral no puede retener. - Útiles cuando el oro está presente como partículas microscópicas o laminares. - Funcionan aplicando fuerzas mucho mayores a la gravedad estándar (60 G), lo que acelera la sedimentación del oro fino. - Se recomiendan cuando la mesa deja colas con oro recuperable. - Ideales para plantas que quieren maximizar recuperación sin usar reactivos. - Equipos grandes pueden procesar hasta 90t/día - Recuperación: >90%de oro liberado - Requieren alimentación constante y bombeo adecuado.	Concentrado de alta ley, relaves finos	- Mayor costo inicial que otras tecnologías. - Requieren mantenimiento y limpieza periódica. - Sensibles a variaciones de densidad de pulpa. - Capacidad limitada en comparación con espirales. - No alimentar con distribuciones granulométricas muy amplias (partículas muy finas y muy gruesas juntas) - MTD (Mejor Técnica Disponible) para eliminación del mercurio	- Aumentan significativamente la recuperación de oro fino. - Reducen la pérdida de oro en relaves (uno de los objetivos clave de P+L) y estos relaves se pueden reprocesar - Mejoran la productividad del minero artesanal o pequeño sin necesidad de químicos. - Disminuyen la carga de concentrados limpios hacia flotación y cianuración, reduciendo consumo de reactivos.
SEPARACIÓN MAGNÉTICA			- Recuperación de minerales ferromagnéticos o paramagnéticos (magnetita, ilmenita, hematita) - Relaves con contenido de hierro, titanio o manganeso - Para reducir volumen de relave antes de otro tratamiento		- Bajo costo y alta eficiencia para minerales con propiedades magnéticas. - Reduce volumen de residuos finales.	Parte de la caracterización de relaves para determinar potencial de aprovechamiento económico. Subproductos valiosos o eliminación previa.
Entradas de agua		Salidas de agua			Oportunidad de Economía circular	
- Pulpa de molienda - Agua de dilución en mesa - Agua de lavado en concentradores centrifugos (Knelson/Falcon) - Agua de fluidización en canaletas		- Cola (relave): agua de entrada, con sólidos - Concentrado: Agua de lavado de concentrado - Evaporación en equipos abiertos			- Sedimentar colas en piscinas en serie (cascada) y reciclar agua - Tiempo de retención en piscinas: - Usar flocculantes naturales (almidón, tuna) si se requiere acelerar - Meta: Recirculación >85% del agua de concentración	

Operación unitaria o Actividad	Entradas	Tecnologías disponibles	Criterios de selección	Salidas	Limitantes / Consideraciones técnicas	Contribución a eficiencia EC / P+L y Aprovechamiento EC
BENEFICIO (SISTEMA: FLOTACIÓN)						
CLASIFICACIÓN HIDRAULICA PREVIA	- Pulpa - Agua de dilución - Energía (bombas)	 Hidrociclón	- Se implementa cuando se requiere separar finos de gruesos antes de flotación o concentración. - Si la planta realizará flotación, el hidrociclón es casi obligatorio, porque produce el tamaño óptimo de partícula para el proceso. - Se usa cuando el molino produce granulometría variable y se necesita uniformizar el tamaño. - También se utiliza para reducir la carga circulante del molino y evitar retrabajo. - La decisión depende de: tipo de proceso (gravidad o flotación), finura requerida y estabilidad del caudal.	Finos a flotación, gruesos a remolienda	- Requiere bomba para generar presión (consumo energético). - Menos eficiente cuando la pulpa no es homogénea. - Produce lamas si se trabaja con exceso de finos.	- Mejora eficiencia de flotación al entregar material del tamaño adecuado, reduciendo relaves por mejor separación - menos reactivos - Ahorra energía en molienda al evitar sobretrituración. - Reduce desgaste del molino al disminuir carga circulante. - Redirección de gruesos
FLOTACIÓN EN CELDAS	- Pulpa fina - Reactivos (xantatos, espumantes) - Aire - Energía	 Celdas mecánicas	- Oro fino <38 µm - Se selecciona flotación cuando el oro no está libre, sino asociado, atrapado o finamente diseminado en minerales sulfurados como pirrita, arsenopirrita o piroclorita o calcopirrita. - Se recomienda cuando la concentración gravimétrica no logra recuperar adecuadamente el oro, y se observa que las colas de mesa conservan tonos grises (indicando presencia de sulfuros pesados que pueden contener oro). Otro refractario asociado a sulfuros - Es apropiada cuando el proceso requiere una molienda fina para liberar el oro desde matrices sulfuradas, lo cual no es suficiente para que la gravedad lo capture. - Se usa para obtener un concentrado con alta ley cuando la mineralogía indica presencia significativa de sulfuros que pueden transportar oro.	Concentrado espumoso, colas de flotación, aguas con reactivos	- Mesa + Flotación >95% recuperación - Necesaria para partículas donde el tamaño es pequeño y no responde a gravimetría - Requiere molienda fina y pulpa bien clasificada. - Sensible a cambios de pH, presencia de arcillas y material orgánico. - Se debe controlar pH tiempo de permanencia, tipo y cantidad de reactivo, densidad de pulpa, temperatura - Demanda uso controlado de reactivos (xantatos, espumantes). - Puede generar lodos que necesitan manejo y disposición adecuados. - Requiere capacitación para su operación estable y ajuste de reactivos.	- Permite recuperar oro que NO es recuperable por gravedad, reduciendo pérdidas en relaves. - Genera un concentrado sulfurado de alto contenido de oro, disminuyendo el volumen de material que pasa a cianuración o fundición. - Reduce la necesidad de cianuro aguas abajo. - Contribuye a la eliminación de mercurio, al ofrecer una alternativa altamente eficiente para oro fino. - Al retirar sulfuros del flujo, reduce potencial de drenaje ácido en depósitos finales. - Optimización de reactivos para usar menos químicos - Tratamiento y reuso del agua - Reprocesamiento de colas
CONCENTRACIÓN EN TANQUES /ESPESAMIENTO	- Pulpa concentrada - Espesante			lodos espesados, agua clarificada		- Redirección de agua - Lodos a fundición o a cianuración según ley

Lo anterior se deberá complementar con el rigor técnico existente en las Guías Metalúrgicas diseñadas por el SGC para cada región o municipio.

3.3.1.1. Oportunidad de Economía Circular 1: Mejoras en eficiencia energética: reducir consumo de energía utilizando energía renovable, y reducción de reactivos en el beneficio del mineral

Un proceso más eficiente reduce la pérdida de oro hacia los relaves, lo que implica un menor volumen de material a tratar, menos recirculaciones y una disminución del uso de insumos químicos.

Se han identificado varias acciones que fortalecen esta eficiencia energética al reducir el consumo específico de energía en las operaciones extractivas. Una de ellas es la instalación de medidores de energía eléctrica en frentes de trabajo, que permite monitorear consumos, identificar sobrecargas y detectar ineficiencias en equipos de perforación y voladura. Así mismo, en la etapa de beneficio, el empleo de equipos de mayor selectividad y tecnologías limpias disminuye la necesidad de reactivos y mejora la recuperación del oro.

También se identifican acciones relacionadas con la transición energética, entre las que se destaca el uso de energías alternativas para calentamiento, como calentadores solares instalados en techos de planta o campamento, que reducen la demanda de electricidad o combustibles y disminuyen la huella energética de la operación. De manera complementaria, la instalación de sistemas de iluminación LED de bajo consumo en labores subterráneas y la re-energización y optimización de equipos de ventilación y bombeo contribuyen a mejorar la eficiencia energética en los sistemas auxiliares críticos.

Además de la eficiencia energética, la optimización tecnológica en el beneficio también se orienta a la reducción del consumo de reactivos, un aspecto crítico para la sostenibilidad ambiental y económica en la minería de pequeña escala de oro. Uno de los avances más relevantes en materia de economía circular corresponde a la recuperación, reciclaje y re-generación de reactivos de lixiviación, particularmente del cianuro. Estas tecnologías permiten recuperar, purificar y reincorporar los reactivos utilizados en el proceso extractivo, disminuyendo el consumo de insumos vírgenes, reduciendo la toxicidad de los efluentes y cerrando ciclos químicos dentro de la operación.

Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando que la eficiencia tecnológica depende también del uso responsable y estratégicamente justificado de los insumos químicos, a continuación se presenta una tabla que identifica los principales reactivos empleados en cada operación del beneficio del oro filón, junto con su función específica, criterios de uso y referencias técnicas. Esta clasificación permite reconocer en qué etapas son realmente necesarios, dónde existen oportunidades de reducción o sustitución y cuáles son los puntos críticos para implementar acciones de economía circular orientadas al reciclaje, regeneración o minimización de dichos reactivos.

Tabla 3.11. Principales reactivos empleados en cada operación del beneficio del oro filón

Reactivo	Función	Consideraciones	Alternativas	Oportunidad economía circular
FLOTACIÓN 				
Xantatos (SEX, SIPX, SIBX, PAX)	Colectores que vuelven hidrofóbicos los sulfuros y el oro asociado.	Su "fuerza" aumenta con la longitud de la cadena (PAX más fuerte, SEX más selectivo). A mayor fuerza, mayor riesgo de arrastrar ganga y generar relaves con más sulfuros.	Orica Mining Chemicals indica que se puede cambiar de un xantato a otro según se necesite más selectividad o más potencia.	No se reciclan. Para usar menos: ajustar bien el pH, dosificar solo en los puntos necesarios (generalmente al molino o acondicionador) y evitar sobre-molienda que aumenta el área específica del mineral.

Reactivo	Función	Consideraciones	Alternativas	Oportunidad economía circular
FLOTACIÓN 				
Sulfato de cobre (CuSO₄)	Activador de pirita, arsenopirita y esfalerita antes del colector.	Mejora la flotación de sulfuros pero aumenta la carga de sulfatos y metales disueltos en el agua de proceso.	Orica Mining Chemicals menciona otros activadores (Na ₂ S, NaHS, Pb(NO ₃) ₂) según el tipo de mineral, pero siempre deben probarse en laboratorio.	No se recicla como tal. Para reducir consumo: aplicar solo donde se requiere activación (antes del colector) y evitar dosificar si el mineral ya está suficientemente activo.
Cal (CaO / Ca(OH)₂)	Regulador de pH; ayuda a deprimir pirita en muchos circuitos de cobre-oro.	Exceso de pH puede deprimir también sulfuros valiosos cuando el oro está asociado a pirita; genera lodos que deben manejarse.	Carbonato de sodio (Na ₂ CO ₃) o NaOH, según problemas de incrustación y viscosidad.	No se recicla, pero se puede usar menos controlando mejor el pH objetivo, evitando “sobre-correr” y aprovechando la recirculación de aguas ya alcalinas.
Soda cáustica (NaOH)	Regulador de pH, alternativa a la cal.	Muy corrosiva; se usa cuando la cal produce incrustaciones o problemas de viscosidad.	Na ₂ CO ₃ o cal, según condiciones del agua y del mineral.	No se recicla. Se reduce su uso priorizando cal cuando sea posible y preparando soluciones diluidas bien controladas para evitar sobredosificación.
Carbonato de sodio (Na₂CO₃)	Eleva pH y actúa como dispersante cuando la cal causa incrustaciones.	Útil en aguas duras; puede aumentar el contenido de sales disueltas en el agua recirculada.	Cal o NaOH, dependiendo de la problemática específica.	No se recicla. Para usar menos: ajustar el uso únicamente a los puntos donde la cal genere problemas de incrustación y aprovechar aguas recicladas ya tratadas.
Sulfato de zinc (ZnSO₄)	Depresor de esfalerita y, en algunos casos, de pirita.	Incrementa sales disueltas (Zn ²⁺ , sulfatos) en el circuito de agua.	Metabisulfito de Sodio, Cianuro de Sodio o Carboximetilcelulosa, dependiendo de la ganga y de los minerales a deprimir	No se recicla. Para usar menos: combinarlo con otros depresores y optimizar el punto de adición para que actúe solo donde es necesario.
Espumante tipo MIBC (Methyl Isobutyl Carbinol). Alcoholes alifáticos	Generar espuma estable pero no excesiva para transportar las partículas hidrofóbicas a la superficie.	Líquido inflamable y volátil; su exceso genera espumas muy persistentes y arrastre de ganga. Manejar en áreas ventiladas, evitar fuentes de ignición y seguir Hojas de Seguridad.	Otros espumantes (glicoles, mezclas alcohol-glicol) ajustando el sistema según el tipo de mineral y agua; en algunos casos se puede trabajar con dos espumantes en dosis bajas.	Ajustar dosificación a la “espuma necesaria” (ni seca ni muy voluminosa) mediante pruebas; recircular agua de proceso para aprovechar espumante residual y solo reponer lo que se pierda en relaves.
CIANURACIÓN 				
Cianuro de sodio (NaCN)	Agente lixivante que forma el complejo dicianuroaurato [Au(CN) ₂] ⁻ con el oro en presencia de oxígeno, permitiendo disolver el metal y recuperarlo de la solución.	Reactivo altamente tóxico para personas y fauna acuática; el riesgo aumenta cuando el pH baja (< 10) por formación de HCN gaseoso.	No tiene sustituto directo industrialmente consolidado en pequeña minería, pero se puede reducir su consumo usando reactivos mejoradores (peróxido de hidrógeno, nitrato de plomo, glicina, etc.) y optimizando la molienda y aireación.	Recirculación de soluciones pobres a la etapa de lixiviación después de ajustar pH y concentración; tratamiento de soluciones y lodos antes de disposición (oxidación química, precipitación, biodegradación) para destruir o inmovilizar el cianuro y permitir ciclos de reuso de agua.
Peróxido de hidrógeno (H₂O₂) – en cianuración	Oxidante que puede complementar al oxígeno disuelto, mejorando la velocidad y eficiencia de disolución del oro cuando el oxígeno es limitado.	Oxidante fuerte; en altas dosis puede descomponer el cianuro de manera incontrolada y aumentar el consumo de reactivos. Debe almacenarse en recipientes adecuados, protegido de la luz y el calor.	No sustituye al cianuro, pero puede permitir trabajar con concentraciones de NaCN algo menores manteniendo recuperaciones; también se evalúan alternativas como nitrato de plomo y glicina como mejoradores del proceso, según la mineralogía.	Ensayar en laboratorio la dosis óptima de H ₂ O ₂ para aumentar la recuperación sin sobredosificar; usarlo solo cuando la limitante sea el oxígeno. Complementar con recirculación de soluciones, evitando descargas con exceso de oxidante.

3.3.2. Lineamiento 5. Valorización de subproductos

La Economía Circular, en este contexto, propone tres objetivos fundamentales:

- Reducir la disposición final mediante la minimización de residuos,
- Disminuir las pérdidas metalúrgicas a través de tecnologías de reprocesamiento de relaves, y
- Habilitar nuevos mercados para los subproductos mediante la caracterización técnica rigurosa y la creación de encadenamientos productivos intersectoriales.

Este paradigma no solo responde a imperativos de responsabilidad ambiental, sino que representa una oportunidad económica tangible y sostenible para el sector minero de pequeña escala (Universidad Internacional de Andalucía, 2024).

3.3.2.1. Oportunidad de Economía Circular 1: Aprovechar los relaves generados en el proceso de beneficio

La valorización de relaves mineros constituye una de las estrategias más prometedoras de Economía Circular para la minería de pequeña escala aurífera colombiana. Este enfoque permite transformar materiales históricamente catalogados como residuos en recursos con valor económico, técnico y ambiental, reconfigurando la tradicional visión de “desecho” hacia una perspectiva de “subproducto valorizable”.

a) Reconversión de relaves para recuperar oro remanente del proceso de beneficio

Marco normativo: La normativa colombiana permite considerar los relaves como materiales aprovechables. El Código de Minas (Ley 685 de 2001, art. 61) autoriza el aprovechamiento de minerales asociados y subproductos. La Estrategia Nacional de Economía Circular (2019) impulsa el uso de materiales secundarios, incluidos residuos mineros. La Resolución 631 de 2015 fija los límites permisibles para vertimientos del sector minero. Los Términos de Referencia para Estudios de Impacto Ambiental en proyectos de explotación minera del 2016, exigen caracterización geoquímica de relaves y estériles, incluyendo pruebas de potencial de drenaje ácido.

El método TCLP (EPA 1311), citado en el Decreto 4741 de 2005 para clasificar residuos peligrosos, puede usarse para evaluar la lixiviación de relaves, pero no es un requisito obligatorio para su valorización; no obstante, para el uso, es la única prueba que garantiza que el estéril no es un residuo peligroso (RESPEL). Ésta depende además del cumplimiento de normas técnicas colombianas aplicables a materiales de construcción.

En la minería de pequeña escala aurífera, las pérdidas metalúrgicas son frecuentes debido a la granulometría fina del oro, la presencia de menas refractarias, la variabilidad del mineral y la baja eficiencia de métodos tradicionales como canaleteo o centrifugación simple.

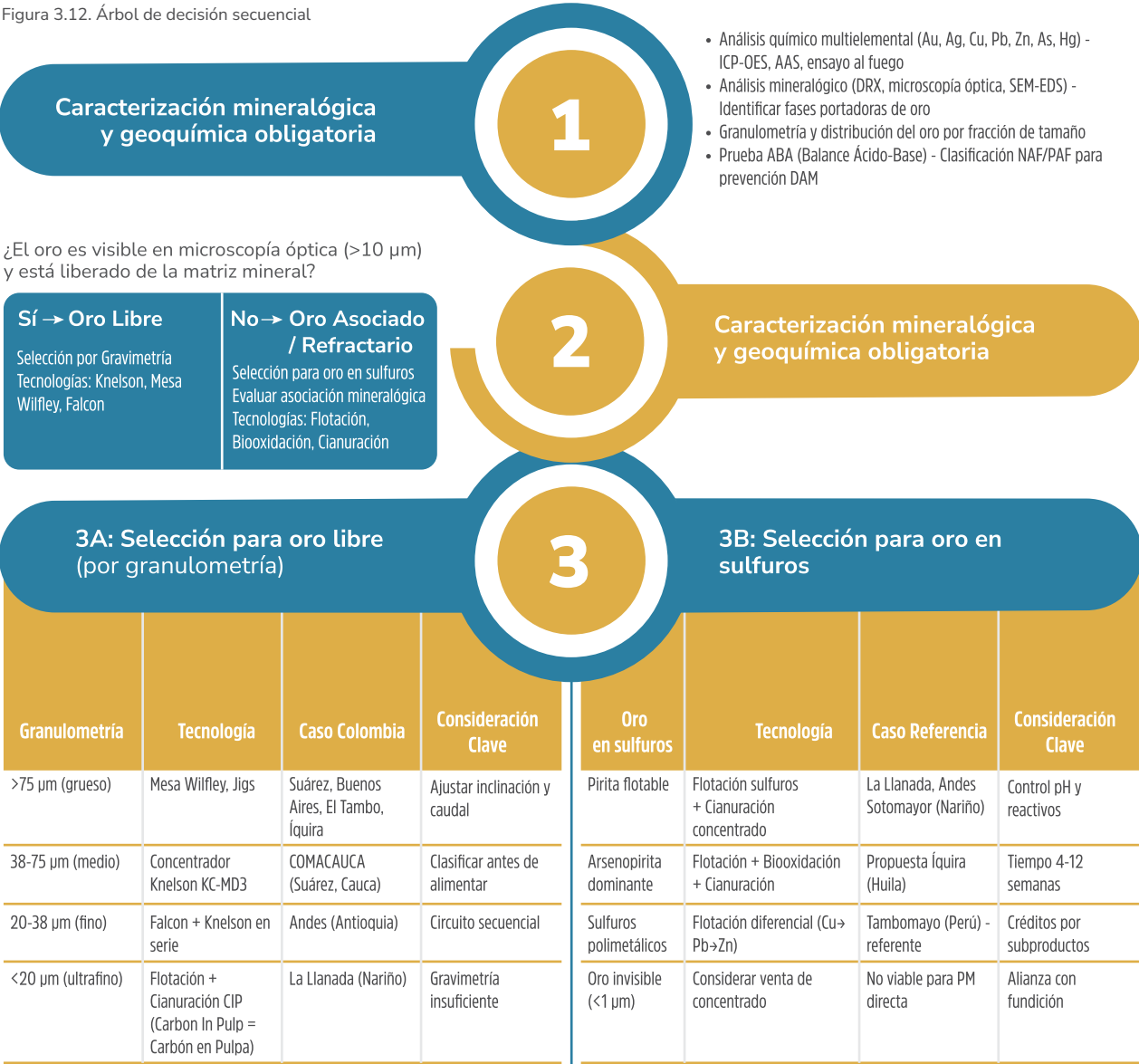
Para ello se requiere:



Tabla 3.12. Variables principales en la selección de tecnologías para valorización de relaves

Variable	Parámetros a Evaluar	Implicación para Selección Tecnológica
1. Tipo de Oro	- Oro libre (visible, liberado) - Oro asociado a sulfuros - Oro refractario (encapsulado) - Oro ultrafino (<10 µm)	Oro libre → Gravimetría. Oro en sulfuros → Flotación. Oro refractario → Pretratamiento oxidativo + lixiviación. Oro ultrafino → Biolixiviación.
2. Granulometría	- Au >75 µm (grueso) - Au 38-75 µm (medio) - Au 20-38 µm (fino) - Au <20 µm (ultrafino)	>75 µm: Mesa Wilfley, jigs. 38-75 µm: Concentrador Knelson. 20-38 µm: Centrífugas de alta G. <20 µm: Flotación o lixiviación.
3. Mineralogía Asociada	- Pirita aurífera (FeS₂) - Arsenopirita (FeAsS) - Calcopirita (CuFeS₂) - Galena/Esfalerita - Minerales magnéticos	Sulfuros polimetálicos → Flotación diferencial. Minerales magnéticos → Separación HGMS. Arsenopirita dominante → Biooxidación previa.
4. Recursos Disponibles	- Capital de inversión - Asistencia técnica (SGC, universidades) - Acceso a reactivos químicos - Infraestructura existente - Mano de obra calificada	Recursos limitados → Gravimetría y separación magnética. Recursos medios + apoyo técnico → Flotación. Recursos altos → Cianuración en circuito cerrado.
5. Contenido Metálico	- Au >1.0 g/t (alto) - Au 0.5-1.0 g/t (medio) - Au 0.3-0.5 g/t (bajo) - Subproductos (Ag, Cu, Pb, Zn)	Au >1.0 g/t justifica inversión mayor. Au 0.3-0.5 g/t requiere tecnologías de bajo costo. Subproductos pueden mejorar rentabilidad (créditos polimetálicos).

Figura 3.12. Árbol de decisión secuencial



Fuente: Elaboración propia con base en SGC (2017-2019), Ingeominas-JICA (2010), Estado del Arte EC (2025).

b) Recuperación de minerales secundarios presentes en los residuos de beneficio (relaves)

Los relaves de la minería aurífera contienen frecuentemente minerales secundarios de valor económico que no fueron recuperados en el proceso primario de beneficio. El reprocesamiento de relaves es una de las estrategias de economía circular más directas, enfocada en la recuperación de metales valiosos residuales o subproductos que no fueron extraídos en el proceso primario (Araya, Kraslawski & Cisternas, 2020; MME & ATG, 2022). La filosofía de la Economía Circular establece que estos materiales no deben considerarse residuos, sino recursos secundarios con potencial de valorización.

Principio de economía circular: La identificación y posterior valorización de Minerales Críticos y Estratégicos (MCE) en los relaves evita constituir pasivo ambiental al valorizarlo como activo. Los residuos de una etapa se convierten en la materia prima de otra, diversificando los ingresos del minero y cerrando el ciclo de los materiales (MADS & MinCIT, 2019). La política minera nacional en Colombia está reconociendo la importancia de estos MCE, y la EC proporciona el marco ideal para su aprovechamiento (UPME, 2024).

Las tecnologías y criterios aquí presentados son orientativos y deben validarse con pruebas metalúrgicas a escala laboratorio antes de cualquier inversión. Consultar con SGC, universidades y especialistas en procesamiento de minerales.

Principales minerales secundarios

Tabla 3.13. Principales minerales secundarios que podrían encontrarse en los diferentes relaves provenientes del beneficio aurífero

Elemento / Mineral	Forma Mineralógica Común	Ocurrencia en Relaves Auríferos	Aplicaciones Industriales	Relevancia para Transición Energética
Plata (Ag)	Argentita (Ag ₂ S), electrum (Au-Ag), tetraedrita, galena argentífera	Asociada frecuentemente al oro en yacimientos de filón. Alta correlación con sulfuros polimetálicos. 72% mundial es subproducto (MME & ATG, 2022).	Electrónica, joyería, paneles solares fotovoltaicos, catalizadores, medicina (propiedades antibacterianas).	ALTA: Esencial para paneles solares y contactos eléctricos en energías renovables.
Cobre (Cu)	Calcopirita (CuFeS ₂), bornita, calcosina, malaquita, azurita	Presente en yacimientos polimetálicos Au-Cu. Sulfuros de cobre acompañan oro en vetas hidrotermales.	Conductores eléctricos, motores, generadores, construcción, aleaciones (bronce, latón).	MUY ALTA: Vehículos eléctricos usan 4-5 veces más Cu (La Porta, 2019). Esencial para electromovilidad.
Plomo (Pb)	Galena (PbS), cerusita, anglesita	Común en depósitos polimetálicos Pb-Zn-Ag. Galena frecuentemente contiene Ag como impureza.	Baterías (ácido-plomo), blindaje radiación, soldaduras, aleaciones.	MEDIA: Baterías de almacenamiento, aunque litio está desplazándolo en electromovilidad.
Zinc (Zn)	Esfalerita (ZnS), smithsonita, hemimorfita	Asociado a Pb en yacimientos polimetálicos. Esfalerita común en vetas auríferas con sulfuros.	Galvanizado de acero, aleaciones (latón), baterías Zn-aire, suplementos nutricionales.	ALTA: Baterías de flujo de zinc para almacenamiento de energía renovable (Banco Mundial, 2017).
Hierro (Fe)	Magnetita (Fe ₃ O ₄), hematita (Fe ₂ O ₃), pirita (FeS ₂), goethita	Magnetita y pirita muy comunes en relaves auríferos. Pirita es mineral hospedero de oro refractario (SGC, 2017).	Siderurgia (acero), pigmentos, cemento, lastre, materiales de construcción.	ALTA: Acero verde para turbinas eólicas y estructuras de energía renovable.
Manganeso (Mn)	Pirolusita (MnO ₂), rodocrosita, psilomelano	Presente en óxidos secundarios. Puede precipitar en drenajes ácidos de mina.	Acero (desoxidante), baterías, fertilizantes, vidrio, cerámica.	MUY ALTA: Crítico para baterías de vehículos eléctricos NMC, LMO (Banco Mundial, 2017).

Fuente: Elaboración propia con base en MME & ATG (2022), Araya et al. (2020), Banco Mundial (2017), La Porta (2019), SGC (2017a, 2017b).

Tecnologías de recuperación de minerales secundarios

Tabla 3.14. Portafolio de tecnologías de recuperación de minerales secundarios

Tecnología	Descripción del Proceso	Minerales Objetivo	Eficiencia y Parámetros	Viabilidad PN (potencial de neutralización)
Flotación Diferencial	Aprovecha diferencias de flotabilidad de minerales usando reactivos (colectores, espumantes, depresores). Separa selectivamente sulfuros de Cu, Pb, Zn de la ganga. Secuencia típica: Cu → Pb → Zn (Gutiérrez & Sánchez, 2020).	• Calcopirita (Cu) • Galena (Pb) • Esfalerita (Zn) • Pirita aurífera • Sulfuros polimetálicos	Recuperación: 85-95% por mineral. Control crítico: pH, densidad pulpa (25-35% sólidos), tipo/dosis reactivo, tiempo de residencia (SGC, 2018).	MEDIA-ALTA: Requiere inversión inicial moderada y asistencia técnica. Plantas asociativas.
Separación Magnética (HGMS / WHIMS)*	Separa minerales según susceptibilidad magnética. HGMS (alta intensidad) para paramagnéticos. Bajo costo operativo, alta eficiencia, no requiere reactivos químicos (Pomykala & Tora, 2017).	• Magnetita (Fe) • Ilmenita (Ti) • Hematita (Fe) • Cromita • Minerales de Mn	Recuperación: 80-95% minerales magnéticos. Reduce volumen de relave hasta 30%. Prepara material para flotación posterior.	MUY ALTA: Bajo costo, sin químicos, fácil operación. Ideal como pre-concentración.
Separación Gravimétrica (Espirales, Mesas)	Concentra minerales pesados por diferencia de densidad. Espirales para arenas negras y minerales pesados. Mesas para separación selectiva final (Granja et al., 2021).	• Circón (Zr + REE) • Monacita (REE) • Ilmenita (Ti) • Rutilo (Ti) • Casiterita (Sn)	Recuperación: 70-90% minerales pesados. Óptimo para placeres aluviales (ANM, 2022). Concentración de arenas negras.	MUY ALTA: Tecnología simple, bajo costo, aplicable a PM aluvial.
Lixiviación Química (Hidrometalurgia)	Disolución selectiva de metales usando agentes lixiviantes: ácido sulfúrico (Cu), cianuro (Au, Ag), cloruros (REE). Incluye lixiviación por agitación, percolación, autoclave (Hernández et al., 2007).	• Cu (ácido sulfúrico) • Au, Ag (cianuro, tiosulfato) • REE (ácidos) • Co, Ni (ácido) • V, Mo (alcalino)	Recuperación variable según mineral y ley. Cu: 85-95%. REE: 60-85%. Requiere control riguroso de pH, temperatura, tiempo.	MEDIA: Requiere infraestructura y control ambiental. Viable en plantas centralizadas.
Biolixiviación (Biohidrometalurgia)	Usa microorganismos (Acidithiobacillus) para oxidar sulfuros y liberar metales. Bajo impacto ambiental. Tiempos largos 4-12 semanas. Bajo costo operativo (SGC, 2017b).	• Cu de calcopirita • Co, Ni de sulfuros • Zn de esfalerita • Au refractario (pretratamiento) • REE (en desarrollo)	Recuperación: 70-90% según mineral. Tiempo: 4-12 semanas. Condiciones: pH 1.5-2.5, T° 30-35°C.	EMERGENTE: Bajo costo pero largo tiempo. Alianza con universidades para pilotaje.

*(HGMS: High Gradient Magnetic Separation) (WHIMS: Wet High Intensity Magnetic Separation)

Fuente: Elaboración propia con base en Gutiérrez & Sánchez (2020), Araya et al. (2020), Kinnunen et al. (2022), Hernández et al. (2007), Aduvire (2019), SGC (2017b).

Análisis de decisión para valorización de minerales secundarios

La información geológica es la base para: 1) seleccionar la tecnología de concentración más eficiente, 2) predecir el potencial de generación de DAM (Drenaje Ácido Minero), y 3) determinar los mejores usos potenciales para los relaves (MME & ATG, 2022). Un diseño de circuito que no tome en cuenta la geología local resulta en una baja recuperación y mayor generación de pasivos ambientales.

Tabla 3.15. Proceso para la valorización de materiales secundarios

	1	2	3	4	5
Pregunta / Criterio de Decisión	¿Se ha realizado caracterización química multielemental del relave (Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Fe, Ti, REE, Co)?	¿El relave contiene sulfuros polimetálicos (Cu, Pb, Zn) en concentraciones económicas (Cu >0.1%, Pb >1.5%, Zn >1%)?	¿El relave contiene minerales magnéticos (magnetita, ilmenita, hematita) en concentración significativa (>5%)?	¿El relave tiene potencial de REE o MCE (>500 g/t TREO, Co, V) según caracterización?	¿Los contenidos de minerales secundarios no justifican reprocesamiento metalúrgico?
Respuesta: Si	Continuar al Paso 2 con datos de caracterización	FLOTACIÓN DIFERENCIAL: Diseñar circuito Cu→Pb→Zn secuencial (Gutiérrez & Sánchez, 2020). Evaluar créditos por Ag.	SEPARACIÓN MAGNÉTICA: Bajo costo, alta eficiencia. Subproductos Fe, Ti. Reduce volumen (Pomykala & Tora, 2017).	INVESTIGACIÓN ESPECIALIZADA: Alianza con universidades. Lixiviación selectiva + SX (Araya et al., 2020).	VALORIZACIÓN NO METALÚRGICA: Evaluar uso en materiales de construcción ladrillos, agregados, backfill (Torres et al., 2024).
Respuesta: No	OBLIGATORIO: Realizar análisis ICP-OES, AAS, DRX, SEM-EDS antes de decisión (SGC, 2017)	Continuar al Paso 3 (otros minerales)	Continuar al Paso 4	Continuar al Paso 5	Revisar caracterización. Puede haber elementos no analizados.
Herramienta	ICP-OES, AAS, Ensayo al fuego, DRX	Análisis químico, microscopía, pruebas de flotación	Prueba magnética, susceptibilidad magnética	SEM-EDS, análisis de REE por ICP-MS	Pruebas geotécnicas, contenido de SiO ₂ , Al ₂ O ₃

c) Valorización como materiales de construcción

La Economía Circular establece que, si un material es químicamente estable y no presenta riesgos de generación de drenaje ácido o lixiviación de metales pesados, debe reintegrarse al sistema productivo antes de optar por su disposición final (MADS & MinCIT, 2019).

Requisito obligatorio: Conforme a los Términos de Referencia de la ANLA (2016) y a las buenas prácticas internacionales establecidas en el GARD Guide (INAP, 2014), únicamente materiales clasificados como NAF (No Generadores de Acidez) mediante pruebas ABA/NAG pueden emplearse sin riesgo en usos constructivos. Adicionalmente, deben cumplir con los límites de lixiviación de metales mediante TCLP y compararse con los valores normativos vigentes (Resolución 631 de 2015; Resolución 0165 de 2023).



Advertencia crítica: Los relaves que contengan mercurio residual de procesos de amalgamación previos NO deben ser utilizados directamente como materiales de construcción sin un proceso previo de tratamiento y recuperación del oro remanente (SGC, 2018). El protocolo establecido para La Llanada y Andes Sotomayor (Nariño) debe ser la referencia para el manejo de estos materiales.

Requisitos técnicos para el aprovechamiento de relaves en materiales de construcción

Los relaves generados durante el beneficio de minerales pueden constituir una fuente potencial de materiales para aplicaciones en obras civiles, siempre que sus características físicas, mecánicas, geoquímicas y ambientales permitan garantizar un desempeño adecuado y seguro.

Antes de considerar cualquier alternativa de aprovechamiento, se recomienda realizar una caracterización integral del material para verificar su aptitud técnica y ambiental.

Tabla 3.16. Caracterización mínima recomendada

Propiedad a evaluar	Objetivo	Ensayo recomendado
Granulometría	Determinar la distribución de tamaños de partículas.	Análisis granulométrico.
Plasticidad	Evaluar el comportamiento de los finos.	Límites de Atterberg.
Compactación	Determinar humedad óptima y densidad máxima seca.	Proctor Estándar o Modificado.
Capacidad de soporte	Evaluar comportamiento en aplicaciones viales.	CBR.
Resistencia mecánica	Determinar capacidad estructural del material.	Compresión simple, CBR u otros según uso.
Densidad y absorción	Evaluar calidad física del material.	Ensayos de densidad y absorción.
Durabilidad	Evaluar resistencia al deterioro físico.	Solidez en sulfatos y desgaste.
Permeabilidad	Evaluar comportamiento hidráulico.	Ensayo de permeabilidad.
Estabilidad química	Verificar posibles reacciones indeseables.	Caracterización química y mineralógica (DRX) + balance ácido-base ABA (Sobek, 1978); criterio NPR: No-PAG si NPR > 2 (> 3 en zonas sensibles); %S total.
Riesgo ambiental	Filtro previo eliminador de aptitud.	Lixiviación TCLP (EPA 1311) y SPLP (EPA 1312) vs. límites (As 5,0; Pb 5,0; Cd 1,0; Hg 0,2 mg/L) + Hg total (EPA 7473) en relaves de amalgamación.

Fuente: Normas de Ensayo INVÍAS (serie INV E-); Sobek et al. (1978); Price (2009) MEND 1.20.1; EPA Methods 1311, 1312 y 7473; Decreto 1076 de 2015 (Anexo III).

Posibles aplicaciones sujetas a validación técnica

Los relaves generados durante el beneficio de minerales pueden representar una oportunidad para la economía circular cuando sus características físicas, mecánicas, químicas y ambientales permitan su aprovechamiento seguro. Antes de su utilización, se recomienda realizar una caracterización técnica que garantice la aptitud del material para el uso propuesto.

Tabla 3.17. Posibles aplicaciones para los relaves

Aplicación Potencial	Descripción	Requisitos mínimos de evaluación
Material de relleno	Utilización de relaves para nivelación de terrenos, recuperación topográfica o rellenos no estructurales.	Granulometría, compactación (Proctor), humedad óptima, estabilidad física y evaluación ambiental básica.
Conformación de terraplenes	Empleo de relaves en la construcción de terraplenes para vías internas, plataformas o adecuación de terrenos.	Granulometría, CBR, compactación, resistencia al corte, estabilidad geotécnica y drenaje.
Subrasantes mejoradas	Incorporación de relaves para mejorar la capacidad portante de suelos de fundación.	Granulometría, límites de Atterberg, CBR, compactación y comportamiento mecánico.
Subbases estabilizadas	Uso de relaves mezclados con cemento, cal u otros estabilizantes para capas de soporte vial.	Granulometría, CBR, resistencia a compresión, durabilidad y cumplimiento de especificaciones técnicas aplicables.
Fabricación de ladrillos	Aprovechamiento de relaves como materia prima parcial para productos cerámicos o bloques prensados.	Caracterización mineralógica, resistencia mecánica, absorción de agua y ausencia de contaminantes que afecten el producto final.
Fabricación de bloques de construcción	Utilización de relaves mezclados con cemento u otros aglomerantes para elementos no estructurales.	Resistencia a compresión, absorción, densidad, durabilidad y control de calidad del producto terminado.
Prefabricados no estructurales	Producción de adoquines peatonales, bordillos, separadores u otros elementos de baja exigencia estructural.	Resistencia mecánica, absorción, desgaste superficial y estabilidad química.
Recuperación geomorfológica de áreas intervenidas	Reconformación de taludes, recuperación paisajística y rehabilitación de áreas degradadas.	Estabilidad física, control de erosión, compatibilidad con suelos locales y evaluación ambiental.
Material de cobertura para cierre minero	Uso de relaves para conformar capas de cobertura o encapsulamiento durante el cierre y abandono de labores mineras.	Permeabilidad, estabilidad geotécnica, comportamiento geoquímico, potencial de generación de drenaje ácido y capacidad de revegetación.
Relleno de labores mineras (Backfill)	Retorno de relaves al interior de labores subterráneas para mejorar la estabilidad y reducir volúmenes de disposición superficial.	Granulometría, resistencia mecánica, comportamiento hidráulico, compatibilidad con el método de explotación y estabilidad a largo plazo.

Fuente: INVÍAS Especificaciones Generales de Construcción 2013 (Art. 320 y 330); NTC 174 y NTC 4026; síntesis de reúso de relaves como materiales de construcción (Cárdenas, 2019).

Consideraciones generales

Antes de implementar cualquier alternativa de aprovechamiento, se recomienda verificar:

- Estabilidad física y geotécnica del material.
- Comportamiento mecánico para el uso previsto.
- Ausencia de contaminantes que puedan generar riesgos ambientales o para la salud.
- Potencial de generación de drenaje ácido de mina (cuando aplique).
- Cumplimiento de las especificaciones técnicas aplicables al sector de la construcción.
- Viabilidad económica y logística del aprovechamiento propuesto.

La utilización de relaves en obras civiles o productos de construcción deberá estar respaldada por estudios técnicos y ensayos de laboratorio que demuestren su desempeño y seguridad para la aplicación específica.

Criterios orientativos para aplicaciones viales

Cuando se pretenda utilizar relaves en capas de infraestructura vial, se recomienda verificar como mínimo:

Tabla 3.18. Criterios para aplicaciones viales

Propiedad	Criterio mínimo (INVÍAS art. 320 sub-base / art. 330 base)
Granulometría	Conforme a las franjas INVÍAS Art. 320 (sub-base) y Art. 330 (base); INV E-123.
Índice de Plasticidad	≤ 6 (sub-base); ≤ 3 (base, no plástica en NT2-NT3); INV E-125/126.
CBR	≥ 30 % (sub-base); ≥ 80 % (base; ≥ 95 % en NT3); INV E-148.
Compactación	$\geq$ densidad máxima seca del Proctor modificado (INV E-142).
Durabilidad	Solidez en sulfatos ≤ 18 % ($MgSO_4$, INV E-220); desgaste Los Ángeles ≤ 50 % sub-base / ≤ 40 % base (INV E-218).
Estabilidad química	Sin reacciones expansivas; verificar previamente DAR y lixiviación.
Equivalente de arena	≥ 25 % (sub-base); ≥ 30 % (base); INV E-133.
Forma de partículas (base)	Caras fracturadas $\geq 50/70/100$ % según NT (INV E-227); alargamiento y aplanamiento ≤ 35 % (INV E-230).

Fuente: INVÍAS Especificaciones Generales 2013, Art. 320 (sub-base) y Art. 330 (base); Normas de Ensayo INV E-123, E-125/126, E-133, E-142, E-148, E-218, E-220, E-227 y E-230.

Si el relave resulta potencialmente generador de ácido ($NPR < 1$) o supera los límites de lixiviación, no debe usarse en obra civil expuesta sin tratamiento previo: flotación de sulfuros (objetivo $< 0,5$ % S), cocción cerámica > 700 °C o estabilización/solidificación con cemento (encapsulamiento), tratamiento que reduce más del 95 % la movilidad de metales (Cárdenas, 2019).

Consideraciones de seguridad y sostenibilidad

El aprovechamiento de relaves deberá garantizar:

- La protección de la salud humana y del ambiente.
- La estabilidad física y química del material.
- La ausencia de riesgos asociados a drenaje ácido de mina.
- El control de metales potencialmente tóxicos.
- El cumplimiento de la normatividad ambiental y técnica vigente.

La valorización de relaves puede contribuir a reducir la disposición final de residuos mineros, disminuir la extracción de materiales naturales y promover el aprovechamiento eficiente de recursos. No obstante, cualquier uso deberá estar soportado en estudios técnicos que demuestren la viabilidad geotécnica, ambiental y operacional del material para la aplicación propuesta.



Criterios de estabilidad geoquímica para valorización de relaves

Tabla 3.19. Parámetros de evaluación según criterios de estabilidad geoquímica

Parámetro de Evaluación	Método de Análisis	Criterio de Aceptación	Referencia Normativa
Potencial de Acidez (AP)	Prueba ABA (Acid-Base Accounting): Determina el balance entre minerales generadores de acidez (sulfuros) y minerales neutralizantes (carbonatos).	Relación NP/AP > 3.0 indica bajo riesgo. NP/AP < 1.0 indica alto riesgo de DAM.	INAP. (2014); MEND. (2009).
Generación Neta de Ácido (NAG)	Prueba NAG: (Net Acid Generation): Oxidación acelerada con peróxido de hidrógeno para simular meteorización a largo plazo.	NAG pH > 4.5 indica no generador de acidez. NAG < 4.5 kg H ₂ SO ₄ /t es aceptable.	GARD Guide (INAP, 2014); Términos de Referencia ANLA
Lixiviación de Metales Pesados	Prueba TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) o SPLP para simular condiciones de disposición.	Concentraciones < límites Decreto 1076/2015 para As, Cd, Cr, Hg, Pb, Se.	EPA SW-846 Método 1311; Resolución 631 de 2015
Contenido de Sulfuros	Análisis mineralógico por DRX (Difracción de Rayos X) y cuantificación de azufre total por ICP-OES.	S total < 0.3% indica bajo riesgo. Pirita < 1% del volumen total.	SGC (2017); Ingeominas-JICA (2010)
Elementos Contaminantes	Análisis multielemental por ICP-MS para As, Cd, Hg, Pb, Zn y elementos traza.	Concentraciones totales dentro de límites para suelos de uso industrial (Resolución 0165/2023 MADS).	NTC-4254; Resolución 0165 de 2023
Estabilidad Física	Análisis granulométrico, límites de Atterberg, compactación Proctor y CBR (California Bearing Ratio).	CBR > 20% para uso en subbase. IP < 10 para agregados.	INVÍAS (2013)

Pruebas mínimas obligatorias para uso en construcción

Tabla 3.20. Pruebas mínimas para uso en construcción

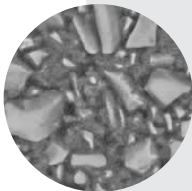
Prueba	Parámetro a Evaluar	Norma Aplicable	Criterio Aceptación
Balance Ácido-Base	Potencial generación acidez (NP/AP)	Sobek et al. 1978	NP/AP > 3 (NAF)
TCLP	Lixiviabilidad metales pesados	EPA 1311 / NTC 5820	< límites Res. 631
Resistencia compresión	Aptitud estructural	NTC 673 / ASTM C39	Según uso final
Granulometría	Distribución tamaño para agregados	NTC 77 / ASTM C136	Curva graduada
Contenido sulfatos	Riesgo expansión en concreto	NTC 3495	SO ₄ < 1% peso



Tecnologías de valorización en materiales de construcción

Una vez verificada la estabilidad geoquímica del material, existen múltiples tecnologías para su transformación en productos de valor comercial. La selección depende de la composición mineralógica, la granulometría, la demanda local y la capacidad técnica disponible.

Tabla 3.21. Portafolio de tecnologías de valorización de relaves estables

Geopolímeros / Activación Alcalina		
	Descripción Tecnología que transforma relaves ricos en sílice y alúmina en aglutinantes cementantes mediante activación con soluciones alcalinas (NaOH, Na₂SiO₃). Produce materiales con resistencia comparable al cemento Portland pero con menor huella de carbono.	Requisitos del material Alto contenido de SiO₂ (>40%) y Al₂O₃ (>15%). Bajo contenido de sulfuros (<1%). Granulometría fina (<75 µm). Productos finales Ladrillos geopoliméricos, bloques estructurales, morteros de reparación rápida.
Ahmari & Zhang (2013); Kiventerä et al. (2018)		
Agregados Finos en Hormigón/Concreto		
	Descripción Sustitución parcial de arena natural por relaves procesados en mezclas de concreto. La adición óptima de 15% de relave incrementa la resistencia y elasticidad del cemento.	Requisitos del material Granulometría 0.075-4.75 mm. Libre de sulfuros reactivos. Lixiviación de metales bajo límites. Productos finales Concreto hidráulico, morteros, prefabricados de concreto.
Argane et al. (2016); Barzegar et al. (2022); Onuaguluchi & Özgür (2012)		
Ladrillos, Baldosas y Adoquines		
	Descripción Fabricación de unidades de mampostería con reemplazo de 10-50% del cemento por relave seco. Requiere encapsulamiento de metales pesados en la matriz cerámica.	Requisitos del material Humedad <15%. Libre de Hg. Compactación adecuada. Pruebas de resistencia y lixiviación del producto final. Productos finales Ladrillos ecológicos, baldosas, adoquines para tráfico peatonal y vehicular ligero.
Romero & Flores (2010); Cerón & Gutiérrez (2019)		
Áridos para Carreteras		
	Descripción Uso de relaves como material granular para base, subbase o terraplenes de vías. Debe cumplir especificaciones de CBR y prueba Marshall.	Requisitos del material CBR > 20% (subbase), >80% (base). IP < 6. Granulometría según INVÍAS. Productos finales Material de subbase granular, terraplenes, rellenos estructurales.
Torres et al. (2024); INVÍAS (2013)		
Retrollenado Minero (Paste Fill / Backfill)		
	Descripción Reincorporación de relaves espesados como relleno de labores subterráneas abandonadas. Mejora la estabilidad del macizo rocoso y reduce el volumen en superficie.	Requisitos del material Densidad de pulpa 70-85%. Resistencia UCS > 0.5 MPa a 28 días. Compatible con cemento si se requiere estabilidad estructural. Productos finales Relleno cementado (CPB), relleno hidráulico, relleno en pasta.
Bellenfant et al. (2013); MME & ATG (2022)		

Cemento de Fosfato de Magnesio (MPPC: Magnesium Phosphate Portland Cement)



Descripción Utilización de relaves como fuente de MgO para fabricación de cementos químicos de fraguado rápido, usados en reparaciones de ingeniería civil.

Requisitos del material

Alto contenido de Mg (>30%). Mineralogía de magnesita ferroan. Libre de contaminantes.

Productos finales

Cementos de reparación rápida, morteros especiales.

Ismailov et al. (2020)

Reconformación Morfológica



Descripción Uso de estériles y relaves inertes para restauración del paisaje, relleno de depresiones y reconformación de taludes en el cierre de minas.

Requisitos del material

Estabilidad geoquímica verificada. No generador de DAM. Compatible con revegetación.

Productos finales

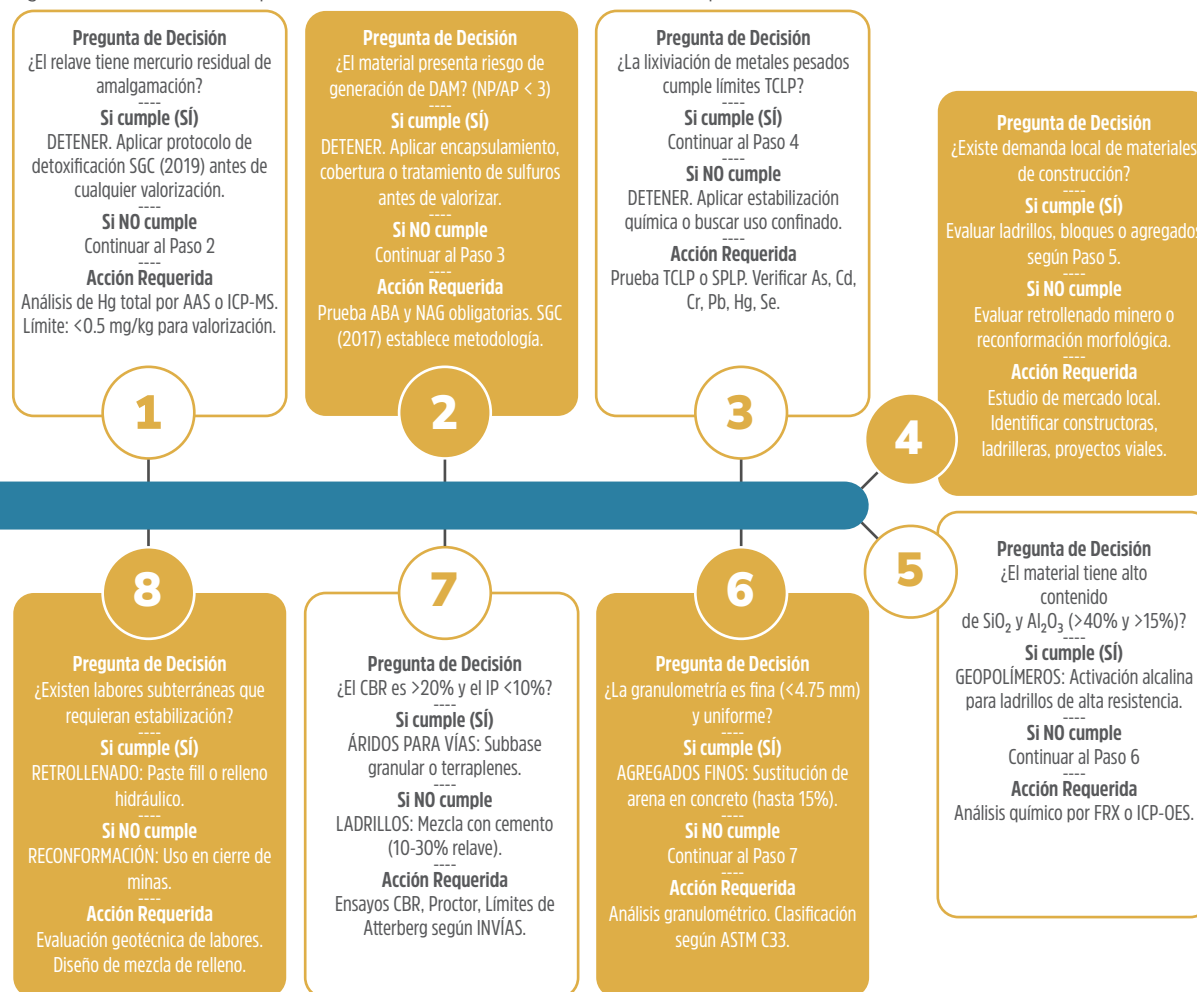
Rehabilitación de áreas degradadas, cierre de minas.

Guía Minero Ambiental (MME & MMA, 2002)

Análisis de decisión para selección de valorización

El siguiente análisis de decisión permite identificar la ruta de valorización más adecuada según las características del material y el contexto local de la operación minera.

Figura 3.13. Ruta de decisión para la valorización del material en el contexto de la operación miner



Fuente: Elaboración propia con base en SGC (2017, 2019), MME & ATG (2022), INVÍAS (2013), Ahmari & Zhang (2013).

Incorporación en el instrumento o documento técnico minero y ambiental aplicable

La valorización de relaves como materiales de construcción debe

estar contemplada en el instrumento o documento técnico minero y ambiental aplicable para garantizar su viabilidad legal y técnica. La Ley 685 de 2001 (Código de Minas), en su artículo 61, establece que los minerales asociados o subproductos de la explotación pueden ser aprovechados por el titular.

Advertencia legal: La incorporación de valorización en el instrumento o documento técnico minero NO exime del cumplimiento de: (1) Plan de Manejo de DAM si materiales son PAF, (2) Tratamiento de aguas según Res. 631/2015, (3) Manejo de RESPEL si contienen Hg o CN, (4) Plan de cierre y rehabilitación.

El Contenido mínimo del Plan de Valorización en el instrumento o documento técnico minero aplicable es:

- Caracterización geoquímica de los relaves (pruebas ABA, NAG, TCLP) con actualización anual.
- Identificación de aplicaciones potenciales según composición mineralógica y demanda local.
- Diseño de infraestructura de procesamiento (clasificación, deshidratación, almacenamiento).
- Programa de muestreo y control de calidad del producto final.
- Acuerdos de encadenamiento productivo con industria de la construcción.
- Metas de reducción del volumen de relaves dispuestos (% anual).
- Plan de contingencia para materiales que no cumplan especificaciones.

3.3.3. Lineamiento 6. Mejorar la eficiencia hídrica en el proyecto minero

Prioridades de uso del agua: (Decreto 1076 de 2015, Art. 2.2.3.2.5.1): a) Consumo humano; b) Necesidades domésticas de interés comunitario; c) Necesidades domésticas individuales; d) Conservación y protección de flora y bosques; e) Aprovechamiento sostenible. La minería se ubica en la categoría (e), por lo cual NUNCA puede afectar los usos prioritarios (a-d).

3.3.3.1. Oportunidad de Economía Circular 1: Captación y uso responsable del agua

La captación debe realizarse siguiendo los principios de mínima afectación ambiental y priorizando

fuentes sostenibles. Una operación que no gestiona adecuadamente el recurso hídrico compromete todo el sistema aguas abajo, incrementando pasivos ambientales y sociales.



Dato clave – caudal ecológico: En Colombia, el caudal ecológico no está definido por una norma única, pero el IDEAM recomienda reservar aproximadamente el 25% del caudal mínimo en época seca como caudal ecológico para garantizar la permanencia del ecosistema acuático.

Para minería de pequeña escala, esto implica que, si una quebrada presenta 10 L/s en el nivel más bajo o caudal mínimo que en ciertas épocas del año tienen las aguas de un río por causa de la sequía, se recomienda no captar aproximadamente 2.5 L/s, dejando este volumen como reserva ambiental. La autoridad ambiental puede establecer restricciones mayores basadas en el índice de escasez y la presión sobre la cuenca.

Para asegurar una captación sostenible, el pequeño minero debe implementar las siguientes acciones:

- **Aforar la fuente:** Medir el caudal de la quebrada o río en época seca usando el método de balde y cronómetro (para caudales pequeños) o el método del flotador (para caudales mayores). Registrar al menos 3 mediciones.
- **Identificar otros usuarios:** Recorrer la quebrada aguas arriba y abajo para identificar bocatomas de acueductos, fincas con riego, abrevaderos. Registrar nombres y usos.
- **Calcular la demanda real:** Estimar el consumo de agua del molino, concentración y servicios auxiliares. Un molino de bolas típico consume 1.5-2.5 m³/t de mineral procesado.
- **Diseñar captación con sedimentador:** La bocatoma debe incluir rejilla para retener sólidos gruesos y un pequeño tanque de sedimentación antes de la conducción.
- **Instalar medidor de caudal:** Colocar un vertedero calibrado o medidor volumétrico en la entrada de la planta para registrar diariamente los litros captados.
- **Priorizar recirculación:** Diseñar el sistema para que el agua de proceso retorne al circuito después de sedimentar, reduciendo la captación fresca al mínimo.
- **Captar agua lluvia:** Instalar canaletas en techos de la planta y campamento. Un techo de 100 m² puede captar 200-800 m³/año según la zona.
- **Coordinar con la comunidad:** Acordar horarios de captación que no afecten el suministro doméstico, especialmente en época seca.

3.3.3.2. Oportunidad de Economía Circular 2: Recirculación del agua en el proceso de beneficio

La ENEC (2019) reconoce el agua como uno de los flujos estratégicos para la transición hacia una economía circular. En minería, este enfoque se traduce en incrementar al máximo la recirculación interna del agua, recuperándola desde relaves y efluentes para reutilizarla en operaciones como molienda, concentración o cianuración (MME & ATG, 2022). Sistemas de circuito cerrado pueden alcanzar más del 80% de recirculación, disminuyendo la demanda de agua fresca y la generación de vertimientos (Universidad de Córdoba, 2025). A continuación, se describen las tecnologías de tratamiento pasivas y de bajo costo aplicables a la minería de pequeña escala aurífera, orientadas a cerrar el ciclo hídrico (Recirculación de aguas) y convertir los efluentes en un recurso hídrico operativo (Pat-Espadas et al., 2018).

Tecnologías de tratamiento

Las tecnologías de tratamiento se clasifican en activas (requieren energía y reactivos continuos) y pasivas (operan por procesos naturales con mínima intervención). Para la minería de pequeña escala, se priorizan los sistemas pasivos y de bajo costo por su sostenibilidad operativa y menores requerimientos de personal especializado (Pat-Espadas et al., 2018; Universidad de Córdoba, 2025).

Tabla 3.22. Clasificación de tecnologías de tratamiento de aguas

Tipo	Características	Cuando Aplicar	Limitaciones	Fuente
Activo	Requiere energía, reactivos químicos y operación continua. Ejemplo: neutralización con cal, proceso INCO SO ₂ /Aire.	Cuando se requiere alta eficiencia y control preciso. Caudales altos o contaminantes específicos.	Alto costo operativo, requiere personal capacitado, genera lodos.	(MinMinas & MinAmbiente, 2002)
Pasivo	Opera por procesos naturales (gravidad, biorremediación). Ejemplo: humedales artificiales, sedimentadores.	Pequeña minería con espacio disponible. Caudales bajos a moderados. Tratamiento a largo plazo.	Mayor área requerida, tiempos de retención largos.	Pat-Espadas et al., 2018
Híbrido	Combina elementos activos y pasivos. Ejemplo: sedimentación + floculación + humedal.	Cuando se necesita balance entre costo y eficiencia. Condiciones variables de efluente.	Requiere diseño integrado, monitoreo periódico.	Universidad de Córdoba, 2025

Tratamientos Físicos (Separación Sólido-Líquido)

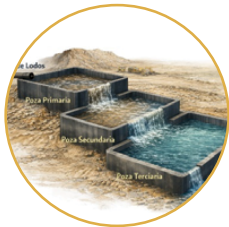
La tecnología de espesamiento y clarificación aplicada a fuentes hídricas en contextos mineros comprende el uso de pozas de sedimentación, espesadores o clarificadores (convencionales o de alta tasa) para separar los

sólidos en suspensión de las aguas de proceso o escorrentía, mediante sedimentación por gravedad asistida y no con floculantes. De este modo se obtiene un lodo o relave espesado para disposición o valorización interna y un agua clarificada que puede recircularse al proceso o descargarse de forma controlada al cuerpo de agua receptor, reduciendo la turbidez y la carga de sólidos que llegan a la fuente hídrica.

Sedimentación por Gravedad

Consiste en conducir las aguas cargadas de sólidos hacia estructuras de baja velocidad (pozas o lagunas de sedimentación), donde las partículas suspendidas se separan del agua por acción de la gravedad, formando un depósito de sedimentos en el fondo y permitiendo la obtención de un efluente superficial con menor turbidez para su descarga controlada al cauce natural.

Tabla 3.23. Abanico de tecnologías de sedimentación por gravedad



Pozos de sedimentación en cascada

Sistema de 3-5 pozos interconectados con flujo por gravedad. Tiempo de retención: 2-8 horas. Remoción SST: 60-80%.

Cuándo Aplicar

Ideal para MAPE. Proceso gravimétrico. Bajo costo. Requiere limpieza periódica.



Tanques de sedimentación

Tanques rectangulares o circulares con baja velocidad de flujo (<0.5 m/min). Volumen: 1-2 m³ por ton/día.

Cuándo Aplicar

Plantas de beneficio pequeñas. Decantación de sólidos gruesos y finos.



Lagunas de sedimentación

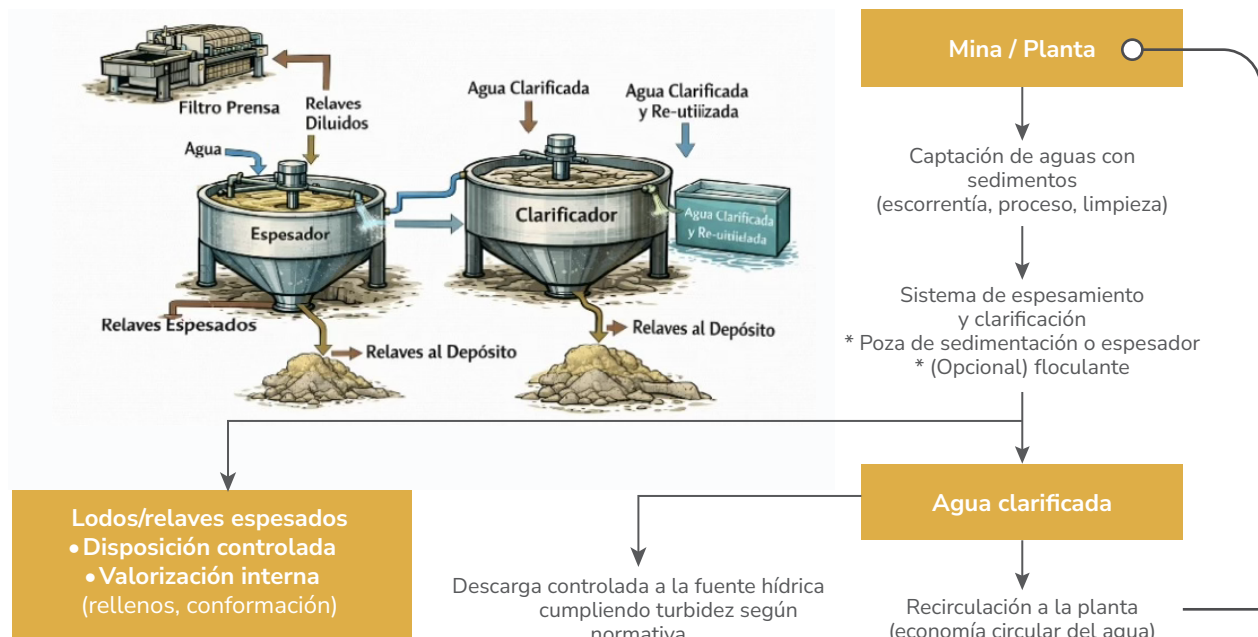
Lagunas artificiales. Tiempo de retención: 12-48 horas. Profundidad: 1-2 m. Área: 10-50 m² por L/s.

Cuándo Aplicar

Caudales mayores. Permite degradación natural por exposición UV.

Espesamiento y Clarificación

Figura 3.14. Explicación proceso de espesamiento y clarificación



Espeamiento es concentrar los sólidos de una pulpa o agua sucia, aumentando su porcentaje de sólidos, para que ocupe menos volumen y sea más fácil de manejar. Resultado:

- por abajo: lodo espeso / relave espesado
- por arriba: agua más clara, lista para seguir tratándose o recircularse.

Clarificación es remover sólidos en suspensión (que dan turbidez) para obtener agua lo más limpia posible en la parte superior. Resultado:

- por arriba: agua clarificada (baja turbidez)
- por abajo: una capa de lodos o sedimentos.

Tabla 3.24. Abanico de tecnologías de espeamiento y clarificación



Espesador convencional

Tanque cilíndrico con rastras rotativas. Underflow: 48-52% sólidos. Recuperación agua: 65-75%. Floculante: 10-50 g/t.

Cuándo Aplicar

Operaciones medianas (>50 t/día). Recircular agua clarificada a molienda.



Espesador alta densidad

Diseño cono profundo. Underflow: 54-70% sólidos. Recuperación agua: 85-95%.

Cuándo Aplicar

Cuando se requiere máxima recuperación de agua y reducción de volumen de relaves.



Clarificador

Enfocado en calidad del overflow. SST salida: <100 NTU. Recuperación agua: hasta 90%.

Cuándo Aplicar

Cuando el agua recuperada debe cumplir parámetros de calidad para reúso directo.

Filtración

Es hacer pasar el agua a través de un medio poroso para retener partículas y contaminantes y dejar pasar el agua “limpia”.

Tabla 3.25. Abanico de tecnologías de filtración



Filtro de arena y grava

Lecho de arena graduada (0.5-2 mm). Velocidad filtración: 5-15 m/h. Remoción SST: >90%. Requiere retrolavado.

Cuándo Aplicar

Pulimento final antes de recirculación. Económico y fácil de construir.

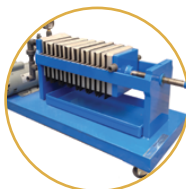


Filtro carbón activado

Lecho percolador con carbón activado de elevada área superficial. Remueve metales por adsorción.

Cuándo Aplicar

Posterior a sedimentación. Remoción de color, olor y trazas de metales.



Filtro prensa

Deshidratación mecánica de lodos. Torta: >80% sólidos. Permite disposición en seco (dry stacking).

Cuándo Aplicar

Eliminar necesidad de depósitos de relaves húmedos. Mayor inversión inicial.

Tratamientos Químicos

Destrucción de cianuro (CN)

El cianuro residual debe destruirse antes de verter o recircular agua de procesos de cianuración. El límite de cianuro en vertimientos según Resolución 631/2015 (MADS) es 1.0 mg/L. La destrucción del cianuro mediante oxidación química es fundamental para la recirculación segura del agua al proceso, siendo el método con H_2O_2 y $FeSO_4$ el más recomendado para pequeña minería por ser menos costoso y no dejar secuelas ambientales como el cloro (SGC, 2017; Universidad de Córdoba, 2025).

Tabla 3.26. Variedad de tecnologías de destrucción de cianuro

Proceso	Descripción y Mecanismo	Cuándo Aplicar
Proceso INCO (SO_2/Aire)	$SO_2 + O_2 + H_2O + CN^- \rightarrow CNO^- + H_2SO_4$. Requiere Cu como catalizador (50 mg/L). pH: 8-10. CN WAD: <50 mg/L.	Plantas medianas. Pulpas con alto contenido de sólidos. Robusto y ampliamente probado.
Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)	$H_2O_2 + CN^- \rightarrow CNO^- + H_2O$. Catalizado por cobre. pH: 9-10.5. Dosis: 3-7 g H_2O_2 /g CN. CN: <1 mg/L posible.	Pequeña minería. Soluciones clarificadas. Más simple que INCO. Menos costoso.
Sulfato ferroso ($FeSO_4$)	Coprecipitación de cianuros complejos como Azul de Prusia. Transforma complejos de Ag, Cd, Cu, Hg, Ni, Zn.	Segundo paso tras H_2O_2 . Neutralización de cianuros complejos con metales.
Degradación natural	Volatilización, oxidación UV, hidrólisis. Requiere pH >10 y exposición solar prolongada en lagunas.	Complemento a tratamientos químicos. No como método único. Clima soleado.

Neutralización y remoción de metales

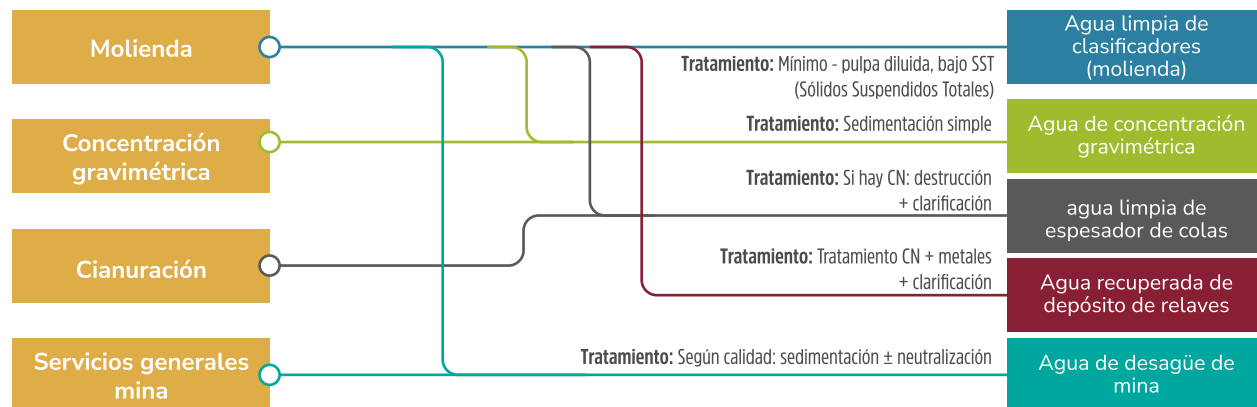
Tabla 3.27. Variedad de tecnologías de neutralización y remoción de metales

Proceso	Descripción y Mecanismo	Cuándo Aplicar
Neutralización con cal	$Ca(OH)_2$ eleva pH y precipita metales como hidróxidos. Dosificación: 1-5 kg/m ³ . Remoción Fe, Mn, Cu, Zn: >90%.	Drenaje ácido de mina. Método estándar, económico y disponible.
Coagulación-floculación	Sulfato de aluminio o cloruro férrico + polímero aniónico. SST (sólidos suspendidos totales): <50 mg/L. Turbiedad: <5 NTU.	Clarificación de aguas turbias. Requiere jar test para dosificación.
Precipitación sulfuros	Adición de NaHS o Na_2S precipita metales como sulfuros insolubles. pH: 7-9. Remoción Cu, Zn, Pb, Cd: >95%.	Efluentes con altas concentraciones de metales pesados. Requiere control estricto.
Adsorción carbón activado	Adsorción de metales disueltos y compuestos orgánicos. Capacidad varía según metal y pH.	Pulimento fino de trazas de metales y orgánicos. Tratamiento posterior a sedimentación.

Sistemas de recirculación: cerrando el ciclo del agua

La recirculación del agua es el corazón de la economía circular aplicada al recurso hídrico en minería. Representa la materialización del principio de “cerrar el ciclo”: el agua que sale de una etapa del proceso no se descarta, sino que se acondiciona y retorna como insumo a otra etapa, reduciendo simultáneamente la presión sobre fuentes naturales y la generación de vertimientos (Universidad de Córdoba, 2025; ENEC, 2019).

Figura 3.15. Representación del sistema de recirculación del agua en minería oro filón



3.3.3.3.Oportunidad de Economía Circular 3: Aprovechamiento de aguas lluvias. Sistema de captación para pequeña minería

Beneficios: reducción de costos por captación y tratamiento de agua fresca, menor dependencia de fuentes hídricas externas, cumplimiento normativo más sencillo al minimizar vertimientos, y reducción de la huella hídrica de la operación (SGC, 2017).

El aprovechamiento de aguas lluvias constituye una estrategia fundamental de economía circular para reducir la dependencia de fuentes hídricas superficiales y subterráneas en operaciones mineras. Para la pequeña minería de oro de filón, ubicada frecuentemente en zonas de alta precipitación como Chocó (>5000 mm/año), Antioquia (2000-4000 mm/año) y Cauca (2000-3000 mm/año), el agua lluvia representa un recurso abundante y de excelente calidad que puede suplir una parte significativa de las necesidades operativas (IDEAM, 2020).

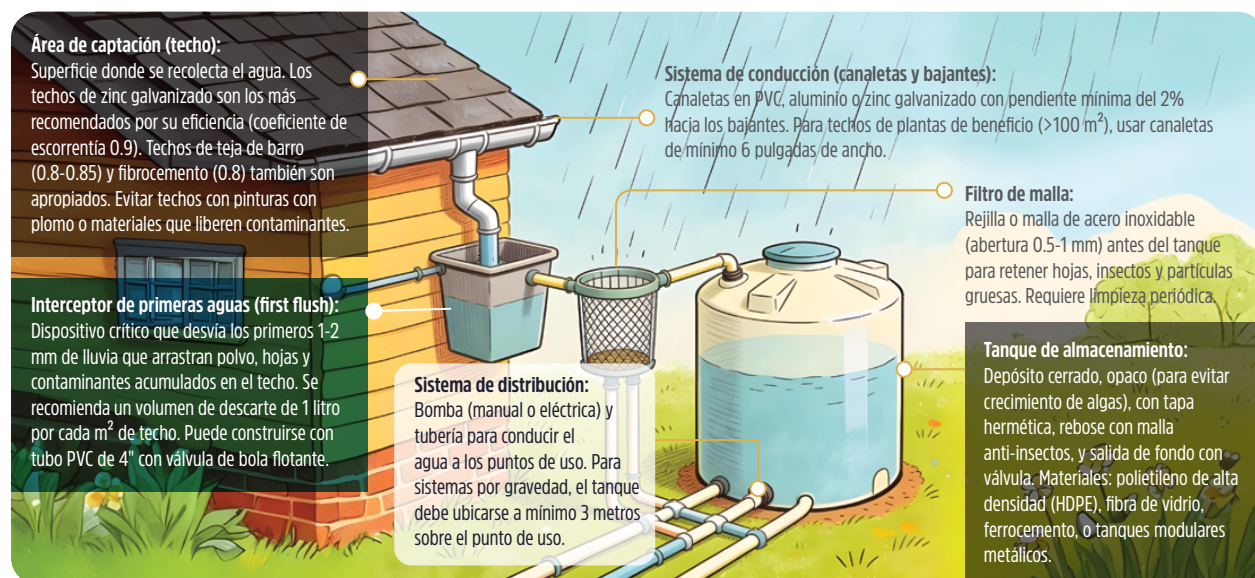
A diferencia del agua de proceso que requiere tratamiento para recirculación, el agua lluvia captada de techos limpios tiene calidad suficiente para uso directo en muchas etapas del beneficio minero, como preparación de reactivos, lavado de equipos, y alimentación de circuitos de molienda. Esto la convierte en un complemento ideal a los sistemas de recirculación, reduciendo la captación de fuentes naturales y los costos asociados a concesiones de agua (MinMinas & MinAmbiente, 2002).

Marco normativo: La Ley 373 de 1997 establece el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA), incorporando en su artículo 2 el aprovechamiento de aguas lluvias como fuente alternativa de abastecimiento y disponiendo en su artículo 5 el reúso obligatorio de aguas superficiales, subterráneas o pluviales en actividades que generen efluentes. Esta obligación se refuerza con el Decreto 1090 de 2018, que reconoce el uso de aguas lluvias como práctica de eficiencia hídrica dentro del PUEAA. De manera complementaria, el Decreto 1076 de 2015, en su artículo 2.2.3.2.16.2, establece que el aprovechamiento de aguas lluvias no requiere concesión siempre que no formen cauce ni atraviesen predios de terceros, facilitando su implementación en operaciones de pequeña minería aurífera.

Componentes del sistema de captación

Un sistema de captación de agua lluvia (SCALL) para pequeña minería consta de los siguientes componentes esenciales (OPS, 2004; FAO, 2013):

Figura 3.16. Esquema del sistema de captación



Diseño y dimensionamiento del sistema

El dimensionamiento del sistema requiere conocer la precipitación local y la demanda de agua. La fórmula básica para calcular el potencial de captación es (OPS, 2004; DOE, 2023):

$$Q = A \times P \times C \times \eta$$

Donde: Q = Volumen captable (m³/año) | A = Área de captación (m²) | P = Precipitación anual (m) | C = Coeficiente de escurrimiento (0.7-0.9) para techos | η = Eficiencia del sistema (0.75-0.90)

Integración del agua lluvia con el proceso minero

El agua lluvia captada puede integrarse estratégicamente al proceso de beneficio para maximizar su valor y reducir la demanda de agua de otras fuentes. La Guía Minero Ambiental de Explotación (2002) establece que las aguas lluvias que caen sobre el campamento deben tener un sistema de manejo independiente que evite su contaminación, permitiendo su aprovechamiento directo.

Los usos recomendados para agua lluvia en pequeña minería de oro de filón son:

Figura 3.17. Diferentes usos de agua lluvia en pequeña minería de oro filón



Preparación de reactivos:
El agua lluvia, por su baja dureza y ausencia de sales, es ideal para preparar soluciones de cianuro, cal, floculantes y otros reactivos. Reduce el consumo al no requerir corrección de pH o dureza.



Alimentación a molinos:
Como agua de dilución en circuitos de molienda, ya sea como fuente primaria o como complemento al agua recirculada del espesador.



Lavado de equipos y áreas:
Para limpieza de mesas concentradoras, canaletas, pisos de planta y mantenimiento general. No contamina y puede reutilizarse después del lavado.



Uso sanitario y doméstico:
Con tratamiento básico (filtración + desinfección con cloro o UV), puede usarse para consumo humano, duchas y sanitarios del campamento minero.



Reserva para emergencias:
antener un volumen mínimo de reserva para situaciones de sequía prolongada o interrupciones en el suministro principal

La integración de sistemas de captación de agua lluvia en pequeña minería representa una inversión de bajo costo con múltiples beneficios: reduce la presión sobre fuentes naturales, disminuye costos de operación, mejora la resiliencia ante sequías y demuestra compromiso ambiental ante autoridades y comunidades. Se trata de una tecnología madura, de fácil implementación, plenamente coherente con los principios de economía circular y producción más limpia (Universidad de Córdoba, 2025; MME & ATG, 2022).



Calidad del agua lluvia y tratamiento

El agua lluvia captada de techos limpios generalmente cumple con la mayoría de parámetros de calidad para uso industrial. Sin embargo, puede presentar contaminación por material particulado, microorganismos y, en zonas industriales, trazas de contaminantes atmosféricos. Los principales parámetros a considerar son (OPS, 2004; FAO, 2013):

- pH: El agua lluvia es naturalmente ligeramente ácida (pH 5.6-6.5) por disolución de CO₂. En zonas con contaminación atmosférica puede ser menor. Para preparación de reactivos de cianuración (que requieren pH >10), esto es ventajoso ya que facilita el control de pH.
- Turbidez y sólidos: Después del interceptor de primeras aguas y filtro de malla, típicamente <5 NTU. Si se requiere mayor claridad, usar filtro de arena.
- Microorganismos: Pueden estar presentes bacterias y coliformes por contaminación de aves. Para uso potable, desinfectar con cloro (2-5 mg/L) o luz UV.

- Dureza y sales: El agua lluvia es muy blanda (<50 mg/L CaCO₃), libre de sales y minerales. Esta es una ventaja significativa para procesos químicos.

3.4. APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS: ETAPA DE CIERRE DE MINA

Durante las actividades de cierre y reconfiguración de áreas intervenidas, es importante garantizar la estabilidad física de taludes, botaderos, pilas de material y depósitos de relaves, con el fin de prevenir deslizamientos, erosión, pérdida de cobertura vegetal o afectaciones a la seguridad de las personas y al medio ambiente.

Como criterio general, se recomienda que las obras de cierre alcancen un Factor de Seguridad (FS) igual o superior a 1,5, valor comúnmente utilizado como referencia para condiciones permanentes.

Metodologías utilizadas para evaluar la estabilidad

Existen diferentes metodologías reconocidas internacionalmente para evaluar la estabilidad geotécnica:

Metodología	Aplicación principal	Uso recomendado
Bishop	Taludes en suelos y materiales sueltos.	Evaluación de taludes en depósitos aluviales, botaderos y pilas de estériles.
Janbu	Taludes con geometrías complejas o diferentes materiales.	Evaluación de depósitos heterogéneos y terrenos irregulares.
Morgenstern-Price	Análisis avanzado de estabilidad.	Taludes altos, botaderos o condiciones complejas.
Hoek & Bray	Taludes en roca.	Canteras y explotaciones desarrolladas en macizos rocosos.

Estas metodologías permiten determinar si las fuerzas que mantienen estable un talud son suficientes para resistir las fuerzas que podrían generar una falla o deslizamiento.

Procedimientos prácticos para el pequeño minero

Durante las etapas de cierre se recomienda realizar las siguientes verificaciones:

Acciones recomendadas ante indicadores de alerta temprana de inestabilidad

Durante las actividades de operación, cierre y postcierre, el titular minero debe realizar inspecciones periódicas para identificar señales que puedan indicar problemas de estabilidad física. Cuando se detecten las siguientes condiciones, se recomienda implementar las acciones preventivas descritas a continuación.

Aspecto a verificar	Método práctico de evaluación
Presencia de grietas en taludes	Inspección visual periódica.
Erosión superficial	Inspección después de lluvias.
Filtraciones o acumulación de agua	Observación directa y control de drenajes.
Desprendimiento de material	Monitoreo visual de taludes y botaderos.
Asentamientos o hundimientos	Seguimiento topográfico o inspección visual.
Estado de la cobertura vegetal	Verificación periódica de revegetación.
Estabilidad de botaderos y pilas	Inspección de pendientes y drenajes.

Tabla 3.28. Acciones recomendadas para la inestabilidad

Indicador de alerta	Posible causa	Acción recomendada
Aparición de grietas en la corona del talud	Inicio de movimientos del terreno o pérdida de estabilidad.	Delimitar el área, restringir el acceso, realizar monitoreo de la evolución de las grietas y solicitar evaluación geotécnica.
Inclinación de árboles, cercas o estructuras	Movimientos lentos del terreno o asentamientos diferenciales.	Inspeccionar la zona, verificar presencia de deformaciones adicionales y evaluar posibles movimientos de masa.

Indicador de alerta	Posible causa	Acción recomendada
Desprendimiento frecuente de material	Erosión, fracturamiento o pérdida de resistencia del talud.	Retirar material inestable cuando sea seguro hacerlo, reducir pendientes si es necesario e incrementar la frecuencia de monitoreo.
Filtraciones permanentes de agua	Presión de agua dentro del terreno o problemas de drenaje.	Implementar drenajes superficiales o subdrenes, controlar escorrentías y evitar acumulación de agua en el área.
Formación de cárcavas o erosión profunda	Escorrentía superficial no controlada.	Construir canales de drenaje, zanjas de coronación, disipadores de energía y realizar estabilización superficial del terreno.
Hundimientos o deformaciones del terreno	Asentamientos, vacíos subterráneos o pérdida de soporte.	Restringir actividades en la zona afectada, realizar inspección detallada y evaluar medidas de estabilización.
Acumulación de agua en zonas de cierre	Deficiencias de drenaje o cambios topográficos.	Mejorar la evacuación de aguas lluvias, reconformar superficies y garantizar pendientes adecuadas para el drenaje.

Medidas preventivas generales

Ante la presencia de cualquiera de estos indicadores se recomienda:

- Suspender temporalmente las actividades en áreas de alto riesgo.
- Delimitar y señalizar las zonas afectadas.
- Mantener registros fotográficos de las condiciones observadas.
- Verificar el funcionamiento de canales y sistemas de drenaje.
- Realizar inspecciones después de lluvias intensas.
- Actualizar los planes de mantenimiento y monitoreo del cierre.
- Solicitar apoyo técnico especializado cuando se identifiquen condiciones que puedan comprometer la estabilidad de taludes, botaderos o depósitos de relaves.

Clasificación práctica de la respuesta

Nivel de alerta	Condición observada	Acción
Bajo	Erosión superficial leve o acumulación puntual de agua.	Corregir drenajes y continuar monitoreo.
Medio	Grietas pequeñas, erosión moderada o filtraciones localizadas.	Implementar medidas correctivas y aumentar frecuencia de inspección.
Alto	Grietas extensas, deformaciones visibles, hundimientos o desprendimientos frecuentes.	Suspender actividades en el área y realizar evaluación geotécnica especializada.

La estabilidad física de las áreas intervenidas es un requisito fundamental para garantizar el éxito de las estrategias de economía circular implementadas durante el cierre minero. La reutilización de materiales, la reconformación geomorfológica y la restauración del paisaje deben mantenerse estables en el tiempo para evitar la generación de nuevos pasivos ambientales y asegurar la sostenibilidad de las intervenciones realizadas.

Recomendaciones para depósitos de relaves y botaderos

Durante el cierre de depósitos de relaves y botaderos se recomienda:

- Garantizar el adecuado drenaje superficial.
- Evitar pendientes excesivamente inclinadas.
- Implementar coberturas vegetales cuando sea técnicamente viable.
- Controlar procesos erosivos.
- Monitorear periódicamente las condiciones de estabilidad.
- Verificar que no existan evidencias de movimientos de masa.

¿Cómo puede el pequeño minero implementar medidas de estabilidad durante el cierre de botaderos y depósitos de relaves?

Tabla 3.29. Medidas para manejo de relaves

Medida recomendada	¿Cómo implementarla?	Beneficio esperado
Garantizar el adecuado drenaje superficial	Construir zanjas de coronación en la parte superior de los taludes para interceptar las aguas lluvias. Instalar cunetas, canales de drenaje y disipadores de energía para conducir el agua de manera controlada hacia zonas seguras. Mantener libres de sedimentos los drenajes mediante limpieza periódica.	Reduce infiltraciones, erosión y posibles deslizamientos.
Evitar pendientes excesivamente inclinadas	Reperfilar los taludes durante el cierre para disminuir la inclinación. En materiales sueltos se recomienda conformar terrazas o bermas intermedias. Evitar taludes verticales en botaderos y depósitos de relaves.	Incrementa la estabilidad física y reduce el riesgo de falla.
Implementar coberturas vegetales	Colocar una capa de suelo orgánico sobre la superficie del depósito o botadero y sembrar especies nativas adaptadas a la zona. Utilizar hidrosiembra o revegetación manual cuando sea posible.	Reduce erosión, mejora el paisaje y favorece la recuperación ecológica.
Controlar procesos erosivos	Instalar barreras vivas, geotextiles biodegradables, trinchos, barreras de retención o sistemas de protección superficial en áreas vulnerables. Mantener cobertura vegetal permanente.	Disminuye pérdida de material y formación de cárcavas.
Monitorear periódicamente las condiciones de estabilidad	Realizar inspecciones visuales al menos después de lluvias intensas y registrar observaciones en formatos sencillos con fotografías. Verificar drenajes, taludes y zonas revegetadas.	Permite detectar problemas antes de que se conviertan en fallas mayores.
Verificar que no existan evidencias de movimientos de masa	Revisar periódicamente la aparición de grietas, hundimientos, inclinación de árboles, desprendimientos de material o deformaciones del terreno. Comparar fotografías tomadas en diferentes fechas.	Facilita la identificación temprana de riesgos geotécnicos.

¿CÓMO PUEDE EL PEQUEÑO MINERO GARANTIZAR LA ESTABILIDAD DURANTE EL CIERRE DE DEPÓSITOS DE RELAVES Y BOTADEROS?

1. DRENAJE SUPERFICIAL

- Construir zanja de coronación para interceptar aguas lluvias.
- Conducir el agua por cunetas y canales hacia sitios seguros.
- Mantener los drenajes limpios y sin obstrucciones.

2. PENDIENTES ADECUADAS

- Evitar taludes muy inclinados.
- Reperfilar con pendientes estables.
- Construir terrazas o bermas intermedias.

3. COBERTURA VEGETAL

- Colocar capa de suelo orgánico.
- Sembrar especies nativas.
- Usar hidrosiembra si es posible.

4. CONTROL DE EROSIÓN

- Instalar barreras vivas, trinchos o geotextiles.
- Proteger la superficie del impacto de la lluvia.
- Evitar formación de cárcavas.

5. MONITOREO PERIÓDICO

- Realizar inspecciones visuales frecuentes (especialmente después de lluvias).
- Revisar drenajes, taludes y coberturas vegetales.
- Registrar observaciones y tomar fotografías.

6. VERIFICAR QUE NO EXISTAN EVIDENCIAS DE MOVIMIENTOS DE MASA

- Revisar grietas, hundimientos, inclinación de árboles, filtraciones o desprendimientos.
- Comparar fotografías de diferentes fechas.
- Actuar de inmediato ante cualquier señal de alerta.

OBJETIVO

Lograr un cierre estable, seguro y sostenible, evitando deslizamientos, erosión y nuevos impactos ambientales.

BREVE RECORDATORIO

- Mantener los drenajes siempre funcionando.
- No dejar pendientes muy inclinadas.
- Proteger el suelo con vegetación.
- Inspeccionar y registrar periódicamente.
- Actuar a tiempo ante cualquier alerta.

Lista de verificación práctica para el pequeño minero

Antes de dar por finalizadas las actividades de cierre, se recomienda verificar que:

- No existan grietas visibles en taludes o botaderos.
- No se presenten filtraciones permanentes de agua.
- Los canales y drenajes funcionen adecuadamente.
- No existan zonas con erosión severa o cárcavas.
- Las pendientes sean estables y uniformes.
- Se haya establecido cobertura vegetal en las áreas intervenidas.
- No existan evidencias de deslizamientos o movimientos de masa.
- Se cuente con registros fotográficos de seguimiento.

La reutilización de materiales, la reconformación geomorfológica y las estrategias de recuperación del paisaje deben desarrollarse garantizando condiciones adecuadas de estabilidad física. Un cierre estable reduce riesgos futuros, favorece la restauración del área intervenida y contribuye a la sostenibilidad de largo plazo del proyecto minero.

3.4.1. Lineamiento 7. Simbiosis industrial y valorización de residuos

El aprovechamiento de estériles y relaves secos representa una de las oportunidades más relevantes para promover la economía circular en la etapa de cierre. Su potencial se fundamenta en la posibilidad de reincorporar estos materiales a ciclos productivos externos o utilizarlos internamente en actividades de cierre y estabilización, siguiendo las directrices técnicas establecidas para el sector minero (Ministerio de Minas y Energía & ATG, 2022).

3.4.1.1. Oportunidad de Economía Circular 1: Modelos regenerativos vs. rehabilitación tradicional, soluciones basadas en la naturaleza (SbN)

Principio de Economía Circular: El modelo regenerativo persigue funcionalidad ecosistémica e integración paisajística más allá del enfoque tradicional de “seguro y estable”. Esto se alinea con el principio de “regenerar la naturaleza” ICMM (2019), IUCN (2020) y SER (2019).

Comparación detallada entre rehabilitación tradicional y modelo regenerativo

Tabla 3.30. Comparación rehabilitación tradicional vs. modelo regenerativo

Aspecto	Rehabilitación Tradicional	Modelo Regenerativo	Aspecto	Rehabilitación Tradicional	Modelo Regenerativo
Objetivo principal	Estabilidad física y química	Funcionalidad ecológica + servicios ecosistémicos	Gestión agua	Captación, tratamiento químico	Humedales, ciclo restaurado
Estado final	Sitio estable, uso básico	Ecosistema funcional, resiliente, biodiverso	Vegetación	Rápido crecimiento, cobertura	Nativas, sucesión, estructura bosque
Horizonte temporal	Corto plazo (2-5 años)	Mediano-largo (5-20+ años)	Biodiversidad	No es objetivo	Objetivo explícito
Enfoque diseño	Ingeniería civil (muros, coberturas)	Ingeniería ecológica (sucesión, SbN)	Servicios ecosistémicos	Limitados	Múltiples (carbono, agua, hábitat)
Mantenimiento	Perpetuo (reparaciones, químicos)	Decreciente (autosostenible)	Valor post-cierre	Pasivo (vigilancia)	Activo de capital natural
Costos largo plazo	Altos y continuos	Bajos después de establecimiento	Licencia social	Cumplimiento mínimo	Alto valor, legado positivo
			Adaptabilidad clima	Baja (estructuras rígidas)	Alta (resilientes, autoreparación)

Fuente: Elaboración propia con base en Ellen MacArthur Foundation (2015), SER (2004), ICMM (2019).

El modelo regenerativo es especialmente viable para la pequeña minería por las siguientes razones:

- Menor escala de intervención: áreas más pequeñas permiten enfoques intensivos en biodiversidad.
- Disponibilidad de mano de obra local para revegetación y mantenimiento.
- Acceso a materiales locales: semillas nativas, compost, suelo sin costos de transporte.
- Tiempos compatibles: cierre progresivo permite maduración de sistemas ecológicos.
- Costos accesibles: SbN y técnicas regenerativas 60-90% menores que convencionales.

3.4.1.2. Oportunidad de Economía Circular 2: Reconversión paisajística y uso del suelo

La reconversión paisajística constituye una de las principales oportunidades para aplicar principios de economía circular en la etapa de cierre. La “Propuesta de Lineamientos Técnicos de Política de Buenas Prácticas para Estandarizar los Procesos de Economía Circular en la Actividad Minera (Ministerio de Minas y Energía – ATG Ltda., 2021).” establece que el cierre debe garantizar estabilidad física ($FS \geq 1,5$), química (Res. 631/2015) y ecológica (cobertura $\geq 70\%$); integrar las áreas intervenidas con el paisaje circundante y habilitar un uso seguro del suelo acorde con la vocación del territorio. De manera complementaria, la “Guía para la elaboración del plan de cierre y abandono de proyectos mineros, (ANLA, 2022)” señala que el cierre implica actividades de restauración, rehabilitación, reconformación morfológica y definición del uso final del suelo, orientadas a recuperar funciones ecosistémicas y reducir riesgos ambientales.

El Plan de Cierre y Abandono (PCA) es un capítulo del Estudio de Impacto Ambiental que debe presentarse desde el licenciamiento. La Guía ANLA (2022) define diez componentes mínimos que articulan medidas técnicas, sociales y financieras del cierre.



Desde la economía circular, esta etapa permite cerrar ciclos biofísicos, reutilizar recursos existentes (suelo, material de conformación, vegetación), evitar movimientos adicionales de tierra y consolidar ecosistemas autosostenibles con mínima dependencia de insumos externos.

Las oportunidades principales pueden agruparse en los siguientes componentes:



Reconformación geomorfológica y manejo del drenaje

La reconformación morfológica es una actividad esencial del cierre minero. Su objetivo principal es alcanzar una estabilidad física duradera, lo cual implica configurar taludes con niveles de amenaza bajos frente a remociones en masa y adecuar los sistemas de drenaje a la nueva topografía generada. Esto requiere considerar parámetros como precipitación, escorrentía, pendientes y capacidad del suelo para evitar erosión o acumulaciones críticas de agua. (Ministerio de Minas y Energía – ATG Ltda., 2021)

Desde la economía circular, esta actividad favorece la optimización del uso de materiales disponibles en la zona –como estériles estabilizados o rocas aptas– reduciendo transporte externo y manteniendo el ciclo de materiales dentro del área intervenida.



Revegetación, restauración ecológica e integración con el paisaje

La recuperación paisajística y la integración con el entorno corresponden a actividades mínimas dentro del cierre minero. Esto implica restituir coberturas vegetales que protejan el suelo, restablecer la conectividad ecológica y habilitar áreas capaces de ofrecer servicios ecosistémicos, incluidos aquellos de carácter cultural (Ministerio de Minas y Energía – ATG Ltda., 2021)

Los procesos de restauración deben orientarse a la estabilidad ecológica del sitio y a su coherencia funcional con el paisaje circundante (ANLA 2022). Desde la economía circular, estas acciones permiten reactivar los ciclos biogeoquímicos del ecosistema y favorecer la recuperación natural del sitio, reduciendo necesidades de insumos externos y promoviendo una transición progresiva hacia condiciones ecológicas estables.



Definición del uso final del suelo y articulación territorial

El cierre debe asegurar un uso seguro y apto del suelo posterior a la explotación articulado con los instrumentos de ordenamiento territorial como POT, EOT y POMCA. Asimismo, el componente socioeconómico debe promover nuevas prácticas económicas en el post-cierre, coherentes con la vocación del territorio.

La economía circular orienta esta definición hacia usos que maximicen el valor del área recuperada, tales como: restauración ecológica, conservación, producción sostenible de bajo impacto, infraestructura comunitaria o zonas destinadas a la provisión de servicios ecosistémicos.

3.4.2. Marco institucional de pasivos ambientales mineros

La Ley 2327 de 2023 establece el marco vigente para la identificación, gestión y recuperación de pasivos ambientales en Colombia. Para la pequeña minería de oro filón donde son frecuentes los socavones, entable y depósitos de relaves abandonados sin titular conocido este marco es de aplicación obligatoria. Cinco instrumentos institucionales sintetizan el régimen:



3.5. APLICACIÓN LÍNEA ESTRATÉGICA TRANSVERSAL PARA TODAS LAS ETAPAS MINERAS

3.5.1. Lineamiento 8: Establecer indicadores de monitoreo y verificación

Para que la gestión preventiva sea efectiva, deben definirse indicadores verificables e implementarse monitoreo sistemático. La siguiente tabla presenta un conjunto integral de 12 indicadores de monitoreo organizados en 4 categorías:

Indicadores de monitoreo para gestión preventiva de impactos ambientales residuales

Principio de Economía Circular: El monitoreo de indicadores de EC (recirculación de agua, reutilización de materiales, valorización de subproductos) debe integrarse con los indicadores ambientales tradicionales para medir el avance hacia una minería circular.

Tabla 3.31. Indicadores de monitoreo para gestión preventiva de impactos ambientales residuales

	Indicador	Meta / Criterio	Cómo Medirlo	Frecuencia	Quién
Agua (Básico)	1. pH del agua de salida	>6.0	Tirillas de pH o pHmetro portátil	Semanal	Operador
	2. Color del agua	Clara, sin turbidez	Observación visual en botella transparente	Semanal	Operador
	3. Agua recirculada	≥50%	Estimar: ¿cuánta agua vuelve al proceso vs. se pierde?	Mensual	Jefe mina
	4. CN en agua (si aplica)	<1 mg/L	Kit colorimétrico CN o laboratorio	Semanal	Operador
Materiales	5. Separación de materiales	Sí/No cumple	Verificar: ¿hay áreas separadas para estéril bueno y malo?	Mensual	Jefe mina
	6. Tierra negra guardada	100% preservado	Registro en cuaderno de volumen guardado	Al remover	Operador
	7. Pozas funcionando	100% operativas	Inspección visual: ¿hay fugas, desbordamientos, sedimentos acumulados?	Semanal	Operador
Revegetación	8. Plantas en vivero	≥100 plantas	Conteo directo de plantas listas para siembra	Trimestral	Encargado
	9. Supervivencia siembras	≥60% vivas	Contar: de cada 10 sembradas, ¿cuántas están vivas?	Trimestral	Encargado
	10. Cobertura verde	≥50% del área	Estimación visual o foto desde punto fijo	Semestral	Jefe mina
Apoyo técnico	11. Prueba ABA de materiales	NP/AP >2:1	Laboratorio especializado (solo en exploración)	Una vez	Geólogo
	12. Metales en agua	Según Res.631	Laboratorio acreditado (Fe, Mn, As, Hg)	Semestral	Lab. externo

Elaboración propia con base en ANLA (2016), ICMM (2019), MME & ATG (2021), adaptado para viabilidad en pequeña minería

Indicadores de monitoreo y verificación en la valorización de subproductos

El seguimiento a la implementación de la valorización de subproductos requiere indicadores medibles, alcanzables y pertinentes para el contexto de la pequeña minería. Estos indicadores permiten medir el nivel de cumplimiento de los objetivos planteados, conocer el valor generado en las dimensiones económica, ambiental y social, e identificar el avance hacia modelos de negocio circulares (MME & ATG, 2022; MADS & MinCIT, 2019).

Tabla 3.32. Indicadores de valorización de relaves

Indicador	Fórmula	Meta sugerida	Frecuencia
Tasa de valorización de relaves	$(\text{Ton relaves valorizados} / \text{Ton relaves generados}) \times 100$	$\geq 20\%$ año 1; $\geq 40\%$ año 3	Mensual
Recuperación de oro	$(\text{g Au recuperado} / \text{g Au en relaves}) \times 100$	$\geq 50\%$ del contenido	Por lote procesado
Índice de caracterización	$(\text{Depósitos caracterizados} / \text{Total depósitos}) \times 100$	100% en año 1	Anual
Subproductos comercializados	Número de subproductos con venta efectiva	≥ 1 en año 2	Semestral

Fuente: Elaboración propia con base en MME & ATG (2022), Ellen MacArthur Foundation (2015), SGC (2017-2019).

Tabla 3.33. Indicadores de valorización para materiales de construcción

Indicador	Fórmula	Meta sugerida	Frecuencia
Relaves geoquímicamente estables	$(\text{Ton relaves NP/AP} \geq 3 / \text{Total relaves}) \times 100$	Caracterizar 100%	Anual
Pruebas geoquímicas completadas	Número de pruebas ABA, NAG y TCLP realizadas	Mínimo 3 por depósito	Por depósito nuevo
Productos fabricados	Unidades de bloques, adoquines o mortero producidos	≥ 500 und/año (piloto)	Trimestral
Cumplimiento NTC	$(\text{Lotes aprobados} / \text{Lotes producidos}) \times 100$	$\geq 90\%$	Por lote

Fuente: Elaboración propia con base en Torres et al. (2024), Cerón & Gutiérrez (2019), INAP (2014).

Nota de implementación: Los indicadores propuestos pueden registrarse en formatos simples (cuaderno de campo o planilla Excel) y reportarse junto con el Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA). La frecuencia de monitoreo se adaptó a la capacidad operativa de la pequeña minería, priorizando indicadores de fácil medición con equipos básicos (balanza, cinta métrica, registros de venta). Se recomienda incluir estos indicadores en el plan de valorización del instrumento o documento técnico minero aplicable.

Indicadores de monitoreo y verificación en la eficiencia hídrica

Los siguientes indicadores constituyen el núcleo del sistema de monitoreo hídrico para pequeña minería. Están diseñados para ser medidos con herramientas simples (balde, cronómetro, cinta métrica) y registrados en una bitácora diaria o semanal.

Tabla 3.34. Indicadores de monitoreo y verificación en la eficiencia hídrica

Indicador	Fórmula de Cálculo	Meta Año 1	Meta Año 3	Herramienta de Medición
Índice de Recirculación Hídrica (IRH)	$\text{IRH} = (\text{Agua recirculada} / \text{Agua total usada}) \times 100$	$\geq 70\%$	$\geq 85\%$	Balde aforado + cronómetro en entrada y salida de piscinas
Consumo Específico de Agua (CEA)	$\text{CEA} = \text{Agua fresca captada (m}^3) / \text{Mineral procesado (ton)}$	$\leq 1.5 \text{ m}^3/\text{t}$	$\leq 0.8 \text{ m}^3/\text{t}$	Medidor volumétrico o vertedero calibrado + báscula de mineral
Índice de Fuentes Alternativas (IFA)	$\text{IFA} = (\text{Agua lluvia} + \text{Agua desagüe}) / \text{Agua total} \times 100$	$\geq 15\%$	$\geq 30\%$	Registro de tanques de agua lluvia + caudal de bombeo de mina
Índice de Calidad de Efluente (ICE)	$\text{ICE} = (\text{Parámetros cumplidos} / \text{Parámetros medidos}) \times 100$	$\geq 80\%$	100%	Análisis trimestral de laboratorio (pH, SST, metales)
Tasa de Pérdidas Hídricas (TPH)	$\text{TPH} = (\text{Agua no recuperada} / \text{Agua entrada proceso}) \times 100$	$\leq 30\%$	$\leq 15\%$	Balance hídrico: Entrada - Recirculación - Evaporación

Fuente: Elaboración propia con base en ICMM Water Stewardship Framework (2023), Ellen MacArthur Foundation (2020), MME & ATG (2022), Universidad de Córdoba (2025).

Métodos de medición de bajo costo para pequeña minería

La medición de indicadores hídricos no requiere equipos sofisticados. A continuación se presentan métodos prácticos y económicos validados para operaciones de pequeña escala.

Tabla 3.35. Métodos de medición para el componente hídrico accesibles para la pequeña minería

Parámetro	Método de Campo	Materiales Requeridos
Caudal (L/s)	Método volumétrico: llenar balde de volumen conocido y cronometrar. $Q = V/t$. Repetir 3 veces y promediar.	Balde de 10-20 L calibrado, cronómetro de celular, libreta de registro
Volumen en tanques (m³)	Medir dimensiones del tanque (largo × ancho × altura del agua) o usar vara graduada para tanques cilíndricos.	Cinta métrica de 5m, vara de madera graduada cada 10 cm
pH	Tiras indicadoras de pH o medidor digital portátil. Sumergir en muestra y comparar color con escala.	Tiras de pH (paquete 100 unidades) o medidor digital básico
Sólidos Suspendidos (visual)	Prueba del disco Secchi: profundidad a la que desaparece el disco blanco en la piscina. Menor profundidad = más sólidos.	Disco blanco de 20 cm con cuerda graduada cada 10 cm
Temperatura	Termómetro de mercurio o digital sumergido en el punto de muestreo durante 1 minuto.	Termómetro de laboratorio o digital
Precipitación	Pluviómetro casero: recipiente cilíndrico graduado expuesto a la intemperie. Medir cada 24 horas.	Botella PET cortada con escala en mm o pluviómetro comercial

Fuente: Elaboración propia con base en SGC (2017), Guía Minero Ambiental de Explotación (2002), OPS (2004).

Sistema de registro y seguimiento

El registro sistemático de datos es esencial para el cálculo de indicadores y para demostrar el cumplimiento normativo ante las autoridades ambientales. Se recomienda implementar un sistema de registro sencillo que pueda ser llevado manualmente o en una hoja de cálculo básica.

Formato de bitácora diaria de agua

La bitácora diaria debe incluir como mínimo los siguientes campos:

Fecha y responsable del registro	Caudal de entrada de agua fresca (L/min o m³/día)
Caudal de agua recirculada (L/min o m³/día)	Volumen de agua lluvia captada (si aplica)
Toneladas de mineral procesado	pH de entrada y salida del sistema de tratamiento
Observaciones (derrames, mantenimientos, lluvias intensas)	

Indicadores para evaluar la reducción de estériles y la gestión preventiva de relaves

La implementación de estrategias de economía circular en minería de oro filón debe estar acompañada por indicadores que permitan evaluar el aprovechamiento eficiente del recurso mineral, la reducción de residuos y la disminución de pérdidas durante la explotación.

Los siguientes indicadores pueden ser utilizados por pequeños mineros para monitorear la eficiencia de sus operaciones.

1. Relación Estéril / Mineral (Strip Ratio)

Este indicador muestra cuántas toneladas de material sin valor económico (estéril) deben removerse para extraer una tonelada de mineral útil.

Fórmula:

Relación Estéril/Mineral = Toneladas de Estéril Removido ÷ Toneladas de Mineral Extraído

Interpretación:

- Valores bajos indican una explotación más eficiente.
- Valores altos pueden indicar deficiencias en la planeación minera o excesiva extracción de material estéril.

Ejemplo:

Si se extraen:

- 1.000 toneladas de estéril
- 500 toneladas de mineral

Relación E/M = $1.000 \div 500 = 2$

Esto significa que por cada tonelada de mineral se removieron 2 toneladas de estéril.

2. Índice de Dilución Minera

La dilución corresponde al material estéril que ingresa involuntariamente junto con el mineral durante la extracción.

Fórmula:

Dilución (%) = $[(\text{Toneladas Procesadas} - \text{Toneladas de Mineral Planificadas}) \div \text{Toneladas de Mineral Planificadas}] \times 100$

Interpretación:

- Menor dilución significa mejor selectividad minera.
- Una alta dilución aumenta costos de transporte y procesamiento.

Valores orientativos:

Dilución (%)	Interpretación
< 10 %	Excelente
10 - 20 %	Aceptable
> 20 %	Requiere mejoras operativas

Ejemplo:

Mineral estimado: 100 t

Material enviado a planta: 120 t

Dilución = $((120-100)/100) \times 100$

Dilución = 20 %

3. Recuperación Minera

Mide qué porcentaje del mineral identificado en el diseño de explotación realmente fue extraído.

Fórmula:

Recuperación Minera (%) = $(\text{Mineral Extraído} \div \text{Mineral Estimado}) \times 100$

Interpretación:

- Valores altos indican buen aprovechamiento del recurso.
- Valores bajos pueden representar pérdidas de mineral.

Meta recomendada:

$\geq 90 \%$

4. Pérdida de Mineral

Corresponde al mineral que permanece sin extraer durante la explotación.

Valores orientativos:

Fórmula:

Pérdida (%) = $[(\text{Mineral Estimado} - \text{Mineral Extraído}) \div \text{Mineral Estimado}] \times 100$

Interpretación:

- Mientras menor sea el porcentaje, mejor será el aprovechamiento del yacimiento.

Pérdida (%)	Interpretación
< 5 %	Excelente
5 - 10 %	Aceptable
> 10 %	Requiere mejoras operativas

5. Aprovechamiento de Materiales

Permite cuantificar el porcentaje de materiales que son reutilizados o valorizados en lugar de ser dispuestos como residuos.

Fórmula:

Aprovechamiento (%) = $(\text{Material Aprovechado} \div \text{Material Generado}) \times 100$

Ejemplo:

Material generado: 500 toneladas

Material reutilizado: 300 toneladas

Aprovechamiento = 60 %

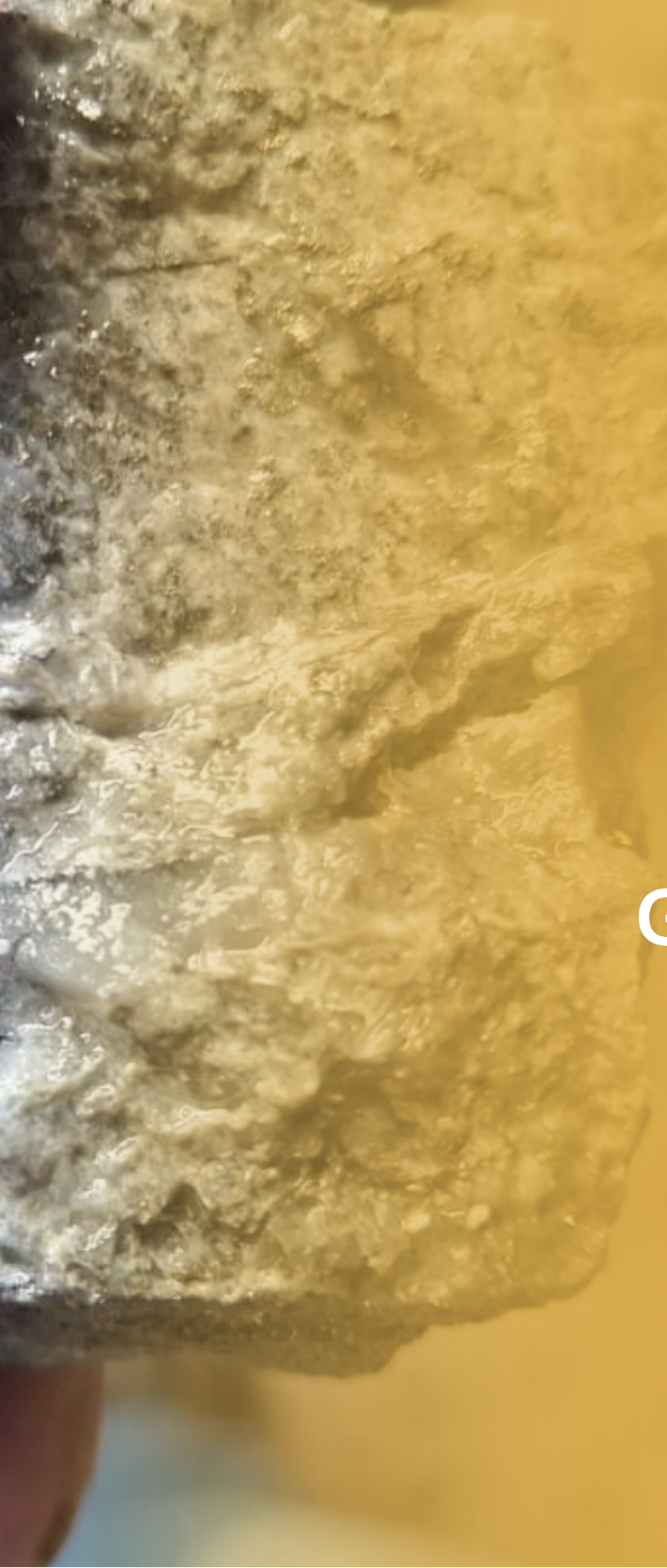
La reducción de la dilución, la disminución de la relación estéril/mineral, la minimización de pérdidas y el aprovechamiento de materiales contribuyen directamente a:

- Reducir la generación de residuos mineros.
- Disminuir la necesidad de nuevas áreas de disposición.
- Optimizar el uso de recursos naturales.
- Reducir costos de operación.
- Incrementar la recuperación del recurso mineral.
- Mejorar el desempeño ambiental y económico del proyecto.

Por esta razón, se recomienda que el titular minero registre periódicamente estos indicadores y los utilice como herramienta de seguimiento para evaluar la efectividad de las estrategias de economía circular implementadas en la operación.







4

GLOSARIO

Aa

ABA (Acid Base Accounting)-Balance Ácido-Base: son pruebas geoquímicas que permiten saber si un material de mina: puede generar drenaje ácido (PAF), o no genera acidez (NAF). En minería de oro se usan

para: clasificar estériles y relaves, separar material PAF y NAF, diseñar botaderos y coberturas, prevenir drenaje ácido de mina (DAM), cumplir requisitos ambientales. Las pruebas ABA comparan: Potencial de Acidez (PA): Depende del contenido de azufre (sulfuros como piritas) y Potencial de Neutralización (PN): Depende de minerales carbonatados (caliza, dolomita). Se calcula un balance: $NNP=PN-PA$ y $NPR=PN/PA$. “ $NPR<1=PAG$; $>2=NAF$ ”.

ALD (Anoxic Limestone Drain) - Drenaje Calizo Anóxico: drenaje ENTERRADO y SELLADO relleno con caliza donde el agua fluye SIN contacto con el aire (condiciones anóxicas, oxígeno < 1 mg/L). A diferencia de OLC/OLD, el hierro NO se oxida dentro del drenaje, por lo que la caliza no se cubre con lodos y mantiene su capacidad de neutralización por 10-20 años sin mantenimiento. Aplicable cuando: pH 3.5-6.0, hierro oxidado (Fe^{3+}) < 1 mg/L, oxígeno disuelto < 1 mg/L, aluminio < 1 mg/L. Requiere tiempo de retención hidráulica de 15-24 horas. Construcción más compleja y costosa que OLC, pero sin costos de mantenimiento.

ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil)-Nitrato de Amonio con Combustible: Es un explosivo industrial usado principalmente en minería y obras civiles para romper roca. En minería de oro se usa para fragmentar roca dura, facilitar la excavación y preparar el material para cargue y transporte. Se usa solo en voladuras controladas. Para ello, requiere manejo especializado, se emplea bajo permiso y control, no es sensible a pequeños golpes, pero sí peligroso si se maneja mal. No todos los pequeños mineros pueden usar ANFO porque su uso depende de autorización legal, personal capacitado, plan de voladuras y cumplimiento de normas de seguridad. El uso indebido genera sanciones graves.

Cc

CAL ($CaO/Ca(OH)_2$): es un material alcalino utilizado en procesos mineros para el control del pH, la neutralización de aguas ácidas, la

precipitación de metales y la mejora de la selectividad en la flotación, constituyendo un insumo clave en la gestión ambiental del proyecto.

Carbonato de sodio (Na_2CO_3): es una sal alcalina utilizada en procesos mineros para el ajuste controlado del pH y el acondicionamiento del agua, favoreciendo la eficiencia de los reactivos y la estabilidad de los procesos de beneficio mineral.

CBR (California Bearing Ratio) - Índice de Soporte California: es un ensayo geotécnico que mide la capacidad de soporte del suelo para usarlo en subrasante, subbase o base de una vía. Indica qué tanto peso puede aguantar el suelo frente al paso de vehículos. Según la práctica y especificaciones usadas por INVÍAS, el CBR se usa para: clasificar la calidad del suelo, definir el espesor del pavimento, diseñar subrasante, subbase y base, evaluar suelos naturales o materiales de préstamo, control de calidad en obras viales.

Cianuro (CN): El cianuro es un reactivo químico altamente tóxico utilizado en minería para disolver y recuperar oro fino, cuyo manejo requiere estrictas medidas de seguridad y control ambiental.

CIP (Carbon in Pulp)-Carbón en Pulpa: es un proceso de recuperación de oro fino que usa carbón activado para extraer el oro disuelto en la pulpa después de la cianuración, esto permite aumentar la eficiencia de la cianuración y reducir pérdidas de oro en relaves.

CPB Cemented Paste Backfill): es un relleno cementado que se utiliza en minería subterránea para rellenar labores mineras agotadas (cámaras, caserones, tajos), usando una mezcla de relaves mineros (especialmente espesados, sin arena gruesa), agua (controlada) y cemento portland u otro aglomerante. Su función principal es dar soporte geomecánico, disponer relaves de forma segura y mejorar la estabilidad, seguridad y gestión ambiental del yacimiento. En pequeña minería se puede aplicar como uso de relaves finos, mezclas de baja resistencia (1-5 % cemento), preparación en tanques simples con bombeo por gravedad o con equipos básicos.

Dd

DAM - Drenaje Ácido de Mina: Es un agua ácida y contaminada que se forma cuando Materiales con sulfuros (como pirita) entran en contacto con agua y oxígeno, esto genera ácido y puede arrastrar metales tóxicos.

En minería de oro puede aparecer en los botaderos de estériles, relaves, frentes de mina, tajos abandonados, drenajes y escorrentías.

Depresión: La depresión de sulfuros corresponde al uso de reactivos químicos en procesos de flotación para inhibir la flotabilidad de minerales no deseados, como la pirita, permitiendo su permanencia en el relave y favoreciendo la recuperación selectiva de los minerales de interés.

DRX-Difractometría de Rayos X: Análisis que permite saber qué minerales tiene la roca (cuarzo, pirita, calcita, feldspatos, etc.) o el relave, que puedan generar acidez o neutralizarla.

Ee

EC - Economía Circular: es un modelo de producción y consumo que busca reducir residuos, reutilizar materiales y cerrar ciclos, para aprovechar mejor los recursos y disminuir el impacto ambiental.

EPP - Equipo de Protección Personal: protege al trabajador de: Golpes y caídas, polvo y partículas, sustancias químicas, ruido, riesgos eléctricos, cortes y quemaduras. No elimina el riesgo, pero reduce daños y accidentes.

Esfarelita (ZnS): es un mineral sulfuro de zinc que constituye la principal fuente de este metal, frecuentemente asociado a depósitos hidrotermales con presencia de otros sulfuros y, en algunos casos, oro. Su manejo es relevante tanto en el procesamiento mineral como en la gestión ambiental por su potencial de liberación de metales.

Ff

FRX – Fluorescencia de Rayos X: Análisis que indica qué elementos químicos tiene el material y cuánto, permitiendo evaluar riesgo de drenaje ácido, controlar relaves y estériles y reconocer zonas con sulfuros.

Gg

Geopolímeros: son materiales cementantes alternativos al cemento Portland, hechos a partir de residuos ricos en sílice (Si) y aluminio (Al)

que se activan químicamente. Funcionan como un “cemento químico” de bajo impacto ambiental. Están hechos normalmente de cenizas volantes, escorias, relaves mineros, arcillas calcinadas, residuos industriales y se activan con: hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio.

Hh

HGMS (High Gradient Magnetic Separation)- separación magnética de alto gradiente: sistema de separación magnética que separa minerales

débilmente magnéticos muy finos usando un campo magnético muy fuerte como por ejemplo minerales de hierro finos, algunos sulfuros y óxidos metálicos.

Hidrofóbico: material o sustancia que presenta baja afinidad por el agua, evitando su humectación y favoreciendo la formación de gotas sobre su superficie.

Ii

ICP-OES (Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry) - Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente:

es una técnica de laboratorio usada para medir metales y elementos químicos a la vez en muestras ambientales y mineras, con buena precisión y límites de detección bajos (ppm–ppb).

IP - Índice de Plasticidad: es un parámetro geotécnico que indica qué tan plástico (arcilloso y deformable) es un suelo cuando está húmedo. INVÍAS exige límites máximos de IP para materiales viales: Subrasante: IP bajo o moderado; Subbase: IP generalmente $\leq 6 - 12$; Base granular: IP muy bajo o no plástico. Un IP alto significa que se hincha con agua, pierde resistencia y genera baches y deformaciones.

Mm

MIBC (Metil Isobutil Carbinol): Es un reactivo químico usado principalmente en procesos de flotación en minería de oro. Su función es: formar espuma estable, permitir que las partículas de mineral con oro se adhieran a la espuma y facilitar la separación del mineral valioso del material estéril. Actúa en las celdas de flotación, después de la molienda y junto con colectores (como xantatos). Es un líquido incoloro, con olor fuerte (tipo alcohol), que debe usarse en cantidades pequeñas porque es inflamable y requiere manejo cuidadoso.

Micra (µm) o micrómetro: es una unidad de medida muy pequeña que equivale a una milésima de milímetro y se usa para medir el tamaño de partículas minerales.

MPa – megapascal: es una unidad de medida de presión o resistencia, que indica cuánta fuerza soporta un material por cada área antes de romperse.

MPPC (Magnesium Phosphate Portland Cement) - Cemento de Fosfato de Magnesio: es un cemento especial de fraguado ultra rápido (30 minutos - 3 horas), usado principalmente para reparación de pavimentos y obras viales por su alta resistencia inicial y excelente adherencia al concreto existente, baja contracción y buen desempeño térmico, diferente al cemento Portland convencional. Se obtiene por la reacción química entre óxido de magnesio (MgO), fosfatos solubles y aditivos minerales (en algunas formulaciones se combina con cemento Portland). Se emplea para reparación rápida de pavimentos rígidos (concreto), bacheo profundo y superficial, rehabilitación de losas, obras que deben abrirse al tráfico en pocas horas, intervenciones de emergencia en carreteras.

Nn

NAF (No Acid Forming)-No Generador de Acidez: un material NAF es un material de mina (estéril, roca, suelo o relave) que NO produce drenaje ácido cuando entra en contacto con: agua, oxígeno porque tiene pocos o nada de sulfuros, o tiene minerales que neutralizan la acidez (como caliza). En pequeña minería de oro se usa para: rellenar tajos y depresiones, reconformar botaderos, cubrir y encapsular material PAF, reducir el riesgo de drenaje ácido y apoyar el cierre minero. Se identifica mediante pruebas ABA (Balance Ácido-Base), análisis de azufre, DRX / FRX, verificación técnica de laboratorio.

NAG (Net Acid Generation)-Generación Neta de Acidez: son pruebas geoquímicas que indican si un material realmente genera acidez cuando se oxidan completamente sus sulfuros. En minería de oro se usan para: confirmar si un material es PAF o NAF, complementar las pruebas ABA que predice el potencial (teórico) mientras que la NAG muestra el comportamiento real del material, por otro lado, reducir la incertidumbre en la clasificación, diseñar mejor el manejo de estériles y relaves y prevenir drenaje ácido de mina (DAM). Consiste en que la muestra se trata con peróxido de hidrógeno (H₂O₂), esto oxida rápidamente los sulfuros, se mide el pH final y la acidez generada y se evalúa si la acidez supera la capacidad de neutralización.

NTU (Nephelometric Turbidity Unit)- Unidad Nefelométrica de Turbidez: mide la turbidez del agua, es decir, qué tan clara o turbia está el agua y cuánta tierra, lodo, arcilla o sólidos finos tiene en suspensión. No mide contaminación química, solo qué tan “revuelta” está el agua.

Oo

OLC (Open Limestone Channel)- Canal Óxico Calizo / OLD (Open Limestone Drain)- Drenaje Calizo Óxico: es un canal abierto lleno de piedra caliza, por donde corre el agua ácida en contacto con el aire. El cual sirve para aumentar el pH del agua, reducir la acidez y neutralizar parcialmente metales disueltos. El oxígeno oxida el hierro que precipita como lodos rojizos. Aumenta el pH, reduce acidez y neutraliza metales.

Pp

PAF (Potentially Acid Forming)-Potencialmente Generador de Acidez: es un material de mina (roca, estéril o relave) que PUEDE producir drenaje ácido cuando: entra en contacto con agua, entra en contacto con oxígeno. Esto ocurre porque contiene sulfuros, principalmente pirita. El material PAF puede: generar drenaje ácido de mina (DAM), liberar metales pesados, contaminar quebradas y suelos, generar sanciones ambientales. Se identifica con Pruebas ABA (Balance Ácido-Base), Análisis de azufre, DRX / FRX, Observación de óxidos

rojizos (solo indicativo). En pequeña minería se debe hacer buenas prácticas como no mezclarlo con material NAF, encapsularlo con NAF, evitar exposición en taludes, cubrirlo progresivamente, controlar infiltración de agua.

PA-Potencial de Acidez: el PA indica cuánta acidez puede generar un material de mina (roca, estéril o relave) cuando: se moja y se expone al oxígeno. Está relacionado principalmente con el contenido de azufre (sulfuros como la pirita). El PA viene de sulfuros (pirita FeS_2); $\text{AP} = \% \text{S sulfuro} \times 31,25$ (Sobek, 1978). En minería de oro se usa para: evaluar riesgo de drenaje ácido de mina (DAM), compararlo con el PN (Potencial de Neutralización), clasificar material como PAF o NAF y diseñar botaderos y coberturas.

Peróxido de hidrógeno (H_2O_2): es un reactivo químico oxidante líquido, incoloro, conocido comúnmente como agua oxigenada. Se usa en minería, ambiente e industria por su capacidad para oxidar, limpiar y descomponer contaminantes. Es un químico que limpia el agua porque suelta oxígeno, pero hay que manejarlo con cuidado porque quema.

Pirita (FeS_2): es un mineral sulfuro de hierro comúnmente asociado a depósitos auríferos, que puede contener oro en forma diseminada. Su presencia es relevante tanto para la exploración como para el procesamiento mineral, así como para la gestión ambiental debido a su potencial de generación de drenaje ácido.

PN-Potencial de Neutralización: el PN indica la capacidad de un material de mina (roca, estéril o relave) para neutralizar acidez. Es como medir qué tanto puede “apagar” un ácido. El PN depende principalmente de: minerales carbonatados (caliza, dolomita) y otros minerales alcalinos presentes en la roca. A mayor contenido de estos minerales, mayor PN. En minería de oro se usa para: evaluar si un material puede compensar acidez, compararlo con el PA (Potencial de Acidez), clasificar material como NAF o PAF, diseñar botaderos y coberturas.

PUEAA - Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua: es un requisito de la autoridad ambiental cuando un minero solicita o tiene una concesión de aguas (quebrada, río, pozo, manantial). Su objetivo es que el minero use solo el agua necesaria, la cuide y no la desperdicie.

Rr | **ROM (Run Of Mine)-Mineral tal como sale de la mina:** es el material recién extraído, sin ningún tipo de procesamiento: no triturado, no molido, no concentrado, el cual incluye mineral con oro, roca estéril mezclada, humedad natural. En minería de oro (filón): se usa para medir producción, para control de ley del mineral, para planear trituración y molienda, para balances de masa.

Ss | **SBN – Soluciones Basadas en la Naturaleza:** son acciones que usan procesos naturales (suelo, agua, plantas y microorganismos) para resolver problemas ambientales, al mismo tiempo que protegen la biodiversidad. Definición usada por ONU, UICN y adoptada en Colombia.

Soda cáustica (NaOH): es un compuesto alcalino utilizado para el control de pH en procesos mineros, favoreciendo condiciones químicas adecuadas para la separación de minerales y la prevención de procesos de acidificación, requiriendo un manejo controlado debido a su carácter corrosivo.

SST-Sólidos Suspendidos Totales: son las partículas sólidas que flotan o quedan suspendidas en el agua, como: tierra, lodo, arena fina, arcillas y partículas de relaves. No están disueltas, por eso se pueden separar por filtración. En minería de oro se usan para: evaluar la calidad del agua, controlar vertimientos, ver si los sedimentadores funcionan bien, evitar contaminación de quebradas y ríos y cumplir con normas ambientales. Se expresan en mg/L (miligramos por litro).

Sulfato de zinc (ZnSO_4): es un reactivo utilizado como depresor en procesos de flotación de minerales sulfurados, inhibiendo la flotabilidad de minerales no deseados y mejorando la selectividad del proceso de separación.

Sulfato de cobre (CuSO_4): es un reactivo químico utilizado como activador en procesos de flotación de minerales sulfurados, promoviendo la adherencia de colectores y facilitando la recuperación selectiva de minerales, requiriendo un manejo controlado por su potencial impacto ambiental.

Tt

TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)-Prueba de Lixiviación por Característica de Toxicidad:

Es una prueba que evalúa qué tan tóxicos pueden ser los relaves o residuos, si metales peligrosos pueden disolverse y salir con el agua y el riesgo de contaminación de suelos y aguas. Consiste en que el material (relave o estéril) se mezcla con una solución ácida, se simulan condiciones de lixiviación y se mide la concentración de metales liberados. Los metales típicos analizados: arsénico, plomo, mercurio, cadmio, cromo. En minería se usa para clasificar relaves y estériles, definir si un residuo es peligroso, diseñar medidas de manejo y disposición y cumplir requisitos de la autoridad ambiental.

TOPSOIL: es el suelo orgánico superficial, es decir, la capa superior del suelo. Es la parte más fértil del suelo.

Uu

UCS (Uniaxial Compressive Strength) - Resistencia a la Compresión

Uniaxial: es una propiedad mecánica que indica cuánta carga puede soportar un material antes de romperse, cuando se comprime en una sola dirección, sin confinamiento lateral. El resultado se expresa en MPa (megapascuales) o kg/cm^2 , utilizada para evaluar la estabilidad de rocas, rellenos cementados y estructuras mineras.

Ww

WHIMS (Wet High Intensity Magnetic Separator)- separador magnético húmedo de alta intensidad:

sistema de separación magnética que separa minerales débilmente magnéticos en pulpa (con agua). Es el más común en plantas de beneficio. En oro de filón se usan para: retirar minerales de hierro, limpiar concentrados, preconcentrar material antes de flotación o cianuración y reducir impurezas en relaves. No recuperan oro directamente, pero ayudan al proceso.

Xx

Xantatos: son compuestos orgánicos utilizados como reactivos colectores en procesos de flotación, que inducen propiedades hidrofóbicas en minerales sulfurados, facilitando su separación mediante la adhesión a burbujas de aire.



Bibliografía

- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina: generación y tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España.
- Aduvire, O. (2019). Innovaciones técnicas en el tratamiento de aguas ácidas. *Rev. Medio Ambiente Minero y Minería*, 4(1), 55–64.
- Aguayo Salinas, Pérez Tello y Encinas Romero (1996), *Rev. Metalurgia* 32(1):33-39.
- Aliaga Churruarín, D. G. (2023). La reutilización del agua en la minería con enfoque en economía circular. *Fides Et Ratio*, 25(25), 193–228.
- Álvarez-Pugliese, C. E. (2018). Aproximación a la estimación de la huella hídrica minera en el municipio de Suárez (Cauca). Tesis de Maestría. Universidad del Valle, Facultad de Ciencias Sociales y Económicas. Santiago de Cali, Colombia.
- Álvarez-Pugliese, C. E., Machuca-Martínez, F., & Pérez-Rincón, M. (2021). Water footprint in gold extraction: A case-study in Suárez, Cauca, Colombia. *Heliyon*, 7(9), e07949.
- Anglo American. (2024). Premios Avonni: proyecto de relaves deshidratados reduce impacto ambiental. [Comunicado de prensa].
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2016). Términos de referencia para estudios de impacto ambiental-Proyectos de explotación minera. ANLA.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2022). Guía para la elaboración del plan de cierre y abandono de proyectos mineros. Bogotá.
- ASOMIAT. (2023). Experiencias de biorremediación pasiva en minería de oro. Tadó, Chocó. [Documentación de proyecto].
- Bishop, A.W. (1955). The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes.
- Botz, M. M. (2001). Overview of cyanide treatment methods. In *Mining Environmental Management*. Mining Journal Books.
- CARDER. (2010). Guía para la elaboración del Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua en la minería de metales preciosos y carbón – PUEAA. Corporación Autónoma Regional de Risaralda.
- CEPAL. (2020). Estado del arte de las estadísticas mineras del uso de agua y energía en los países andinos. Serie Recursos Naturales y Desarrollo. Santiago de Chile.
- CEPAL. (2021). La ENAMI de Chile: Modelo y buenas prácticas para pequeña minería y artesanal.
- CEPIS. (1988). Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades. Lima, Perú.
- COCHILCO. (2024). Consumo de Agua en la Minería del Cobre. Actualización 2024. Comisión Chilena del Cobre. Santiago de Chile.
- Davies, M. P., & Rice, S. (2001). An alternative to conventional tailings management: Dry stack filtered tailings. En *Proceedings of Tailings and Mine Waste '01* (Fort Collins, Colorado).
- Decreto 4741 de 2005. Prevención y manejo de residuos peligrosos. Presidencia de la República de Colombia.
- Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diario Oficial. Presidencia de la República de Colombia.
- Decreto 050 de 2018. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015 en materia de vertimientos. Presidencia de la República de Colombia.
- Decreto 1090 de 2018. Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015 en lo relacionado con el Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA). Presidencia de la República de Colombia.
- Department of Energy (DOE). (2023). Rainwater Harvesting Systems Technology Review. Federal Energy Management Program, U.S. DOE.
- ECOCARBON. (1995). Control de la Contaminación del Agua en la pequeña minería subterránea del Carbón. Bogotá.
- EL MANEJO DEL CIANURO EN LA EXTRACCIÓN DE ORO disponible en: <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/434.pdf>
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition. Isle of Wight.

- Ellen MacArthur Foundation. (2020). The Circular Economy: A Wealth of Flows (2nd ed.). Isle of Wight.
- EPA. (2014). Reference Guide to Treatment Technologies for Mining-Influenced Water. EPA 542-R-14-001.
- EY-SNMPE. (2021). Economía Circular en la Minería: Oportunidades y desafíos.
- FAO. (2013). Captación y almacenamiento de agua de lluvia: Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile.
- FAO Colombia. (2023). Con lluvia potabilizada, comunidades de la Amazonía colombiana se proveen de agua. FAO.
- Flotation Guidebook disponible en https://www.ausimm.com/globalassets/insights-and-resources/minerals-processing-toolbox/omc_flotation_guidebook.pdf
- Geological Survey of Finland (GTK). (2024). Mine closure guidance. <https://mineclosure.gtk.fi/>
- GISTM. (2020). Global Industry Standard on Tailings Management. ICMM, UNEP, PRI.
- González-Valencia, J. E., Montoya, L. J., Botero, A., Arévalo, D., & Valencia, V. (2012). Aproximación a la estimación de la Huella Hídrica de la minería del oro en Segovia, Antioquia. Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo, (7), 27–44.
- Guía Minero Ambiental. (2021). Ministerio de Minas y Energía - ANM - GIZ.
- Haggard, E. L., Sheridan, C. M., & Harding, K. G. (2015). Water footprint for a South African platinum mine. Doctoral dissertation, University of the Witwatersrand.
- ICMM. (2017). Water Stewardship Position Statement. Londres.
- ICMM. (2019). Water Reporting Good Practice Guide (2nd ed.). Londres.
- ICMM. (2019). Integrated mine closure: Good practice guide (2nd ed.). International Council on Mining and Metals.
- ICMM. (2021). Water Stewardship Framework. Londres.
- ICMM. (2023). Water Stewardship Maturity Framework. Londres. <https://www.icmm.com/en-gb/guidance/environmental-stewardship/2023/water-stewardship-maturity-framework>
- ICONTEC. (2020). GTC 314 – Marco para la implementación de los principios de la economía circular. Bogotá.
- IDEAM. (2020). Atlas Interactivo Climatológico de Colombia. IDEAM.
- IGF. (2017). Global Trends in Artisanal and Small-Scale Mining (ASM). IISD.
- IMTA. (2024). Plataforma Agua y Minería – Huella Hídrica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Instituto Tecnológico Geominero de España. (1989). Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería (2a ed.). Madrid.
- International Network for Acid Prevention (INAP). (2009). Global acid rock drainage guide (GARDGuide). <http://www.gardguide.com>
- Intergovernmental Forum on Mining (IGF). (2017). Global trends in artisanal and small-scale mining (ASM): A review of key numbers and issues. IGF.
- Intergovernmental Forum on Mining (IGF). (2025). Best practices for responsible ASM gold supply chains. IGF.
- International Council on Mining and Metals (ICMM). Integrated Mine Closure Good Practice Guide.
- Hoek, E. & Bray, J.W. (1981). Rock Slope Engineering.
- Julca, J. (2023). Economía Circular en la Minería: Marco conceptual y aplicaciones.
- Ley 373 de 1997. Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Congreso de la República de Colombia.
- Ley 685 de 2001. Código de Minas. Diario Oficial. Colombia
- Ley 2250 de 2022. Por la cual se establece el marco jurídico de legalización y formalización minera. Diario Oficial. Colombia
- Ley 2327 de 2023. Por medio de la cual se establece la definición de pasivo ambiental y lineamientos para su gestión. Diario Oficial.
- Li, X., et al. (2014). Mixed-integer programming model for optimal waste rock dump design. SME Annual Meeting.
- López Pamo, E., Aduvire, O. y Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina. Boletín Geológico y Minero, 113(1), 3–21.
- Marrugo Negrete, J., et al. (2017). Removal of mercury from gold mine effluents using *Limnocharis flava* in constructed wetlands. Chemosphere, 167, 188-192.

- Marrugo Negrete, J. L., Paternina Uribe, R., & Navarro Frómeta, A. (Eds.). (2024). Alternativas basadas en la naturaleza para la recuperación de ecosistemas degradados por minería aurífera bajo un enfoque de economía circular. Editorial Navegante.
- Matebese, F., Mosai, A. K., Tutu, H., & Tshentu, Z. R. (2024). Mining wastewater treatment technologies and resource recovery techniques: A review. *Heliyon*, 10(3), e24730.
- MEND. (2004). Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings (Report 2.21.4). MEND.
- Metso. (2024). Tailings filtration and water recovery solutions. Metso Corporation.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC). Bogotá.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000), Sección II, Título E. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente. (2002). Guía Minero Ambiental de Explotación. Bogotá.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM). (2005). Guía ambiental para el manejo de relaves mineros. MINEM.
- Ministerio de Minas y Energía & Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda. (2022). Lineamientos Técnicos de Buenas Prácticas de Economía Circular para la Actividad Minera. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía & Universidad de Córdoba. (2021). Propuesta de lineamientos técnicos de buenas prácticas de economía circular para la minería del oro de pequeña escala. Gobierno de Colombia.
- Mudder, T. I., Botz, M. M., & Smith, A. (2001). Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes (2nd ed.). Mining Journal Books.
- O'Kane, M., & Wels, C. (2003). Mine waste cover system design. En Proceedings of the 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Cairns.
- OPS. (2004). Guía de diseño para captación del agua de lluvia. Lima: Organización Panamericana de la Salud.
- Pardavé, W., & Delvasto, P. (2017). Evaluación de la huella hídrica en la mina Reina de Oro, Vetas (Santander). Universidad Industrial de Santander.
- Pat-Espadas, A. M., Loredó, R., Amabilis-Sosa, L., Gómez, G., & Vidal, G. (2018). Review of Constructed Wetlands for Acid Mine Drainage Treatment. *Water*, 10(11), 1685.
- Peragallo, N., & Martínez, P. (2023). Uso de relaves como relleno de labores subterráneas. *Revista de Minería y Geología*, 39(2).
- Portal Minero Chile. (2020). Consumo de agua en procesos mineros. [Fuente web].
- Process Minerals Consulting PMC. (2024). Datos de consumo de agua en beneficio de minerales. [Consultoría técnica].
- Price, W. A. (2009). Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. MEND 1.20.1, 579 pp.
- Ráez, E. (2018). Gestión del agua en minería: Desafíos y oportunidades para la sostenibilidad.
- Reactivos usados para mejorar la lixiviación del oro con cianuro: una revisión disponible en <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/download/12248/17784/>
- Resolución 865 de 2004. Metodología para el cálculo del índice de escasez. MinAmbiente.
- Resolución 1362 de 2007. Por la cual se establece el registro de generadores de RESPEL. MinAmbiente.
- Resolución 631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y al alcantarillado público. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Colombia
- Resolución 0330 de 2017. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). Ministerio de Vivienda.
- Resolución 1402 de 2018. Por la cual se adopta la metodología general para la elaboración de estudios ambientales. ANLA.
- Resolución 1256 de 2021. Por la cual se reglamenta el reúso de las aguas residuales. MinAmbiente.
- Rötting, T. S., et al. (2008). Improved Passive Treatment of High Zn and Mn Concentrations Using Caustic Magnesia (MgO): Particle Size Effects. *ES&T* 42(24), 9370-9377.
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2017a). Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio del oro sin mercurio. Cauca.

- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2017b). Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio del oro sin mercurio. Huila.
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2017c). Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio del oro sin mercurio. Antioquia.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). Guías para evaluación de amenaza por movimientos en masa.
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2019). Protocolo para manejo de relaves mercuriales. Nariño.
- Skousen, J., et al. (2017). Review of passive systems for acid mine drainage treatment. *Mine Water and the Environment*, 36(1), 133–153.
- Sobek, A. A., et al. (1978). Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils (EPA-600/2-78-054). U.S. Environmental Protection Agency.
- Society for Ecological Restoration (2019). *International Principles for Ecological Restoration*, 2nd ed.
- UICN. (2016). *Defining nature-based solutions*. UICN.
- UNEP. (2019). *Global Mercury Assessment 2018*. United Nations Environment Programme.
- Universidad de Córdoba. (2025). *Estado del Arte de las Mejores Técnicas Disponibles y Alternativas de Economía Circular para la Pequeña Minería Aurífera*. MinMinas.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). *Global mercury assessment 2018*. UNEP.
- UPME. (2015). *Guía de orientación para el manejo de vertimientos en minería de metales preciosos y carbón*. UPME – Universidad de Córdoba.
- UPME. (2024). *Plan Nacional de Desarrollo Minero 2024–2035*. UPME.
- WEF (World Economic Forum). (2015). *Mining & Metals in a Sustainable World 2050*.
- Williams, D. J., et al. (2006). Kidston waste rock dump design and performance. En *Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, St. Louis.
- World Bank. (2020). *Climate-Smart Mining: Minerals for Climate Action*. Washington, D.C.



Energía



"VIGILADA MINEUCACIÓN"

