

GUÍA DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LAS ETAPAS MINERAS
DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN



UNIVERSIDAD DE
CÓRDOBA

GUÍA

DE ECONOMÍA CIRCULAR
PARA LAS ETAPAS MINERAS

DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN



GUÍA DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LAS ETAPAS MINERAS DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN.

**Convenio Interadministrativo GGC
No 1860 – 2025**

Autores

Esp. Lina Paola Barrera Sterling
Esp. Miriam Yanet Pantoja Álvarez
Geól. Juan Andrés Gil
Esp. Jesús Alberto Ordoñez
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 Batista
MSc. Carlos Domínguez Balmaceda

Profesional Temático en Geología

Esp. Diana Carolina Ortiz Niño
MSc. Sergio Reyes Sandoval

Profesionales de Apoyo

PhD. Carlos Gómez Ortiz
Ing. Edgardo Elías Cruz Montes
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
Ing. Paula Peñate Salgado

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	10
	Agradecimientos	11
	Introducción	12
2	PRINCIPIOS DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LAS ETAPAS DE LA MINERÍA DE LOS MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN	15
3	CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA COMO BUENA PRÁCTICA DE ECONOMÍA CIRCULAR	23
	3.2 CARACTERIZACIÓN POR CARACTERÍSTICAS DE PELIGROSIDAD DE RESIDUOS, LODOS Y SUBPRODUCTOS	26
	3.3 MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS Y SEDIMENTOS DURANTE LA EXPLOTACIÓN	28
	3.4 PRUEBAS DE CALIDAD DEL PRODUCTO PARA COMERCIALIZACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PROVENIENTES DE RÍOS Y CANTERAS	29
	3.4.1 Ensayos de calidad para comercialización	30
	3.4.2 Ensayos de laboratorio y criterios de calidad	31
	3.4.3 Requisitos mínimos recomendados para comercialización	32
	3.4.4 Recomendaciones para pequeños mineros	32
	3.5 PAQUETES ANALÍTICOS MÍNIMOS POR FASE Y ESCALA (PEQUEÑA MINERÍA)	33
	3.6 INDICADORES DE MONITOREO Y VERIFICACIÓN	34
4	BASES TÉCNICAS PARA LA APLICACIÓN DE LAS LINEAS ESTRATÉGICAS DE ECONOMÍA CIRCULAR EN LAS ETAPAS DE LA MINERÍA DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN	37
	4.1 MARCO CONCEPTUAL	39
	4.2 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE EXPLORACIÓN	46
	4.2.1 Lineamiento 1. Optimización en el muestreo	52
	4.2.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Reducir número de apiques y zanjas, disminuir remoción de sedimentos	53
	4.2.2 Lineamiento 2. Optimización en la planeación del proyecto minero	56
	4.2.2.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Minimizar intervención física del cauce y planicie aluvial	56
	4.2.2.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Reducción de estériles en la extracción del mineral de interés	58

4.2.3 Lineamiento 3. Estrategias de anticipación y prevención de impactos ambientales residuales desde la exploración aluvial	61
4.2.3.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Manejo del agua con control de sedimentos desde la exploración aluvial para anticipar y prevenir impactos ambientales residuales	62
4.2.4 Lineamiento 4. Modelamiento y gestión inteligente de información	68
4.2.4.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Reducción de la huella hídrica y ocupación territorial mediante optimización y análisis con herramientas SIG	68
4.3 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	69
4.3.1 Lineamiento 5. Ejecutar el plan de obras con manejo eficiente de materiales	70
4.3.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Aprovechamiento de materiales generados en el proceso de infraestructura aluvial	70
4.3.1.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Construcción modular y desmontable de infraestructura	71
4.3.1.3 Oportunidad de Economía Circular 3: Uso de áridos reciclados y materiales locales en vías, plataformas y obras hidráulicas	71
4.4 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO EN MATERIALES DE CONTRUCCIÓN	74
4.4.1 Lineamiento 6. Optimización del proceso de explotación y beneficio con eficiencia tecnológica	74
4.4.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Enfoque integral de optimización del proceso	78
4.4.1.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Uso eficiente del agua con recirculación y control de sólidos en el proceso de explotación y beneficio	79
4.4.2 Lineamiento 7. Valorización de subproductos	82
4.4.2.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Aprovechar los relaves generados en el proceso de beneficio	82
4.4.2.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Simbiosis industrial para arenas finas, gravas y oro	82
4.5 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE CIERRE DE MINA DE MATERIALES DE CONTRUCCIÓN ALUVIAL	91
4.5.1 Lineamiento 8. Restauración inmediata con manejo circular del agua	91
4.5.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Cero excavaciones abiertas y cero descargas directas	91
4.5.1.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Reconversión paisajística y uso del suelo	94
4.6 APLICACIÓN LÍNEA ESTRATÉGICA TRANSVERSAL PARA TODAS LAS ETAPAS MINERAS	98
4.6.1 Lineamiento 9. Establecer indicadores de monitoreo y verificación	98

5

CANTERAS 101

5.1 CONCEPTOS INICIALES PARA ENTENDER LAS ETAPAS MINERAS DENTRO DE UNA CANTERA	105
5.1.2 Criterios básicos para la estabilidad de taludes en explotaciones de materiales de construcción	107
5.1.2.1 Metodología de Bishop	107
5.1.2.2 Metodología de Janbu	108

Contenido

5.1.2.3 Metodología de Morgenstern - Price	109
5.1.2.4 Metodología de Hoek & Bray	111
5.2 ETAPA DE EXPLORACIÓN EN CANTERA	113
5.2.1 Lineamiento 1: caracterización geológica y geotécnica del	
5.2.1.1 Ensayos de laboratorio	121
5.2.1.2 . Ensayos hidrológicos e hidráulicos	125
5.2.1.3. Ensayos ambientales	126
5.2.1.4. Ensayos mineralógicos y geoquímicos	127
5.2.1.5. Ensayos operacionales	129
5.2.1.6. Ensayos para economía circular	129
5.2.1.7. Ensayos de calidad del aire, polvo, ruido	130
y vibraciones en canteras	
5.2.1.8. Ensayos para calidad de agregados	131
5.2.2. Identificación de zonas útiles y zonas de descarte	133
5.2.3. Mapeo de fracturas, alteración, arcillas y humedad	133
5.2.4. Lineamiento 2: planeación selectiva de la cantera	
oportunidades de economía circular	134
5.3. ETAPA DE EXPLOTACIÓN EN CANTERA	135
5.3.1. Lineamiento 3: explotación selectiva y control	136
de dilución	
5.3.1.1. Oportunidades de economía circular	136
5.3.2. Lineamiento 4. Manejo eficiente de voladura	141
y fragmentación	
5.3.2.1. Oportunidades de economía circular	141
5.3.3. Lineamiento 5. Gestión del agua y control	147
de sedimentos	
5.3.3.1. Oportunidades de economía circular	147
5.4. ETAPA DE BENEFICIO O PROCESAMIENTO EN CANTERA	150
5.4.1. Lineamiento 6. Optimización de trituración	153
y clasificación	
5.4.1.1. Oportunidades de economía circular	153
5.4.2. Lineamiento 7. Valorización de finos, rechazos	155
y subproductos	
5.4.3. Lineamiento 8. Control de polvo y emisiones	158
5.4.3.1. Oportunidades de economía circular	158
5.5. ETAPA DE CIERRE Y RESTAURACIÓN	160
5.5.1. Lineamiento 9. Cierre progresivo y reconfiguración	164
geomorfológica	
5.5.1.1. Oportunidades de economía circular	164
5.5.2. Lineamiento 10. Reversión del uso del suelo	165
5.6. LINEAMIENTO TRANSVERSAL: INDICADORES DE ECONOMÍA CIRCULAR	166



GLOSARIO	168
FICHAS TÉCNICAS	172
BIBLIOGRAFÍA	174



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 a través de 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.

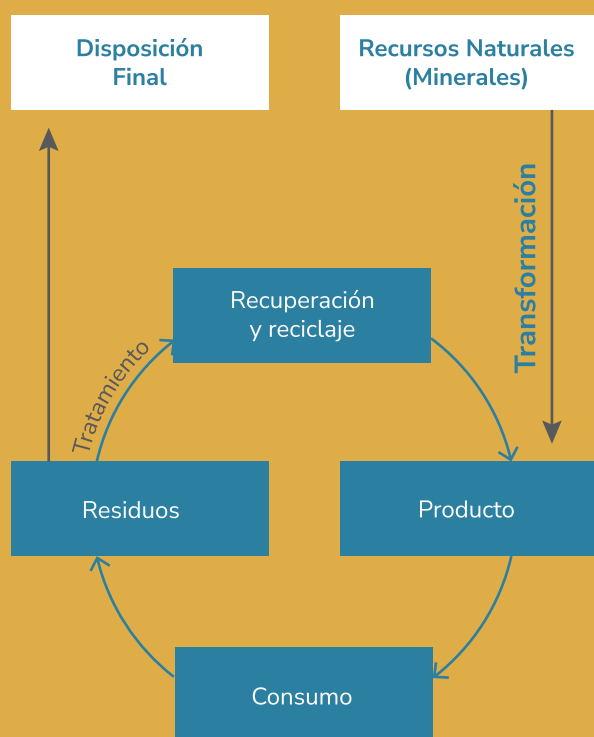


Introducción

El presente documento, denominado Guía de economía circular para las etapas mineras de materiales para la construcción, 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 para el desarrollo económico, cuya viabilidad depende de la incorporación de criterios de sostenibilidad y de la transición hacia modelos de economía circular.

Figura 1.1. El papel de la recuperación y el reciclado en el ciclo de vida de los minerales



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

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 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 (EC) 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 cerrado¹. Las prácticas de la EC 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 futuro².

Tradicionalmente, el sector minero ha operado bajo un modelo de economía lineal, caracterizado por la extracción de recursos naturales, su transformación y

uso, y la disposición final de los residuos, sin un aprovechamiento sistemático de los materiales generados. En el marco de la normativa ambiental y minera vigente en Colombia, la explotación de materiales de construcción especialmente en operaciones de pequeña escala enfrenta desafíos relevantes relacionados con el uso eficiente del recurso hídrico, la gestión de estériles, y la recuperación de áreas intervenidas.

1 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.

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

Estas problemáticas requieren enfoques integrales que permitan mejorar el desempeño ambiental y productivo de la actividad minera, en concordancia con las disposiciones regulatorias y los lineamientos de la política pública nacional.

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 (DNP-CONPES 4011: Política Nacional de Economía Circular, 2020; MADS Resolución 1256, 2021).

La economía circular cuenta con múltiples 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.

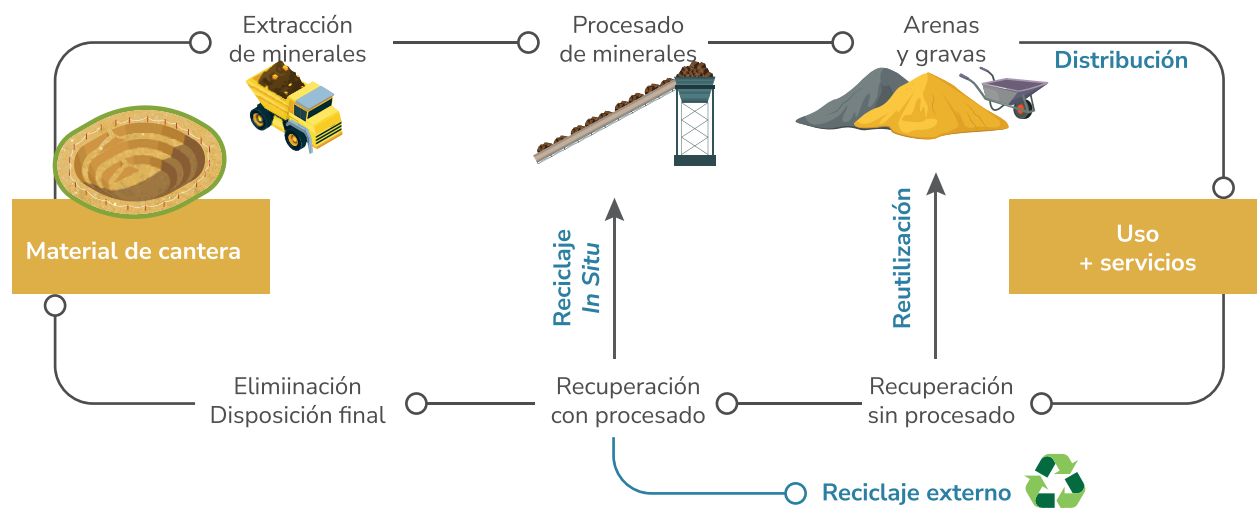
Bajo este contexto, se han propuesto distintas definiciones del concepto, entre las cuales se destacan:

“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).

Figura 1.2. Fases del ciclo de vida para un producto



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.

Las prácticas de economía circular son particularmente pertinentes en la minería de materiales de construcción, donde grandes volúmenes de arenas y gravas son movilizados durante la exploración y explotación. La implementación de estrategias circulares permite transformar estos materiales, tradicionalmente considerados estériles, en potenciales subproductos, al tiempo que se reduce la huella hídrica, se previenen daños residuales ambientales y se mejora la perspectiva social de la actividad minera en las poblaciones vecinas (Smart Prosperity Institute, 2020; MinMinas et al., 2023).

En este contexto, la presente guía tiene como propósito orientar al pequeño minero hacia una comprensión integral del ciclo de vida del producto minero, en este caso de materiales para la construcción, incorporando los principios de economía circular dentro del planeamiento minero y ambiental que se presenta ante las autoridades competentes. A lo largo de las distintas etapas del ciclo minero, se abordan lineamientos técnicos aplicables y alternativas para la identificación y el aprovechamiento de residuos y subproductos como segundas materias primas, con el fin de mejorar la eficiencia de la actividad, reducir los impactos sociales y ambientales y maximizar los beneficios para el titular minero y su entorno. Desde este enfoque, la guía plantea oportunidades de transformación y reconversión productiva que permiten avanzar hacia una minería más responsable, sostenible y articulada con el desarrollo del territorio.



The background image shows a mining operation. In the foreground, there is a large pile of crushed rocks or gravel. In the middle ground, an orange excavator is visible, and a small truck is parked nearby. The background features a large, light-colored earthen mound and a line of trees under a cloudy sky. The entire image is overlaid with a semi-transparent orange filter.

2

PRINCIPIOS DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LAS ETAPAS DE LA MINERÍA DE LOS MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN

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 de Economía Circular: “La EC 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 (Laple, 2007, pp. 9-10)”.

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 en los equipos y en los procesos de explotación y beneficio	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

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 materiales para la construcción, 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 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.

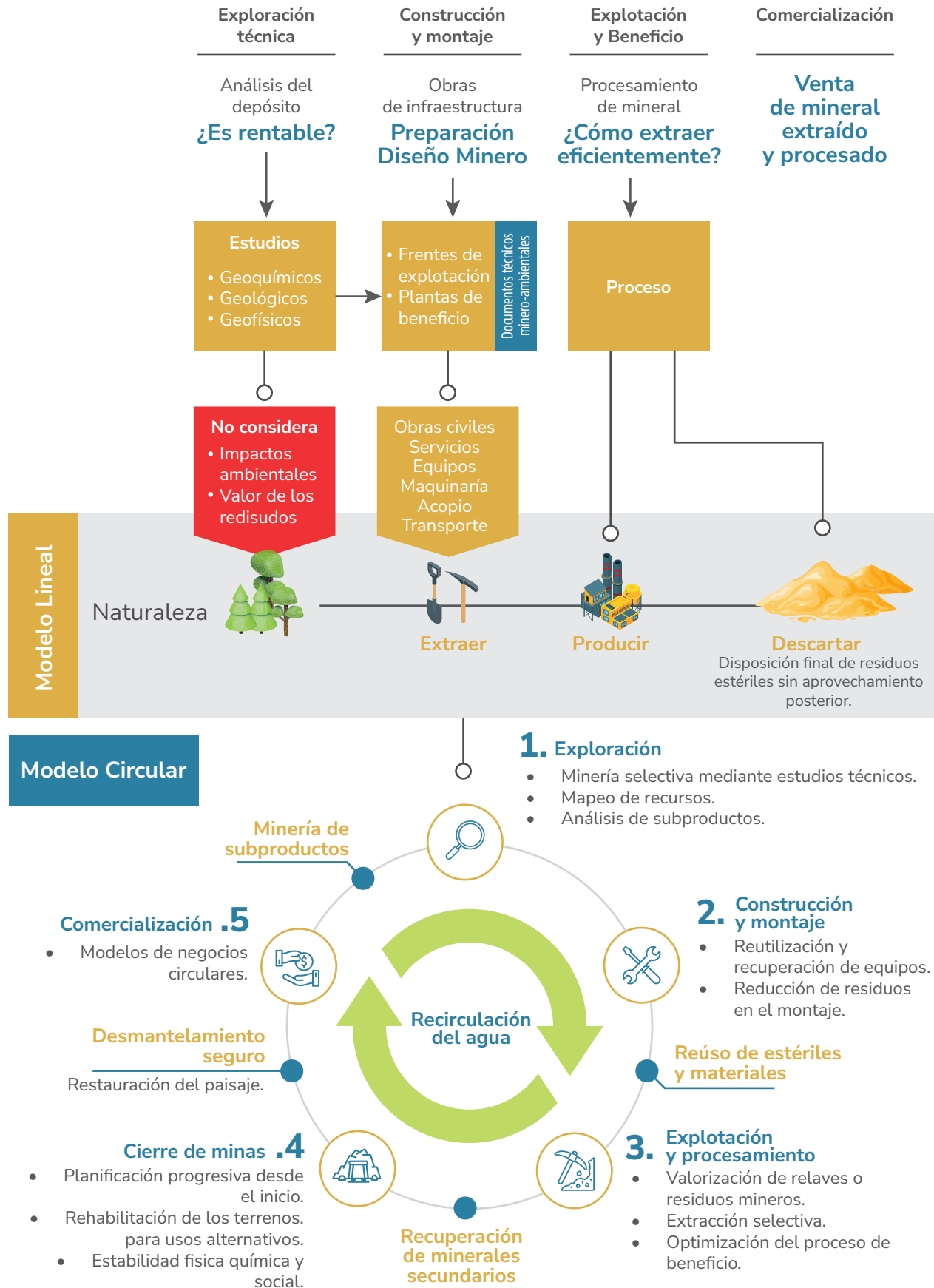
Figura 2.2. Proceso de beneficios de minerales



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



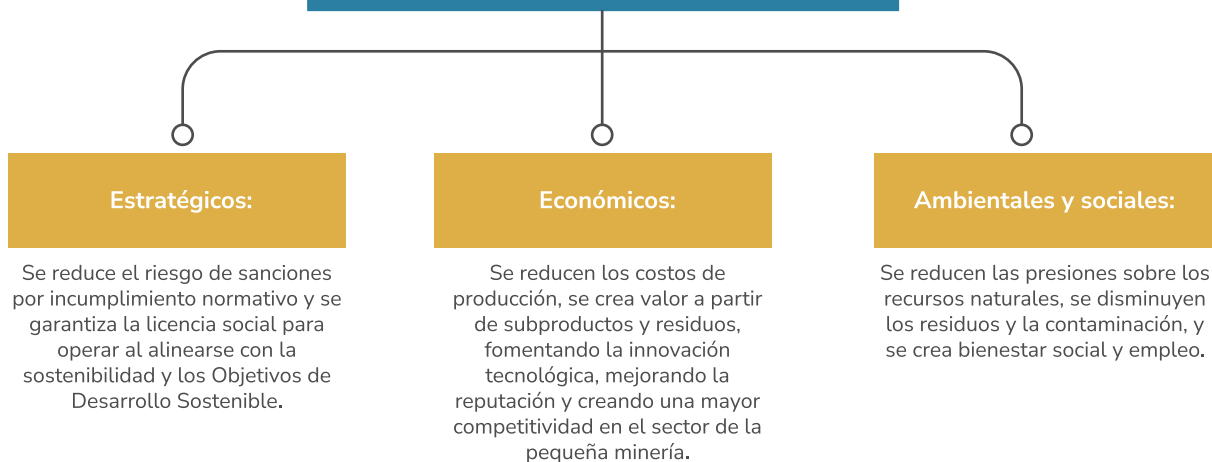
Figura 2.3. Transición de un modelo tradicional a un modelo de economía circular sostenible en la actividad minera



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 (estériles) se considerarían una nueva "reserva minera", donde se buscarían y extraerían minerales presentes para otros usos y fines, su procesamiento y reintroducción en la cadena productiva.
- **Simbiosis industrial:** crear "encadenamientos productivos", donde los residuos de la minería 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.

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



Bajo este marco conceptual, la presente guía de economía circular aplicada a la minería de materiales para la construcción adopta y operacionaliza los principios de “Reducir, Reutilizar, Reparar, Recuperar, Revalorizar, Regenerar/Rehabilitar/Restaurar y Reemplazar, ajustándolos a las condiciones técnicas, operativas y ambientales propias del proyecto minero. La aplicación de estos principios orienta la actividad minera hacia un modelo productivo más sostenible y resiliente, al optimizar el uso de los recursos naturales, mejorar la eficiencia de los procesos y reducir las presiones ambientales asociadas a la minería de oro aluvial. No obstante, es necesario que estos principios puedan ser implementado de manera efectiva en las operaciones mineras, es necesario traducirlos en lineamientos técnicos y operativos que orienten la toma de decisiones, la planificación de actividades y la gestión de los recursos a lo largo del ciclo minero, que en el siguiente capítulo se abordará.







3

CARACTERIZACIÓN
GEOQUÍMICA
Y MINERALÓGICA
COMO BUENA
PRÁCTICA
DE ECONOMÍA
CIRCULAR

Esta sección debe leerse con una distinción precisa entre lo exigido por la regulación y lo recomendado como buena práctica de economía circular. La normativa colombiana revisada en particular el Anexo 2 ‘Complemento para la Explotación de Material de Arrastre’ del TR EIA Minería 2016 (ANLA), los Términos de Referencia para EIA en Materiales de Arrastre (UPME-UPTC, 2015) y la Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas de Materiales de Arrastre (GBPMA, ANM-Asogravas) no exige pruebas geoquímicas (ABA, NAG, cinéticas, lixiviación, MWMP, SPLP) sobre el material de arrastre extraído. La exigencia geoquímica del TR Minería 2016 (sección 5.1.1.3) se dirige expresamente a ‘los escombros o desechos de roca, rocas de las paredes del tajo, trabajos subterráneos, relaves, mineral, materiales de la pila de lixiviación, y materiales sólidos de desecho’ de proyectos de minería metálica, carbonífera u otros yacimientos sulfurados; no al material de arrastre.

Sin embargo, en cuencas que drenan yacimientos polimetálicos colombianos (Segovia, Marmato, Buriticá, Vetas-California,

Distrito Vetas, entre otros) la fracción fina (<2 mm) del material aluvial puede concentrar sulfuros (pirita, arsenopirita, galena, esfalerita) y carbonatos blandos arrastrados desde la cabecera. Cuando se lava y clasifica el agregado se exponen superficies frescas que pueden generar drenaje ácido (DAM) o lixiviar metales aún en condiciones de pH neutro (ML). En zonas con minería aurífera histórica aguas arriba puede además existir mercurio residual en sedimentos. En estos escenarios, las pruebas geoquímicas dejan de ser un formalismo importado y se convierten en una herramienta de gestión de riesgo y de circularidad.

Marco normativo: El Anexo 2 ‘Complemento para la Explotación de Material de Arrastre’ del TR EIA Minería 2016 (ANLA) y los Términos de Referencia UPME-UPTC 2015 para EIA de Materiales de Arrastre no exigen caracterización geoquímica del yacimiento, pruebas estáticas (ABA, NAG, Sobek), pruebas cinéticas (HCT, columnas), ni pruebas de lixiviación (TCLP, SPLP, MWMP) sobre el material extraído. Su énfasis es fluvio-sedimentológico (dinámica fluvial, topobatemetría, carga de fondo, recarga de sedimentos, crecientes). Por su parte, Propuesta de Economía Circular para el Sector Minero Convenio ATG GGC-606-2021 entre Agencia Nacional de Minería y Asociación de Técnicos Geólogos (febrero de 2022), aplicables a depósitos minerales en general (incluido el material de arrastre como sub-tipo), recomiendan en su Lineamiento 2 / Componente B una ‘Caracterización geoquímica de los materiales’ en fase de exploración con información sobre potencial de acidez, potencial de neutralización y elementos contaminantes (As, Cd, Hg, Zn, entre otros). Estos son lineamientos de buena práctica, no normas vinculantes. La exigencia regulatoria sí aplica cuando el material extraído se destina como insumo o materia prima dentro de un proyecto minero metálico sujeto al TR EIA Minería 2016, caso en el que ese TR exige cinéticas en columna sobre ‘todos los materiales minados expuestos al aire, incluyendo los materiales de construcción para la zona del proyecto, con excepción de los relaves’ (sección 5.1.1.3, p. 44).

Principio de economía circular: Este Lineamiento adopta las pruebas geoquímicas como buena práctica de economía circular —no como exigencia regulatoria genérica— en tres escenarios donde la presunción de inercia del material aluvial se debilita: (i) operaciones en cuencas que drenan distritos sulfurados conocidos; (ii) zonas con minería aurífera histórica aguas arriba con sospecha de mercurio residual o de partículas con galena, arsenopirita u otros sulfuros; y (iii) cuando el material extraído se destina como insumo a un proyecto minero metálico sujeto al TR Minería 2016. En estos casos, la caracterización aplica tanto al material extraído (con énfasis en la fracción fina <2 mm) como a los lodos del lavado y a los sedimentos del cauce. Fuera de estos escenarios, las pruebas pueden simplificarse al paquete básico de pH en pasta y Shake Flask como cribado preventivo de bajo costo.

Pruebas estáticas (ABA y NAG)

Tabla 3.1. Pruebas estáticas para caracterización geoquímica

Prueba	Metodología y resultado esperado	Cuándo aplicar	Costo / viabilidad PM
pH en pasta / Rinse pH	Indicador inmediato del pH actual del drenaje; mezcla 1:1 muestra:agua DI, lectura potenciométrica. Umbrales: roca o lodos pH<6,5 → AG; sobrecarga pH<5,5 → AG.	Cribado inicial sobre toda muestra de exploración.	Muy bajo / ALTA
Acid-Base Accounting (Sobek modificado)	S total, sulfuro-S, sulfato-S; cálculo de AP = %S × 31,25; NP por digestión ácida con HCl y titulación. Cálculo de NNP=NP-AP y NPR=NP/AP. Clasificación: NPR<1 PAG; NPR 1-2 dudoso; NPR>2 NAG.	Recomendado en escenarios de aplicación (cuencas sulfuradas, minería Au previa, destino insumo proyecto metálico) antes de movimientos de tierra; muestreo representativo de litotipos.	Medio / ALTA
Net Acid Generation (NAG)	Oxidación con H ₂ O ₂ y medición de acidez residual; complementario al ABA cuando NPR está en zona dudosa.	Sobre muestras NPR 1-2.	Medio / ALTA
Multi-elemental ICP (digestión aqua regia)	Inventario de elementos traza (As, Pb, Cd, Cu, Zn, Hg, Ni, Cr, Sb, Se, Mo).	Junto con ABA en exploración avanzada.	Medio / MEDIA
Shake Flask Extraction (SFE 3:1)	Lixiviación corta con agua DI 24 h, ratio 3:1; análisis multi-elemental ICP filtrado 0,45 µm.	Sobre muestras meteorizadas y acopios.	Medio / ALTA

Fuente: Elaboración propia con base en Price (2009) MEND 1.20.1 — Manual de Predicción ML/ARD; BC Ministry (1998); Sobek et al. (1978); ANLA TR Minería 2016.

Pruebas cinéticas

Tabla 3.2. Pruebas cinéticas para confirmación geoquímica

Prueba	Metodología y resultado esperado	Duración	Viabilidad PM
Humidity Cell Test (HCT)	1 kg muestra triturada 80%<6 mm; ciclo semanal de 7 días: 3 días aire seco, 3 días aire húmedo, día 7 enjuague con 500-750 mL agua DI; análisis pH, sulfato, conductividad, acidez, alcalinidad y multi-elemento ICP en lixiviado filtrado.	Mín. 20 semanas (ASTM D5744); estabilización típica 40 semanas.	MEDIA (laboratorio externo)
Field test cells / barriles	Celdas de campo expuestas a clima real; indicado para confirmar tasas de generación bajo condiciones tropicales.	≥ 1 ciclo hidrológico (12 meses).	MEDIA

Fuente: Elaboración propia con base en Price (2009), ASTM D5744-18, Sapsford et al., MEND.

Análisis mineralógico

La mineralogía permite identificar las fases reactivas (sulfuros generadores, carbonatos neutralizantes) y entender el comportamiento futuro del material. Para pequeña minería el paquete mínimo viable es: descripción visual + petrografía óptica + DRX cualitativo. La mineralogía automatizada (QEMSCAN/MLA) se justifica sólo cuando se observa discrepancia entre pruebas estáticas y cinéticas.

Pruebas de lixiviación

Tabla 3.3. Pruebas de lixiviación según escenario de uso

Prueba	Norma / Ratio L:S	Uso recomendado	Aplicación a material de arrastre
Shake Flask (SFE)	3:1 con agua DI, 24 h.	Solubles acumulados, productos de meteorización.	Cribado en exploración y operación.
TCLP	EPA 1311; 20:1 con ácido acético.	Clasificación por toxicidad (RCRA / RESPEL).	Caracterización de lodos y subproductos por la característica T (toxicidad) del Decreto 1076/2015 Anexo III.
SPLP	EPA 1312; 20:1 con agua sintética de lluvia ácida.	Lixiviación bajo condiciones naturales de precipitación.	Comercialización y uso final del agregado.

Fuente: Elaboración propia con base en Price (2009), EPA, Decreto 1076 de 2015, Resolución 062/2007 IDEAM.

Umbral operativos para clasificación geoquímica

Tabla 3.4. Umbral operativos de clasificación PAG/NAG

Parámetro	Verde (NAF)	Ámba / Incertidumbre	Rojo (PAG)	Parámetro	Verde (NAF)	Ámba / Incertidumbre	Rojo (PAG)
NPR (NP/AP)	> 2,0	1,0 - 2,0	< 1,0	pH en pasta (sobrecarga)	≥ 5,5	-----	< 5,5
NNP (kg CaCO ₃ /t)	> +20	-20 a +20	< -20	Rinse pH (sobrecarga)	≥ 5,0	-----	< 5,0
pH en pasta (roca estéril)	≥ 6,5	-----	< 6,5	S sulfuro (%)	< 0,1	0,1 - 0,3	> 0,3

Fuente: NPR de Price (2009) MEND 1.20.1, Cap. 14, p. 14-9 a 14-10. pH en pasta y rinse pH de BW Gold Mgmt Plan §4. NNP ±20 de BC AMD Task Force (1989) — no aparece literalmente en Price (2009). S sulfuro de convención BC / USEPA. NAG pH de AMIRA (2002) ARD Test Handbook.

3.2 CARACTERIZACIÓN POR CARACTERÍSTICAS DE PELIGROSIDAD DE RESIDUOS, LODOS Y SUBPRODUCTOS

La normativa colombiana clasifica los residuos peligrosos a partir del Decreto 1076 de 2015 (Capítulo 1, Título 6, Parte 2, Libro 2, que compila el Decreto 4741 de 2005). Sus Anexos I y II contienen listas de residuos por proceso o por corriente, y su Anexo III define las características de peligrosidad: Corrosiva (C), Reactiva (R), Explosiva (E), Tóxica (T), Inflamable (I) y Patógeno-infecciosa. El acrónimo coloquial ‘CRETIB’ / ‘CRETIP’ corresponde al uso técnico mexicano (NOM-052-SEMARNAT) y no aparece literalmente en la normativa colombiana revisada; en este Lineamiento se usa la expresión ‘características de peligrosidad’ del Decreto 1076/2015, manteniendo las mismas seis categorías analíticas.

Para operaciones de material de arrastre los flujos potencialmente sujetos a esta caracterización son: lodos de pozas de sedimentación, sedimentos retenidos en clarificadores, finos resultantes del lavado en zonas con sospecha de mercurio o metales, aceites y filtros de mantenimiento, y baterías y residuos eléctricos del campamento. Conviene precisar el alcance: la Cartilla RCD 2023 (MinAmbiente) y las Resoluciones 472 de 2017 y 1257 de 2021 no exigen pruebas analíticas de toxicidad (TCLP, SPLP) ni de las demás características sobre RCD ni sobre lodos de lavado de manera sistemática; la obligación es identificar los residuos contaminados con peligrosos y separarlos para gestionarlos como RESPEL conforme al Decreto 4741/2005 (Anexos I y II). En la práctica, esta separación se sustenta en la caracterización analítica del flujo cuando hay sospecha razonable —por origen del material, por presencia histórica de mercurio o metales en la cuenca, o por contacto con sustancias peligrosas— de que pueda estar contaminado.

Principio de economía circular: Una caracterización rigurosa por peligrosidad es la puerta de entrada de la valorización: un lodo cuya analítica demuestra que no presenta características de peligrosidad puede entregarse como insumo a un usuario industrial como ocurrió en el caso Industrial Concreto S.A. (Girardota, Antioquia), donde los lodos del lavado de agregados, tras implementar filtroprensa y pasar de 86 % a 93 % de recirculación de agua, se entregaron a Corona como materia prima para baldosas y adobes (Cartilla RCD 2023, MinAmbiente, p. 112-113). Un lodo con características de peligrosidad debe ir a gestor autorizado. Sin la prueba, el flujo entero suele terminar en escombrera por defecto, perdiéndose el potencial de circularidad.

Cuándo aplicar caracterización por peligrosidad

Tabla 3.5. Flujos típicos a caracterizar bajo Decreto 1076 de 2015

Flujo	Origen / descripción	Característica esperada y prueba clave
Finos del lavado en cuencas auríferas	Material aluvial fino con partículas sulfurosas, eventual presencia de Hg residual.	Toxicidad: TCLP-Hg, TCLP-As. Reactividad: prueba de generación de H ₂ S/HCN.
Sedimentos de clarificadores y filtros	Acumulados en sistemas de tratamiento de aguas de proceso.	TCLP completo + análisis de hidrocarburos si hay aceites.
Aceites usados, filtros, trapos contaminados	Mantenimiento de equipos.	Inflamabilidad (I), Toxicidad (T): caracterización por gestor autorizado.
Restos de combustible, ACPM y lubricantes	Operación de equipos.	Inflamabilidad: punto de inflamación < 60 °C → peligroso.
Baterías y residuos eléctricos y electrónicos (RAEE)	Energía y comunicación del campamento.	Caracterización por gestor autorizado conforme a la normativa específica de RAEE.

Fuente: Elaboración propia con base en Decreto 1076 de 2015, Título 6, Parte 2, Libro 2 (que compila el Decreto 4741 de 2005); Resolución 062 de 2007 IDEAM.

Pruebas analíticas para clasificación por peligrosidad

Tabla 3.6. Pruebas analíticas estándar por característica de peligrosidad (Decreto 1076/2015, Anexo III)

Característica	Definición técnica	Prueba estándar	Umbral de peligrosidad
Corrosividad (C)	Capacidad de corroer metales o tejidos.	Medición de pH; corrosión a acero SAE 1020 (NACE TM-01-69).	pH ≤ 2 o ≥ 12,5; tasa corrosión > 6,35 mm/año.
Reactividad (R)	Inestabilidad química, reacción violenta, generación de gases tóxicos.	Generación de HCN o H ₂ S a pH 2-12,5.	HCN > 250 mg/kg; H ₂ S > 500 mg/kg.
Explosividad (E)	Capacidad de detonar o reaccionar explosivamente.	Caracterización por análisis específico.	Aplica a materiales con peróxidos, azidas, etc.
Toxicidad (T)	Lixiviación de constituyentes tóxicos por encima de umbrales.	TCLP (EPA 1311) – extracción con ácido acético, ratio 20:1.	Tabla 1 Decreto 4741: As 5, Ba 100, Cd 1, Cr 5, Pb 5, Hg 0,2, Se 1 mg/L.
Inflamabilidad (I)	Capacidad de iniciar fuego por fricción, calor o humedad.	Punto de inflamación (ASTM D93 Pensky-Martens).	PI < 60 °C para líquidos.
Patógeno-Biológico (P)	Presencia de microorganismos patógenos.	Análisis microbiológico.	No aplica típicamente a material de arrastre.

Fuente: Elaboración propia con base en Decreto 4741 de 2005 (compilado en Decreto 1076/2015), Resolución 062/2007 IDEAM, EPA SW-846.

Caracterización fisicoquímica complementaria de subproductos

Cuando el objetivo es valorizar el subproducto en lugar de disponerlo, la caracterización por peligrosidad se complementa con análisis fisicoquímicos para verificar aptitud como insumo industrial.

Tabla 3.7. Caracterización para valorización del subproducto

Aplicación potencial	Análisis requerido	Norma de referencia
Adición a cemento o producción de ladrillo	Granulometría; química por óxidos (XRF); DRX; pérdidas por calcinación; reactividad puzolánica; contenido de metales pesados.	Especificaciones técnicas del usuario industrial; verificar criterios SAC NTC 6033 (ladrillos de arcilla) si se busca etiquetado ambiental.
Material de relleno / sub-base vial	Granulometría INV E-213; CBR; Límites de Atterberg; lixiviación SPLP / MWMP; contenido de metales pesados.	Especificaciones INVÍAS 2013; lixiviación EPA SW-846.
Insumo cerámico (baldosas, adobes)	Granulometría; plasticidad (Atterberg); composición química (XRF); DRX; pruebas de cocción y absorción.	Especificación del fabricante; caso Industrial Concreto S.A.-Corona, Cartilla RCD 2023, p. 112-113.
Estabilización de suelos y cierre minero	Granulometría; compactación; tasa de erosión; contenido de metales pesados; ausencia de elementos fitotóxicos.	Pruebas agronómicas y de revegetación; criterios del plan de cierre.

Fuente: Caso Industrial Concreto S.A.-Corona transcrito de Residuos de Construcción y Demolición 2023 (MinAmbiente), p. 112-113. Elaboración complementaria con base en Propuesta de Economía Circular para el Sector Minero Convenio ATG GGC-606-2021 entre Agencia Nacional de Minería y Asociación de Técnicos Geólogos (febrero de 2022).

3.3 MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS Y SEDIMENTOS DURANTE LA EXPLOTACIÓN

Durante la operación, los análisis se concentran en (i) calidad del agua de proceso y vertimientos; (ii) sólidos suspendidos y turbidez aguas abajo del frente activo; (iii) caracterización de sedimentos del cauce; y (iv) seguimiento geomorfológico para detectar erosión retrogresiva o cambios morfológicos. La Resolución 631 de 2015 fija los valores límite para vertimientos.

Principio de economía circular: Resolución 631 de 2015 (parámetros y valores máximos permisibles de vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales); Decreto 2811 de 1974 (artículos 102-106 ocupación de cauces); Resolución 1351 de 1995 (emisiones); Resolución 8321 de 1983 (ruido); Protocolo IDEAM 2007 para monitoreo y seguimiento del agua. Para concesiones bajo licencia: TR EIA Minería 2016 (ANLA), sección 5.1.5; Tabla 3 (parámetros sedimentos de fondo).

Programa de monitoreo de aguas durante la operación

Tabla 3.8. Parámetros de monitoreo de aguas en explotación de material de arrastre

Parámetro	Frecuencia mínima	Método / NTC	Punto de muestreo	Norma de cumplimiento
pH	Diaria/semanal.	NTC 3651.	Aguas arriba, aguas abajo y vertimiento.	Res. 631/2015.
Sólidos suspendidos totales (SST)	Mensual; quincenal en lluvias.	Standard Methods 2540 D.	Vertimiento y aguas abajo.	Res. 631/2015
Sólidos sedimentables	Mensual.	Cono Imhoff.	Vertimiento.	Res. 631/2015
Turbidez	Continuo si hay turbidímetro; semanal manual.	NTC 4707.	Aguas arriba/abajo del frente activo.	Comparativo a línea base.
Caudal vertido y receptor	Continuo (vertedero) o aforo periódico.	Aforo en sección estable.	Vertimiento.	Concesión.
Hierro total y manganeso	Trimestral.	Espectrofotometría AA / ICP.	Vertimiento.	Res. 631/2015.
Sulfatos	Trimestral.	Turbidimétrico Standard Methods.	Vertimiento.	Res. 631/2015.
Grasas y aceites	Trimestral.	Soxhlet (Standard Methods).	Vertimiento.	Res. 631/2015.
DBO5, DQO	Trimestral.	Standard Methods 5210 / 5220.	Vertimiento si hay aporte orgánico.	Res. 631/2015.
Mercurio total y metilmercurio	Bianual.	Cold vapor AA / EPA 1631.	Cuando aplica zona aurífera.	Res. 631/2015.
Coliformes totales y fecales	Trimestral si afecta captación humana.	Filtración por membrana.	Aguas abajo.	Res. 2115/2007
Niveles freáticos	Mensual.	Piezómetros en aluvial.	Áreas con freático somero.	EIA / PMA

Fuente: Elaboración propia con base en Guía Minero Ambiental de Explotación (MinAmbiente, 2002), Guía de Beneficio y Transformación, Resolución 631/2015, Protocolo IDEAM 2007.

Caracterización de sedimentos del cauce

La caracterización de sedimentos —especialmente en zonas con minería aurífera histórica aguas arriba— permite detectar carga heredada de mercurio, arsénico y otros contaminantes que pueden afectar la valorización del agregado y constituir pasivos al momento del cierre.

Tabla 3.9. Parámetros para caracterización de sedimentos de fondo

Parámetro	Unidad	Concesiones / uso humano	Vertimientos
Grasas y aceites	mg/kg	X	X
Fenoles	mg/kg	X	X
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/kg	X	X
HAP (16 EPA)	mg/kg	X	X
BTEX	mg/kg	X	X

Parámetro	Unidad	Concesiones / uso humano	Vertimientos
AOX (compuestos halogenados)	mg/kg	X	X
Cloruros, sulfatos, sulfuros, cianuros	mg/kg	X	X
Calcio, magnesio, sodio	mg/kg	-----	X
Metales pesados (Zn, Cu, Cr, Ni, Hg, Pb, Se, V, Cd, Ba)	mg/kg	X	X

Fuente: Elaboración propia con base en TR EIA Minería 2016 (ANLA), Tabla 3.

Adicionalmente se debe calcular el Índice de Calidad del Agua (ICA) y el Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (IACAL), así como el Índice de Langelier y la capacidad buffer (TR EIA Minería 2016, sección 5.1.5.1).

Seguimiento geomorfológico y de la dinámica fluvial

Tabla 3.10. Análisis geomorfológicos durante la explotación

Aspecto a controlar	Análisis y método	Frecuencia / observaciones
Profundidad de extracción	Verificación topográfica vs. cota base autorizada; respeto del lecho activo.	Mensual; pequeña minería: máximo 1,5 m bajo nivel del lecho.
Erosión retrogresiva y de talud	Inspección visual; secciones transversales de control; comparación multitemporal.	Trimestral o tras crecientes significativas.
Cambio morfológico del cauce	Análisis multitemporal con fotointerpretación; secciones del cauce.	Anual y antes/después de cada estación de lluvias.
Subsistencia / colmatación de pozas	Inspección visual y batimetría.	Mensual.
Tasa de sedimentación crítica	Seguimiento de aporte vs. extracción; balance sedimentológico.	Permanente.
Estabilidad de cruces de cauces por vías	Inspección de obras hidráulicas; permeabilidad del cauce.	Semestral y tras eventos extremos.

Fuente: Elaboración propia con base en Guía Minero Ambiental de Explotación (MinAmbiente, 2002), TR EIA Materiales de Arrastre (UPME-UPTC, 2015).

3.4 PRUEBAS DE CALIDAD DEL PRODUCTO PARA COMERCIALIZACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PROVENIENTES DE RÍOS Y CANTERAS

Los materiales de construcción provenientes de depósitos aluviales (materiales de arrastre) y de explotaciones en cantera constituyen una fuente fundamental de agregados para el desarrollo de obras de infraestructura vial, edificaciones, obras hidráulicas y elementos prefabricados.

Para garantizar su calidad, desempeño y aceptación comercial, es necesario realizar procesos de caracterización física, mecánica y de durabilidad mediante ensayos normalizados bajo las Normas Técnicas Colombianas (NTC), las Normas INVÍAS y demás especificaciones técnicas aplicables.

La selección de los ensayos dependerá del uso final previsto para el material, ya sea como agregados para concreto, morteros, mampostería, bases y subbases granulares, afirmados, filtros, rellenos estructurales, gaviones o elementos de protección hidráulica.

La siguiente tabla presenta los principales usos comerciales y los ensayos mínimos recomendados para evaluar la calidad del producto.

3.4.1 Ensayos de calidad para comercialización

Los materiales de construcción provenientes de canteras representan una de las principales fuentes de agregados utilizados en la construcción de vías, edificaciones, obras hidráulicas y proyectos de infraestructura. Sin embargo, para garantizar su aceptación en el mercado y asegurar un adecuado desempeño durante su vida útil, es indispensable verificar que estos materiales cumplan con las especificaciones técnicas y los requisitos de calidad establecidos por la normativa vigente.

La calidad de los materiales no depende únicamente de su apariencia o resistencia visual, sino de sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad, las cuales deben determinarse mediante ensayos de laboratorio realizados conforme a las Normas Técnicas Colombianas (NTC), las Normas de Ensayo INVÍAS y demás especificaciones aplicables según el uso previsto.

La caracterización técnica permite identificar las propiedades del material y definir su uso más adecuado, ya sea como agregado para concreto, morteros, mezclas asfálticas, bases y subbases granulares, afirmados, gaviones, filtros, enrocados, rellenos estructurales u otras aplicaciones en el sector de la construcción.

Desde el enfoque de la economía circular, la realización de ensayos de calidad facilita el aprovechamiento integral del recurso mineral, al permitir clasificar los materiales de acuerdo con sus características y destinarlos a la aplicación que mejor se ajuste a sus propiedades, reduciendo el desperdicio de material, incrementando su valor comercial y disminuyendo la necesidad de disposición como residuo.

A continuación, se presentan los principales ensayos de laboratorio recomendados para evaluar la calidad de los materiales provenientes de cantera, así como los usos potenciales para los cuales pueden ser comercializados, de acuerdo con las especificaciones técnicas vigentes.

Tabla 3.11. Ensayos de calidad para comercialización

Uso potencial	Ensayos mínimos recomendados	Norma de referencia
Base granular para vías	Granulometría, Límites de Atterberg, Equivalente de Arena, CBR, Desgaste Los Ángeles, Solidez, Partículas fracturadas.	INVÍAS Art. 330
Subbase granular para vías	Granulometría, Límites de Atterberg, Equivalente de Arena, CBR, Desgaste Los Ángeles.	INVÍAS Art. 320
Material de afirmado	Granulometría, CBR, Límites de Atterberg.	INVÍAS
Concreto estructural	Granulometría, Densidad, Absorción, Material que pasa tamiz No. 200, Impurezas orgánicas, Desgaste Los Ángeles.	NTC 174
Morteros	Granulometría, Material fino, Materia orgánica.	NTC 2240
Bloques y prefabricados	Granulometría, Absorción, Densidad, Material fino.	NTC 174
Mampostería y pega	Granulometría y limpieza del agregado fino.	NTC 2240
Gaviones	Resistencia mecánica, Durabilidad, Tamaño nominal, Absorción.	INVÍAS
Enrocados y protección de orillas	Densidad, Durabilidad, Resistencia a abrasión, Absorción.	INVÍAS
Filtros drenantes	Granulometría, Material fino, Permeabilidad.	INVÍAS
Rellenos estructurales	Granulometría, CBR, Proctor Modificado.	INVÍAS
Subdrenes	Granulometría y durabilidad.	INVÍAS
Material para estabilización de taludes	Granulometría, CBR, Compactación.	INVÍAS
Material para obras hidráulicas	Granulometría, Durabilidad, Abrasión, Absorción.	INVÍAS
Arenas para construcción	Granulometría, Equivalente de Arena, Impurezas Orgánicas.	NTC 174

3.4.2 Ensayos de laboratorio y criterios de calidad

Análisis granulométrico

Determina la distribución de tamaños de partículas y permite establecer la clasificación del material según su uso potencial.

Normas de referencia:

- INV E-123
- NTC 77

Aplicación:

- Bases
- Subbases
- Concreto
- Morteros
- Filtros
- Rellenos

Límites de Atterberg

Permiten determinar el comportamiento plástico de los finos presentes en el material.

Normas de referencia:

- INV E-125
- INV E-126

Aplicación:

- Bases
- Subbases
- Afirmados
- Rellenos

Equivalente de Arena

Evalúa la limpieza del material y el contenido relativo de partículas arcillosas.

Normas de referencia:

- INV E-133

Aplicación:

- Bases
- Subbases
- Concreto
- Arenas

Desgaste Los Ángeles

Determina la resistencia al desgaste y fragmentación de los agregados.

Normas de referencia:

- INV E-218
- NTC 98

Aplicación:

- Bases
- Subbases
- Concreto
- Gaviones
- Enrocados

CBR (California Bearing Ratio)

Mide la capacidad de soporte del material para aplicaciones viales.

Normas de referencia:

- INV E-148

Aplicación:

- Base granular
- Subbase granular
- Afirmados
- Rellenos estructurales

Proctor Modificado

Permite determinar la humedad óptima y la densidad máxima seca.

Normas de referencia:

- INV E-142

Aplicación:

- Bases
- Subbases
- Rellenos

Densidad y absorción

Determinan la calidad física y porosidad de los agregados.

Normas de referencia:

- NTC 176
- NTC 237

Aplicación:

- Concreto
- Morteros
- Prefabricados
- Gaviones

Solidez en sulfatos

Evalúa la resistencia del agregado frente a ciclos de humedecimiento y secado.

Normas de referencia:

- INV E-220

Aplicación:

- Bases
- Subbases
- Obras hidráulicas
- Gaviones

Impurezas orgánicas

Determina la presencia de materia orgánica que pueda afectar el desempeño del concreto o mortero.

Normas de referencia:

- NTC 127

Aplicación:

- Concreto
- Morteros

3.4.3 Requisitos mínimos recomendados para comercialización

Tabla 3.12. Requisitos mínimos recomendados para comercialización

Propiedad	Base Granular	Subbase Granular	Concreto
Granulometría	Conforme Art. 330 INVÍAS.	Conforme Art. 320 INVÍAS.	Conforme NTC 174.
Índice de Plasticidad	≤ 3	≤ 6	No aplica
Equivalente de Arena	≥ 30	≥ 25	Según NTC
CBR	$\geq 80 \%$	$\geq 30 \%$	No aplica
Desgaste Los Ángeles	$\leq 40 \%$	$\leq 50 \%$	Según diseño
Absorción	Según especificación.	Según especificación.	Conforme NTC 176.

Nota: Los criterios anteriores dependen de la Clase / Nivel de Tránsito (INVÍAS: Clase C = NT1, Clase B = NT2, Clase A = NT3); los valores de la tabla corresponden a NT1–NT2 y para NT3 son más exigentes (Base CBR $\geq 95 \%$, Sub-base CBR $\geq 40 \%$ y base no plástica). Para base granular se exigen además dos ensayos: caras fracturadas (INV E-227; $\geq 50/70/100 \%$ según el nivel de tránsito) y partículas planas y alargadas — alargamiento y aplanamiento (INV E-230; $\leq 35 \%$). La granulometría se verifica con la norma INV E-123.

3.4.4 Recomendaciones para pequeños mineros

1. Realizar una caracterización inicial completa del depósito antes de iniciar la comercialización, mediante un muestre representativo del depósito de acuerdo con las características geológicas y operativas de la explotación
2. Ejecutar inicialmente los ensayos de granulometría, límites de Atterberg, equivalente de arena, desgaste Los Ángeles y CBR, los cuales permiten una evaluación preliminar de la aptitud del material.
3. Si los resultados son favorables, complementar la caracterización con los demás ensayos exigidos por la especificación aplicable.
4. Mantener certificados de calidad actualizados emitidos por laboratorios acreditados.
5. Implementar controles periódicos de granulometría durante la explotación.
6. Segregar materiales según tamaño y calidad para incrementar su valor comercial.
7. Identificar mercados específicos (vial, concreto, prefabricados, obras hidráulicas) para optimizar el aprovechamiento del recurso.
8. Mantener registros de laboratorio que permitan soportar técnicamente la comercialización del material y demostrar su conformidad con los requisitos de calidad exigidos por los compradores o proyectos de infraestructura.

9. Actualizar periódicamente los ensayos cuando cambien las condiciones del frente de explotación o del depósito.
10. Verificar siempre la versión vigente de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVÍAS, ya que los criterios de aceptación pueden ser actualizados por la entidad.

La realización de estos ensayos permite incrementar la competitividad del producto, facilitar su ingreso a mercados especializados y garantizar el cumplimiento de los requisitos exigidos por las especificaciones técnicas de infraestructura y construcción vigentes en Colombia.

Nota: Los valores presentados corresponden a criterios de referencia comúnmente empleados por las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVÍAS para materiales granulares. La aceptación final del material deberá verificarse conforme a la versión vigente de los Artículos 320 (Subbase Granular) y 330 (Base Granular), incluyendo la totalidad de requisitos granulométricos, físicos, mecánicos y de durabilidad aplicables.

3.5 PAQUETES ANALÍTICOS MÍNIMOS POR FASE Y ESCALA (PEQUEÑA MINERÍA)

Esta sección consolida en tres paquetes diferenciados Exploración, Explotación/Beneficio y Comercialización/Cierre el conjunto mínimo viable de análisis que un titular de pequeña minería de material de arrastre debe contratar para cumplir simultáneamente con (i) la regulación ambiental colombiana, (ii) los criterios técnicos de calidad para uso, y (iii) los principios de economía circular.

Paquete A — Exploración / Caracterización inicial

Tabla 3.13. Paquete A — Exploración

Análisis	Justificación	Costo relativo
Geología regional + local + geomorfología fluvial multitemporal	Marco para todo el proyecto; obligatorio en EIA/PMA.	Medio
Estudios hidrológicos e hidráulicos básicos (caudales, IDF, transporte sedimentos)	Define disponibilidad y dinámica del cauce.	Medio
Línea base hídrica: pH, OD, conductividad, SST, turbidez, DBO5, coliformes, Hg si aplica	Punto de comparación para futuros monitoreos.	Bajo
Granulometría, densidad, peso unitario, absorción	Caracterización del depósito y de su valor comercial potencial	Muy bajo
Petrografía óptica + DRX cualitativo	Identifica sulfuros y minerales valorizables.	Medio
pH en pasta + S total	Cribado de potencial generador de ácido.	Medio
Sobek-NP simple + cálculo NPR	Confirma o descarta riesgo DAM.	Medio
Shake Flask 3:1 + ICP básico (As, Pb, Cd, Zn, Cu, Fe, Mn)	Lixiviabiles actuales; útil para predecir comportamiento ML.	Medio
Caracterización biológica cualitativa del tramo	Línea base para EIA.	Medio

Fuente: Elaboración propia con base en GBPMA, Price (2009), Guía Minero-Ambiental para la Etapa de Exploración (MinMinas y MinAmbiente, 2023).

Paquete B — Explotación y Beneficio

Tabla 3.14. Paquete B — Explotación / Beneficio

Análisis	Justificación	Frecuencia
pH, SST, sólidos sedimentables, turbidez, caudal en vertimiento	Cumplimiento Resolución 631/2015.	Diaria-semanal.
Hierro, manganeso, sulfatos, grasas y aceites en vertimiento	Cumplimiento Resolución 631/2015.	Trimestral.
Mercurio total y metilmercurio en agua y sedimentos (zonas auríferas)	Detección de carga heredada.	Bianual.
ABA completo + NAG sobre muestras dudosas	Confirmación geoquímica con avance del frente.	Por cambio de litotipo.
DRX semicuantitativo de finos del lavado	Identifica sulfuros y carbonatos en lodos.	Por cambio de frente.
HCT (min. 20 semanas) si NPR < 2 o S sulfuro > 0,3 %	Confirmación cinética del comportamiento PAG.	Una vez por litotipo dudoso.
TCLP para lodos de pozas y finos del lavado (cuando hay sospecha)	Caracterización por peligrosidad – clave para valorización vs. RESPEL.	Anual o por cambio de frente.
Caracterización geomorfológica del frente (perfil longitudinal y secciones transversales).	Control de erosión retrogresiva y profundidad.	Trimestral.
Caracterización de finos para potencial valorización (granulometría, química, plasticidad).	Define mercado para subproducto.	Por lote significativo.
Tasa de recirculación de agua de proceso	Indicador economía circular; meta > 80 %.	Mensual.

Fuente: Elaboración propia con base en Guías Minero-Ambientales (MinAmbiente, 2002), TR EIA Minería 2016 (ANLA), Cartilla EC Minería (Minminas-ATG).

Paquete C — Comercialización y Cierre

Tabla 3.15. Paquete C — Comercialización / Cierre

Análisis	Justificación	Frecuencia
Granulometría NTC 77 + módulo de finura + finos pasante #200	Certificación NTC 174 (concreto).	Por lote o cada 2 000 m ³ .
Densidad, absorción, peso unitario	Especificaciones agregado.	Por lote.
Desgaste Los Ángeles (NTC 93)	Aplicaciones viales.	Por lote o cada 5 000 m ³ .
Sanidad con sulfato de sodio (NTC 126)	Concreto en ambientes severos.	Cada 5 000 m ³ .
Reactividad álcali-agregado (ASTM C 1260)	Concreto estructural en climas húmedos.	Una vez por frente y al inicio
CBR + Atterberg (INV E-148, E-125, E-126)	Sub-base y base granular.	Cada 2 000 m ³ .
SPLP (EPA 1312) sobre agregado	Lixiviación bajo lluvia natural; uso final no estructural.	Cada cambio de frente.
Caracterización por peligrosidad (Decreto 1076/2015 Anexo III) de cualquier sobrante destinado a disposición externa	Identificación RESPEL vs. no peligroso; entrega a gestor autorizado.	Por entrega.
Restitución morfodinámica del cauce: secciones de control, devolución de sedimentos finos	Plan de cierre; estabilidad geomorfológica.	Permanente y al cierre.
Indicadores de circularidad: % aprovechamiento, tasa recirculación, sustitución agregado virgen	Reporte EC y registro RCD.	Anual.

Fuente: Elaboración propia con base en NTC, INVÍAS, EPA, Decreto 1076/2015, Resolución 1257/2021, ENEC (2019).

3.6 INDICADORES DE MONITOREO Y VERIFICACIÓN

La verificación del cumplimiento del régimen analítico se sustenta en indicadores cuantitativos que pueden ser auditados por la autoridad ambiental, la ANM y los compradores del producto. Se proponen tres bloques: ambientales, de calidad de producto y de circularidad.

Tabla 3.16. Indicadores ambientales, de calidad de producto y economía circular

Indicadores ambientales		
Indicador	Cálculo / metodología	Meta orientativa
Cumplimiento de SST en vertimiento	Promedio mensual SST vertimiento $\leq$ valor Res. 631/2015.	100 % de muestras conformes.
Variación de turbidez aguas abajo	Δ NTU aguas abajo vs. línea base	$\leq$ 50 % incremento
NPR del material extraído	Promedio NP/AP por litotipo	> 2 (NAG)
% lodos clasificados como no peligrosos	Lodos no peligrosos / lodos totales.	> 90 %
Índice ICA aguas abajo	Cálculo IDEAM 2007.	$\geq$ Bueno.
Indicadores de calidad de producto		
% lotes conformes NTC 174	Lotes conformes / lotes producidos.	> 95 %.
Cumplimiento granulometría especificación	% muestras dentro de banda granulométrica.	≥ 90 %.
Variabilidad módulo de finura	Desviación estándar entre lotes.	$< 0,2$.
Trazabilidad por lote	% lotes con cadena de custodia documentada.	100 %.
Indicadores de economía circular		
Tasa de recirculación de agua de proceso	Agua recirculada / agua usada.	> 80 %.
Tasa de aprovechamiento de finos	Finos valorizados / finos generados.	> 50 % (creciente).
Sustitución de agregado virgen por reciclado en mezclas internas	Volumen agregado reciclado / volumen total.	Cumplir metas Res. 1257/2021 según categoría municipal.
Volumen restituído al cauce en cierre	m ³ devueltos / m ³ extraídos en exceso de la recarga natural	Meta progresiva al cierre.
Acuerdos de simbiosis industrial activos	Número de acuerdos formales con cementeras/ladrilleras/otros	≥ 1

Fuente: Elaboración propia con base en ENEC (2019), Cartilla EC Minería (Minminas-ATG), Cartilla RCD 2023, Resolución 631/2015, Resolución 1257/2021.







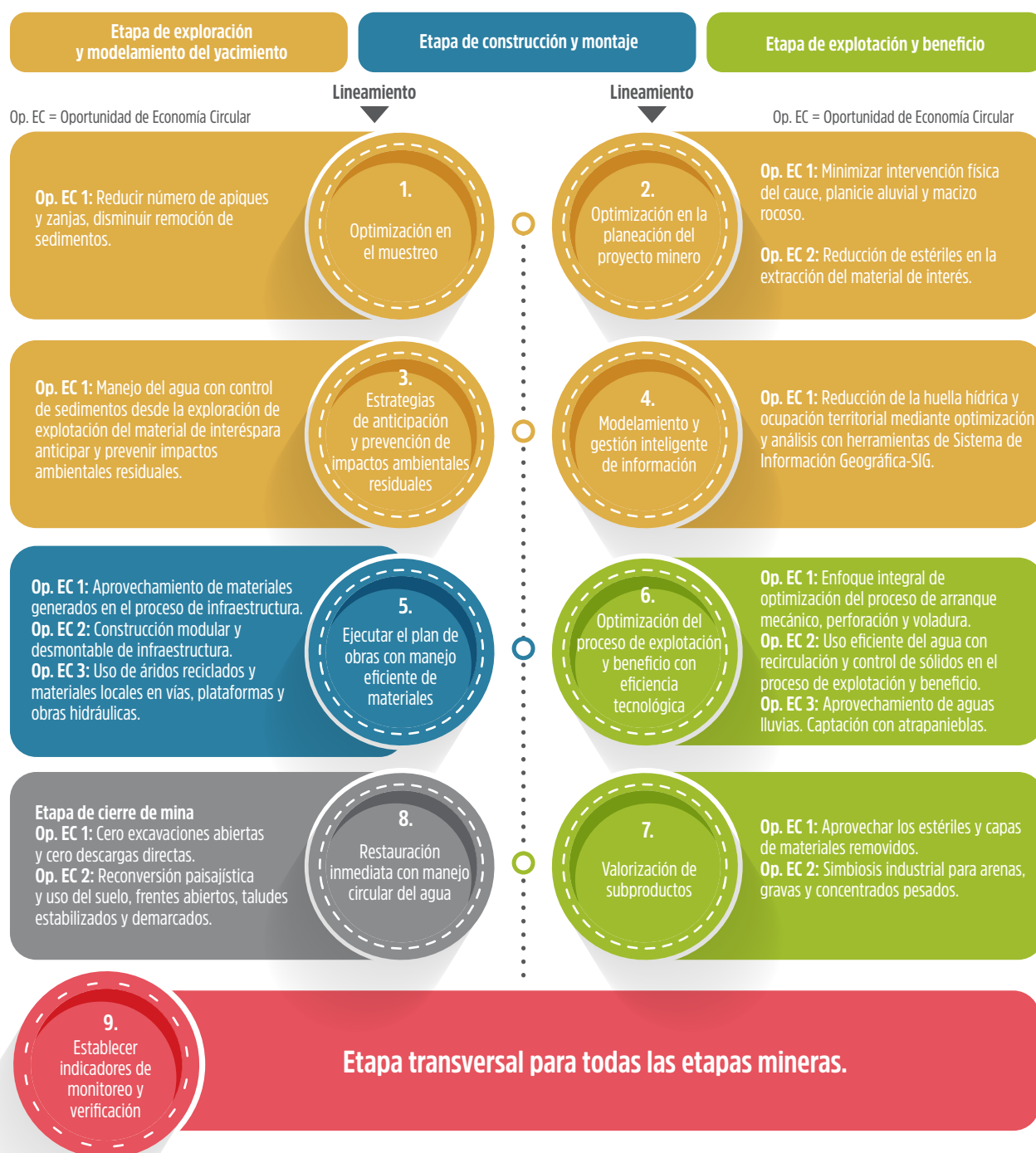
4

BASES TÉCNICAS PARA LA APLICACIÓN DE LAS LINEAS ESTRATÉGICAS DE ECONOMÍA CIRCULAR EN LAS ETAPAS DE LA MINERÍA DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN

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 materiales para la construcción. A partir de estos lineamientos, es posible reconocer prácticas, tecnologías y alternativas de gestión que permiten aplicar los principios de la economía circular de manera concreta, considerando las particularidades técnicas y operativas de cada fase del ciclo minero.

Este apartado desarrolla en profundidad los lineamientos técnicos, ambientales y operativos relacionados con la economía circular aplicada a la explotación de materiales de construcción como arenas, gravas y agregados pétreos. Se abordan estrategias de optimización de recursos, reducción de impactos ambientales, reutilización de materiales, eficiencia hídrica y energética, así como la implementación de modelos de negocio circulares en el contexto colombiano. Asimismo, se consideran las normativas vigentes, las mejores prácticas internacionales y la integración con herramientas tecnológicas como SIG, monitoreo ambiental y planificación minera sostenible.

Figura 4.1. Lineamientos de economía circular en minería de oro de aluvión

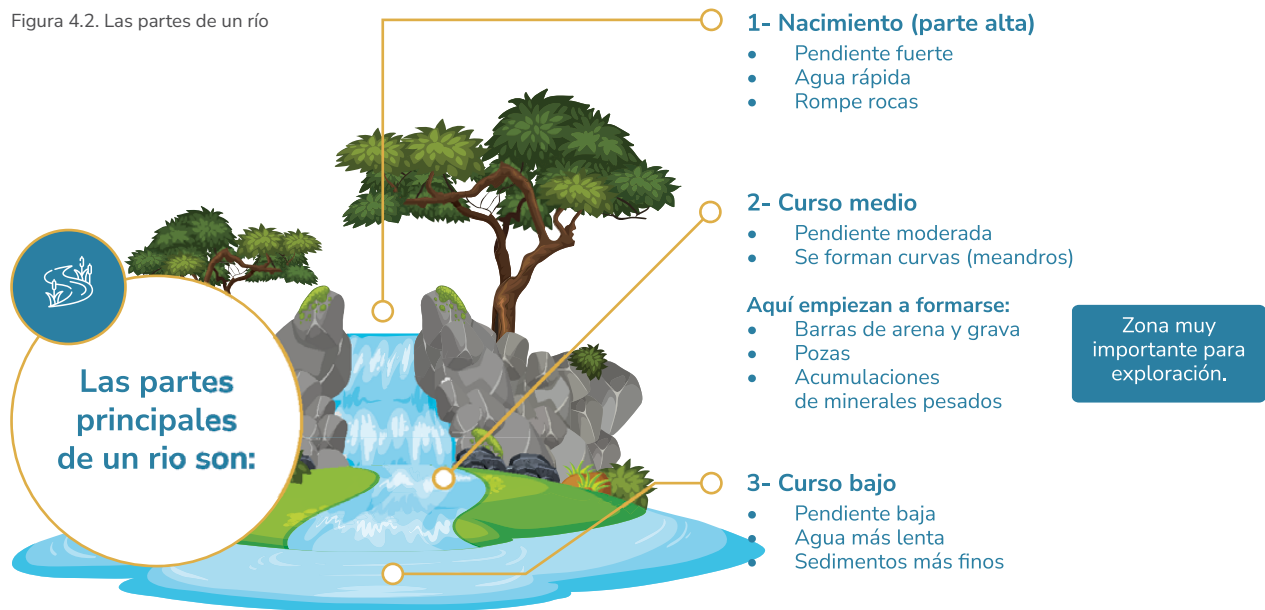


4.1 MARCO CONCEPTUAL

Un río es una corriente natural de agua que nace en la montaña, baja por gravedad, transporta arena, grava y piedras y deposita materiales cuando pierde fuerza, es por ello, que la minería aluvial no es sacar arena al azar sino entender cómo el río trabaja como una “mesa gravimétrica natural” toda vez que el río mueve, clasifica, concentra y deposita el oro.

Si entiendes el río, entiendes dónde está el material de interés. Por consiguiente, se darán estas bases conceptuales iniciales para entender y adentrarnos a los lineamientos y oportunidades de economía circular que tenemos para esta guía.

Figura 4.2. Las partes de un río



En la siguiente figura 4.3 podemos apreciar que el río transporta sedimentos desde zonas altas. Cuando la velocidad disminuye, deposita primero los materiales más pesados.

La exploración y explotación responsable de materiales de construcción requiere comprender el funcionamiento integral del sistema fluvial. La distribución y concentración de estos materiales no es aleatoria, sino que está controlada por cuatro componentes técnicos fundamentales:

- La geomorfología del río (formas del relieve fluvial o formas del terreno).
- La sedimentología del depósito aluvial (estructura y organización de los materiales, es decir, cómo están organizadas las capas).
- La hidráulica fluvial (dinámica del flujo y energía del agua, es decir cómo se mueve el agua).
- Nivel freático (superficie superior de la zona saturada del subsuelo).

El entendimiento articulado de estos cuatro elementos permite optimizar el muestreo, reducir la intervención física y aplicar criterios de economía circular en cada etapa del proyecto minero.

a) Geomorfología fluvial

La geomorfología fluvial estudia las formas del terreno generadas por la acción del agua corriente. En sistemas aluviales, estas formas determinan dónde se erosionan, transportan y depositan los sedimentos.

Los elementos geomorfológicos relevantes son (ver figura 4.4):

Entre los principales elementos geomorfológicos asociados a la concentración de materiales de interés económico se encuentran:

- **Canal activo:** zona por donde circula el flujo principal del río.
- **Barras internas:** depósitos sedimentarios formados en la parte interna de los meandros.

- **Barras laterales:** acumulaciones de sedimentos adyacentes al canal.
- **Planicie aluvial:** superficie plana adyacente al río que se inunda periódicamente.
- **Antiguos cauces (paleocauces):** trayectorias abandonadas por el río debido a procesos naturales de migración lateral.
- **Terrazas aluviales:** antiguos niveles del río que quedaron elevados respecto al cauce actual.

Por otro lado, en zonas de muy alta concentración en regiones como el Chocó y el Cauca tenemos:

- **Abanicos aluviales:** es como un abanico abierto de sedimentos que deja el río al salir de la montaña. El agua venía con fuerza, de repente se abre el terreno y el río se “riega” y suelta material. Resultado: se forma una zona ancha con gravas, piedras y arena
- **Cono de deyección:** es parecido, pero más concentrado y empinado: sale de una quebrada o canal estrecho y se deposita material en forma de cono, es más localizado. (ver figura 4.3).

Figura 4.3.
Abanico aluvial
y cono de
deyección

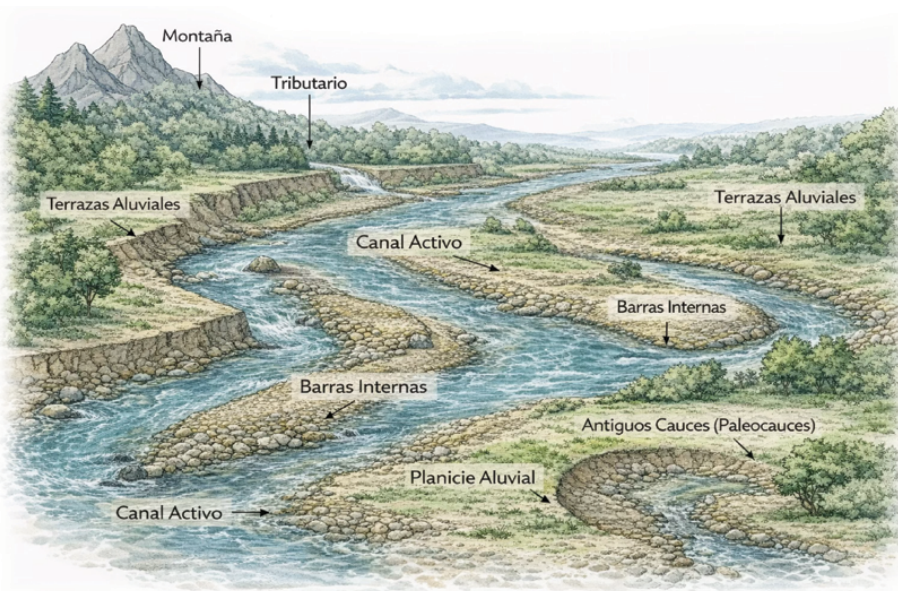
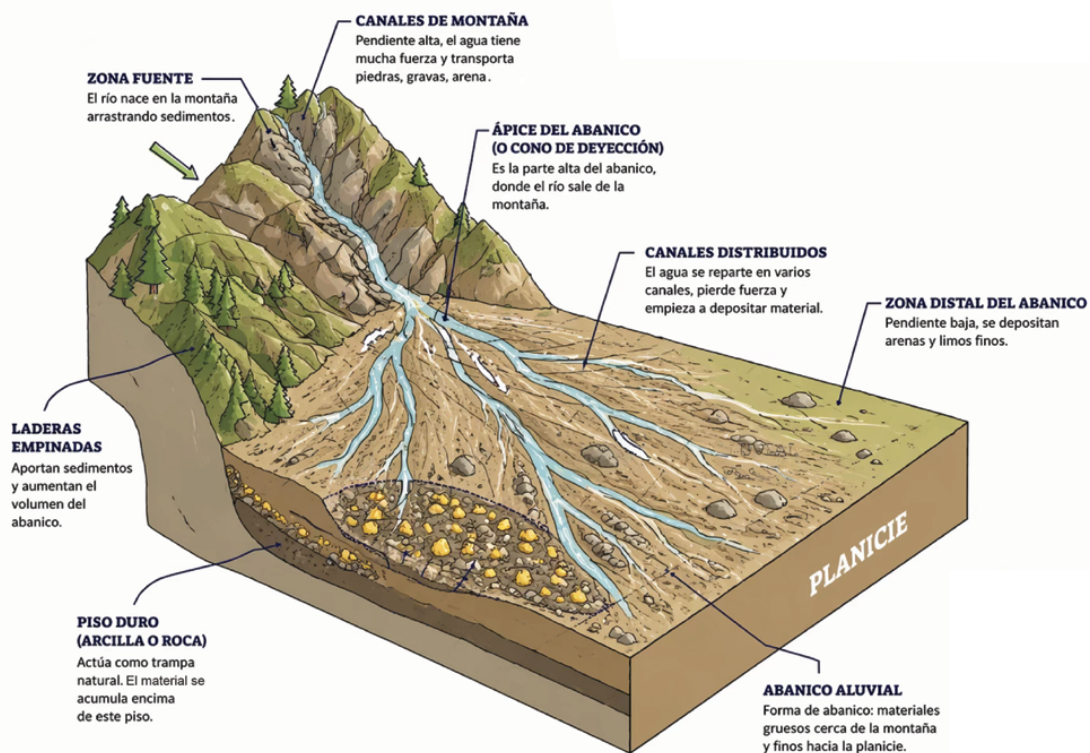
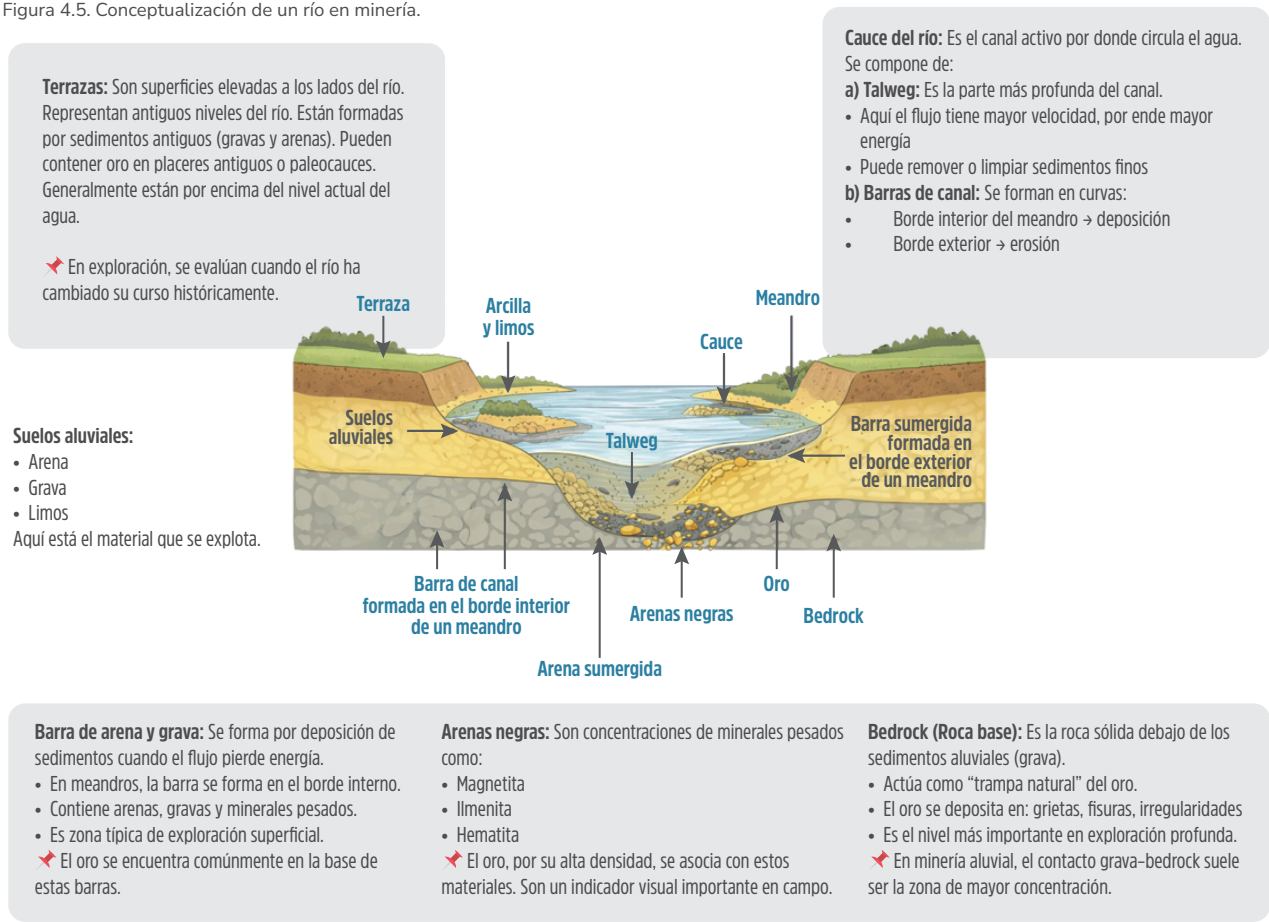


Figura 4.4. Elementos
geomorfológicos asociados a la
concentración de oro aluvial

Figura 4.5. Conceptualización de un río en minería.



Desde el punto de vista minero, estas formas condicionan la localización de zonas mineras de interés económico, ya que reflejan áreas de deposición selectiva de sedimentos.

b) Sedimentología del depósito aluvial

La sedimentología no es más que entender cómo el río acomoda los materiales. Un depósito aluvial normalmente tiene capas así (de arriba hacia abajo):

1. Suelo orgánico (tierra negra)
2. Arenas y limos (material fino)
3. Gravadas y piedras (cascajo)
4. Capa donde se concentra el oro
5. Arcilla dura o roca madre (el "piso")

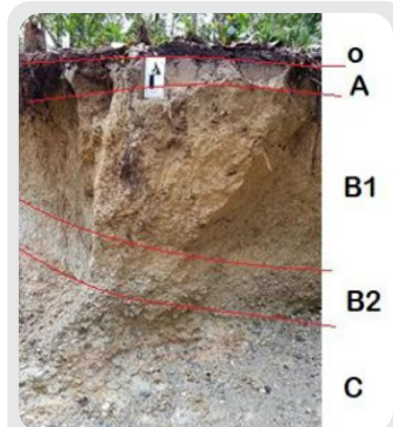
El oro, por ser pesado, baja hasta donde encuentra un "piso duro" y ahí se queda. Por eso el contacto entre grava y arcilla o roca es clave: es como una trampa natural. A continuación en la figura 4.6 se muestra un ejemplo de los yacimientos de depósitos aluviales.

Cómo trabaja el río (clave para no excavar de más)

El río separa el material solo:

- Lo grueso (piedra) se queda primero
- Lo fino (arena, barro) se va con el agua

Figura 4.6. Ejemplo de sedimentología de un depósito aluvial



Fuente: Foto de un perfil de suelo a la orilla del Río Quito (N 05°30'28.0" W 076°44'53.8"). Se presentan los horizontes del suelo. Tomado de Tesis para obtener el título de Geocientífica de la Universidad de los Andes. Caracterización de la concentración de metales en agua, sedimentos y suelos a lo largo del río Quito (Chocó), zona de explotación de oro aluvial. 2019

Cómo te ayuda esto (economía circular en la práctica)

Si entiendes bien las capas:

- Excavas solo donde hay material de interés
- Mueves menos material
- Usas menos agua
- No dañas tanto el río
- Trabajas más rápido y con menos costo

En la siguiente figura 4.7 se da una guía visual para campo con componentes importantes como: dónde muestrear, cómo identificar capas y dónde está el material de interés.

Figura 4.7. Componentes del suelo



c) Hidráulica fluvial

La hidráulica fluvial estudia el comportamiento del flujo de agua en el canal. Existen las siguientes variables principales que controlan la dinámica del río:

- Caudal
- Velocidad del flujo
- Pendiente longitudinal
- Rugosidad del lecho
- Sección transversal del canal

Estas variables determinan la capacidad del río para erosionar, transportar o depositar sedimentos. Existe la energía del sistema fluvial, permitiendo analizar la deposición de sedimentos, es decir, cuándo el río pierde energía —por ejemplo (ver figura 4.8), en: curvas internas, cambios de pendiente, zonas de ensanchamiento del canal y en la confluencias (unión de dos o más corrientes de agua, ríos) se favorece la deposición de sedimentos gruesos y la concentración de minerales pesados. Por el contrario, en zonas de alta energía se produce erosión y remoción de material previamente depositado.

Por otro lado, es importante en minería de oro aluvial conocer lo siguiente:

d) Nivel freático

El nivel freático es la superficie superior de la zona saturada del subsuelo. Es el punto donde:

- Los poros del suelo o sedimento están completamente llenos de agua.
- La presión del agua es igual a la presión atmosférica.

Por consiguiente, no es fijo y depende de varios factores como es:

Proximidad al río

Entre más cerca al cauce activo:

- Más alto el nivel freático.
- Mayor saturación del sedimento.

Época climática

- En temporada de lluvias, el nivel freático asciende.
- En temporada seca, desciende.

Puede variar varios metros dependiendo del régimen hidrológico.

Tipo de sedimento

- Gravas gruesas ---> alta permeabilidad ---> nivel responde rápido.
- Arcillas ---> baja permeabilidad ---> agua retenida.

La importancia de entender e integrar estos cuatro componentes en minería aluvial permite tener claridad de la concentración del material de interés coincidiendo la forma geomorfológica favorable, una arquitectura sedimentaria adecuada y una disminución de la energía hidráulica. Por lo tanto, la exploración técnica debe basarse en la lectura integrada del sistema fluvial y no en excavaciones extensivas sin criterio geomorfológico.

Figura 4.8. Interpretación de la energía del sistema fluvial



Figura 4.9. Explicación del nivel freático en minería



Topografía

En zonas bajas de planicie: El nivel freático es somero.
En terrazas altas: El nivel freático suele estar más profundo.

Conectividad hidráulica con el río

En sistemas aluviales activos: El nivel freático está hidráulicamente conectado al nivel del río.
Cuando el río crece ---> el freático sube.
Cuando el río baja ---> el freático desciende.

Dado lo anterior, en minería es importante tener claro el nivel freático porque:

1. Controla la profundidad real explotable

Si el freático es muy alto:

- Las excavaciones se llenan de agua.
- Aumenta inestabilidad.
- Se requiere bombeo.

2. Influye en la concentración aurífera

El oro se concentra típicamente:

- En la base del paquete aluvial
- Sobre roca madre o arcilla impermeable

Si el freático está alto:

- Se dificulta alcanzar la zona basal.

3. Determina impactos ambientales

Interceptar el freático puede:

- Alterar flujo subterráneo
- Generar drenaje artificial
- Modificar microhidrología

Cómo puede saber un pequeño minero dónde está el nivel freático?

En exploración aluvial hay varios métodos:

Tabla 4.1. Diferentes métodos para determinar el nivel freático

Método 1: Observación directa en apique	Método 2: Piezómetros simples	Método 3: Relación con el nivel del río	Método 4: Indicadores indirectos
Cuando excavas y: • Aparece agua • Se empieza a infiltrar lateralmente • El fondo se humedece constantemente Ese es el nivel freático aproximado. Importante: Debe medirse la profundidad exacta.	Se instala un tubo perforado en perforación manual. Se deja estabilizar y se mide: • Profundidad hasta el espejo de agua. Es el método más técnico y preciso.	En planicie aluvial conectada: El freático suele estar a una cota (punto de referencia) similar al nivel del río cercano. Puede estimarse midiendo: • Elevación del terreno • Elevación del agua del río	• Vegetación hidrófila (ej. juncos) • Suelos permanentemente húmedos • Manchas ferruginosas • Olores reductivos Indican freático somero.

Importante saber para todos los estudios a presentar ante las autoridades:
El nivel freático en depósitos aluviales corresponde a la superficie superior de la zona saturada y está dinámicamente controlado por el régimen hidráulico del río, la permeabilidad del sedimento y la estacionalidad climática.

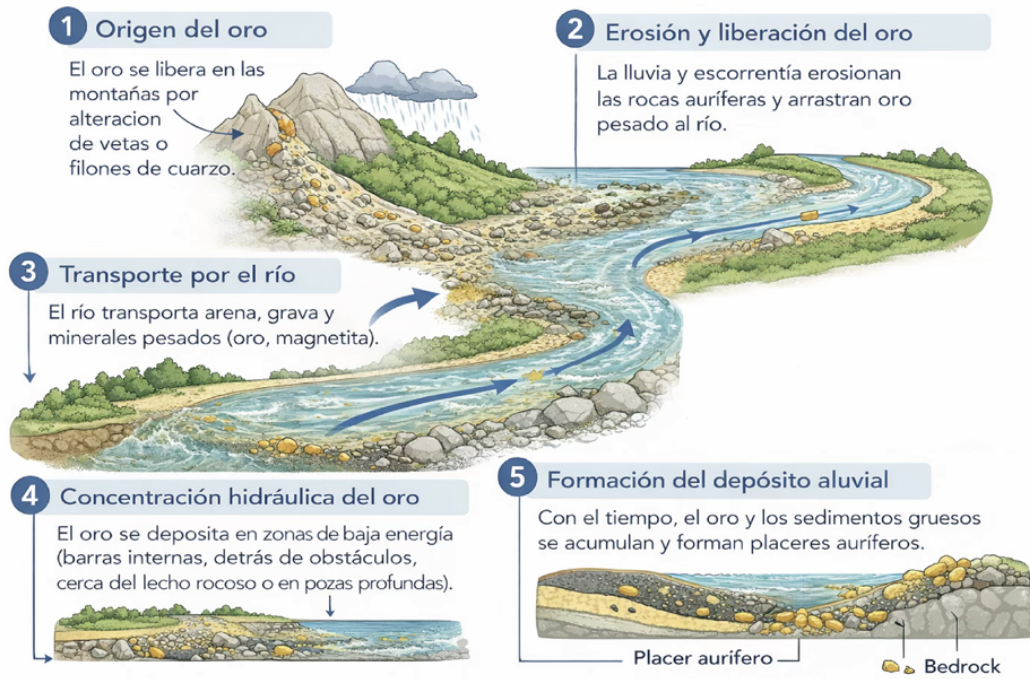
Para concluir este marco conceptual entonces nos hacemos la pregunta: **¿cómo se forman los depósitos aluviales en un río?** (Ver figura 4.10).

Todo lo anterior permite:

- Optimizar el diseño de muestreo.
- Disminuir el volumen de material removido.
- Reducir consumo energético.
- Minimizar alteración del cauce.
- Aplicar restauración progresiva.

Del cual vamos mencionando en cada lineamiento y oportunidad de economía circular de la presente guía.

Figura 4.10. Formación de depósitos aluviales



4.2 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE EXPLORACIÓN

La búsqueda de materiales de construcción es una fase crucial para entender la dinámica de los sedimentos y el potencial financiero de un yacimiento, y generalmente se lleva a cabo a través de una serie de actividades secuenciales que ayudan a disminuir la incertidumbre geológica y guiar la toma de decisiones.

Varios autores destacan que esta clase de exploración necesita combinar la observación directa del entorno, el análisis de granulometría, técnicas gravimétricas y cartografía sistemática para localizar las unidades con material de interés y su distribución en el espacio (Hentschel, Priester & Hruschka, 2003; Levinson & Cook, 2010).

Estas etapas integran trabajo de campo, recolección de datos, validación analítica y modelación espacial, lo que posibilita pasar de una descripción general del terreno a una comprensión más detallada del comportamiento de los sedimentos y su composición mineral. De manera complementaria, investigaciones recientes han subrayado la relevancia de implementar prácticas sostenibles y de optimización de recursos en las etapas iniciales, como la administración digital de datos, la delimitación operativa temprana y el uso eficiente del agua, para reducir la huella ambiental vinculada a la exploración (Talbot & Veiga, 2021). Con este esquema conceptual, las secciones subsecuentes detallan cada actividad, sus insumos y resultados, así como las posibilidades de incorporar conceptos de economía circular en la exploración de materiales para la construcción.

A continuación en la tabla 4.3, se describen las características y el flujo general de operaciones en una mina de materiales de construcción aluvial, estructurando un diagrama de entrada–proceso–salida desde un enfoque de circularidad. Esto permite, desde la fase inicial de exploración, planificar el manejo eficiente de residuos, materiales removidos y flujos generados, optimizando el uso de recursos minerales y no minerales. En el marco de esta guía, la gestión de la información de exploración se articula entre la Guía Técnica Colombiana GTC 314 y el Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales (ECRR-Col). La GTC 314 establece un enfoque de economía circular que exige identificar, medir y optimizar los flujos de materiales, agua y energía, así como asegurar su trazabilidad y control a lo largo del proceso (entrada–proceso–salida). En exploración minera, esto se traduce en la captura estructurada de datos de campo (muestreo, volúmenes removidos, consumo y recirculación de agua, generación de estériles), su validación y almacenamiento con criterios de calidad y seguimiento.

Estos datos, organizados bajo los principios de la GTC 314, constituyen la base técnica que el ECRR-Col utiliza para la estimación, clasificación y reporte de recursos y reservas, de acuerdo con niveles de confianza (inferido, indicado y medido). En consecuencia, la economía circular no solo optimiza el uso de recursos, sino que fortalece la calidad y representatividad de la información geológica, permitiendo que las estimaciones bajo el ECRR-Col sean consistentes, auditables y confiables. Esta integración facilita la toma de decisiones, reduce la incertidumbre y evita reprocesos, alineando la exploración minera con criterios de eficiencia, sostenibilidad y cumplimiento técnico.

Es importante en esta etapa tener en cuenta:

a) Fase inicial de reconocimiento y delimitación del depósito aluvial

Esta primera etapa, se requiere realizar un reconocimiento general del área de interés, orientado a identificar zonas con anomalías asociadas a la dinámica fluvial. A diferencia de las canteras, los depósitos aluviales se caracterizan por su alta variabilidad espacial y control geomorfológico, por lo que la exploración se enfoca en identificar trampas naturales de concentración, como barras, meandros abandonados, zonas de baja energía hidráulica y contactos litológicos favorables (Herail et al., 1990).

En esta fase, el pequeño minero suele basarse en el conocimiento empírico del territorio, complementado con métodos directos (observación geológica y geomorfológica) e indirectos, como el análisis sedimentológico y geoquímico de concentrados pesados. Para la localización preliminar del depósito se emplean fotografías aéreas, imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y cartografía geomorfológica, herramientas que permiten identificar zonas de acumulación de materiales (Knighton, 1998).

El levantamiento de información incluye la descripción de los sedimentos aluviales, su espesor, distribución granulométrica, estratificación y relación con las unidades geomorfológicas, así como el análisis de la dinámica actual del sistema fluvial. Este enfoque permite comprender el comportamiento natural del río y establecer criterios para una explotación que minimice alteraciones irreversibles.

b) Análisis de laboratorio

La caracterización mineralógica de los sedimentos aluviales se apoya en técnicas instrumentales que permiten identificar tanto el oro como los minerales pesados asociados:

Microscopía óptica

Permite identificar minerales como cuarzo, feldespatos, óxidos de hierro, minerales pesados y observar la morfología del oro y otros minerales. A partir de este análisis se puede establecer:

- Forma y tamaño de las partículas de oro
- Grado de liberación natural del oro
- Asociación del oro con minerales pesados
- Distribución granulométrica del oro y de los minerales acompañantes

Estas características influyen directamente en la eficiencia de los procesos gravimétricos y en la recuperación esperada del metal.

Microscopía electrónica (SEM-EDS)

Se emplea para realizar microanálisis químicos de partículas individuales, permitiendo:

- Identificar oro submicroscópico o fino
- Determinar la presencia de metales potencialmente contaminantes (Hg, Pb, As, Cd)
- Establecer la composición química del oro (relación Au/Ag)
- Caracterizar minerales pesados con potencial de valorización

Esta información es clave tanto para el control ambiental como para la identificación de oportunidades económicas adicionales.

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

Estas técnicas permiten identificar fases minerales presentes en fracciones finas del sedimento, así como determinar la composición química global del material, información relevante para evaluar riesgos ambientales y definir estrategias de manejo de sedimentos.

Tabla 4.2. Cuadro comparativo: DRX vs FRX en minería

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, feldespatos, 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

Tabla 4.3. Flujo general de actividades en la minería de materiales para la construcción aluvial desde un enfoque de circularidad

Actividad	Entrada	Salidas	Aprovechamiento
Reconocimiento inicial	- Mapas base - Información previa del área - Equipos (GPS, brújula) - Personal técnico, acceso al área - Condiciones ambientales (clima, nivel del río, caudales)	Zonas favorables identificadas (barras, terrazas, gravas), mapa preliminar de puntos de interés, descripción geomorfológica y sedimentológica inicial, selección de sectores para muestreo, evaluación de accesibilidad y logística.	Digitalización y gestión estructurada de la información geológica para reducir intervenciones innecesarias (menos excavaciones, menor uso de agua y menor huella territorial).
Toma de muestras	- Herramientas (bateas, palas, picas, tamices) - Perforaciones (calicatas y pozos de muestreo) - Agua para el lavado inicial - Elementos de registro y almacenamiento.	Muestras representativas, coordenadas y profundidad de cada muestra, perfiles estratigráficos iniciales, material concentrado para ensayos, volúmenes muestreados por calicata, base de datos de muestreo preliminar.	Muestreo de bajo impacto, se basa en evitar la remoción masiva de cobertura y emplear sondajes de pequeño diámetro y métodos geoquímicos superficiales para reducir el impacto sobre el suelo, la vegetación y la huella hídrica.
Ensayos de concentración	- Muestras recolectadas - Agua (natural o almacenada) - Equipos: batea, alfombra, canaleta manual, concentrador pequeño - Recolectar concentrado pesado - Mano de obra (operadores de batea o concentrador gravimétrico).	Material recuperado, informe de recuperación por nivel, material residual para disposición o reúso.	Valorización de minerales accesorios (magnetita, ilmenita) bajo principios de simbiosis industrial. Recirculación del agua usada en el proceso. Aprovechamiento de arenas limpias para relleno o nivelación.
Caracterización de sedimentación	- Muestras de gravas y arenas - Hoyos y zanjas, pozos y perfiles estratigráficos - Herramientas: tamices, lupa, probetas, kits básicos - Información hidrológica (caudales, niveles del río).	Clasificación granulométrica (grava, arena, limo), identificación de unidades mineralizadas (pay streak), profundidad y espesor de capa basal (false bedrock), descripción de facies sedimentarias, mapas de distribución sedimentaria.	Evaluación del potencial uso de subproductos (gravas, arenas) para materiales de construcción según normativa ambiental. Planificación integral de recursos y reservas para minimizar estériles y evitar sobreexcavación.
Cartografía y georreferenciación	- GPS, equipo con SIG, brújula - Mapas base (DEM, hidrología, geología) - Resultados del reconocimiento y muestreo - Fotografías y perfiles de campo - Software SIG (QGIS, ArcGIS, MapInfo).	Mapa georreferenciado de puntos de muestreo, mapa geomorfológico preliminar (barras, terrazas), mapas de distribución, sedimentología y espesor de gravas, secciones transversales, base cartográfica para el Plan de Exploración o PTOE.	Delimitación precisa de áreas de trabajo para reducir expansión no planificada, proteger áreas sensibles y minimizar la huella hídrica y superficial. Base SIG para optimizar futuras actividades y disminuir nuevas intervenciones.

Fuente: Elaboración propia basada en: Guías Minero Ambientales de Exploración y Explotación (ACMin, 2024; MinMinas, 2023); Manuales de Buenas Prácticas (MINAM & GIZ, 2016; ANM, 2021, 2023); e investigaciones sobre minería aluvial y estándares globales (Langeland, 2015; Smart Prosperity Institute, 2020).



c) Gestión eficiente del agua

La eficiencia hídrica es un eje estratégico de la Economía Circular en minería. El recurso hídrico participa en **todas las etapas del ciclo de vida minero**, desde la exploración hasta el post-cierre. Este flujo continuo genera una presión considerable sobre las fuentes hídricas locales, especialmente en cuencas andinas donde la disponibilidad es limitada y la competencia por el recurso es alta (Universidad de Córdoba, 2025).

La comprensión técnica del sistema fluvial contribuye directamente a la economía circular en exploración, al:

- Evitar excavaciones redundantes.
- Reducir generación de estériles.
- Minimizar consumo de combustible.
- Facilitar la restauración inmediata.
- Mantener la funcionalidad hidrológica del río.

Una minería aluvial técnicamente fundamentada no modifica la dinámica natural del sistema fluvial, sino que aprovecha la concentración natural previamente realizada por el río.

Figura 4.11. Gestión circular del agua en minería aurífera



La tasa retributiva por vertimientos se rige por el **Decreto 1076 de 2015**, que compila la normativa sectorial (incluido el Decreto 2667 de 2012). El **Decreto 1553 de 2024 introduce modificaciones** a dicho decreto único, por lo cual el marco aplicable corresponde al **1076 de 2015 y sus actualizaciones vigentes**, no a una sustitución independiente del 2667 de 2012. El cobro se basa en la **carga contaminante vertida** y es aplicado por la autoridad ambiental como instrumento para incentivar la reducción de la contaminación del recurso hídrico.

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

Tabla 4.4. 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 lavador o clasificador • 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 lavado y clasificación • 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 4.12. 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 4.5. 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 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) Diagrama general de circularidad en un proyecto minero aluvial

Figura 4.13
Etapa de
exploración y
explotación con
cierre progresivo

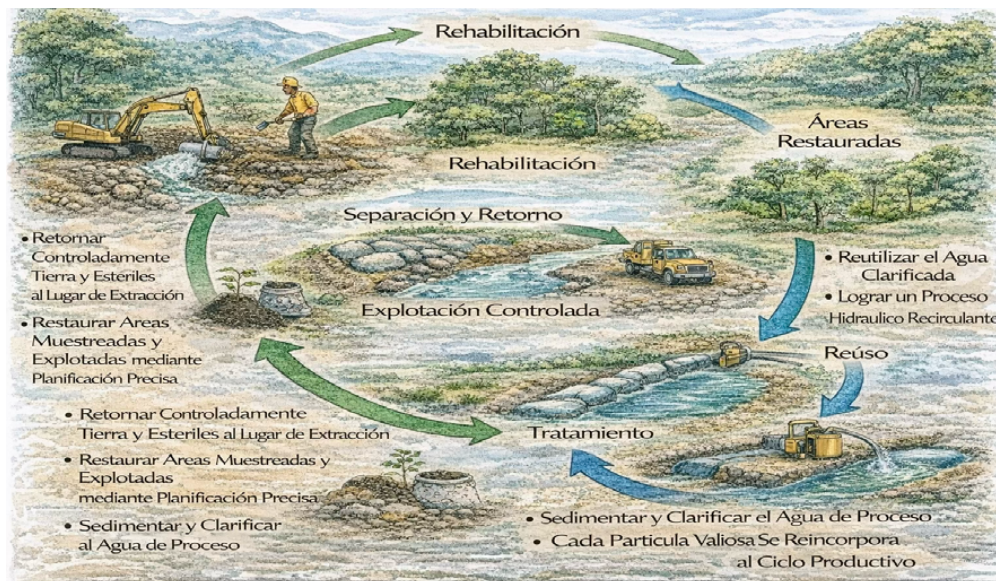


Figura 4.14
Etapa de
explotación
y beneficio con
cierre progresivo

4.2.1 Lineamiento 1. Optimización en el muestreo

Es muy importante el muestreo porque permite reducir número de apiques y zanjas, disminuir remoción de sedimentos, bajar costos de combustible y maquinaria, minimizar alteración del cauce y planicie, recuperar y reutilizar material removido.

En la práctica, dentro de su etapa de exploración un pequeño minero junto con su equipo técnico antes de excavar debería hacerse las siguientes preguntas:

1. ¿Esta zona tiene fundamento geomorfológico?
2. ¿Ya existe información cercana?
3. ¿Puedo perforar antes de excavar?
4. ¿Voy a cerrar inmediatamente el apique?
5. ¿Estoy registrando técnicamente?

Si alguna respuesta es NO ----> no excavar aún. Para ello, se darán los siguientes insumos como pasos para que puedan optimizar el muestreo.

a) Procedimiento de muestreo y manejo selectivo del material

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 4.15. Procedimiento de muestreo y manejo selectivo del material



Modificado de Protocolo-de-preparación-de-muestras-minerales-para-análisis-físicos-químicos-y-mineralógicos. Fundación instituto de ingeniería. Venezuela

4.2.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Reducir número de apiques y zanjas, disminuir remoción de sedimentos

1

Interpretación geomorfológica antes de excavar

¿Qué hacer?

Antes de abrir un solo apique:

Identificar: (Ver figura 3.3, 3.4 y 3.14)

- Barras internas
- Barras laterales
- Zonas de recodo (curvas internas)
- Antiguos cauces
- Contacto grava-arcilla
- Cambios de pendiente

¿Cómo hacerlo?

- Recorridos a pie
- Observación visual de tamaño de gravas
- Mapeo manual con GPS básico
- Uso de imágenes satelitales gratuitas (Google Earth)

Figura 4.17. Elementos geomorfológicos y sedimentológicos del sistema fluvial

BARRAS INTERNAS

★ **¿Qué son?:** Las barras internas son acumulaciones de sedimentos (arena y grava) que se desarrollan en la parte interna de los meandros o curvas del río, donde la velocidad del agua disminuye.

¿Por qué se forman? En una curva:

- Parte externa → mayor velocidad → erosión
- Parte interna → menor velocidad → deposita sedimentos

Importancia en aluvial

Son zonas favorables cuando:

- Existe grava gruesa
- Hay contacto con roca base o arcilla compacta (estratificación visible)
- Se observa concentración de minerales pesados
- Pero no siempre son las más ricas; depende de la energía del río.

BARRAS LATERALES

★ **¿Qué son?:** Depósitos de sedimentos ubicados a lo largo de la orilla del río (adyacente al canal activo), generalmente visibles en época seca.

Características

- Se inundan en crecientes
- Contienen capas de arena y grava estratificada
- Pueden migrar con el tiempo

En minería

Son zonas explorables con baja intervención si:

- No están en el canal activo
- Presentan gravas antiguas consolidadas

En exploración, deben diferenciarse las barras recientes (menos consolidadas) de aquellas más antiguas y estabilizadas, que pueden tener mayor potencial aurífero.

ZONA DE RECODO (Curva interna)

★ **¿Qué es?:** Es la parte interna de una curva pronunciada del río.

Dinámica

- El flujo pierde energía
- Se produce sedimentación selectiva

- Los minerales pesados como el oro tienden a concentrarse
- Estas zonas son estratégicas para el diseño de muestreo exploratorio, siempre que no se altere la estabilidad hidráulica del cauce

ANTIGUOS CAUCES

★ **¿Qué son?**

Son trayectorias anteriores del río que quedaron abandonadas cuando el río cambió su curso debido a procesos naturales de migración lateral o cambios en la dinámica fluvial.

También se llaman:

Paleocauces
Meandros abandonados

Cómo identificarlos

- Forma de herradura
- Depresiones en la planicie
- Diferente vegetación
- Diferente textura del suelo

Importancia minera

Pueden ser muy ricos porque:

- Contienen gravas antiguas no removidas
- No están sometidos a la dinámica actual
- Pueden conservar concentraciones auríferas intactas

CONTACTO GRAVA-ARCILLA

★ **¿Qué es?:** Es el punto donde termina la capa de grava y comienza una capa impermeable (arcilla o roca base).

CAMBIOS DE PENDIENTE

Corresponden a variaciones en el perfil longitudinal del río, donde se modifica la inclinación del cauce. Son zonas donde el río pasa de:

Mayor inclinación → mayor velocidad

Menor inclinación → menor velocidad

Cuando el río pierde pendiente: disminuye energía (la velocidad del flujo), deposita sedimentos gruesos y se concentra material pesado
Potencial aurífero. Zonas ideales para acumulación de: gravas gruesas, cantos rodados, oro grueso. Especialmente en transiciones montaña-planicie.

Fuente: Elaboración propia respaldada por Leopold, L. B., Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1964). Fluvial Processes in Geomorphology. Freeman & Co. Knighton, D. (1998). Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. Arnold. Miall, A. D. (1996). The Geology of Fluvial Deposits. Springer. Boggs, S. (2012). Principles of Sedimentology and Stratigraphy. Pearson. Fletcher, W. K. (1981). Handbook of Exploration Geochemistry, Vol. 1: Geochemical Exploration for Gold. Elsevier.

Figura 4.18. Jerarquías de probabilidades auríferas en un río aluvial



4.2.2 Lineamiento 2. Optimización en la planeación del proyecto minero

La exploración aluvial debe:

- Confirmar potencial del material de interés con la mínima remoción de material.
- No generar pasivos ambientales.
- Dejar el área en condiciones iguales o mejores a las iniciales.
- Producir información técnica reutilizable en etapas posteriores.

La planeación de la etapa de exploración en depósitos aluviales debe ir encaminada a una intervención física mínima del cauce y planicie aluvial, priorizando métodos manuales o semimecanizados, prohibiendo desviaciones permanentes del cauce, no realizando excavaciones continuas o extensivas y trabajando por puntos discretos (apiques, calicatas, pozos de prueba).

Importante: Selección óptima de muestreo, excavaciones superficiales controladas y de menor volumen, reúso del material no mineralizado como relleno o material para nivelación y manejo eficiente del agua y reutilización desde el inicio de la exploración

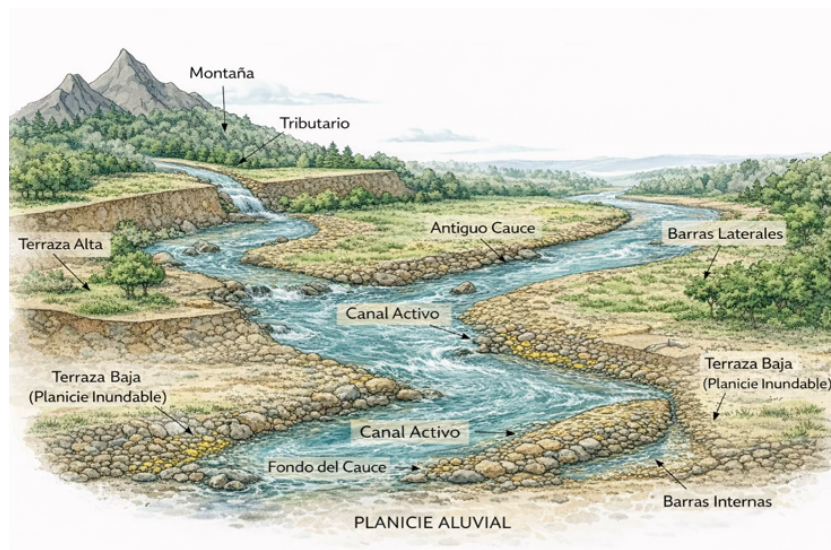
Es así como la planificación desde la etapa de exploración pretende optimizar la localización, profundidad y número de calicatas, pozos y puntos de muestreo, evitando excavaciones innecesarias que incrementen el movimiento de sedimentos y la afectación del cauce. La caracterización preliminar de geomorfología, sedimentación, granulometría y niveles freáticos permite definir un diseño de exploración más eficiente, reduciendo volúmenes removidos y mejorando la exactitud en la estimación de las reservas y recursos. Asimismo, se debe planificar el manejo temporal de sedimentos extraídos, priorizando su retorno inmediato al sitio o su aprovechamiento potencial en usos autorizados para reducir la generación de estériles.

4.2.2.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Minimizar intervención física del cauce y planicie aluvial

Minimizar la intervención física es decir, cualquier acción que cambie el terreno, como excavar, remover sedimentos, desviar agua, construir diques, zanjas o caminos o compactar o nivelar suelo del cauce y la planicie aluvial consiste en limitar las actividades mineras a excavaciones puntuales, de pequeña escala y completamente reversibles, evitando modificaciones permanentes en la morfología, el flujo y la dinámica sedimentaria del río y sus áreas asociadas.

El Cauce es el canal por donde corre el río, incluyendo el fondo (lecho), las orillas inmediatas y el canal activo (zona por donde el agua circula normalmente), dado lo anterior, minimizar intervención del cauce

Figura 4.19. Partes del cauce y planicie aluvial del río



significa no cambiar el trazado del río, no profundizar ni ensanchar el canal, no bloquear ni desviar el flujo natural.

Por otro lado, la planicie aluvial es la zona plana adyacente al río, formada por sedimentos del mismo río como las barras laterales, terrazas bajas, antiguos cauces o áreas que se inundan en crecientes. Dado lo anterior, minimizar intervención aquí significa excavaciones puntuales, no extensivas, no bajar el nivel general del terreno y no destruir la estructura natural del suelo. (Ver figura 4.19)

¿Cómo se ve esto en la práctica (minería de materiales para la construcción)?

✗ NO es minimizar intervención:

- Abrir zanjas largas paralelas al río
- Desviar el cauce para "trabajar seco"
- Remover grandes volúmenes "a ver si aparece material de interés"
- Dejar huecos abiertos

✓ SÍ es minimizar intervención:

- Trabajar con apiques pequeños
- Explorar por puntos, no por frentes
- Usar herramientas manuales
- Rellenar y restaurar el mismo día
- Ubicar trabajos fuera del canal activo

Minimizar la intervención busca que:

- El río siga funcionando igual
- No se altere la erosión ni sedimentación natural
- No aumente la turbidez aguas abajo
- No queden pasivos ambientales
- La restauración sea inmediata y efectiva

A continuación se expondrá unos pasos para tener los criterios técnicos para aplicarlo en campo:

a) Metodología

Tabla 4.6. Pasos con criterios técnicos en campo para minimizar intervención física del cauce y planicie aluvial

Pasos	¿Cómo se aplica en campo?	Criterio técnico / control	Resultado esperado
1. Priorizar métodos manuales o semimecanizados	1- Seleccionar puntos de exploración usando: • Observación geomorfológica • Información previa • Barras, curvas internas, zonas de baja energía 2- Definir excavaciones puntuales, no continuas. 3- Usar herramientas manuales: • Palas • Barras • Picos • Baldes 4- Si se requiere apoyo mecánico: • Motobombas pequeñas • Winches manuales • Equipos portátiles	• Número máximo de apiques por hectárea. • Registro fotográfico antes y después. • Prohibir retroexcavadoras en exploración.	Menor volumen removido, fácil control y restauración inmediata
2. Prohibir desviaciones permanentes del cauce	1- Identificar el eje natural del cauce. 2- Delimitar una zona de exclusión con estacas o cinta (delimitación del canal activo) 3- Realizar exploración fuera del flujo principal. 4- Si se requiere trabajar cerca del agua: • Usar barreras temporales • Canales superficiales removibles Qué sí se permite • Desvíos temporales, manuales y reversibles. • Canaletas provisionales sin excavación profunda. Qué NO se permite ✗ Jarillones ✗ Canales artificiales profundos ✗ Diqueos con maquinaria	Inspección visual: cauce conserva su trazo natural. Cero jarillones o diques permanentes.	Conservación de la dinámica natural del río • Menor erosión • Menor impacto aguas abajo
3. Evitar excavaciones continuas o extensivas	1- Definir un plan de puntos (no frentes) como trabajo por puntos aislados 2- Establecer distancias mínimas entre apiques (ej. 10-20 m). 3- Prohibir zanjas longitudinales. 4- Cada excavación se termina y se cierra antes de iniciar otra.	• Croquis de ubicación de apiques. • Bitácora diaria de excavación y cierre. • No más de un apique abierto simultáneamente.	• Impacto localizado • Control del terreno • Restauración inmediata
4. Trabajar por puntos discretos (apiques, hoyos o zanjas, pozos)	A. Apiques • Dimensiones típicas: ◦ 1 × 1 m ◦ Profundidad hasta roca madre o nivel freático • Excavación por capas. • Separación de materiales por tipo. B. Hoyos o zanjas • Orientación perpendicular al cauce. • Longitud controlada (3-5 m). • Uso solo cuando se requiera perfil estratigráfico. C. Pozos de prueba (solo cuando sea necesario) • Ubicación en terrazas o planicie. • Entibado básico si la profundidad lo requiere. (excavación por capas)	Dimensiones máximas definidas. Control de estabilidad y seguridad.	• Información precisa • Mínimo impacto • Fácil cierre

Pasos	¿Cómo se aplica en campo?	Criterio técnico / control	Resultado esperado
5. Ubicar puntos fuera del canal activo cuando sea posible	1- Recorrer el área en época seca. 2- Identificar marcas de nivel máximo de agua. 3- Ubicar apiques fuera de ese límite (barras laterales, terrazas bajas o antiguos cauces)	Verificación en campo en época seca. Criterios geomorfológicos: • Canal activo: agua permanente o reciente. • Zonas preferidas: ◦ Barras laterales ◦ Terrazas bajas ◦ Antiguos cauces	• Menor afectación hidrológica • Menor turbidez • Menor riesgo de inundación
6. Delimitar claramente el área de intervención	1- Estacar perímetro del área de exploración. 2- Señalizar: • Zona de excavación • Zona de acopio temporal • Zona de exclusión 3- Capacitar al equipo antes de iniciar.	Plano simple de campo y verificación diaria.	Evita expansión no autorizada y facilita control ambiental
7. Cierre inmediato de cada punto explorado	1- Finalizar muestreo. 2- Rellenar con el mismo material extraído. 3- Compactar manualmente. 4- Reponer capa superficial del suelo o tierra vegetal 5- Restablecer microrelieve el mismo día 👉 No se deja ningún apique abierto al final del día.	Inspección al final de la jornada. Registro fotográfico antes/después.	• Sin pasivos ambientales en exploración • Menor riesgo • Aceptación social

4.2.2.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Reducción de estériles en la extracción del mineral de interés

Según el estudio de Neal (2004)¹, se demostró que el uso de geofísica permitió ubicar calicatas con precisión milimétrica en depósitos aluviales, reduciendo hasta un 40% el volumen de sedimentos removidos y el número de excavaciones necesarias. Esto se tradujo en menor disturbio geomorfológico y reducción de estériles. Realizando levantamiento geofísico no invasivo (ETR – Tomografía de Resistividad Eléctrica) el objetivo es identificar capas sedimentarias, cambios granulométricos y zonas con concentraciones típicas como canales, barras y paleocanales. Gracias a este proceso se da una selección óptima de puntos de excavación donde presenten anomalías sedimentarias relevantes y así darle más control volumétrico a la excavación con calicatas con límites aproximados de profundidad y el material no mineralizado pudiendo ser reutilizado para el relleno.

Marco Normativo: El Código de Minas-Ley 685 de 2001 en sus artículos: Art. 34: Obliga a que toda actividad minera se desarrolle bajo el principio de prevención y control ambiental. Art. 199: Exige que desde la exploración se minimicen impactos sobre el suelo y cuerpos de agua. Art. 61: Permite el aprovechamiento integral de minerales y materiales asociados (base legal para reutilizar material no mineralizado), siempre que cumplan la normativa ambiental. El Decreto 1076 de 2015, obliga a minimizar remoción de suelo y sedimentos. Además, prevenir afectaciones a cuerpos de agua. Guía Minero-Ambiental de Exploración – MinMinas & ANLA: El número de calicatas debe justificarse técnicamente. Deben priorizarse métodos indirectos antes de excavación. El material removido debe ser manejado y restaurado inmediatamente.

Conclusión: Los resultados obtenidos se fundamentan en la aplicación de métodos geofísicos indirectos, los cuales permiten estimar el espesor de los depósitos aluviales, la geometría del cauce y la profundidad del basamento rocoso. Esta información optimiza la ubicación de puntos de muestreo y reduce la necesidad de intervención directa sobre el lecho del río, minimizando los impactos ambientales asociados a las actividades de exploración.

1 Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth-Science Reviews, 66(3–4), 261–330. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>

a) Metodología



Fase 1 – Planeación técnica previa

Antes de mover material, saber dónde y cuánto extraer

Acciones

- Delimitar el área de trabajo autorizada
- Definir frentes de explotación y secuencia de avance
- Identificar zonas de mayor potencial

Estudios y herramientas

- Reconocimiento geológico-geomorfológico del río
- Fotografías aéreas o imágenes satelitales
- Información hidrológica básica
- Topografía básica (perfil del cauce y terrazas)
- Información histórica de labores anteriores
- Estudios de Geofísica sencilla (la que pueda aplicar)

Resultado

- Evita extracción indiscriminada
- Reduce volumen de estériles desde el inicio



Fase 2 – Levantamiento de estudios geofísicos (según aplique)

Antes de mover material, saber dónde y cuánto extraer

Estudio geofísico	¿Qué mide?	¿Para qué sirve?	Qué ayuda a encontrar	Cuándo conviene usarlo	Costo relativo	Recomendación/ Limitaciones
Resistividad eléctrica (ERT / SEV)	Resistividad del subsuelo	"Ver" qué tan profundo está el material duro	Espesor de sedimentos, nivel freático, profundidad y forma de la roca madre o roca base que se encuentra debajo de los suelos y sedimentos sueltos (arena, grava, arcilla).	Antes de abrir apiques o dragar, ubicar contacto grava-roca madre o roca base, paleocanales y zonas favorables de concentración de oro	Medio	Muy recomendado No invasivo, buena profundidad, muy usado. No obstante, tiene menor resolución en materiales muy heterogéneos
Sísmica de refracción	Velocidad de ondas sísmicas	• Confirmar dónde está la roca dura. • Diferencia entre sedimentos sueltos, material compacto y roca base	Contacto exacto con la roca madre o roca base que se encuentra debajo de los suelos y sedimentos sueltos (arena, grava, arcilla)	• Cuando el aluvión es grueso • Confirmar profundidad de la roca base o roca madre y su continuidad	Medio - alto	Útil como complemento, Alta confiabilidad para roca base o roca madre. Requiere buen acoplamiento y equipo especializado
Georradar (GPR)	Reflexión de ondas electromagnéticas	Ver capas poco profundas, Estratificación de gravas, paleocanales someros	Detallar capas auríferas superficiales	Terrazas secas o ríos estacionales	Medio	Útil solo en zonas secas Baja penetración en arcillas y sedimentos saturados
Electromagnetismo (EM)	Conductividad eléctrica	Detectar zonas muy húmedas o arcillosas	Delimitar áreas desfavorables y rutas de agua	Para descartar áreas malas	Bajo - medio	Apoyo rápido Menor profundidad que ERT
Batimetría	Profundidad del cauce	Medir la profundidad del río Identifica pozas, barras sumergidas, irregularidades del fondo	Pozas profundas y barras. Identificar zonas de baja energía donde se acumula oro	Ríos anchos o profundos	Bajo	Apoyo operativo No informa sobre subsuelo
Topografía y geomorfología	La forma del terreno	Conocer la forma del terreno	Terrazas, antiguos cauces y cambios de pendiente	Siempre, como primer paso	Bajo	Indispensable. No sustituye métodos geofísicos

👉 Combinación mínima recomendada:

- Topografía + geomorfología
- Resistividad eléctrica
- Muestreo manual (apiques / batea)

Esto: reduce excavaciones innecesarias, ahorra combustible y maquinaria, disminuye impacto ambiental



Fase 3 – Selección previa del material

No todo el material del río tiene oro, se debe extraer solo lo que tiene potencial, es importante el retiro selectivo del topsoil (horizonte orgánico) con separación estricta: capa superficial del suelo o tierra vegetal, material estéril y material potencialmente mineralizado.

Cómo hacerlo: Acciones

- Reconocer visualmente capas favorables:
 - Gravas gruesas
 - Contacto grava-roca madre o roca base
 - Zonas con arenas negras
- Evitar remover:
 - Arcillas limpias
 - Limos

Extracción:

- Solo de arenas y gravas productivas
- Detener excavación al alcanzar la roca madre o roca base
- Buenas prácticas:
 - Espesor típico de retiro: 15-30 cm.
 - Acopio en pilas:
 - Altura < 2 m

- Pendiente estable
- Protección contra erosión
- Prohibido mezclar la capa superficial del suelo o tierra vegetal con gravas auríferas.

Resultado

- Menos material sin oro
- Menor volumen a lavar
- Menor generación de estériles



Fase 4 – Estudios de exploración y caracterización para la delimitación de las capas a explotar

Extraer solo donde hay potencial:

Acciones

- Muestreo con batea y manual
- Hoyos o zanjas poco profundas y apiques
- Identificación del contacto grava-roca madre o roca base

Aspecto	Hoyos o zanjas	Apique
Forma	Excavación más ancha	Excavación estrecha y profunda
Profundidad	Superficial (1-3 m)	Puede ser más profundo
Objetivo	Ver capas de suelo y sedimentos	Explorar material más profundo
Uso común	Exploración preliminar	Exploración puntual
Seguridad	Más estable	Requiere mayor cuidado

Recomendación:

- Apiques $\leq 1 \times 1$ m y profundidad controlada.
- Hoyos o zanjas orientadas perpendiculares al flujo.
- Distancia mínima entre puntos de exploración.

Estudios requeridos

- Muestreo granulométrico básico
- Caracterización visual de sedimentos
- Identificación de areeda aplicar)

Buenas prácticas

- Marcar espesor real de la grava productiva
- Detener excavación al llegar a la roca base o roca madre ideal.
- Definición de puntos de hoyos o zanjas y apiques: sólo se seleccionan puntos donde coinciden anomalías geofísicas y evidencia geomorfológica. Se define la profundidad

- máxima y el área máxima de excavación.
- Reducción de volumen: hoyos o zanjas más estrechas, excavación manual o semimecanizada controlada

Resultado

- Se define espesor real de la grava aurífera
- Se evita excavar material estéril profundo



Fase 5 – Separación temprana de estériles

Sacar lo malo antes del lavado

Acciones

- Retirar arcillas y finos antes del canalón
- Clasificación granulométrica simple (rejillas)
- Separación del material: clasificando si es material mineralizado va a muestreo, si no presenta mineralización va a acopio temporal

Acciones

- Retirar arcillas y finos antes del canalón
- Clasificación granulométrica simple (rejillas)
- Separación del material: clasificando si es material mineralizado va a muestreo, si no presenta

Apoyo técnico

- Control visual
- Ensayos simples de sedimentación

Beneficio

- Menos consumo de agua
- Menor volumen a procesar
- Menor generación de relaves



Fase 6 – Control del tamaño del material

No todo debe entrar al equipo

Medidas

- Uso de zarandas o parrillas
- Retiro de piedras grandes (>2-3 pulgadas)
- Lavado solo del material fino a medio



Fase 7 – Optimización del proceso de lavado

Mejor recuperación = menos reprocesos

Buenas prácticas: acciones

- Caudal de agua controlado
- Canaletas bien niveladas
- Mantas, alfombras o riffles adecuados
- Limpieza periódica del canalón

Resultado

- Mayor eficiencia de recuperación
- Menos generación de relaves



Fase 8 – Recirculación de material y agua

Aplicación de economía circular

Acciones

- Reprocesar solo concentrados
- No reprocesar estériles descartados
- Reusar agua decantada
- Infraestructura
- Pozas de sedimentación
- Canales de recirculación

Resultado

- Menos consumo de agua
- Menor generación de residuos



Fase 9 – Manejo ordenado de estériles

Lo que sí es estéril, usarlo correctamente

Acciones para usos

- Relleno de áreas agotadas
- Reconformación topográfica y del terreno
- Estabilización y protección de taludes

Criterios

- Uso de material NAF
- Integración paisajística
- Resultado
- Menor pasivo ambiental
- Facilita cierre progresivo

b) Equipos y especificaciones

Tabla 4.7. Herramientas y equipos con sus parámetros técnicos

Herramientas	Parámetros técnicos
Adquisición geofísica (ERT)	Arreglos eléctricos: • Wenner-Schlumberger: óptimo para capas subhorizontales y variaciones suaves • Dipolo-Dipolo: mayor sensibilidad lateral para detectar paleocanales Longitud de línea típica: 100-200 m Número de electrodos: 28-64 de acero inoxidable Espaciamiento entre electrodos: 2-5m Profundidad de investigación lograda: 10-25m, depende de la resistividad del material y espaciamiento, llegando hasta 30-40m Precisión de resistividad: $\pm 2-5\%$
Batimetría	Qué mide: Distancia entre la superficie del agua y el fondo del cauce. • Unidad: metros (m) • Rango típico en ríos aluviales: 0,5 – 15 m Importancia: • Define volumen de sedimentos • Ubica zonas de mayor acumulación de grava aurífera • Determina viabilidad de dragado o succión El levantamiento batimétrico se realiza mediante ecosonda monohaz de 200 kHz, con resolución vertical aproximada de ± 5 cm, acoplada a sistema GPS, permitiendo caracterizar la morfología del fondo del cauce y la distribución de sedimentos aluviales potencialmente auríferos.
Definición optimizada de calicatas	Profundidad sugerida: Hasta encontrar capa de grava compacta o arcilla, 2- 4m Volumen excavado promedio: 1-2m ³ por calicata Número de calicatas reducido: 30-40% menos
Muestreo del material	Tamaño de muestra por nivel: 5-10 kg Niveles cada: 20-30cm Equipos: • Pala manual • Baldes estandarizados • Lonas para evitar pérdida del material

La reducción de estériles en la minería aluvial se basa en una adecuada planeación técnica, apoyada en estudios de reconocimiento geomorfológico, topografía básica y muestreo exploratorio, seguida de un minado selectivo, separación temprana del material estéril y optimización del proceso de lavado. Esta metodología permite disminuir el volumen de material extraído y procesado, reducir el consumo de agua y minimizar los impactos ambientales.

Fuentes: Elaboración propia con base en la Guía de buenas prácticas para la exploración y estimación de recursos y reservas de rocas y minerales industriales ANM-2019

4.2.3 Lineamiento 3. Estrategias de anticipación y prevención de impactos ambientales residuales desde la exploración aluvial

Los depósitos aluviales se forman por erosión, transporte (ríos, quebradas), y concentración mecánica del material de interés. Durante ese proceso los sulfuros primarios (pirita, arsenopirita, calcopirita, pirrotita) se oxidan, se descomponen o se disuelven y el oro, al ser químicamente muy estable, sobrevive y se concentra. Por eso: el oro aluvial suele ser libre, grueso o laminar y no está químicamente ligado a sulfuros, no obstante, sí generan potenciales pasivos ambientales durante la exploración asociados a alteración del cauce o margen del río, remoción excesiva de sedimentos finos y generación de zonas inestables o erosivas.

Por consiguiente, la exploración debe contemplar la identificación temprana, evaluación y manejo proactivo de estos posibles impactos ambientales, geomorfológicos e hidrológicos antes de cualquier intervención física en el cauce o sus terrazas asociadas. Implican el análisis previo de la dinámica fluvial (cauce activo, zonas de inundación periódica, terrazas y drenajes secundarios), la jerarquización de áreas con probabilidad mineral, la delimitación de zonas ambientalmente sensibles y la aplicación de medidas técnicas para evitar alteraciones innecesarias, como la intervención selectiva, el control de sedimentos, la protección de la capa superficial u orgánica y la restricción de actividades en rondas hídricas. Su objetivo es reducir al mínimo la remoción de material mediante diseño adecuado del muestreo, prevenir procesos erosivos y evitar impactos acumulativos mediante prácticas de restauración, recirculación del agua y reposición inmediata de sedimentos, asegurando que la exploración se realice bajo criterios de mínima afectación y gestión responsable del recurso hídrico y del suelo.

4.2.3.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Manejo del agua con control de sedimentos desde la exploración aluvial para anticipar y prevenir impactos ambientales residuales

En la etapa de exploración aluvial, la anticipación y prevención de impactos ambientales busca evitar que las actividades exploratorias generen afectaciones permanentes sobre el cauce, los suelos, el agua y los ecosistemas asociados. La exploración no debe modificar la dinámica hidráulica natural del sistema fluvial.

Antes de iniciar trabajos de exploración (calicatas, apiques, batimetría o muestreos), el pequeño minero debe identificar posibles impactos como:

- Alteración temporal del cauce y las barras del río
- Incremento de turbidez por remoción de sedimentos
- Compactación o pérdida de suelo orgánico (topsoil)
- Afectación puntual de la vegetación ribereña

Normatividad a tener en cuenta: Decreto 1076 de 2015: Prohíbe vertimientos directos sin tratamiento y exige control de sedimentos y turbidez. Resolución 0631 de 2015: Establece límites máximos de sólidos suspendidos totales (SST) en vertimientos. Guía Minero-Ambiental de Exploración: Obliga a restaurar calicatas, evitar la expansión del área intervenida y controlar finos y lodos.

La circularidad en depósitos aluviales se logra al restaurar calicatas y trincheras después del muestreo, gestionar adecuadamente los lodos finos para evitar turbidez aguas abajo y delimitar estrictamente el área de exploración para evitar expansión descontrolada.

Mediante el uso de estanques de sedimentación portátiles o bolsas geotextiles para la retención de sólidos, el agua clarificada puede volver al proceso de muestreo gravimétrico y sólo se repone agua por evaporación o pérdidas menores.

a) Metodología



Fase 1 – Identificación previa del comportamiento hídrico

Antes de intervenir es importante tener en cuenta lo siguiente, con el fin de darle criterios de decisión al pequeño minero de dónde no debe excavar:

Delimitar (ver figura 3.17):

- Cauce activo
- Zona de inundación periódica
- Ronda hídrica
- Drenajes secundarios y escorrentías naturales

Importante: se delimita físicamente el área de exploración prohibiendo excavar fuera del polígono autorizado

Determinar:

- Época seca vs. lluviosa
- Nivel freático aproximado
- Dirección de escorrentía superficial
- Sectores con acumulación de agua

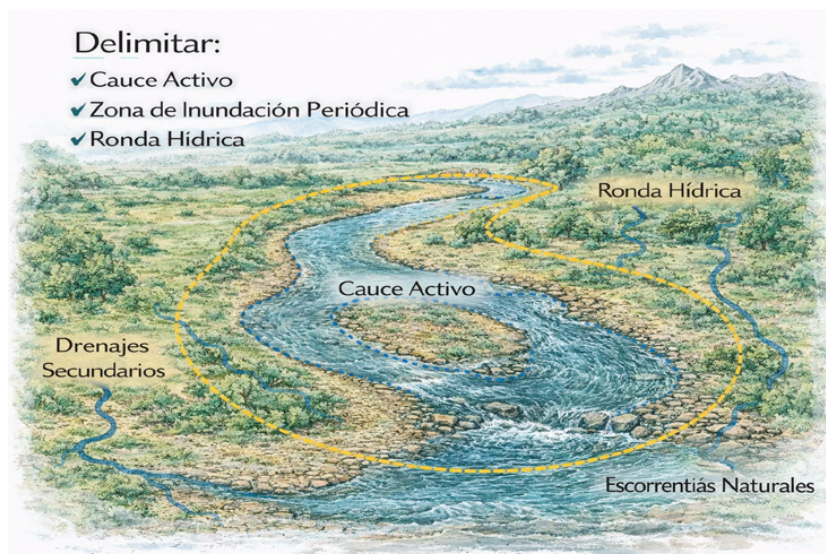


Figura 4.20. Jerarquías de probabilidades aurífera en un río aluvial



Fase 2 – No intervenir dentro del flujo activo

En exploración:

- ✗ No se realizan apiques en el canal con flujo permanente.
- ✗ No se desvía el cauce para muestrear.
- ✗ No se trabaja bajo lámina de agua.

La exploración debe enfocarse en:

- Barras secas
- Terrazas
- Paleocauces
- Planicie aluvial estable

Impacto residual evitando:

- Alteración permanente del patrón hidráulico
- Aumento de turbidez crónica
- Erosión inducida



Fase 3 – Manejo del agua en el proceso

1- Captación del agua de proceso: en la recolección y conducción controlada del agua utilizada en la concentración gravimétrica hacia un sistema de sedimentación, donde los sólidos suspendidos se depositan por acción de la gravedad, permitiendo su clarificación y posterior recirculación o disposición controlada, evitando descargas directas al cuerpo hídrico y previniendo impactos residuales por turbidez.

2- Sedimentación: El agua debe pasar por piscinas y bolsas geotextiles, en estas los sólidos se decantan.

3- Reúso: El agua clarificada se reutiliza en el proceso, únicamente reponiendo el agua por evaporación.

Figura 4.21. Cómo es el manejo del agua durante el proceso



Fase 4 – Control de sedimentos y turbidez

El mayor impacto en exploración aluvial es la liberación de finos, por ello es importante el manejo y disposición controlada de sedimentos finos

Medidas técnicas:

- Trabajar en temporada seca
- Excavar fuera del nivel freático cuando sea posible
- Evitar lavado de muestras directamente en el río
- Usar recipientes cerrados para concentrados
- Instalar pequeñas zanjas de contención si hay pendiente

Si aparece agua en excavación:

- Permitir decantación natural
- No bombear directamente al cauce
- Filtrar mediante sedimentación simple

Es importante tener en cuenta:

1- Extracción controlada de lodos: Los lodos sedimentados se drenan parcialmente para facilitar su manejo.

Dicha extracción es el proceso de retirar lodos sedimentados (mezcla de agua + finos + arcillas), reducir su contenido de agua, facilitar su manejo, transporte y disposición evitando descargas contaminantes al río. (ver figura 4.19)

Figura 4.22. Sistema de drenaje controlado de lodos para minería aluvial de oro



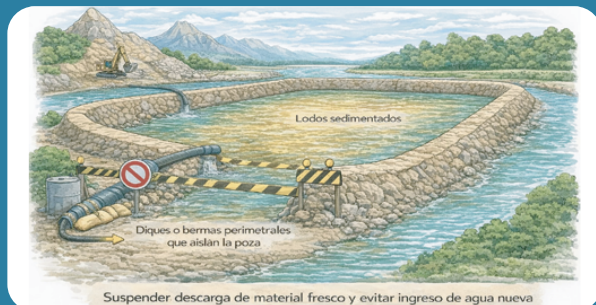
2- La disposición de lodos en calicatas restauradas consiste en el retorno controlado de los sedimentos generados durante la exploración a las mismas excavaciones de origen, mediante relleno por capas y restitución del perfil natural del terreno, garantizando estabilidad geotécnica, continuidad hidráulica y ausencia de impactos residuales.

3- Compactación por capas: El relleno se realiza por capas delgadas, aplicando compactación manual o mecánica ligera para garantizar estabilidad y evitar asentamientos posteriores.

No es sacar lodo húmedo y botarlo directamente.

Paso 1: Aislar el área de sedimentación

- Construir diques o bermas perimetrales
- Evitar ingreso de agua nueva
- Suspender descarga de material fresco
- Esto permite que el lodo se estabilice.



Suspender descarga de material fresco y evitar ingreso de agua nueva

Paso 2: Drenaje parcial controlado

Opciones prácticas:

- a) Drenaje por gravedad
 - Abrir válvula o tubo de salida superior
 - Permitir salida de agua clara superficial
 - No remover el fondo
 - Se debe hacer lentamente para evitar arrastre de sólidos.
- b) Bomba de succión superficial
 - Extraer solo la lámina superior de agua
 - No remover sedimento del fondo
 - Enviar el agua nuevamente a circuito de recirculación



Paso 3: Secado progresivo

Métodos recomendados:

- Secado natural
 - Exposición al sol
 - Espesor máximo recomendado: 30-50 cm
 - Tiempo: 3-10 días según clima
- Celdas de deshidratación
 - Construir pequeñas plataformas con:
 - Geotextil
 - Cama de grava
 - Permiten drenaje vertical
 - Zanjais de drenaje
 - Canales laterales pequeños
 - Recogen el agua escurrida
 - La devuelven a la poza de sedimentación



Paso 4: Retiro mecánico

Cuando el lodo tenga consistencia pastosa o semisólida:

- Retirar con pala mecánica o manual
- Transportar a:
 - Zona de disposición final

- Área de reconformación
- Relleno de excavaciones agotadas
- Nunca disponer directamente en el cauce activo.





Fase 5 – Manejo del nivel freático

En planicie aluvial es común interceptar agua subterránea. Si ocurre:

- No profundizar innecesariamente
- No generar bombeo continuo
- No crear depresiones que modifiquen flujo subterráneo

La excavación debe rellenarse inmediatamente para:

- Restituir presión hidráulica natural
- Evitar drenaje artificial persistente



Fase 6 – Manejo de aguas lluvias

Durante exploración:

- No dejar excavaciones abiertas
- Reconformar microtopografía
- Evitar que los apiques se conviertan en trampas de agua

Impacto residual evitado:

- Formación de charcos artificiales
- Cambios en infiltración
- Procesos de erosión localizada



Fase 7 – Protección de la calidad del agua

En exploración no debe existir:

- Uso de químicos
- Uso de mercurio
- Uso de cianuro
- Descarga de efluentes

El muestreo se limita a separación mecánica y gravimétrica controlada.



Fase 8 – Restauración hídrica inmediata

Después de cada apique:

- Relleno por capas
- Compactación moderada
- Reconformación de pendientes naturales
- Reinstalación de la capa superficial o orgánica
- Recuperación de drenajes menores

El objetivo de esta fase es que el agua superficial vuelva a fluir exactamente como lo hacía antes.



Fase 9 – Indicadores para verificar que no hay impacto hídrico residual

Después de la actividad se debe comprobar:

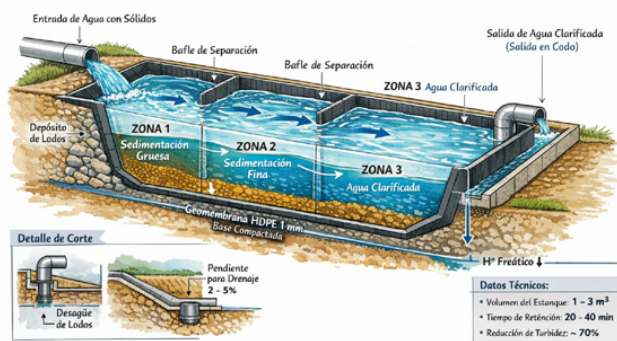
- No hay aumento visible de turbidez
- No se generaron zanjas o barrancos profundos
- No se alteró el cauce
- No hay cambios en trayectorias de escorrentía
- No hay encharcamientos artificiales
- No hay drenajes permanentes nuevos

b) Equipo y especificaciones

Tabla 4.8. Equipos y especificaciones

Piscina de sedimentación

Volumen del Estanque: 1 - 3 m³ | TRH: 20 - 40 minutos



Parámetros técnicos

1. Tiempo de residencia hidráulico (TRH): Es el tiempo promedio que el agua permanece dentro del estanque.
Rango recomendado: 30 - 60 minutos (mínimo operativo ASM)

Óptimo: >1-2 horas en sistemas bien diseñados

Fundamento técnico (para qué sirve): Sedimentación por gravedad requiere tiempo suficiente para que partículas decanten (EPA 2003). Es la variable más importante para la eficiencia.

Lectura operativa:

- Bajo TRH → partículas finas no sedimentan, agua turbia a la salida
- Alto TRH → mayor remoción de SST, mejor clarificación

2. Velocidad del flujo en el estanque: Es la rapidez con la que el agua se desplaza dentro del estanque.

Rango recomendado: < 0.03 - 0.1 m/s (flujo cuasi-laminar)

Fundamento técnico (para qué sirve):

- Basado en criterio de sedimentación por gravedad

- (Stokes), es decir controla si las partículas pueden asentarse o se mantienen en suspensión.
- EPA indica que condiciones de bajo flujo son críticas para eficiencia

Lectura operativa:

- Alta velocidad → re-suspensión, es decir, es cuando los sedimentos que ya estaban en el fondo se vuelven a levantar y mezclarse con el agua, ocasionando un problema porque el agua se vuelve turbia.
- Baja velocidad → sedimentación efectiva

3. Número de estanques en serie: Es la cantidad de piscinas conectadas una después de otra

Configuración recomendada: Mínimo: 2 estanques

Óptimo ASM: 3 estanques en serie

Fundamento técnico (para qué sirve):

Sedimentación progresiva en cascada mejora eficiencia (PlanetGOLD):

- Estanque 1: partículas gruesas
- Estanque 2: intermedias

- Estanque 3: finas

Lectura operativa:

- 1 estanque → baja eficiencia
- 3 estanques → sedimentación progresiva (gruesos → finos), agua reutilizable

4. Profundidad del estanque: Es la altura de la lámina de agua dentro de la piscina

Rango recomendado: 1.0 - 2.5 m

Criterio técnico (para qué sirve): Define el volumen disponible para sedimentación. Influye en la estabilidad del flujo

Lectura operativa:

- Muy bajo → poca capacidad
- Muy profundo → mezcla interna y menor eficiencia efectiva
- Profundidad adecuada = mayor eficiencia sin generar turbulencia

5. Relación largo/ancho (L/W): Es la proporción geométrica del estanque

Rango recomendado: 2:1 - 5:1

Fundamento técnico (para qué sirve):

- Controla el patrón de flujo del agua
- Evita que el agua "ataje" el sistema

Lectura operativa:

- Menor L/W → flujo directo sin sedimentar
- Mayor L/W o adecuado → mejor distribución del flujo

6. Carga hidráulica superficial (Q/A): Cantidad de agua que entra por unidad de área del estanque

Rango recomendado: 0.5 - 2.0 m³/m²·h

Fundamento técnico (para qué sirve): Es la variable crítica de diseño tipo clarificador (EPA). Determina si las partículas tienen tiempo suficiente para caer

Lectura operativa:

- Alta carga → partículas o sólidos no sedimentan, salen
- Baja carga → mayor eficiencia, remoción

Piscina de sedimentación

7. Eficiencia de remoción de sólidos (SST / turbidez):

Porcentaje de sólidos suspendidos que se eliminan
Rango esperado: 60% – 90% (EPA condiciones normales)
 70% – 95% en sistemas ASM multietapa bien operados (PlanetGOLD / ASM consolidado)

Fundamento técnico (para qué sirve): Mide el desempeño real del sistema. Es el indicador clave de cumplimiento ambiental

Lectura operativa:

- <60% → sistema fallando, se debe revisar control hidráulico
- 80% → operación controlada, con alta eficiencia por el buen control hidráulico

NOTA IMPORTANTE: los SST deberán cumplir los límites establecidos máximos permisibles de vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y alcantarillado. en la Resolución 631 de 2015 del MADS, según la actividad y tipo de vertimiento aplicable. Los valores suelen estar en el rango: 150 – 400 mg/L (según tipo de vertimiento y tabla específica de la resolución)

8. Control y distribución del flujo: Cómo se reparte el agua dentro del estanque

Condición requerida:

- Entrada uniforme (difusor o canal de distribución)
- Salida controlada (vertedero)

Fundamento técnico (para qué sirve):

- Evita que el agua entre y salga sin sedimentar (cortocircuitos hidráulicos)
- Garantiza que todo el volumen del estanque sea utilizado

Lectura operativa:

- Flujo directo o canalizado → pérdida de eficiencia, de desempeño
- Flujo distribuido, uniforme → mejor eficiencia, desempeño

Soporte: EPA identifica deficiencias de diseño y construcción como causa principal de bajo desempeño

9. Manejo de sedimentos acumulados (lodos): Control de la acumulación de sólidos en el fondo

Frecuencia recomendada:

- Limpieza periódica (según carga)
- Mantener ≥70% volumen útil

Fundamento técnico (para qué sirve):

- Reducción del volumen efectivo → evita pérdida de

- eficiencia
- Mantiene el volumen útil del estanque

Lectura operativa:

- Sedimento acumulado (más lodo) → menor tiempo de residencia hidráulico, menor eficiencia
- Limpieza → recuperación de eficiencia

10. Sistema de recirculación: Reutilización del agua tratada dentro del proceso

Modo recomendado: Sistema cerrado con recirculación
Fundamento técnico (para qué sirve): reduce consumo de agua y descarga ambiental (PlanetGOLD)

Lectura operativa:

- Descarga directa → impacto ambiental
- Recirculación → operación sostenible

NOTA IMPORTANTE: las piscinas de sedimentación no es solo un hueco con agua, es un sistema hidráulico de control de sólidos que debe mantenerse en equilibrio, su falla no es estructural, es operacional e hidráulica.

Control de lodos



Parámetros técnicos

Para controlar lodos en piscinas de sedimentación (ASM) –incluyendo trampas de sedimentos– hay que manejar el sistema como una línea de control de sólidos en serie: entrada (trampa) → decantación (estanques) → extracción (lodos).

A continuación se relacionan los puntos críticos, con qué vigilar y cómo actuar en campo.

1. Trampa de sedimentos (control primario en la entrada)

Qué asegurar

- Ubicación: antes del primer estanque
- Flujo calmado (sin caída libre directa)
- Volumen suficiente para retener gruesos (>0.5-1 mm)

Operación

- Limpieza diaria o por turno (alta carga de sólidos)
- Extracción suave (evitar agitar y enviar nube al estanque)

Indicadores en campo

- ● Se acumula grava/arena en la trampa; al estanque entra agua “más limpia”
- ● Llegan gravas al estanque → trampa insuficiente o colmada

2. Balance hidráulico del sistema (para no movilizar lodos)

Variables a controlar

- Caudal estable (sin pulsaciones)
- Velocidad baja en estanques (flujo cuasi laminar)
- Tiempo de residencia (TRH) suficiente

Por qué importa: Si sube la energía del flujo, los sedimentos o lodos que ya estaban en el fondo se vuelven a levantar y mezclarse con el agua perdiendo todo lo sedimentado.

Señales

- Agua que se enturbia “de golpe” → los sedimentos o lodos que ya estaban en el fondo se vuelven a levantar y mezclarse con el agua perdiendo todo lo sedimentado.
- Remolinos visibles → exceso de energía

3. Acumulación de lodos (volumen útil)

Qué medir/controlar

- Volumen ocupado por lodos: mantener < 30% del volumen del estanque
- Espesor de capa: ideal < 0.3-0.5 m

Por qué importa: Menos volumen útil → menor TRH → peor sedimentación

Señales

- El estanque “se llena rápido” → problema de lodos
- Agua sale turbia aun con bajo caudal → pérdida de TRH

4. Frecuencia y método de extracción

Frecuencia

- Alta carga (ASM): cada 1-3 días (o diario si es necesario)
- Ajustar a la tasa de acumulación

Método

- Manual (palas) o bombeo controlado
- Evitar: remover todo de una vez
- “batir” el fondo

Buena práctica

- Extraer por secciones
- Mantener siempre zonas en reposo

5. Control de la pérdida de sedimentación (punto crítico)

Qué evitar

- Entradas con alta energía (caídas libres, chorros)

- Limpieza agresiva
- Mezcla por viento o equipos

Cómo controlarlo

- Disipador de energía en la entrada (caja, rocas)
- Mantener lámina de agua tranquila
- Operar sin picos de caudal

6. Gestión de lodos extraídos

Qué hacer

- Llevar a zona de secado (1-3 días mínimo)
- Disposición contenida (no devolver al flujo)

Qué evitar

- Reingresar lodos al sistema
- Disponer en zonas de escorrentía

Riesgo adicional: Si hay sulfuros (relaves): considerar PGA/PNA (ABA) para evitar generación de acidez

7. Configuración en serie (eficiencia global)

Regla operativa

- Trampa → Estanque 1 → Estanque 2 → Estanque 3

Rol de cada uno

- Trampa: gruesos
- Estanque 1: arenas
- Estanque 2: limos
- Estanque 3: finos

Resultado

- Menor carga de lodos por etapa
- Mejor control y menos re-suspensión

NOTA IMPORTANTE: El control de lodos no es solo limpiar, es evitar que los sólidos lleguen, se acumulen y se vuelvan a levantar. En campo se recomienda: primero retener (trampa), luego sedimentar (estanques) y finalmente remover (lodos)

Restauración de calicatas



Parámetros técnicos

1. Relleno y conformación del terreno

Qué hacer

- Rellenar 100% del volumen, en capas (20-30 cm)
- Reintegrar topsoil (20-30 cm) arriba

Por qué: Evita asentamientos y permite revegetación

Señales

- ● Superficie uniforme, sin huecos
- ● Hundimientos o vacíos

2. Compactación

Qué hacer: Compactar cada capa a $\geq 90-95\%$ Proctor (artesanal)

Por qué: Aumenta la estabilidad y capacidad de carga

Señales

- ● Superficie firme (no se marca con pisada)
- ● Material suelto $\rightarrow$ se hunde

3. Pendiente y drenaje superficial

Qué hacer

- Dar pendiente 2-5%
- Construir microcanales/zanjas de coronación

Por qué: Evita encharcamientos y erosión

Señales

- ● El agua escurre sin arrastrar suelo
- ● Agua estancada o cárcavas

4. Estabilidad de taludes

Qué hacer: Taludes $\leq 30^\circ$ ($\approx 1.5H:1V$)

Por qué: Previene deslizamientos

Señales

- ● Talud estable, sin grietas
- ● Caídas de material

5. Control de erosión

Qué hacer: Cobertura vegetal $>70\%$ o mulch (paja, geotextil)

Por qué: Reduce arrastre de finos (SST)

Señales

- ● Suelo cubierto
- ● Suelo desnudo $\rightarrow$ erosión

6. Control de escorrentía y sedimentos

Qué hacer

- Instalar trampas de sedimentos y desvíos
- Evitar que el agua salga con arrastre visible

Por qué: Controla SST en el receptor (cumplimiento)

Señales

- ● Agua clara en drenajes
- ● Pluma de sedimento

7. Manejo de materiales

Qué hacer

- Separar:
- Material limpio
- Material con finos/arcillas
- Material potencialmente contaminado

Por qué: Evita degradación del suelo y dispersión

8. Tiempo de intervención

Qué hacer: Restaurar inmediatamente o < 7 días

Por qué: Minimiza erosión inicial (fase más crítica)

9. Monitoreo post-restauración

Qué revisar (1-3 meses)

- Asentamientos
- Erosión
- Drenaje
- Cobertura vegetal

NOTA IMPORTANTE: Restaurar no es tapar el hueco, es reconstruir el comportamiento del suelo (estructura + drenaje + cobertura).

Fuentes: Chalov, S. R., Thorslund, J., Kasimov, N. S., Aybullatov, D. N., & Nitttrouer, J. A. (2014). Anthropogenic sediment redistribution and impacts on river systems. *Water Resources Research*, 50(3), 2264-2280. <https://doi.org/10.1002/2013WR014063>
Environmental Protection Agency. (2003). Best management practices for placer mining. U.S. EPA. <https://www.epa.gov>



4.2.4 Lineamiento 4. Modelamiento y gestión inteligente de información

La exploración aluvial requiere la recopilación de geomorfología, sedimentología, granulometría de los modelos hidro-geométricos y geo- espaciales. La sistematización digital de datos permite definir zonas de interés con mayor precisión, planear la explotación de forma selectiva y evitar excavaciones innecesarias.

4.2.4.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Reducción de la huella hídrica y ocupación territorial mediante optimización y análisis con herramientas SIG

La reducción de la huella hídrica y territorial se logra mediante la optimización espacial con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitiendo una mejor planificación de frentes de exploración y uso eficiente del recurso hídrico.

La reducción de huella hídrica implica disminuir el volumen de agua utilizada, afectada o intervenida en la actividad minera aurífera de exploración aluvial mediante recirculación de agua, mejor ubicación de puntos de captación, control de pérdidas y diseño eficiente de sistemas de sedimentación.

La reducción de ocupación territorial significa minimizar el área intervenida físicamente, por ejemplo: menor extensión de excavaciones, optimización de accesos, ubicación estratégica de piscinas de sedimentación, reducción de áreas de acopio y disposición. Es decir, intervenir solo el área estrictamente necesaria.

Mediante optimización y análisis con herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) permiten:

- Analizar mapas de pendientes, drenajes y rondas hídricas
- Identificar zonas ambientalmente sensibles
- Modelar escenarios de menor impacto
- Definir la mejor ubicación de infraestructura temporal
- Calcular áreas intervenidas y distancias a fuentes hídricas

Uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), modelos de elevación digital (DEM) y modelos hidrológicos para ubicar mejor las calicatas, generando menos desplazamientos y menos puntos de excavación gracias a los modelos, además de menor intervención del cauce. De acuerdo con Søndergaard et al. (2019), demostraron que la integración de modelos digitales de elevación (DEM) con análisis SIG permite identificar paleocanales antes de campo, reduciendo entre 25- 40% los puntos de excavación requeridos y la huella territorial de la exploración. Mediante el uso de herramientas SIG y capas DEM, se derivan mapas de pendiente, curvatura y rugosidad para identificar terrazas aluviales. Se aplica análisis de flujo, acumulación y redes fluviales combinándolos con mapas de unidades geomorfológicas. A su vez, se implementan datos de granulometría, niveles freáticos. Finalmente, integrando todo en algoritmos como análisis multicriterio de puntos óptimos de calicatas.

Normatividad a tener en cuenta: Decreto 1076 de 2015: Prohíbe vertimientos directos sin tratamiento y exige control de sedimentos y turbidez

Guía ANLA exploración: Establece que la exploración debe basarse en información secundaria y modelamiento previo, debe justificarse técnicamente el número de calicatas y su ubicación y debe evitarse las exploraciones extensivas sin sustento técnico

Resolución 1257 de 2021 – MinAmbiente: Promueve el uso de información geoespacial y análisis territorial para prevenir impactos acumulativos

a) Metodología



Fase 1 – Construcción del modelo espacial base

- 1- Recolección de insumos: Modelo Digital de Elevación (DEM), cartografía geológica y geomorfológica, red hidrográfica e información histórica de explotación aluvial.
- 2- Preparación de capas SIG: Corrección y reproyección, normalización espacial y resolución homogénea.



Fase 2 – Análisis geomorfológicos e hidrológicos

- 1- Derivación de variables: Pendiente, curvatura, rugosidad, acumulación de flujo y dirección de flujo.
- 2- Identificación de unidades favorables: Terrazas aluviales, paleocanales, barras antiguas y llanuras de inundación favorables.



Fase 3 – Integración de información geológica y de muestreo

- 1- Ingreso de datos de campo: Granulometría, niveles freáticos.
- 2- Modelamiento multicriterio: Cada variable se pondera (geomorfología, hidrología y sedimentología) y se genera un mapa de favorabilidad..



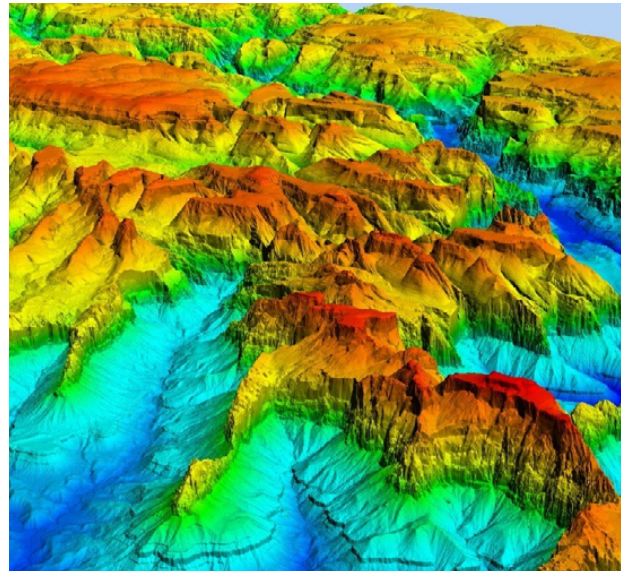
Fase 4 – Optimización de calicatas

- 1- Selección de puntos óptimos: Se seleccionan las zonas con alta favorabilidad y se reducen número de excavaciones junto con desplazamientos innecesarios.
- 2- Definición de huella mínima: Se delimita un polígono exacto de exploración y se excluyen zonas sensibles (pendientes altas)

b) Equipos y especificaciones

Tabla 4.9. Herramientas con sus parámetros técnicos

Herramienta	Parámetros técnicos
DEM utilizado (modelo digital de elevación)	Resolución del DEM: 1-5 m Modelos generados: • Pendiente • Curvatura • Acumulación de flujo • Relieve
Identificación de paleocanales (antiguos cauces de río o arroyos inactivos en la actualidad)	• Anchos detectados: 10-40 m • Espesores estimados de gravas: 1-3 m • Puntos optimizados de muestreo: reducción del 25-40% de excavaciones
Cálculo de accesibilidad	Pendiente máxima recomendada: <12° Distancia al cauce: > 30 m



Elaboración propia basada en: GIS-based identification of fluvial landforms and sediment management, Søndergaard, M. et al. (2019); y High-resolution topography for understanding Earth surface processes, Tarolli, P. (2014).

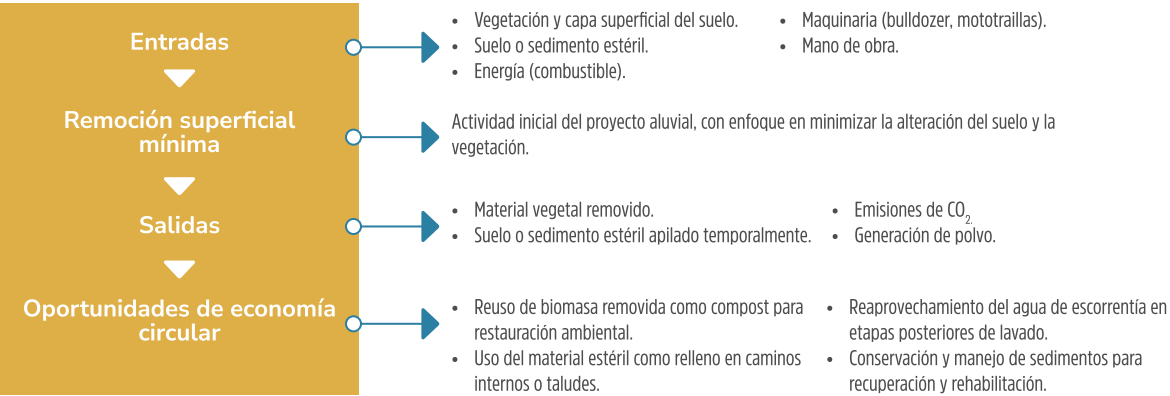
4.3 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

En la minería de materiales para la construcción aluvial de pequeña y mediana escala, la etapa de construcción y montaje comprende el acondicionamiento del área de explotación, la construcción de tolvas y otras unidades de beneficio primario, así como la conformación de áreas de disposición de estériles, pozas de sedimentación y vías internas de acceso. Estas actividades se desarrollan a partir de la planeación establecida en el Programa de Trabajos y Obras (PTO) y en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), y generan flujos de materiales tales como suelos orgánicos, gravas y arenas aluviales, estériles, residuos de construcción y demolición (RCD), empaques e insumos de obra civil, además de consumos de agua y energía.

A continuación, se describen las características y el flujo general de operaciones en una mina de materiales de construcción aluvial, estructurando un diagrama de entrada-proceso-salida desde un enfoque de circularidad. Esto permite, desde la fase inicial de exploración, planificar el manejo eficiente de residuos, materiales removidos y flujos generados, optimizando el uso de recursos minerales y no minerales. La organización se realiza conforme al Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales (ECRR-Col) y la Guía Técnica Colombiana GTC 314 para la gestión y trazabilidad de datos de exploración.

Figura 4.23. Etapas de arranque en minería aluvial

Etapas de arranque
Remoción superficial mínima
(minería aluvial)



Elaboración propia basada en 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., y Guía Minero Ambiental de Explotación. Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Agencia Nacional de Minería y GIZ, Bogotá D.C.

4.3.1 Lineamiento 5. Ejecutar el plan de obras con manejo eficiente de materiales

A partir del análisis bibliográfico de EC en pequeña minería aluvial, se identifican oportunidades concretas asociadas a la construcción modular y desmontable, el uso de áridos reciclados (RCD), la reutilización de suelo orgánico y el aprovechamiento de la geomorfología local en el diseño de la infraestructura (Guía Minero Ambiental, 2021).

4.3.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Aprovechamiento de materiales generados en el proceso de infraestructura aluvial

Durante el descapote, la excavación y la conformación de plataformas, se generan materiales como arena, gravas aluviales, suelo orgánico y estériles que, debidamente caracterizados y clasificados, pueden ser utilizados como subproductos en la construcción de diques de relaves, terraplenes, canales de desvío, estructuras de control de erosión y recuperación de áreas explotadas. Esta estrategia reduce la necesidad de adquirir materiales de cantera, disminuye los volúmenes a disponer como residuo y acorta las distancias de transporte, contribuyendo a la eficiencia material y energética del proyecto (Ministerio de Minas y Energía – ATG Ltda., 2021).

A partir de la caracterización inicial de la exploración, se establece, según el tipo de material, volumen y características, las posibilidades de implementación de medidas como las siguientes: ver figura 4.24.

Figura 4.24. Implementación de medidas en materiales generados

Manejo y Aprovechamiento de Residuos en Minería Aluvial					
Fase Operativa	Tipo de Residuo	Almacenamiento	Tipo de Aprovechamiento	Manejo y Transformación	Manejo y Transformación
Descapote	Arena	Centro de disposición de estériles	Canales, bajantes, manejo de drenaje, obra civil	Ninguno	
	Material vegetal	Centro de disposición de estériles	Jardinería, recuperación de zonas expuestas según Plan de Manejo	Ninguno	
Excavación	Roca	Centro de disposición de estériles	Canales, bajantes, manejo de drenaje, obra civil	Separación en el centro de disposición de estériles y reutilización de material apto para ello.	Separación en la fuente y reutilización

4.3.1.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Construcción modular y desmontable de infraestructura

La construcción modular y desmontable consiste en diseñar e instalar infraestructura minera mediante elementos prefabricados, transportables y reversibles, que puedan montarse, desmontarse y reutilizarse sin generar alteraciones permanentes en el terreno.

En minería aluvial es especialmente pertinente porque la explotación es móvil o por frentes sucesivos, de igual forma, la intervención del terreno es temporal y se busca restauración progresiva priorizando “cero pasivos ambientales”. (Guía Minero Ambiental, 2021).

La construcción modular y desmontable de campamentos, bodegas, talleres y estructuras auxiliares para el montaje de clasificadoras y zarandas permite prolongar la vida útil de los activos, facilitar su relocalización a nuevas áreas de explotación y reducir los pasivos ambientales y económicos en el cierre de la mina.

En minería aluvial, aplica para:



Planta de beneficio

- Estructura metálica atornillada.
- Bases sobre placas o losas prefabricadas.
- Sistemas de clasificadoras.
- Lavadoras.
- Tuberías con uniones bridadas o rápidas.



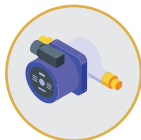
Plataformas operativas

- Mallas y reparadores.
- Bases granulares compactadas (sin concreto permanente).
- Placas prefabricadas de concreto si se requiere mayor capacidad de carga.



Campamentos y áreas administrativas

- Contenedores adaptados.
- Módulos prefabricados livianos.
- Sistemas eléctricos y sanitarios desmontables.



Sistemas hidráulicos

- Tuberías HDPE con acoples desmontables.
- Bombas móviles.
- Tanques modulares de almacenamiento.
- Piscinas con geomembrana removible.

Cuando un frente se agota:



Se recomienda que el proyecto implemente infraestructura modular y desmontable en áreas operativas, planta de beneficio y sistemas hidráulicos, mediante estructuras prefabricadas, bases granulares reutilizables y conexiones desmontables, garantizando reversibilidad, movilidad del frente minero y restauración progresiva del terreno intervenido.

4.3.1.3 Oportunidad de Economía Circular 3: Uso de áridos reciclados y materiales locales en vías, plataformas y obras hidráulicas

El proyecto prioriza el uso de áridos reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) generados en las fases de descapote y excavación, así como la utilización de materiales locales disponibles dentro del área de explotación, en concordancia con los lineamientos de la Guía Minero Ambiental (2021).

Los materiales aprovechables (arena gruesa, gravas, cantos rodados y roca seleccionada) son segregados en la fuente y trasladados al centro de disposición de estériles, donde se realiza su clasificación granulométrica y evaluación geotécnica básica. Previo a su utilización, se verifica el cumplimiento de parámetros como:

Tabla 4.10. Cuadro técnico – evaluación de RCD para uso en vías / plataformas

Parámetro	¿Qué es? (concepto)	Requisitos técnicos de uso (referencia INVIAS*)	Decisión de uso (campo)
Granulometría	Distribución de tamaños de partículas (gravas, arenas, finos). Define el “esqueleto” del material.	Debe ajustarse a bandas granulométricas de la capa (base/subbase). Material bien gradado (mezcla equilibrada de tamaños). Sin sobre-tamaños ni huecos granulométricos.	● Usar: cumple banda. ● Mejorar: fuera leve → mezclar/cribar/triturar. ● Descartar: muy uniforme o muy heterogéneo (no ajustable).
% finos (pasa #200)	Porcentaje de partículas <0.075 mm (polvos/arcillas). Controla drenaje y cohesión.	Subbase: < 12% (típico). Base: < 8-10%. Evitar finos plásticos.	● Usar: dentro de rango. ● Mejorar: 12-20% → lavado/mezcla con grava. ● Descartar: >20% o finos plásticos dominantes.
Límites de Atterberg (LL/IP)	LL: humedad a la que el suelo fluye. IP: rango plástico (sensibilidad al agua).	Subbase: IP < 12. Base: IP < 6 (ideal). LL bajo (<25-35 según capa).	● Usar: IP bajo (material poco plástico). ● Mejorar: IP 12-20 → estabilizar (cal/cemento). ● Descartar: IP >20 (alta plasticidad/ahuellamiento).
Compactación (Proctor)	Máxima densidad alcanzable con energía de compactación (control de vacíos/rigidez).	Subbase: ≥ 95% Proctor. Base: ≥ 98% Proctor.	● Usar: alcanza densidad especificada. ● Mejorar: 90-95% → más pasadas/ajuste humedad. ● Descartar: <90% (no logra densificar → material inestable).
CBR (capacidad de soporte)	Resistencia del material a la penetración (soporte estructural).	Subrasante mejorada: >5-8%. Subbase: >30%. Base: >80%.	● Usar: cumple para la capa. ● Mejorar: 10-30% → mezcla/estabilización. ● Descartar: <10% (no estructural).

OJO: * Ajustar a la especificación vigente de INVIAS y al nivel de tránsito del proyecto.

Notas específicas para RCD:

- Limpieza: retirar yesos, maderas, plásticos, orgánicos (rechazo).
- Homogeneidad: preferir RCD triturado y clasificado (evita segregación).
- Contaminantes: si hay sospecha (pinturas, suelos contaminados), realizar metales totales/lixiviabilidad antes de usar.
- Durabilidad: en bases, verificar desgaste (Los Ángeles) cuando aplique.

Regla operativa

- Ensayar --> comparar con INVIAS --> decidir: usar / mejorar / descartar.
- La economía circular con RCD es válida sólo si cumple desempeño geotécnico y no introduce riesgos ambientales.

Estos materiales son empleados en:

- Construcción y mantenimiento de vías de acarreo.
- Conformación de rampas de acceso.
- Estabilización de plataformas operativas.
- Revestimiento de cunetas y canales de desvío.
- Estructuras disipadoras de energía y obras de drenaje.

Adicionalmente, el diseño geomorfológico del proyecto aprovecha la topografía natural del terreno, reduciendo movimientos innecesarios de tierra y favoreciendo la estabilidad física y el manejo adecuado de aguas superficiales.

Esta estrategia se enmarca en el enfoque de economía circular minera y restauración progresiva del área intervenida.



Proceso constructivo

a. Segregación en la fuente

- 1- Durante excavación, separar:
 - Material orgánico.
 - Gravas y roca.
 - Arena gruesa.
- 2- Evitar mezcla con lodos finos.

b. Clasificación y almacenamiento

- 1- Trasladar al centro de disposición.
- 2- Organizar por pilas según tipo de material.
- 3- Verificar:
 - Granulometría.
 - Contenido de finos.
 - Plasticidad.

c. Construcción de vías internas

d. Construcción de plataformas

- 1- Delimitación del área.
- 2- Extendido por capas.
- 3- Compactar material de relleno en capas delgadas sucesivas por separado antes de colocar la siguiente

¿Por qué no se compacta todo de una vez?

Si colocas 60 cm de material y lo compactas de una sola vez:

- ✗ La parte superior se compacta.
- ✗ La parte inferior queda suelta.
- ✗ Se generan asentamientos posteriores.
- ✗ Se forman deformaciones en la vía.

Por eso se hace por capas.

4- Control de drenaje superficial es importante porque implementa obras hidráulicas menores destinadas a conducir de manera controlada las aguas lluvias y escorrentías naturales fuera de la plataforma vial, evitando procesos erosivos, inestabilidad estructural y aporte de sedimentos a cuerpos hídricos cercanos. Incluye la conformación de cunetas laterales, pendientes transversales del 2-4%, instalación de alcantarillas en cruces naturales y protección de taludes, garantizando la estabilidad operativa y el cumplimiento ambiental en explotaciones aluviales.

¿Por qué es clave en minería aluvial?

En minería aluvial:

- Hay suelos sueltos y altamente erosionables
- Se trabaja cerca de cauces naturales
- El incumplimiento puede generar sedimentación del río
- Puede generar sanciones ambientales

Un mal drenaje superficial puede destruir la vía en una sola temporada de lluvias.

Enfoque de economía circular

Entrada	Transformación	Salida útil
Material excavado	Clasificación	Base granular
Roca seleccionada	Acomodo estructural	Gaviones
Roca seleccionada	Acomodo estructural	Gaviones
Arena gruesa	Compactación	Subbase
Tierra negra	Almacenamiento temporal	Revegetación

Figura 4.25. Cómo realizar la construcción de vías internas



e. Obras hidráulicas

1- Excavación de cuneta siguiendo pendiente natural (ver figura 4.26) , es decir, alinear la cuneta con la dirección natural del escurrimiento del agua, evitando cambios bruscos de dirección, tramos planos donde el agua se estanque, pendientes muy fuertes que generen socavación. En minería aluvial, esto es clave porque los suelos son sueltos y fácilmente erosionables.

2- Revestimiento con grava gruesa.

3- Colocación de roca en zonas de mayor velocidad.

4- Construcción de disipadores de energía en puntos críticos, es importante por que es una estructura hidráulica diseñada para reducir la velocidad del agua cuando esta baja con mucha fuerza por una pendiente o sale de una cuneta, canal o tubería. En minería aluvial se utilizan especialmente porque se manejan altos caudales, hay pendientes variables, los suelos son sueltos (gravas, arenas, limos y su función principal es evitar erosión, socavación y arrastre de sedimentos.

Figura 4.26. Cómo es la excavación de cuneta siguiendo pendiente natural



Figura 4.27. Funcionamiento de un disipador



Los puntos críticos son lugares donde el agua gana velocidad y puede dañar el suelo, en minería aluvial suelen ser:

- Descarga de bombas hacia canales
- Salida de canaletas o canalones
- Descarga de piscinas de sedimentación
- Transiciones de pendiente fuerte a suave
- Puntos cercanos a rondas hídricas o drenajes naturales

Figura 4.28. Tipos de disipadores en minería de oro aluvial



4.4 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO EN MATERIALES DE CONTRUCCIÓN

4.4.1 Lineamiento 6. Optimización del proceso de explotación y beneficio con eficiencia tecnológica

La optimización del proceso de explotación en minería de materiales de construcción de aluvión comienza con la ejecución disciplinada del planeamiento minero definido en el Programa de Trabajos y Obras (PTO),

cuya función es orientar el avance de labores, controlar la selectividad en la extracción y evitar aperturas innecesarias que incrementen la remoción de biomasa y 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.

Establecer un proceso de explotación aluvial técnicamente optimizado que maximice la recuperación del mineral, disminuya consumo de agua, energía y químicos, minimice pérdidas y reduzca impactos ambientales, mediante la implementación de tecnologías limpias, control hidráulico y recirculación de recursos, bajo un enfoque de economía circular y cumplimiento ambiental.

La eficiencia tecnológica en minería aluvial es determinante para aumentar la recuperación de material de interés, reducir las pérdidas hacia zonas de acopio de estériles y minimizar el consumo de agua, energía y reactivos, bajo un enfoque de economía circular y cumplimiento ambiental. La liberación adecuada del mineral mediante la planeación adecuada de las operaciones unitarias constituida bajo la correcta clasificación del tamaño de partícula y forma.

Descripción general del proceso

El proceso productivo se desarrolla mediante un sistema secuencial de operaciones unitarias que incluyen clasificación granulométrica, lavado hidráulico, concentración gravimétrica y manejo de efluentes, integrados en un circuito cerrado de agua.

Tendríamos las siguientes etapas iniciales en este proceso:



Preparación del frente de extracción

Es el descubrimiento del yacimiento o cuerpo mineral, mediante la remoción de la capa o cobertura vegetal o estéril. Generalmente se realiza con: - Bulldozer - Mototraillas - Otros .

Actividades:

Remoción de la vegetación



Arranque: Remoción superficial mínima para acceder al depósito aluvial

Consiste en la fragmentación del macizo rocoso a un tamaño que pueda ser manipulado por el sistema definido de cargue y transporte planeado. El arranque es la remoción del estéril y la extracción del mineral de interés.

Estas operaciones se pueden realizar en forma directa, mecánica o con explosivos. En la extracción del cuerpo mineralizado se debe evitar la contaminación del material de interés con el estéril.

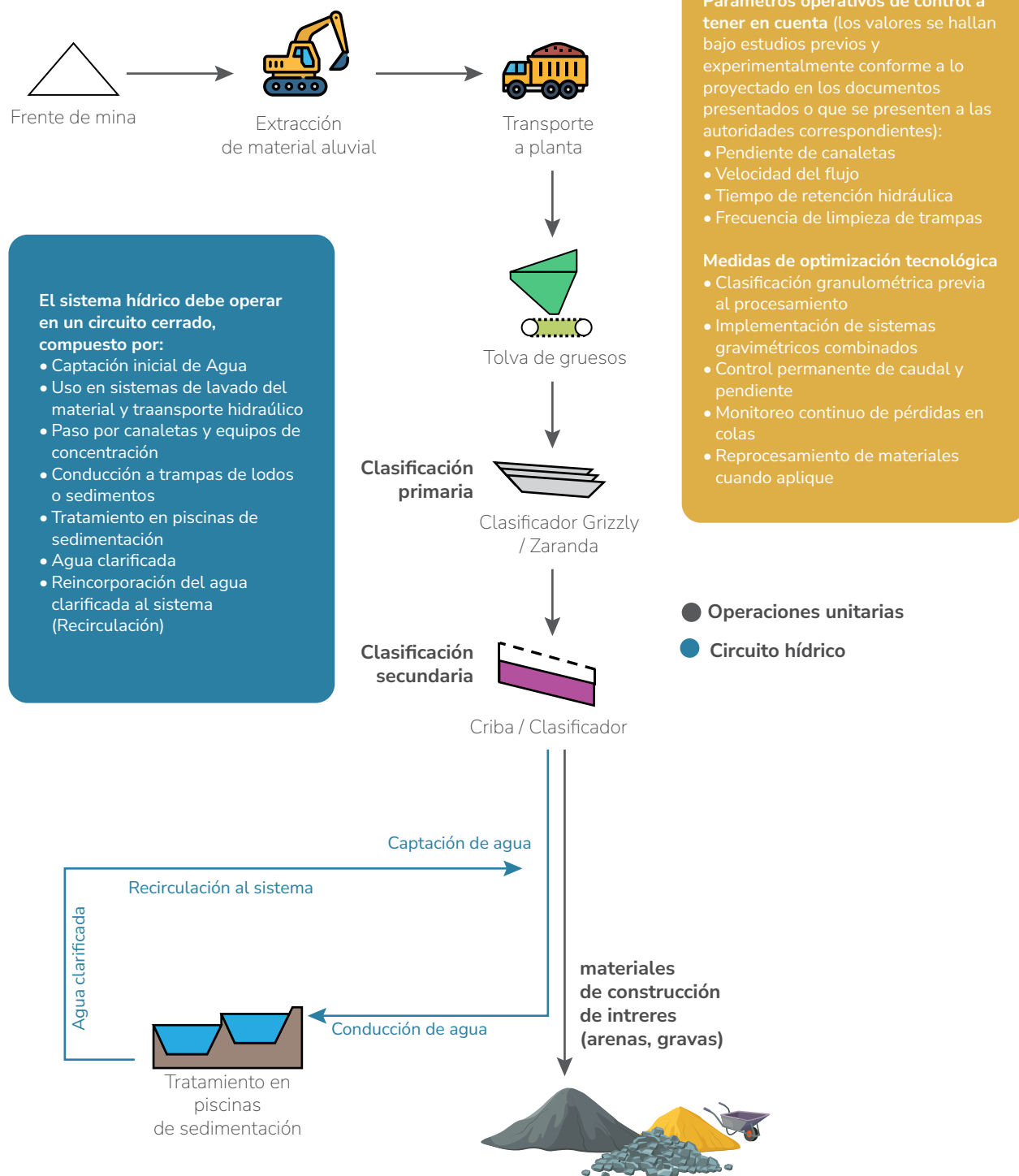
Actividades:

- La remoción de estéril: Puede ser mecánica o química. La voladura incluye perforación y fragmentación con explosivos.
- Explotación del mineral: es la extracción del yacimiento o la sustancia mineralizada de interés.

Tabla 4.11. Oportunidades de economía circular en la etapa de arranque

Etapas / Actividad	Entradas	Salidas	Oportunidades de Economía Circular
Arranque: Remoción superficial mínima	• Vegetación y capa superficial del suelo • Suelo o sedimento estéril • Energía (combustible, -maquinaria: bulldozer, mototraillas) • Mano de obra	• Material vegetal removido • Suelo o sedimento estéril apilado temporalmente • Emisiones de CO₂ y polvo	• Reuso de biomasa removida como compost para restauración • Material estéril puede utilizarse como relleno en caminos o restauración de taludes • Reaprovechamiento del agua de escorrentía de la zona de arranque en etapas posteriores de lavado • Reducción de erosión y conservación de sedimentos para uso posterior en recuperación de oro mediante manejo de sedimentos

Figura 3.29. Diagrama del proceso de explotación y beneficio



Manejo de materiales sólidos

- Material grueso (>2"): utilizado para relleno y reconfiguración del terreno intervenido
- Colas (finos): conducidas a sistemas de sedimentación para su estabilización en reúso o disposición controlada
- Lodos: retirados periódicamente (Limpieza periódica), dispuestos en zonas de secado para su posterior uso en restauración.

Tabla 4.12. Tecnología utilizada en la explotación aluvial

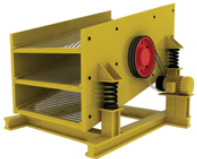
Etapa	Tecnología/equipo	Capacidad típica	Eficiencia de recuperación	Ventajas	Limitaciones
Clasificación	Zaranda vibratoria	5-50 m³/h	Media	- Bajo Costo - Facil mantenimiento	Menor eficiencia con arcillas
	Trommel* (tambor rotatorio)	10-100 m³/h	Alta	Mejor desintegración de arcillas	Mayor consumo de agua
Bombeo (energía)	Bomba de agua de alta eficiencia	5-50 m³/h		Control hidráulico del proceso	Consumo de combustible (diesel o sistemas híbridos)
Tratamiento de agua	Piscinas de sedimentación (HDPE)	1-5 m³	60-80% turbidez	- Bajo costo - Facil implementación	Requiere espacio
Control sólidos	Trampas de sedimentos	1-3 m³	Alta retención sólidos	- Simples - Eficientes	Limpieza frecuente

*Sistemas con Trommel pueden escalar hasta capacidades superiores (10-150t/h), dependiendo del diseño modular

El esquema de proceso de explotación y beneficio implementado con circuito de agua y manejo de materiales sólidos propuesto (sistema integrado) permite una operación minera técnicamente eficiente, ambientalmente sostenible y alineada con los lineamientos normativos vigentes, optimizando el aprovechamiento del recurso aurífero y reduciendo significativamente los impactos asociados a la actividad.

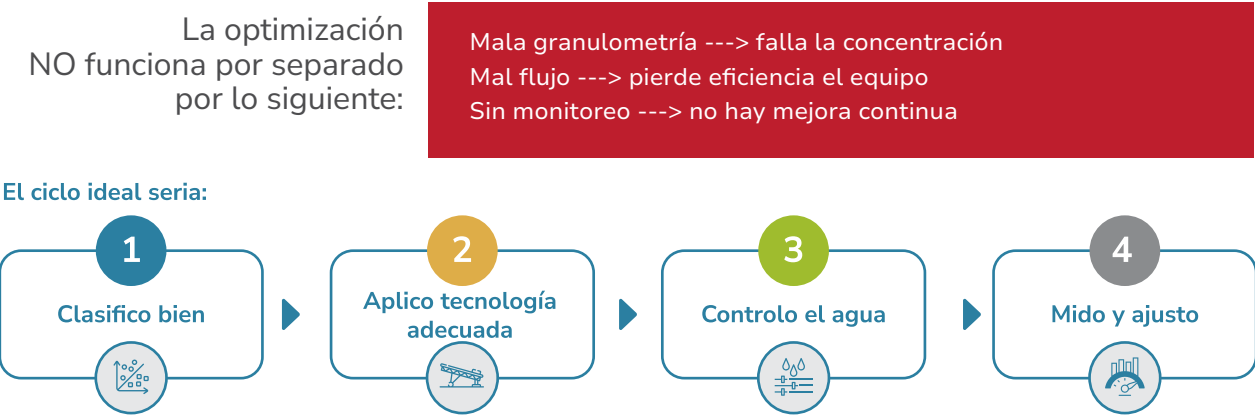


Tabla 4.13. Portafolio de tecnologías por etapa del proceso (Entradas – Salidas – Economía Circular)

Operación unitaria o Actividad	Entradas	Salidas	Limitantes / Consideraciones técnicas	Contribución a eficiencia EC / P+L y Aprovechamiento EC
Pretratamiento (clasificación y preparación del material)	- Material bruto aluvial. - Agua para lavado. - Energía.	Material clasificado por tamaño: - arena fina. - grava. - pedras. - lodo / arcilla.	Separar material mayor a 2" antes del lavado. Clasificar en fracciones: - gruesos (rechazo). - medios (tratamiento gravimétrico). - finos (requieren mejor control hidráulico). - reduce carga innecesaria mejorando eficiencia.	- Reuso de agua de lavado mediante sedimentación. - Aprovechamiento de arena fina como agregado o relleno. - Venta de gravilla para construcción.
Tecnologías disponibles				
Trommel (tambor rotatorio) 			Zaranda vibratoria (2 - 3 mallas) Grizzly (rejilla primaria) 	
- Permite un lavado eficaz de lodos y arcillas - Clasifica el material en función de tamaños, alimentando de forma más homogénea la siguiente etapa de concentración. - Se emplea cuando el material extraído contiene alta proporción de arcillas o aglomerados, y se requiere un proceso que combine lavado con separación por tamaño antes de ingresar a mesas, jigs o centrífugas de recuperación de oro.			- Permite una clasificación más precisa por tamaños que puede ser ajustada mediante diferentes mallas o múltiples niveles. - Tiene alta eficiencia de producción y es relativamente fácil de mantener. - La zaranda vibratoria es preferida cuando el material a procesar es comparativamente más limpio (menos arcilloso) o se necesita un control granulométrico más fino antes del ingreso a concentradores o mesas.	

4.4.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Enfoque integral de optimización del proceso

La mejora del proceso se basa en los siguientes 4 pilares, la integración de éstos permite un enfoque integral de optimización.



1- Selección granulométrica adecuada



Objetivo
Separar el material por tamaños para aplicar la tecnología adecuada a cada fracción y evitar pérdidas.

Criterios técnicos
Grueso: > 2" (50 mm) posible rechazo / inspección manual.
Grava: 10-50 mm Trituración ligera o descarte
Arena gruesa: 2-10 mm Canaletas

Problemas comunes

- Mezcla de tamaños
- Exceso de finos ---> proceso de acumulacion de sedimentos, lodos, arenas o materiales sólidos en las canaletas
- Material arcilloso sin desintegración

Buenas prácticas

- Prelavado en trommel con agua controlada
- Uso de dispersores (romper arcillas)
- Clasificación en al menos 2-3 fracciones

Indicador clave
% de material correctamente clasificado

2- Monitoreo y ajuste operativo continuo



Objetivo

Tomar decisiones en tiempo real para maximizar eficiencia y reducir pérdidas.

Qué monitorear

- Producción diaria
- Consumo de combustible
- Caudal de agua
- Pérdidas en colas

Control clave: análisis de colas

- Muestreo cada 2-4 horas
- Reprocesar el material estéril si es necesario

Problemas comunes

- Operación "empírica" sin datos
- No medir pérdidas ---> baja rentabilidad
- Falta de trazabilidad

Buenas prácticas

- Formatos simples de registro diario
- Capacitación de operarios
- Ajustes en tiempo real (pendiente, caudal, carga)

Indicadores clave

- % pérdidas en las zonas de estériles
- m³ recuperados
- eficiencia operativa (% tiempo efectivo)

4.4.1.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Uso eficiente del agua con recirculación y control de sólidos en el proceso de explotación y beneficio

La minería aluvial es una actividad altamente dependiente del agua, utilizada principalmente para:

- Desagregación del material
- Transporte hidráulico
- Clasificación granulométrica



Objetivo

Minimizar captación de fuentes naturales

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

Acciones clave:

- Captación controlada y planificada: Toma de agua fuera del cauce principal, realizar la captación en periodos de mayor caudal, realizar aforo de la fuente hídrica impactada, realizar almacenamiento temporal en reservorios
- Aprovechamiento de aguas ya intervenidas: Reuso de agua de piscinas, captación de escorrentía interna del área minera
- Optimización del lavado del material: Control de caudal en zarandas y clasificadoras, ajuste de pendientes y velocidades, uso de equipos gravimétricos de bajo consumo
- Procesamiento secuencial: en la explotación por bloques, usar el mismo volumen de agua en ciclos sucesivos

La recirculación del agua en los procesos de explotación y beneficio minero es uno de los principios más consolidados de la economía circular aplicada a la minería, ya que permite reducir significativamente la captación de agua fresca, disminuir descargas de efluentes y mejorar la eficiencia operativa del sistema productivo. En minería, la recirculación consiste en recuperar el agua contenida en relaves y corrientes de proceso, tratarla hasta alcanzar condiciones operativas aceptables y reintroducirla en el circuito, configurando sistemas de uso múltiple o circuitos cerrados (Gunson et al., 2012). Diversos estudios demuestran que operaciones mineras con esquemas de recirculación bien diseñados pueden reutilizar más del 70 % del agua total del proceso, reduciendo la huella hídrica y aumentando la resiliencia frente a la variabilidad climática (Mudd, 2008; Northey et al., 2016). En minería aluvial, donde el agua es esencial para la desagregación y lavado, la recirculación representa una oportunidad clave para transformar un uso lineal del recurso en un modelo circular de alta eficiencia hídrica (Lottermoser, 2010).

Como tecnologías más recomendadas (pequeña minería):

- Implementar circuitos cerrados de agua (recirculación $\geq$ 70-80%)
- Uso de piscinas de sedimentación (sistema en cascada 2-3 pozas), trampas de lodos y canales de recirculación
- Reutilización del agua clarificada en: lavado de material / transporte hidráulico

Como Tecnologías complementarias:

- Hidrociclones (cuando hay alta carga de sólidos finos)
- Geotubos (manejo de lodos)

Como Tecnologías condicionadas (según PMA):

- Coagulación-floculación (si se requiere mayor claridad del agua)
- Humedales (para cierre o restauración)

Indicadores clave

m³ de agua reutilizada / m³ total consumida

Tabla 4.14. Clasificación de tecnologías de tratamiento de aguas para minería aluvial artesanal y de pequeña escala

Categoría	Tecnología de tratamiento	Principio de funcionamiento	Eficiencia típica	Ventajas / Cuando aplicar	Limitaciones	Aplicabilidad
Físicas (primarias)	Sedimentación (pozos)	Decantación por gravedad de sólidos suspendidos.	60 – 80% turbidez.	• Simples, bajo costo, fácil operación de remoción de sólidos gruesos y medios. • Primer tratamiento del agua de lavado y relaves.	Baja eficiencia para partículas finas (<20 µm); requiere gran superficie	Alta
	Pozas en cascada	Sedimentación progresiva	Mejora remoción de sólidos finos frente a una sola poza	Cuando se busca aumentar % de recirculación sin alta inversión		
	Espesadores gravitacionales	Aumentan concentración de sólidos (Sedimentación acelerada); recuperación rápida y con grandes volúmenes de agua clara.		Beneficio gravimétrico continuo y relaves finos; cuando se busca recircular agua al proceso.	Sensibles a variaciones de caudal y granulometría; requieren control de floculación	Alta
	Espesadores de alta densidad	• Sedimentación + reología controlada. • Mayor recuperación de agua; menor volumen de relaves.	• Diseño cono profundo 54-70% sólidos • Recuperación agua: 85-95%	Cuando el agua es crítica		
	Trampas de sedimentos	Retención de partículas gruesas por reducción de velocidad.	50 – 70% sólidos.	Simples, mantenimiento básico.	Limpieza frecuente.	Alta
	Lechos de secado / geotextiles drenantes	• Deshidratación pasiva de relaves; recuperación progresiva de agua. • Evaporación y drenaje natural.		Operaciones aluviales de baja a mediana escala (bajo costo); climas cálidos, operación pasiva.	Dependencia climática (seca); tiempos largos de secado.	
	Clasificadores hidráulicos: Canales de desaceleración o de decantación	• Disminución de velocidad de flujo para favorecer sedimentación. • Permiten separar fracciones granulométricas.	40 – 60%.	Fácil implementación en explotación aluvial continua, Integrables al diseño del frente minero.	• Baja eficiencia en finos. • Pretratamiento antes de espesadores.	Media
	Filtración en grava/arena	Retención física de partículas finas (filtración por medio granular).	50 – 80%.	• Mejora calidad del agua porque mejora turbidez del agua recirculada. • Pulido del agua antes del reuso.	Colmatación (proceso de relleno o acumulación de sedimentos)	Media
	Relaves espesados o en pasta	Relaves con alto % de sólidos; mínima pérdida de agua.		Gestión integral de relaves y maximización de recuperación hídrica.	Requiere diseño especializado y control geológico.	
Físico-químicas	Coagulación – floculación	Agrupación de partículas finas mediante químicos.	80 – 95% turbidez.	Alta eficiencia.	Requiere insumos químicos.	Media
	Clarificadores con floculantes	Sedimentación acelerada con polímeros.	85 – 95%.	Reduce tamaño de piscinas.	Costos operativos.	Media
Biológicas (naturales)	Humedales artificiales (NBS)	Tratamiento pasivo; remoción adicional de sedimentos y metales por plantas y microorganismos.	50 – 80%.	• "Bajo impacto ambiental. • Mejora de calidad antes de recirculación o descarga controlada".	No aptos como único sistema de tratamiento; requieren espacio.	Baja-Media
	Fitorremediación	Absorción de contaminantes por vegetación.	Variable.	Solución sostenible.	Lenta.	Baja

Categoría	Tecnología de tratamiento	Principio de funcionamiento	Eficiencia típica	Ventajas / Cuando aplicar	Limitaciones	Aplicabilidad
Tecnologías avanzadas	Hidroclones o ciclones hidráulicos	Separación por fuerza centrífuga.	60 – 90% sólidos.	Compacto, eficiente, alta capacidad, separación rápida.	- Requiere presión. - Se usa cuando hay alto contenido de arenas finas.	Media
	Filtros prensa (placa o banda)	- Deshidratación de lodos (filtración forzada). - Alta eficiencia de separación sólido-líquido; agua recuperada con bajo contenido de sólidos.	>90% sólidos.	- Reduce volumen de residuos. - Cuando se requiere alta recirculación (>80 %) y control ambiental estricto.	- Alto costo. Alto CAPEX y OPEX. - Manejo de tortas secas.	Baja
	Geotubos drenantes (geobolsas)	- Filtración pasiva y secado de lodos con geotextil. - Portátiles, rápidos de instalar.	80 – 95%.	Fácil manejo de lodos para operaciones temporales.	Requiere insumos.	Media
Sistemas integrados	Circuito cerrado con recirculación de agua de proceso	Reuso continuo del agua tratada dentro del sistema.	70 – 90% ahorro agua.	- Reduce captación. - Operaciones con infraestructura estable y control operativo.	- Requiere diseño adecuado. - Acumulación de sales y finos; requiere monitoreo.	Alta

Criterios de selección

Para elegir la tecnología adecuada se debe considerar:

- Caudal de agua (m³/h)
- Carga de sólidos suspendidos
- Espacio disponible
- Nivel de cumplimiento ambiental requerido
- Costos de operación

Configuración óptima recomendada

Sistema escalonado:

- Trampas de sedimentos
- Piscinas de sedimentación (2–3 en serie)
- (Opcional) Hidrociclón o floculación
- Recirculación del agua

Cumplimiento ambiental en Colombia

Este esquema permite cumplir con:

- Reducción de turbidez (<50 NTU aguas abajo, según PMA)
- Disminución de vertimientos
- Uso eficiente del recurso hídrico
- Lineamientos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible



4.4.2 Lineamiento 7. Valorización de subproductos

Durante la exploración aluvial se identifica la presencia de material de interés (gravas, arenas), sin embargo, también se generan concentrados pesados (magnetita, ilmenita, rutilo, circón) y concentración y presencia de oro y demás elementos. La valorización temprana de estos materiales como posibles subproductos (si cumplen normativa ambiental y de calidad) permite diseñar modelos de negocio circulares y reducir la fracción que terminaría con estéril en la fase de explotación.

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

Oro residual fino y ultrafino

Tabla 4.15. Variables principales en la selección de tecnologías para valorización de relaves

Variable	Parámetros a evaluar		Implicación para Selección Tecnológica
1. Tipo de subproducto	• Oro residual (fino / ultrafino) • Arena silícea • Grava / canto rodado • Limos y arcillas	• Minerales pesados (Fe-Ti-Zr) • Óxidos Fe-Mn • Agua de relaves	Oro ---> tecnologías de concentración. Arenas / gravas ---> clasificación y uso directo. Finos ---> deshidratación y transformación. Pesados ---> separación física especializada.
2. Granulometría	• > 2 mm (gravas) • 63 µm - 2 mm (arenas)	• 20-63 µm (limos) • < 20 µm (arcillas / Au ultrafino)	Gruesos ---> cribado y trituración. Finos ---> espesadores, filtros prensa. Arenas ---> lavado, ciclones. Ultrafinos ---> flotación o lixiviación.
3. Mineralogía asociada	• Cuarzo dominante • Arcillas (caolinita, illita) • Magnetita / ilmenita	• Óxidos Fe-Mn • Sulfuros traza	Cuarzo limpio ---> construcción / filtración. Arcillas plásticas ---> cerámica / suelos. Minerales magnéticos ---> separación magnética. Sulfuros ---> evitar oxidación / encapsular.
4. Contenido metálico	• Au (g/t) • Fe (% Fe₂O₃) • TiO₂ (%)	• Zr (ppm) • Metales traza (As, Pb, Hg)	Au alto ---> reprocesamiento rentable. Fe/Ti ---> pigmentos o abrasivos. Zr ---> mercado especializado. Metales tóxicos ---> tratamiento previo o restricción de uso.

4.4.2.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Simbiosis industrial para arenas finas, gravas y oro

Consiste en evaluar arenas y gravas como materiales de construcción (previa caracterización), analizar magnetita, ilmenita y otros minerales pesados como subproductos según la Ley 685 (art. 61). Aprovechar más materiales desde exploración reduce impactos, aumenta eficiencia y mejora productividad.

Según Méndez et al. (2022), se demostró que las arenas y gravas provenientes de actividades de lavado poseen propiedades geotécnicas adecuadas para su uso como agregados en bloques de hormigón, reemplazando hasta un 50% del agregado natural y reduciendo la necesidad de extraer nuevos materiales. Mediante la toma sistemática de muestras de arenas y gravas (material estéril), ensayos geotécnicos de aptitud (granulometría por tamizado, límites de Atterberg, ensayo de Proctor para densificación y resistencia a la compresión), evaluación de metales asociados o trazas (análisis de elementos potencialmente tóxicos como As, Hg, Pb utilizando ICP-MS), pruebas piloto de sustitución en agregados (monitorear la resistencia mecánica).

Normatividad a tener en cuenta: Ley 685 de 2001 – Art. 61: Permite el aprovechamiento integral de minerales y materiales asociados (base legal para reutilizar material no mineralizado), siempre que cumplan la normativa ambiental. Resolución 472 de 2017: Gestión de residuos aprovechables (arenas y gravas). Norma base: ICONTEC, especifica calidad, gradación y límites de impurezas de agregados para concreto (equivalente a ASTM C33). Las normas complementarias (métodos de ensayo NTC/ASTM adoptados): Granulometría, finos, Atterberg, densidad/ absorción; Abrasión Los Ángeles (durabilidad); Materia orgánica, equivalente de arena, etc; Desempeño en concreto: NTC 673 (compresión) y NSR-10 (requisitos estructurales). En la práctica: NTC 174 define qué debe cumplir el agregado; las demás normas miden cómo verificarlo.

Tabla 4.16. Aplicación directa en minería aluvial

Tipo de material	Evaluación clave	Decisión
Gravas aluviales	Granulometría + Los Ángeles + CBR	Uso en vías
Arenas	Finos + SE + IP	Uso en concreto o rellenos
Relaves limpios	Granulometría + CBR + finos	Uso condicionado
Relaves con Hg o sulfuros	Metales + TCLP + PGA/PNA	✗ No reutilizar directo

a) Metodología



Fase 1 – Caracterización inicial del material

Durante la exploración se debe ampliar el análisis más allá del material de interés:

Caracterización mineralógica

Este conjunto de análisis (los que aplique) permite determinar la fracción económicamente aprovechable, identificar subproductos potenciales, diseñar procesos más eficientes, reducir generación de estériles, incorporar principios de economía circular desde fase exploratoria minimizando riesgos ambientales asociados a mala caracterización.

Tabla 4.17. Diferentes análisis para caracterización de materiales

Etapa	Objetivo Técnico	Método / Técnica	Información que Genera	Aplicación en Minería Aluvial	Nivel de Complejidad
Análisis granulométrico	- Determinar la distribución de tamaños de partícula del material. - Establecer la fracción granulométrica asociada a la mineralización. - Optimizar el diseño de sistemas de concentración.	Tamizado en seco o húmedo, curva granulométrica.	% de gravas, arenas y finos; tamaño dominante del oro.	- Diseño de canaletas y equipos - Estimación de recuperación - Planificación de sedimentación.	Bajo
Separación gravimétrica preliminar	Concentrar fracción pesada por densidad.	Métodos físicos basados en diferencias de densidad (canaletas, mesas concentradoras o bateo, centrifugas).	- Concentrado pesado preliminar. - Estimación de la ley de oro recuperable.	Evaluación inicial de viabilidad económica y presencia de minerales acompañantes.	Bajo – Medio
Identificación de minerales pesados	- Determinar composición del concentrado. - El concentrado gravimétrico es evaluado para identificar minerales acompañantes con potencial de valorización como subproductos.	Separación magnética manual, lupa binocular, análisis visual.	Presencia de magnetita, ilmenita, rutilo, circón u otros.	Evaluación de subproductos y modelo de negocio circular.	Medio
Difracción de Rayos X (DRX)	Confirmar fases minerales cristalinas, permitiendo confirmar composición mineralógica.	Análisis instrumental en laboratorio especializado.	Identificación mineralógica precisa y cuantificación de fases.	Sustento técnico para valorización comercial y cumplimiento normativo.	Alto
Microscopía óptica	Analizar morfología y tamaño del oro.	Observación con microscopio petrográfico o binocular.	Forma, tamaño, grado de liberación del oro.	Selección de método de beneficio (gravimétrico, combinado, etc.).	Medio
Microscopio Electrónico de Barrido (SEM-EDS)(Si llegase a aplicar)	Caracterización microestructural y química.	Imagen de alta resolución + microanálisis elemental.	Asociación mineralógica, inclusiones, composición puntual.	Optimización metalúrgica y análisis de recuperación potencial.	Alto

Caracterización físico-química

• Densidad y susceptibilidad magnética.

La densidad al ser la relación entre masa y volumen (g/cm^3), es muy importante porque el oro y los minerales pesados tienen alta densidad, lo que permite al tener conocimiento de esta densidad diseñar procesos gravimétricos eficientes y ayuda a estimar comportamiento hidráulico en canaletas. Mientras mayor la diferencia de densidad, más eficiente la separación gravimétrica.

Ejemplo: Oro $\approx 19.3 \text{ g/cm}^3$; Magnetita $\approx 5.2 \text{ g/cm}^3$; Arena silíceo $\approx 2.6 \text{ g/cm}^3$

Mientras que la susceptibilidad magnética es la capacidad de un mineral para responder a un campo

magnético, la cual sirve para separar magnetita del concentrado pesado, preconcentrar fracciones antes de análisis químico y evaluar potencial de subproducto (magnetita comercial).

- **Contenido de Fe, TiO₂, ZrO₂.**

Son análisis químicos que determinan concentración de elementos clave, siendo importantes porque permite evaluar si el concentrado pesado puede comercializarse como subproducto y no considerarse estéril.

- **Ensayos de lixiviabilidad.**

El ensayo TCLP puede emplearse como herramienta complementaria para evaluar la lixiviabilidad de contaminantes en relaves, es decir, estimar del material el potencial de liberación de contaminantes (metales pesados, por ejemplo) bajo condiciones específicas; sin embargo, su uso debe enmarcarse dentro de la normativa colombiana vigente y no sustituye una caracterización integral del material, la cual debe incluir análisis geoquímicos y de generación de drenaje ácido, conforme a los lineamientos del Decreto 4741 de 2005 y la Resolución 1023 de 2005.

- **Determinación de potencial generación de drenaje ácido (si aplica).**

En los depósitos aluviales y de placer colombianos —tales como los distritos de Bajo Cauca antioqueño (Nechí, Cáceres, El Bagre, Zaragoza), Sur de Bolívar, ríos San Juan y Atrato (Chocó), Complejo de Humedales de Ayapel (Córdoba) y Barbacoas (Nariño)—, el oro se ha concentrado por procesos sedimentarios junto con minerales pesados resistentes a la meteorización: magnetita, ilmenita, circón, rutilo, monacita y, en proporciones variables, sulfuros residuales (pirita detrítica, arsenopirita parcialmente oxidada) que no alcanzaron a destruirse durante el transporte fluvial (SGC, 2019; ANM, 2022).

Error conceptual frecuente en pequeña minería aluvial

Afirmación común (incorrecta): “Como es minería aluvial, entonces no genera ácido.” **Lo correcto:** el relave puede concentrar sulfuros residuales en la fracción de arenas negras; por lo tanto, se debe evaluar caso a caso antes de valorizar, reutilizar o disponer el material. Además, en aluvión el riesgo dominante en términos de salud pública y ecosistemas acuáticos suele ser el mercurio residual proveniente de amalgamación previa. Ambos riesgos —acidez potencial y mercurio— deben evaluarse en conjunto y no son mutuamente excluyentes.

En la minería aluvial, el riesgo de Drenaje Ácido de Mina (DAM) suele ser menor que en depósitos filonianos primarios, ya que buena parte de los sulfuros originales ha sido oxidada o removida durante el transporte sedimentario y la meteorización natural. Sin embargo, esta condición no debe generalizarse: en zonas cercanas a la fuente primaria —Bajo Cauca, Sur de Bolívar y paleoplaceres profundos— los relaves y arenas negras de beneficio pueden contener sulfuros residuales o concentrarlos como minerales pesados, principalmente pirita y, en ciertos casos, arsenopirita, galena o esfalerita, que al quedar expuestos al oxígeno y al agua pueden generar procesos de acidificación y movilización de metales (INAP, 2014; MEND, 2009).

La valorización o reutilización de relaves aluviales (como agregado fino para construcción, relleno estructural, concentrados de arenas negras o separación de minerales pesados valiosos) no debe basarse únicamente en el supuesto de bajo riesgo por tratarse de minería aluvial, sino en una caracterización geoquímica específica del material. En consecuencia, se recomienda realizar ensayos de Balance Ácido-Base (ABA) y las determinaciones complementarias que se describen en la Sección 2, con el fin de determinar si el relave presenta comportamiento generador, no generador o incierto frente al DAM. Este análisis puede ser requerido por la autoridad ambiental como soporte técnico para definir su manejo, aprovechamiento o disposición final (Términos de Referencia ANLA; Decreto 1076 de 2015).

Enfoque de caracterización en tres niveles progresivos

El esquema siguiente sigue el principio de caracterización proporcional al riesgo establecido en MEND (2009) y recogido por INAP-GARD (2014, Capítulo 4). La estrategia permite avanzar gradualmente —desde una inspección visual de campo hasta ensayos estáticos de laboratorio y, cuando aplique, ensayos cinéticos— optimizando recursos y escalando la profundidad del estudio solo cuando los resultados del nivel previo lo ameriten. Esta guía presenta el enfoque interpretativo; los procedimientos analíticos detallados deben consultarse en las normas de referencia citadas en cada nivel.

NIVEL 1

Evaluación rápida en campo (screening visual y pH en suspensión)

Propósito del nivel. Identificar indicios visuales y fisicoquímicos inmediatos que sugieran la presencia de sulfuros residuales reactivos, sulfatos secundarios (DAM activo o histórico) o productos de oxidación de hierro. Este nivel no clasifica el material como NAF o PAG: es un tamiz que decide si se avanza al Nivel 2.



Qué aporta:

detección temprana de señales críticas (eflorescencias, agua ácida visible, olor a sulfuro) que justifican intervención inmediata.



Qué NO puede responder:

(i) cuantificar el potencial ácido-base; (ii) descartar DAM en sulfuros encapsulados o en fase de lag (latencia, sin acidificación externa aún); (iii) confirmar contenido de mercurio residual.



Costo y tiempo indicativos:

bajo (tiras de pH, frasco de muestreo, agua destilada); ~30 minutos por punto. Ejecutable por el operador o supervisor de planta con capacitación básica.

Tabla 4.18. Indicadores visuales y de campo para riesgo de DAM en relaves aluviales

Indicador	Qué observar	Interpretación preliminar
Color del relave / arenas	Presencia abundante de arenas negras (capas oscuras con brillo metálico).	Concentración de minerales pesados (magnetita, ilmenita) y posibles sulfuros residuales. No indica DAM por sí solo.
Brillos metálicos en partículas	Partículas doradas latón (pirita), gris acero (arsenopirita) o gris plomo (galena).	Sulfuros residuales sobrevivientes al transporte fluvial. Confirmación mineralógica (DRX, lupa binocular, microscopía) recomendada.
Eflorescencias	Costras blancas, amarillas o rojizas sobre pilas secas.	Sulfatos secundarios (jarosita, melanterita, yeso). Señal directa de oxidación de sulfuros. Puede reflejar DAM activo o histórico; requiere confirmación con Nivel 2.
Agua de infiltración o charcos	Coloración rojiza, naranja o marrón en zanjas y pozas de decantación.	Puede indicar oxidación de Fe^{2+} de DAM, pero en regiones tropicales con suelos ferralíticos (Chocó, Bajo Cauca) también refleja hierro natural del suelo o materia orgánica húmica. Medir pH in situ: pH < 4.5 con color ferruginoso es indicativo fuerte de DAM; pH > 6 con el mismo color probablemente es hierro natural.
Olor	Azufre ("huevo podrido") al remover el relave húmedo.	Posible H_2S por oxidación activa de sulfuros o reducción bacteriana en condiciones anóxicas. Interpretar junto con pH y coloración.
pH en suspensión 1:1 (screening de campo)	Mezclar 1 parte de relave con 1 parte de agua destilada; agitar; reposar 10 min; medir con tira o electrodo. NOTA: esto NO es pH de pasta en sentido estricto (Price, 2009 §8.2).	pH < 4: generador activo, pH 4-6: riesgo medio, requiere Nivel 2, pH > 6: no descarta riesgo. Para decisiones formales, confirmar con electrodo calibrado (± 0.1); tiras de pH solo para screening visual.

Fuente: Elaboración propia con base en MEND (2009), INAP-GARD (2014), Price (2009), Nordstrom & Alpers (1999).

Decisión al final del Nivel 1

- Sin señales visuales y pH > 6: riesgo aparente bajo. Avanzar al Nivel 2 solo si se planea valorizar formalmente el material, si lo exige la autoridad ambiental o si la operación dispone de sulfuros residuales confirmados por mineralogía.
- Una o más señales o pH 4-6: riesgo incierto ---> obligatorio pasar al Nivel 2.
- Eflorescencias, agua ácida visible o pH < 4: evidencia de DAM activo. Aplicar controles de contención inmediatos (Tabla 4.21) y escalar al Nivel 2/3 para cuantificar balance ácido-base y diseñar manejo.

Limitación del Nivel 1: La ausencia de señales visuales no descarta el riesgo de DAM. Los sulfuros pueden estar encapsulados en granos de cuarzo o en fase de latencia (lag phase), sin acidificación externa medible. Para toda valorización formal o disposición controlada se requiere avanzar al Nivel 2. En aluvión, evalúe además el mercurio residual: si existe historial de amalgamación, solicite determinación de Hg total antes de reutilizar el material. El Nivel 1 es un tamiz, no un criterio de aprobación.

NIVEL 2

Ensayos estáticos de laboratorio (Balance Ácido-Base y complementos)

Propósito del nivel. Cuantificar el balance entre la capacidad de generar acidez (AP, Acid Potential) y la capacidad de neutralizarla (NP, Neutralization Potential) del material, y derivar una clasificación preliminar que soporte la decisión de manejo o el escalamiento a ensayos cinéticos.



Qué aporta:
un estimado conservador del balance ácido-base bajo el supuesto de reacción completa; clasificación preliminar PAG / Incierto / Non-PAG; evidencia de especies de azufre y carbonatos presentes.



Qué NO puede responder:
(i) la velocidad de oxidación de sulfuros y de liberación de metales en condiciones de campo; (ii) la duración del periodo de latencia antes de la acidificación; (iii) la movilidad real de metales a pH neutro (ML - Metal Leaching). Para estos aspectos se requieren ensayos cinéticos (Nivel 3).



Muestreo mínimo:
una muestra compuesta representativa por cada tipo de relave o unidad geoquímica, integrada por al menos 5 submuestras de ~1 kg. En operaciones aluviales, separar: (i) arenas negras concentradas (fracción pesada), (ii) colas gruesas, (iii) lodos finos. Documentar coordenadas, profundidad y tiempo de almacenamiento.



Costos indicativos (laboratorios colombianos, 2024):
del orden de ~\$500.000 COP por muestra para ABA Sobek modificado; consultar cotización específica. Tiempo: 10-15 días hábiles.n básica.

Tabla 4.19. Determinaciones estáticas recomendadas y su rol en la interpretación

Parámetro	Qué aporta a la predicción
Azufre total (S _{total} , %)	Contenido total de azufre en la muestra (todas las formas: sulfuros, sulfatos, azufre orgánico si aplica). Valor bruto, NO apto para calcular AP directamente.
Azufre sulfato (S _{sulfato} , %)	Azufre presente como sulfatos (yeso, jarosita, melanterita, baritina). Este azufre NO es fuente de acidez futura: los sulfatos solubles ya descargaron su acidez y los insolubles no son reactivos.
Azufre sulfuro (S _{sulfuro} , %)	Azufre contenido en minerales sulfurados reactivos (pirita, arsenopirita, etc.). Base correcta para el cálculo del AP. ---> S_{sulfuro} = S_{total} - S_{sulfato}
AP – Potencial de Acidez (kg CaCO ₃ eq./t)	Acidez potencial máxima asumiendo oxidación completa de sulfuros a H ₂ SO ₄ e hidrólisis de Fe ³⁺ . AP = %S_{sulfuro} × 31,25 Supone 2 moles H ⁺ por mol S. Para arsenopirita, galena o sulfuros no-Fe el factor puede diferir (MEND 2009 §12.7).
NP – Potencial de Neutralización (kg CaCO ₃ eq./t)	Capacidad de neutralización aportada por carbonatos reactivos (calcita > dolomita >> siderita) y, marginalmente, silicatos reactivos. La NP medida por Sobek puede sobrestimar la NP efectiva si hay siderita (FeCO ₃), que al disolverse libera Fe ²⁺ que se oxida y vuelve a consumir alcalinidad.
AP – Potencial de Acidez (kg CaCO ₃ eq./t)	Acidez potencial máxima asumiendo oxidación completa de sulfuros a H ₂ SO ₄ e hidrólisis de Fe ³⁺ . AP = %S_{sulfuro} × 31,25 Supone 2 moles H ⁺ por mol S. Para arsenopirita, galena o sulfuros no-Fe el factor puede diferir (MEND 2009 §12.7).
NPR = NP / AP (adimensional)	Relación normalizada. Criterio PRIMARIO de clasificación (MEND, 2009 §14).
NNP = NP – AP (kg CaCO ₃ eq./t)	Diferencia neta. Criterio COMPLEMENTARIO. Cuando NPR y NNP dan clasificaciones discordantes, prevalece NPR (Price, 2009).
NAG (pH tras oxidación forzada con H ₂ O ₂)	Test de contraste cualitativo. Útil para detectar materiales cerca del umbral o con S no-reactivo. No reemplaza a NPR; se interpreta en conjunto.
Mineralogía (DRX, microscopía óptica o QEMSCAN/MLA)	Línea de evidencia crítica en aluvión. Permite: (i) distinguir pirita detritica (poco reactiva) de pirita primaria fresca; (ii) verificar si el NP viene de calcita, dolomita o siderita; (iii) identificar jarosita/goethita (DAM histórico pasivo) vs. melanterita (DAM activo).
Hg total (específico para aluvión)	Concentración de mercurio residual por historial de amalgamación. Parámetro crítico en aluvión colombiano. Nota: el TCLP (EPA 1311) no es adecuado para evaluar lixiviabilidad de Hg metálico en relaves de amalgamación; complementar con EPA 1631/7474 para Hg disuelto en lixiviados.

Fuente: Elaboración propia con base en Sobek et al. (1978), Price (2009), MEND (2009), INAP-GARD (2014), AMIRA (2002), EPA (2007).



NIVEL 3

Interpretación técnica, clasificación y decisión de manejo

Propósito del nivel. Integrar las líneas de evidencia del Nivel 2 (ABA, mineralogía, Hg, NAG) para clasificar el material y decidir su manejo. Cuando el material cae en zona incierta o se destina a valorización formal, se requiere escalar a ensayos cinéticos (celdas de humedad según ASTM D5744, ≥ 21 semanas) para estimar la velocidad real de reacción.



Criterios de clasificación: la siguiente tabla adopta el marco internacional estándar establecido en MEND 1.20.1 (Price, 2009) y recogido por INAP-GARD Guide (2014). Los umbrales NPR = 1 y NPR = 2 no son valores arbitrarios: derivan del balance estequiométrico de la reacción pirita-calcita bajo condiciones de intercambio de CO₂ con la atmósfera, donde la neutralización efectiva requiere al menos 2 moles de CaCO₃ por mol de S oxidado para mantener pH > 6,3 (MEND 2009, §14.3).

Tabla 4.20. Clasificación por criterios MEND 1.20.1 / INAP-GARD

NPR = NP/AP	NNP (kg CaCO ₃ /t)	Clasificación	Decisión de manejo
< 1	< -20	● PAG – Potencialmente generador de acidez	Manejo controlado (Tabla 3.21). No valorizable sin tratamiento. Ensayos cinéticos recomendados para dimensionar tasa de oxidación si la escala lo justifica.
1 - 2	-20 a +20	● Incierto	Ensayos cinéticos obligatorios (celdas de humedad ASTM D5744, ≥ 20 semanas) antes de definir manejo definitivo. Caracterización mineralógica recomendada.
> 2	> +20	● Non-PAG – No generador de acidez (bajo supuestos ABA)	Potencialmente apto para valorización, previa verificación de: (i) TCLP para metales (EPA 1311) conforme a Decreto 4741/2005; (ii) Hg total; (iii) evaluación de lixiviación de metales a pH neutro (ML) si aplica.

Nota técnica — Factor de seguridad para diseño en contexto colombiano

El criterio MEND NPR > 2 separa materiales Non-PAG de materiales inciertos bajo supuestos ideales (AP y NP correctamente medidos, reactividad uniforme). Algunos autores (Price, 1997; Soregaroli & Lawrence, 1998) y jurisdicciones específicas recomiendan un factor de seguridad adicional (NPR > 3 o incluso > 4) cuando concurren: (i) climas muy húmedos con alta lixiviación preferencial de NP; (ii) fracciones finas con AP preferencialmente expuesto; (iii) presencia de siderita o silicatos en el NP medido; (iv) cercanía a receptores sensibles (humedales Ramsar, rondas hídricas, captaciones). Para proyectos en el ámbito de licenciamiento ANLA en zonas sensibles esta guía recomienda adoptar NPR > 3 como factor de seguridad de diseño.

Complementos obligatorios para valorización formal

Para cualquier material destinado a valorización (agregado, relleno, restauración), además del ABA y la mineralogía se requiere:

- **TCLP (EPA Method 1311)** para metales regulados, comparado con los límites del Decreto 0631 de 2005 (As ≤ 5,0 mg/L; Pb ≤ 5,0 mg/L; Cd ≤ 1,0 mg/L; Hg ≤ 0,2 mg/L).
- **Hg total en sólido (EPA 7473)** y, si aplica, Hg disuelto en lixiviado (EPA 1631/7474). El TCLP por sí solo no es suficiente para evaluar riesgo por mercurio metálico en relaves de amalgamación.
- **Evaluación de lixiviación de metales a pH neutro (ML)** cuando haya sulfuros distintos de piritita (galena, esfalerita, arsenopiritita). El drenaje neutro con altos metales es un riesgo real, aunque el material sea Non-PAG (MEND 2009).



Protocolo de manejo según clasificación

Tabla 4.21. Acciones según clasificación ABA en minería aluvial

Clasificación	Acciones permitidas	Controles obligatorios	Prohibiciones / limitaciones
● Non-PAG (NPR > 2, o > 3 con factor de seguridad en zonas sensibles; TCLP y Hg conformes)	Valorización de arenas negras (ilmenita, circón, rutilo, monacita-REE), relleno de piscinas, subbase vial, material de cobertura en restauración. Uso condicionado al cumplimiento simultáneo de ABA, TCLP y Hg.	Control de erosión y SST en escorrentía (Resolución 631/2015); monitoreo semestral de pH, conductividad, sulfatos y metales prioritarios (As, Pb, Cd, Hg); registro de volúmenes y destinos; reevaluación anual.	Uso en contacto directo con cuerpos de agua sin pantalla hidráulica; uso en zonas de ronda hídrica sin estudio específico.
● Incierto (NPR 1-2)	Uso controlado solo tras ensayos cinéticos (ASTM D5744, ≥ 20 semanas). Si se opta por mezcla con material alcalino: proporción calculada por balance estequiométrico contra NNP con factor de seguridad FS ≥ 1,5 (caliza molida) o FS ≥ 1,2 (cal hidratada); proporción efectiva validada con NAG o celdas cinéticas antes de aplicación a escala.	Celdas cinéticas activas; monitoreo trimestral de lixiviados; pH objetivo > 6; cobertura vegetal; caracterización mineralógica; seguimiento por profesional idóneo.	Uso en taludes expuestos sin cobertura; disposición cerca de ciénagas, humedales o paleocauces activos; aplicación a escala sin validación cinética previa.
● AG (NPR < 1)	Disposición controlada, seleccionando la opción viable según condiciones hidrogeológicas y ambientales del sitio: (i) cobertura seca multicapa: arcilla compactada ≥ 0,5 m sobre geomembrana, capa de suelo vegetal. Recomendada cuando no se puede garantizar saturación permanente. (ii) disposición subacuática: solo si se garantiza saturación permanente y O₂ disuelto < 1 mg/L en el agua de cubrimiento. No recomendada en zonas de humedal Ramsar, ronda hídrica ni donde haya fluctuaciones estacionales marcadas del nivel freático. (iii) co-disposición con material alcalino, proporción validada con ensayos cinéticos. Diseño por ingeniero geotécnico/ambiental aplicando criterios MEND 2.21.3 y 2.21.4.	Sistema de captación y tratamiento de lixiviados (activo o pasivo según caudal); monitoreo mensual de pH, acidez, sulfatos, Fe, Mn y metales prioritarios; plan de cierre y monitoreo post-cierre documentado. En presencia de arsenopirita evaluar cuidadosamente la opción subacuática: el As puede movilizarse más en condiciones reductoras que óxicas.	Uso como relleno en vías, plataformas o zonas expuestas; venta como agregado; retorno directo a cauces; disposición sin cobertura o sin garantías de saturación.

Fuente: Elaboración propia con base en MEND (2009, 2001), INAP-GARD (2014), Resolución 631/2015, Decreto 4741/2005, Decreto 1076/2015.

Factores de sitio que aumentan el riesgo en aluvión

En zonas auríferas aluviales colombianas, los siguientes factores amplifican la velocidad de generación de acidez y/o la movilización de contaminantes. Deben documentarse explícitamente en el EIA/PMA como parte del análisis de riesgo:

- Material fino (lodos, limos y relaves finos): mayor área superficial expuesta, mayor velocidad de oxidación.
- Exposición al aire en pilas no cubiertas: activación de procesos de oxidación de sulfuros residuales.
- Lluvia constante y alta precipitación: zonas como Chocó, Bajo Cauca y Sur de Bolívar (> 3.000 mm/año) aceleran la lixiviación y favorecen la pérdida preferencial de NP.
- Ausencia de cobertura vegetal o mantas: exposición directa del material a agentes atmosféricos.
- Acumulación en pilas sin compactación: pilas mayores a 3 m favorecen infiltración preferencial y canales de oxidación interna.
- Cercanía a cuerpos de agua sensibles: ciénagas, humedales Ramsar (Ayapel), paleocauces y nacimientos — riesgo de contaminación directa y de incumplimiento del principio precautorio.
- Mercurio residual de amalgamación: aunque no causa DAM, coexiste con el riesgo y debe evaluarse y tratarse antes de cualquier valorización.
- Cercanía a la roca fuente primaria: paleoplaceres profundos en Bajo Cauca y Sur de Bolívar concentran más sulfuros que placeres distales.
- Presencia de arsenopirita: el As de arsenopirita se moviliza más en condiciones reductoras que óxicas, al contrario del Fe y Pb. Esto condiciona la elección entre cobertura seca y disposición subacuática.

Costo-beneficio: prevenir vs. remediar

Muchos casos documentados muestran que el costo de la caracterización geoquímica temprana (Nivel 2 completo) representa una fracción marginal del costo de remediación posterior de un pasivo ambiental por DAM o por contaminación con Hg. En operaciones aluviales pequeñas este costo de remediación puede superar los cientos de millones de pesos por hectárea afectada,

Principio de Economía Circular aplicado a aluvión

Caracterizar desde la exploración permite: (1) separar y valorizar arenas negras con minerales de alto valor (ilmenita, circón, rutilo, monacita-REE); (2) identificar materiales Non-PAG aptos para restauración de piscinas y taludes; (3) aislar tempranamente los sulfuros residuales o el Hg para manejo controlado; y (4) evitar que hoy se construya el pasivo ambiental de mañana en zonas de humedal. La caracterización geoquímica no es un costo, es la puerta de entrada a la economía circular.

como evidencian los estudios en el Complejo de Humedales de Ayapel (MinEnergía, 2022; Universidad de Córdoba, 2023). La relación costo-beneficio favorece de forma consistente la caracterización preventiva.

Mensaje clave: en la pequeña minería aluvial no se trata de demostrar que el material es inocuo para poder usarlo, sino de caracterizarlo para decidir cómo usarlo con seguridad. La decisión de manejo debe ser proporcional al riesgo documentado, trazable en el EIA/PMA y revisable por la autoridad ambiental.



Fase 2 – Identificación temprana del subproducto

- 1- Durante el muestreo aurífero se separan: Concentrado aurífero, arenas y gravas.
- 2- Cada fracción se almacena por separado y se etiqueta.



Fase 3 – Clasificación y preparación del material

- 1- Clasificación granulométrica preliminar: Separación por tamices y definir porcentaje de arena fina, media, gruesa y grava.
- 2- Homogeneización: Mezcla representativa para ensayo, con esto se evitan sesgos en laboratorio.

Fracción	Potencial de uso
Concentrados pesados	Industria pigmentos, abrasivos, fundición
Gravas clasificadas	Agregados para construcción
Arenas limpias	Material de relleno o prefabricados
Fracción fina	Rehabilitación o mezcla controlada



Fase 4 – Caracterización técnica (NTC)

Los siguientes ensayos (ver tabla 3.16) permiten convertir gravas y arenas en subproductos útiles, reducir volumen de estéril, diseñar restauración técnica estable y sustentar aprovechamiento ante autoridad ambiental.

Tabla 4.22. Cuadro técnico - caracterización NTC de agregados

Ensayo (NTC / referencia equivalente)	¿Qué evalúa?	Parámetros que determina	¿Qué indica técnicamente?	Aplicación en minería aluvial / valorización
Granulometría (NTC equivalente ASTM C136)	Distribución de tamaños.	% retenido/pasante por mallas.	- Intertrabado. - estabilidad. - drenaje.	Selección de gravas/arenas para vías, subbases y concretos; clasificación de relaves limpios.
Material fino (#200) (NTC equivalente ASTM C117)	Contenido de partículas finas.	% finos (<0.075 mm).	- Permeabilidad. - cohesión. - riesgo de plasticidad.	Control de relaves: altos finos → no aptos sin tratamiento
Límites de Atterberg (NTC equivalente ASTM D4318)	Plasticidad del material fino.	LL, LP, IP.	- Sensibilidad al agua. - deformabilidad.	Identificar arcillas en arenas/relaves → decidir estabilización o descarte
Densidad y absorción (NTC equivalente ASTM C127/C128)	Propiedades físicas del agregado.	- Peso específico. % absorción.	- Porosidad. - Calidad del agregado.	Evaluar agregados reciclados (RCD) o aluviales para concreto.
Abrasión Los Ángeles (NTC equivalente ASTM C131/C535)	Resistencia al desgaste.	% pérdida por abrasión.	Durabilidad mecánica.	Selección de gravas para bases, subbases y disipadores hidráulicos.
Materia orgánica (NTC equivalente ASTM C40)	Contaminación orgánica.	- Coloración. - índice comparativo.	Interferencia con cemento.	Rechazo de materiales con restos orgánicos (RCD o aluvial).
Equivalente de arena (NTC equivalente ASTM D2419)	Limpieza del material.	Valor SE (%).	Proporción arena vs arcilla.	Control de finos en arenas recicladas o aluviales.
CBR (NTC equivalente ASTM D1883)	Capacidad de soporte.	% CBR.	Resistencia estructural.	Decidir uso en subrasantes, plataformas y vías mineras.
Proctor (NTC equivalente ASTM D698/D1557)	Compactabilidad.	- Densidad máxima. - humedad óptima.	Comportamiento en obra.	Control de compactación de materiales reciclados o naturales.
pH (NTC laboratorio)	Condición química básica.	Valor de pH.	Acidez o alcalinidad.	Identificar riesgo geoquímico (DAM en relaves).
Metales totales (NTC laboratorio)	Contaminantes.	Hg, Pb, As, Cd, etc.	Riesgo toxicológico.	Determinar si el material puede reutilizarse o debe confinarse.
Lixiviabilidad (TCLP u otros)	Movilidad de contaminantes.	Concentración lixiviada.	Riesgo de liberación al agua.	Evaluar relaves antes de uso en economía circular.
PGA/PNA (ABA)	Generación de acidez.	Relación NP/AP.	Riesgo de DAM.	Crítico en relaves con sulfuros antes de reutilización.



Fase 5 – Evaluación normativa y ambiental

- 1- Análisis químico: Búsqueda de metales potencialmente tóxicos (As, Hg, Pb, Cd) mediante ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente), el cual es un ensayo de laboratorio especializado como herramienta de control ambiental y caracterización química que permite detectar y cuantificar metales en concentraciones muy bajas (trazas), garantizando que los materiales extraídos no representen riesgo.
- 2- Verificar cumplimiento con normativa minera nacional, normativa ambiental (manejo de residuos mineros), normas técnicas de calidad de agregados (si se destinan a construcción), permisos de aprovechamiento o comercialización.
- 3- Comparación normativa: Se comparan resultados con límites ambientales y guías internacionales de calidad
- 4- Debe verificarse: ausencia de contaminación, no afectación a cauce activo y compatibilidad con plan de manejo ambiental.



Fase 6 – Definición de destino

- 1- Si cumple con las normas técnicas y ambientales, puede ser utilizado como agregado, material de relleno o insumo industrial.
- 2- Si no cumple, se retorna de forma controlada como relleno de calicatas y se le da manejo como material inerte.



Fase 7 – Registro y trazabilidad

- 1- Reporte ambiental: Se integra al PMA o informe de exploración. Además, se dejan evidencias de la reducción de estériles.

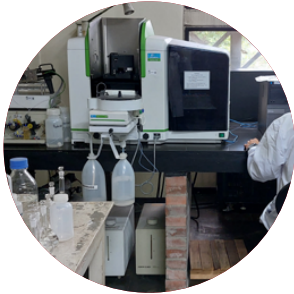


Figura 3.30. Reciclaje del material estéril
Fuente: Tomado de: Jordan (2021). How to make recycled concrete aggregate: Process and uses. <https://www.ftmmachinery.com/blog/how-to-make-recycled-concrete-aggregate-and-what-is-it-used-for.html>

c) Herramientas y especificaciones

Tabla 4.23. Herramientas con sus parámetros técnicos

Herramientas	Parámetros técnicos
Ensayos granulométricos	Tamices utilizados: ASTM • 3/8" (9.5 mm) • N°4 (4.75 mm) • N°10 (2 mm) • N°40 (0.425 mm) • N°200 (0.075 mm) Balanza de precisión: ±0.1g Horno 110 ± 5°C Prensa Proctor
Caracterización	ICP-MS: Identificación de metales traza • Límite de detección: ppb • Metales: As, Hg, Pb, Cd Límites de Atteberg: No plásticos Proctor estándar: Energía Proctor Energía estándar: 600 kN*m/m ³ • Densidad seca máxima: 1.88 - 2.05 g/cm³ • Humedad óptima: 9- 12%
Ensayos de reemplazo en bloques de concreto	• Porcentaje de reemplazo por material minero: 10%, 20%, 30%, 40% y 50% • Mejor desempeño: 30-50% de reemplazo del agregado natural
Subproductos pesados	Molinos y separación magnética: Imán de 0.3-0.5 Tesla (se recupera magnetita e ilmenita en proporción 1-5%)



Elaboración propia basada en: Evaluation of gold mining sands and gravels as construction aggregates, Méndez, J. A., Ramírez, F. J., & López, A. M. (2022); An integrated framework for evaluating leaching in waste materials, Kosson, D. S. et al. (2002); y las Normas Técnicas Colombianas NTC 1522 (Ensayo Proctor estándar) y NTC 77 (Análisis granulométrico por tamizado) del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC, 2011, 2013.

4.5 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE CIERRE DE MINA DE MATERIALES DE CONTRUCCIÓN ALUVIAL

4.5.1 Lineamiento 8. Restauración inmediata con manejo circular del agua

La restauración inmediata y el manejo circular del agua en minería aluvial consisten en la recuperación progresiva de áreas intervenidas mediante reconformación y revegetación simultánea a la explotación para evitar inestabilidad, erosión o arrastre de sedimentos del río, junto con la implementación de sistemas de recirculación hídrica que permiten reutilizar el agua del proceso previo tratamiento por sedimentación, reduciendo captaciones externas, evitando vertimientos directos al cauce activo y manejo responsable de lodos finos.

4.5.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Cero excavaciones abiertas y cero descargas directas

El principio de “Cero excavaciones abiertas y cero descargas directas”.

Como oportunidad de circularidad en esta actividad corresponde a una estrategia de intervención modular con restauración inmediata y manejo hídrico en circuito cerrado, evitando frentes abandonados y vertimientos a cuerpos de agua naturales. Se propone el relleno y compactación de cada hoyo o zanja al finalizar el muestreo, junto con el uso de piscinas o tanques para retener finos y reutilizar el agua. En Perú, el programa planetGOLD (2020) mostró que implementar circuitos cerrados de agua con piscinas de sedimentación portátiles permite reutilizar el 80-90% del agua usada en concentración aurífera, eliminando descargas al cauce y permitiendo tapar las calicatas. Por medio de la implementación de piscinas móviles de sedimentación con capacidad adecuada al caudal del equipo de concentración.

El agua decantada se bombea de regreso al proceso, reduciendo la extracción de agua fresca, mientras que los lodos sedimentados se drenan y retornan a las calicatas restauradas, siendo compactadas por capas y evitando la erosión. De esta forma se rellena con material original y reconformando el terreno para evitar las zanjas o canales profundos y estrechos.

Normatividad a tener en cuenta:
Decreto 1076 de 2015: Prohíbe vertimientos directos sin tratamiento y exige control de sedimentos y turbidez.
Resolución 0631 de 2015: Establece límites máximos de sólidos suspendidos totales (SST) en vertimientos.

a) Metodología



Fase 1 – Excavación y muestreo controlado

- 1- Delimitación del área del hoyo o zanja: Se marca el perímetro exacto de excavación (normalmente $\leq 1.5 \times 1.5\text{m}$).
- 2- Excavación progresiva: Excavación manual o semimecanizada, retirando por capas naturales (estratos).
- 3- Separación inmediata del material: Material con potencial se toma como muestreo y el no mineralizado se lleva a un acopio temporal.





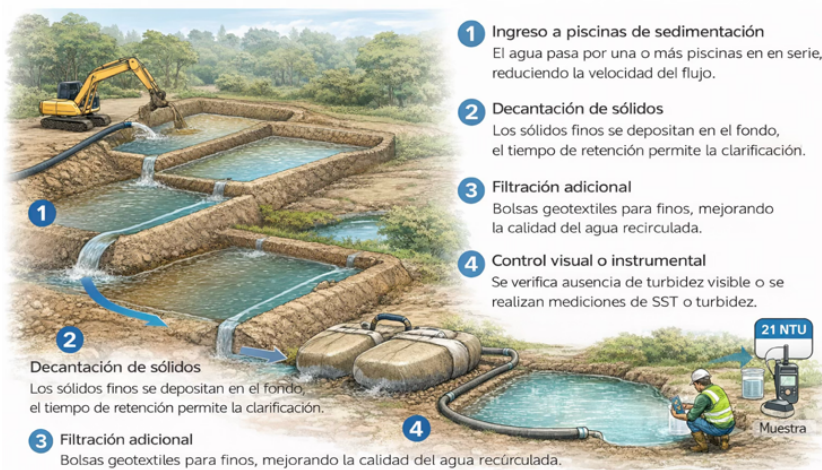
Fase 2 – Concentración gravimétrica en circuito cerrado

- 1- Ingreso del material al sistema gravimétrico: zarandas y lavadoras.
- 2- Captación total del agua usada: El agua de lavado no se descarga, sino que se dirige por gravedad o bombeo a sedimentación.
- 3- Circuito cerrado: Funcionando como un ciclo Concentración -> Sedimentación -> Recirculación. Sólo reponiendo agua por evaporación y/o pérdidas menores por manipulación.

Figura 4.32. Concentración gravimétrica en circuito cerrado



Figura 4.33. Sedimentación y clarificación del agua



Fase 3 – Sedimentación y clarificación del agua



Fase 4 – Manejo y retorno de lodos

Figura 4.34. Manejo y retorno de lodos





Fase 5 – Relleno, compactación y restauración

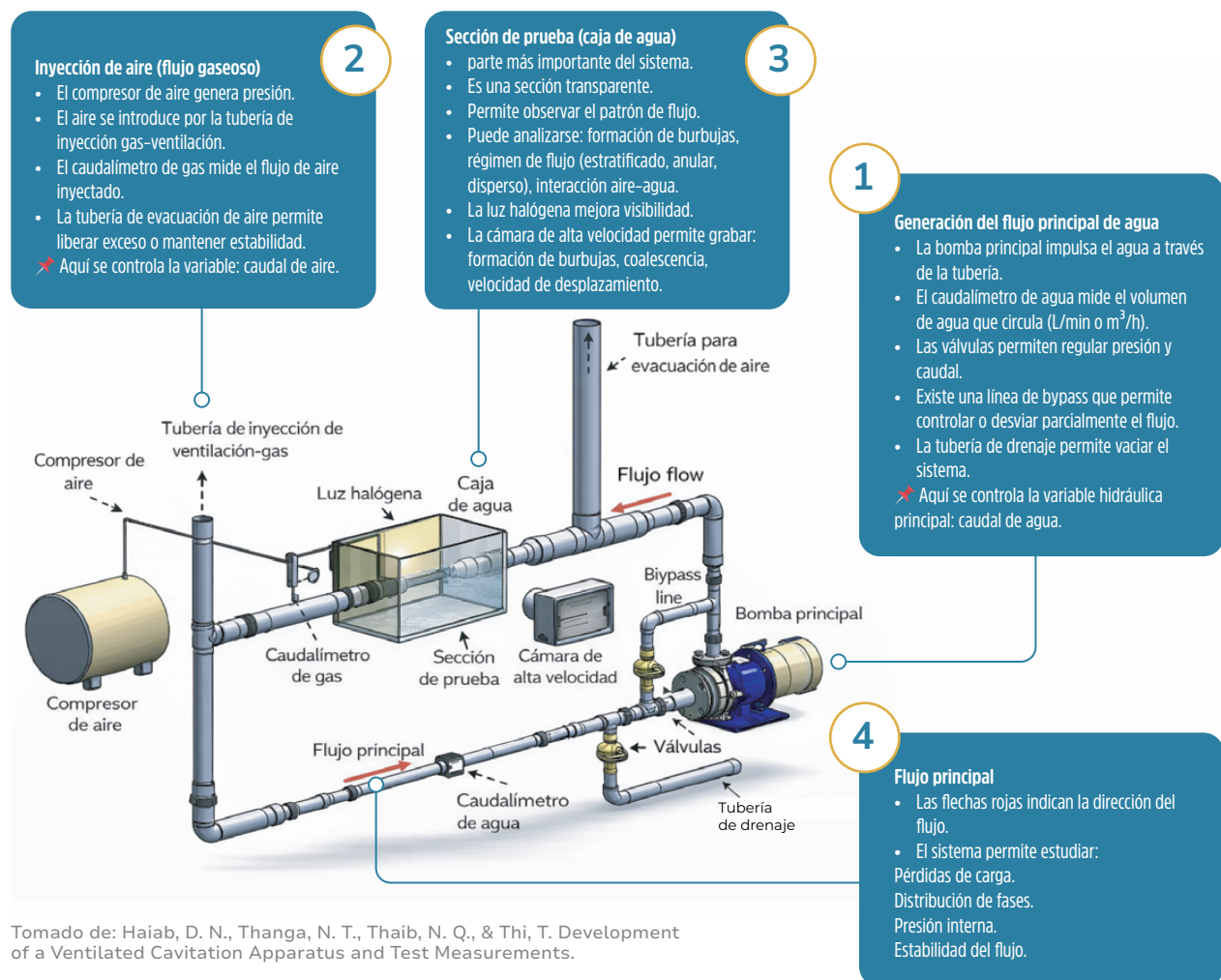
- 1- Relleno por capas: Se utiliza el material original y los lodos deshidratados, tratando de respetar el orden estratigráfico.
- 2- Compactación de cada capa: Se compacta manualmente o con equipo ligero, buscando una compactación $\geq 90\%$ de compactación Proctor.
- 3- Reconformación topográfica o del terreno: Se restituye la forma original del terreno, evitando la formación de depresiones o zonas de erosión. Se restablece la configuración morfológica del terreno intervenido, garantizando estabilidad física, drenaje adecuado y control de procesos erosivos.
- 4- Estabilización superficial: Compactación final, pudiendo agregar cobertura vegetal o material fino

Esta oportunidad de economía circular se puede basar en un sistema experimental de flujo en circuito cerrado que permite simular, controlar y optimizar condiciones hidráulicas (flujo, aireación, presión) aplicables al manejo, tratamiento y recirculación del agua en entornos mineros, como el de la figura 4.35.

Lo anterior teniendo en cuenta que el agua utilizada en actividades mineras es recirculada, tratada y reincorporada al sistema sin necesidad de descargas externas. La aireación inducida y el control del flujo favorecen procesos de oxidación y sedimentación, contribuyendo a la mejora de la calidad del agua desde etapas tempranas, lo cual es coherente con estrategias de restauración inmediata del sistema hídrico intervenido.

La aplicación conceptual de este tipo de sistema permite diseñar operaciones sin excavaciones abiertas permanentes, donde el agua es gestionada mediante circuitos cerrados que integran captación, uso, tratamiento y recirculación. Esto elimina la necesidad de vertimientos directos a cuerpos de agua, reduciendo impactos sobre la ronda hídrica y favoreciendo un modelo de economía circular basado en la eficiencia del recurso hídrico.

Figura 4.35. Sistema experimental de flujo de agua en circuito cerrado



Tomado de: Haiab, D. N., Thanga, N. T., Thaib, N. Q., & Thi, T. Development of a Ventilated Cavitation Apparatus and Test Measurements.

Lo observado en la figura 4.32 explica que los principios del equipo se aplican a:

- Canales de recirculación
- Piscinas de sedimentación
- Sistemas de aireación
- Control de sedimentos
- Tratamiento pasivo/activo de agua

Lo anterior permite analizar, modelar y optimizar el comportamiento hidráulico del transporte de pulpas y procesos de separación gravimétrica, mejorando la eficiencia de recuperación y reduciendo impactos ambientales. Es decir,

- No perder oro fino.
- No dañar bombas.
- Reducir consumo de energía.
- Evitar taponamientos.
- Mejorar recuperación.

b) Herramientas y especificaciones

Tabla 4.24. Herramientas con sus parámetros técnicos

Herramientas	Parámetros técnicos
Circuito cerrado de agua	Piscinas portátiles: • Volumen: 500 – 1000 L cada una • 2 piscinas en serie • Tiempo de retención: 15-30 min Eficiencia de recirculación: 80-90% • Bombas 2- 4"
Manejo de lodos	• Peso de lodos por calicata: 20-40 kg Secado: 24 – 48 horas • Reincorporación al terreno: Mezclado con grava del relleno
Cierre de calicatas	• Capas compactadas: 20-30 cm Material utilizado: • Grava gruesa abajo • Arena fina arriba • 5 cm de suelo orgánico • Tiempo estimado de cierre: 20 – 40 min



Elaboración propia basada en: Water management and sediment control in artisanal and small-scale gold mining, PlanetGOLD Programme – United Nations Environment Programme (2020); y Sediment pond removal and enhanced design practices, Environmental Protection Agency – U.S. EPA (2015).

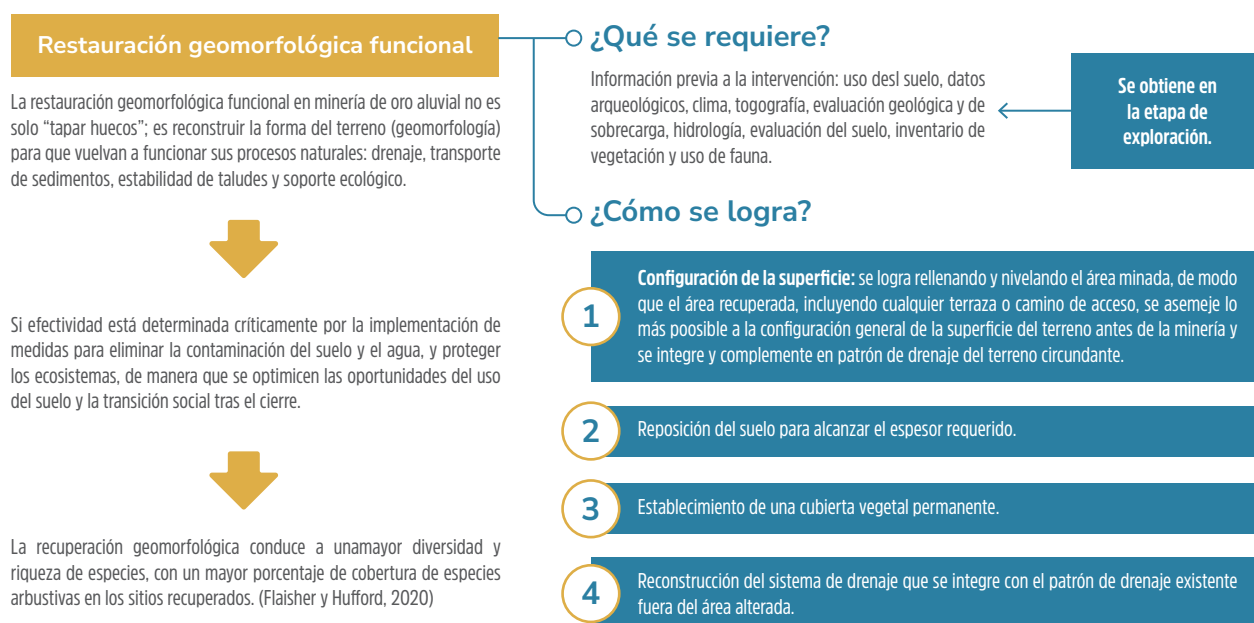
4.5.1.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Reconversión paisajística y uso del suelo

La revegetación

- La revegetación permanente debe ser diversa, eficaz y estar compuesta por especies nativas de la zona.
- El área revegetada debe ser compatible con el uso aprobado del suelo tras la minería.
- En los casos en que el terreno se recupera utilizando comunidades de plantas nativas, la vegetación se establece mediante la plantación de mezclas de semillas diseñadas, con una densidad y profundidad de siembra específicas, y durante períodos específicos (Sheley et al., 2008; Strom et al., 2010).
- El uso de especies nativas promueve la estabilidad ecológica y la integridad de la comunidad vegetal, y reduce el riesgo de siembra de especies agresivas o invasoras (Mangold et al., 2008).



Figura 4.36. Restauración geomorfológica funcional



Reutilización de áreas intervenidas para proyectos productos sostenibles

Esta guía al ser desarrollada como se presenta en sus lineamientos y oportunidades como principios de la economía circular ofrecen oportunidades para regenerar el terreno alterado y crear zonas agrícolas, forestales o pesqueras productivas que apoyen las economías locales.

La producción de biomasa mediante cultivos energéticos de rotación corta también puede ser un componente muy importante en un modelo de economía circular aplicable en terrenos mineros recuperados, tanto en términos de producción de materiales como de energía.

A menudo se requiere un tratamiento físico, químico o biológico para eliminar contaminantes del suelo y las aguas subterráneas, con el fin de preparar el terreno minero para el desarrollo de nuevos usos con el mínimo riesgo para las funciones ecológicas y la salud humana.

Una alternativa para la reutilización de terrenos mineros es la construcción de parques fotovoltaicos.

Regeneración de suelos degradados

El estudio **“Alternativas basadas en la naturaleza para la recuperación de ecosistemas degradados por minería aurífera bajo un enfoque de economía circular”**, editado por José Luis Marrugo Negrete, Roberth de Jesús Paternina Uribe, y Amado Navarro Frómata, ofrece una visión integral y práctica para abordar los complejos desafíos ambientales resultantes de la minería de oro en Colombia. Esta obra se centra en proponer soluciones sostenibles que integran principios de la economía circular. A través de enfoques innovadores como la fitorremediación (Capítulo II), el uso de humedales artificiales (Capítulo V), y la valorización de biomasa contaminada (Capítulo IV), además de la inmovilización de contaminantes mediante enmiendas (Capítulo III: **“Evaluación de Materiales Orgánicos e Inorgánicos para la Inmovilización de Pb, Cd, As Y Hg en Suelos Contaminados”**), el texto aborda la problemática de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) y la contaminación por mercurio (Hg) en departamentos como Córdoba, Sucre y Chocó, con el fin de mitigar los impactos en los ecosistemas y las comunidades.

A continuación, se resaltan los siguientes diagramas relevantes del estudio mencionado, que es de gran importancia traerlo a colación en esta guía:

Figura 4.37. Diagrama de actividades para inmovilización de metales pesados en suelos mineros

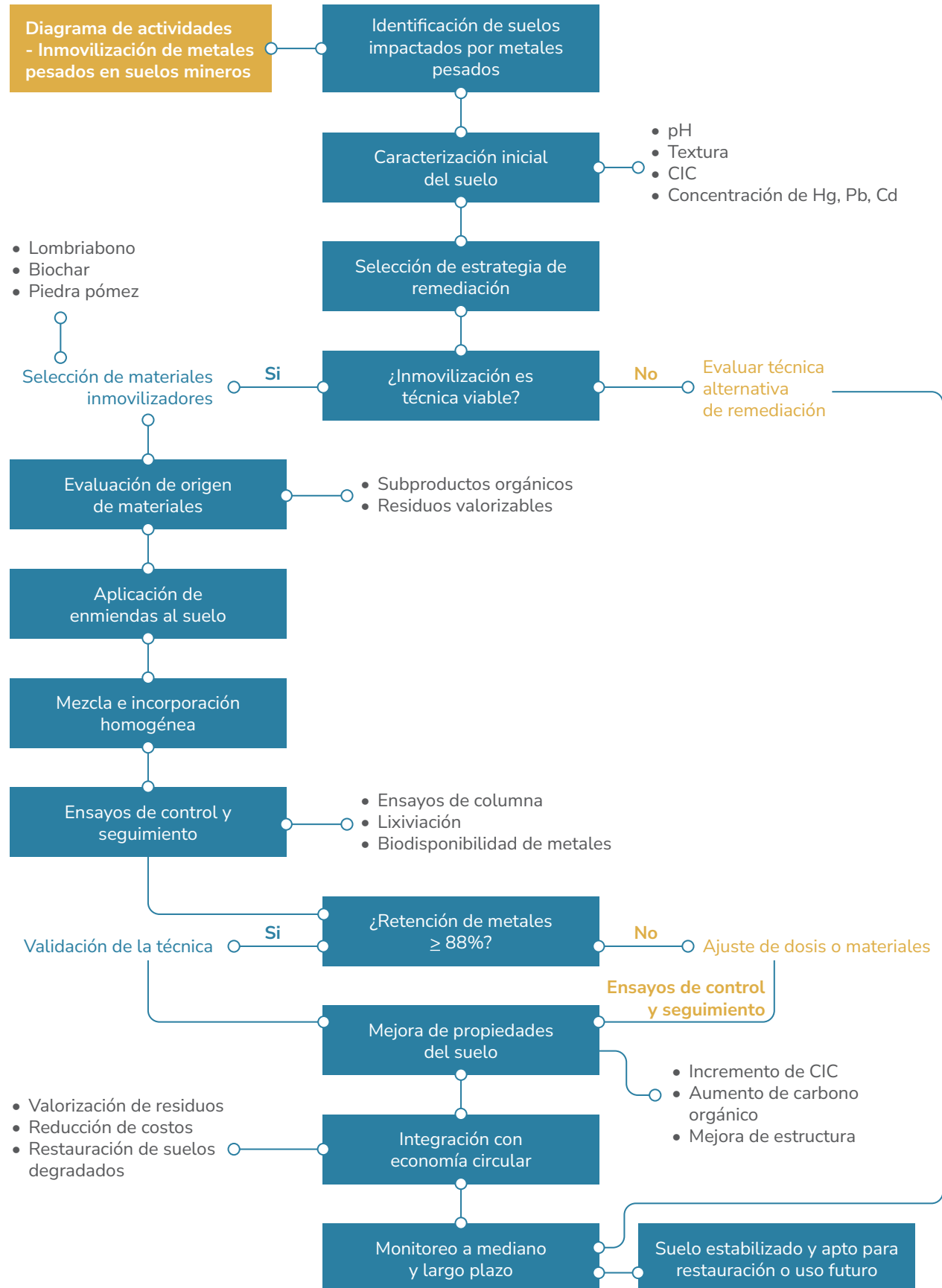
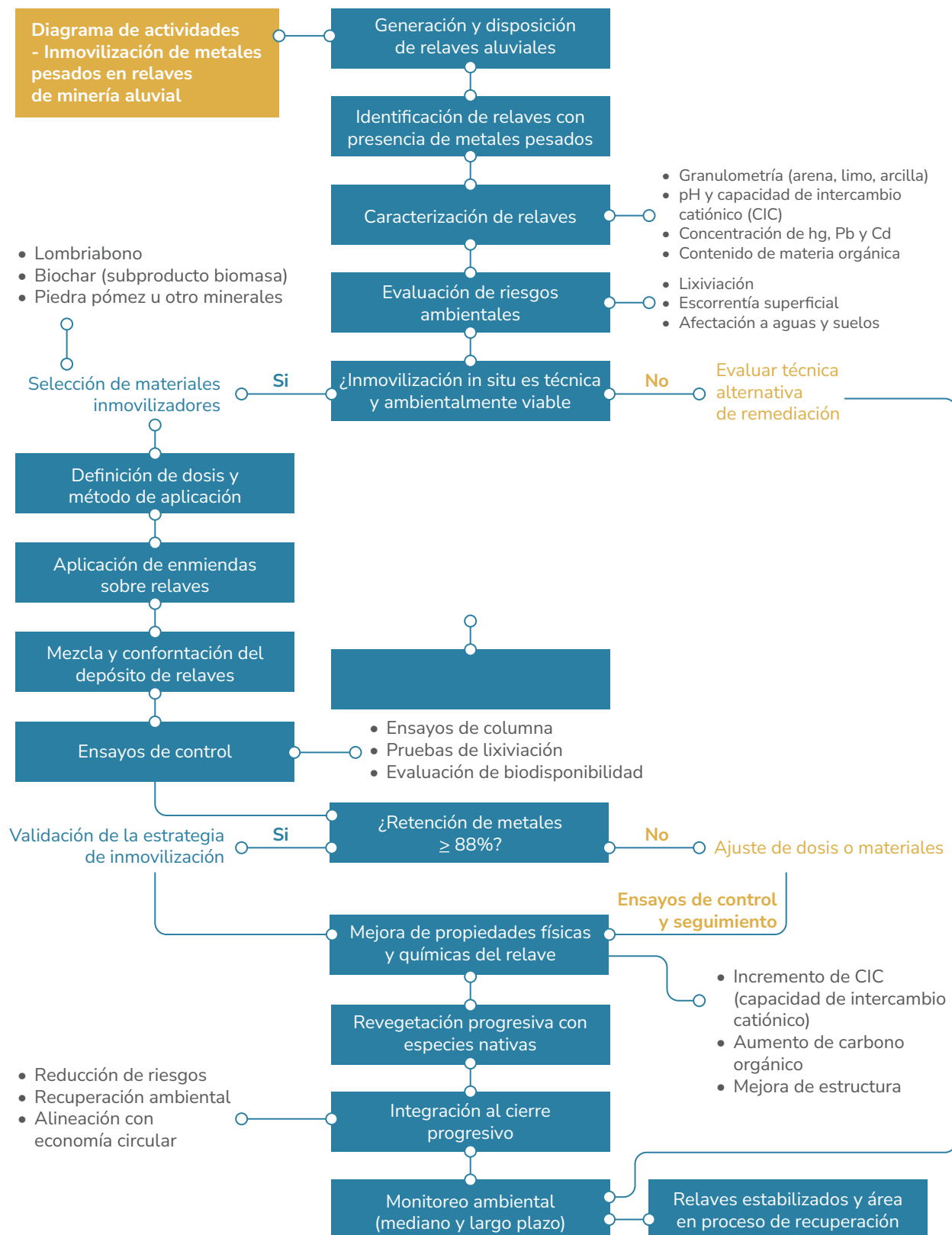


Figura 4.38. Diagrama de actividades para inmovilización de metales pesados en relaves de minería aluvial



4.6 APLICACIÓN LÍNEA ESTRATÉGICA TRANSVERSAL PARA TODAS LAS ETAPAS MINERAS

4.6.1 Lineamiento 9. Establecer indicadores de monitoreo y verificación

Este sistema de indicadores permite un control integral de la operación minera aluvial, asegurando eficiencia productiva, sostenibilidad ambiental y cumplimiento normativo bajo un enfoque de economía circular.

Formato de resumen diario de indicadores

Fecha	Recuperación (%)	Agua recirculada (%)	Consumo combustible (L/m³)	Pérdidas en colas (%)	Cumplimiento ambiental
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Componente hídrico

Tabla 4.25. Componente hídrico

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Consumo de agua	Volumen agua / m³ material	m³/m³	Diario	↓ progresivo
Recirculación de agua	(Agua recirculada / total usada) × 100	%	Diario	≥ 70%
Turbidez aguas abajo	Medición directa	NTU	Semanal	< 50 NTU
Eficiencia sedimentación	(Entrada - salida) / entrada	%	Semanal	≥ 70%
Cumplimiento vertimientos	Cumple / No cumple	Cualitativo	Mensual	100%

Formato control de agua y recirculación

Fecha	Caudal estimado (m³/h)	Agua recirculada (%)	Estado de piscinas	Turbidez visual (Alta/Media/Baja)	Ajustes realizados
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Componente suelo y restauración

Tabla 4.26. Componente suelo y restauración

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Componente suelo y restauración	(Área restaurada / intervenida) × 100	%	Mensual	≥ 80%
Estabilidad del terreno	Nº fallas (deslizamientos)	Nº	Mensual	0
Cobertura vegetal	Área cubierta / área restaurada	%	Trimestral	≥ 70%
Erosión	Observación o medición	Cualitativo	Mensual	Baja
Reutilización de estériles	Volumen reutilizado / total	%	Mensual	≥ 75%

Componente productivo (eficiencia minera)

Tabla 4.27. Componente productivo (eficiencia minera)

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Recuperación de oro	Oro recuperado / oro estimado	%	Diario	≥ 80-95%
Pérdidas en colas	Oro en colas / total	%	Semanal	↓ mínimo
Producción	g de oro / m³	g/m³	Diario	Optimizar
Tiempo efectivo	Horas operativas / totales	%	Diario	≥ 85%

Formato control de clasificación granulométrica

Fecha	Tipo de material	% gruesos (>2")	% medios	% finos	Problemas detectados	Acción correctiva
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Formato limpieza de trampas de sedimentos

Fecha	Hora	Volumen retirado	Estado del sistema	Disposición del lodo	Responsable
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Frecuencia recomendada: cada 2 – 3 horas

Componente tecnológico

Tabla 4.28. Componente tecnológico

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Componente tecnológico	Producción / capacidad	%	Mensual	≥ 80%
Disponibilidad mecánica	Tiempo operativo / total	%	Mensual	≥ 90%
Fallas de equipos	Nº fallas	Nº	Mensual	↓ mínimo
Uso de tecnologías limpias	Equipos sin mercurio / total	%	Mensual	100%

Formato control de equipos y mantenimiento

Fecha	Equipo	Estado (Bueno/Regular/Malo)	Mantenimiento realizado	Tiempo fuera de servicio	Responsable
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Componente economía circular

Tabla 4.29. Componente economía circular

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Reuso de agua	Agua reutilizada / total	%	Diario	≥ 70%
Reaprovechamiento de residuos	Material reutilizado / total	%	Mensual	≥ 70%
Reducción de residuos	Comparativo mensual	%	Mensual	↓ progresivo
Uso de fuentes alternativas (lluvia/niebla)	Volumen alternativo / total	%	Mensual	≥ 5-20%

Componente ambiental

Tabla 4.30. Componente ambiental

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Calidad del agua	Análisis físico-químico	Cumple/No	Trimestral	Cumple
Ruido	Medición dB	dB	Semestral	< límites
Material particulado	Observación / medición	Cualitativo	Mensual	Bajo
Afectación a flora/fauna	Inspección	Cualitativo	Trimestral	Nula

Formato de registro de manejo ambiental

Fecha	Actividad	Área intervenida (m²)	Área restaurada (m²)	Acción realizada	Responsable
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Consumo de recursos

Tabla 4.31. Consumo de recursos

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Consumo de combustible	Litros / m ³	L/m ³	Diario	↓ progresivo
Consumo energético	Energía / producción	kWh/m ³	Mensual	Optimizar

Formato control de consumo de combustible

Fecha	Equipo	Combustible consumido (L)	Horas de operación	Consumo (L/h)	Observaciones
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Componente social y seguridad

Tabla 4.32. Componente social y seguridad

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Accidentes laborales	Nº eventos	Nº	Mensual	0
Uso de EPP	Trabajadores con EPP / total	%	Diario	100%
Capacitación	Nº capacitaciones	Nº	Trimestral	≥ 1

Mecanismos de verificación

Bitácoras de campo diaria de operación

Fecha	Frente de trabajo	Hora inicio	Hora fin	Volumen procesado (m ³)	Producción de oro (g)	Equipo en operación	Observaciones
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----



Registro fotográfico



Georreferenciación (GPS)



Análisis de laboratorio



Reportes mensuales



Inspecciones técnicas





5

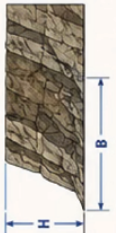
CANTERAS

Figura 5.1. Diseño técnico ambiental para pequeña minería

TALUDES, BANCOS, DRENAJE Y PLATAFORMAS EN UNA CANTERA DISEÑO TÉCNICO Y AMBIENTAL PARA PEQUEÑA MINERÍA

Cumplimiento: Agencia Nacional de Minería (ANM) y Autoridad Ambiental

2. ALTURA Y ÁNGULO DE BANCOS



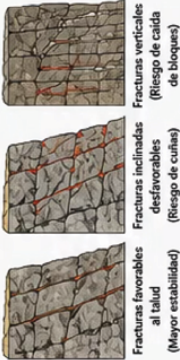
Relación recomendada según tipo de roca:

Tipo de roca	Altura de banco (H)	Ángulo de talud del banco (°)
Roca competente	5 – 15 m	70° – 90°
Roca fracturada	3 – 8 m	55° – 70°
Roca muy fracturada	2 – 5 m	45° – 55°
Materiales sueltos	2 – 4 m	34° – 45°

La altura y el ángulo dependen del estudio geotécnico y del tipo de explosivo y equipo a utilizar.

3. COMPORTAMIENTO DE FRACTURAS

Las fracturas controlan la estabilidad del talud.



CONDICIONES CLAVE

- Espaciamiento de fracturas
- Persistencia y apertura
- Relleno de fracturas (arcillas, agua)
- Meteorización y alteración
- Presencia de agua

REQUIERE MONITOREO GEOTÉCNICO PERIÓDICO

7. REQUERIMIENTOS ANM (Regulación)

- ✓ Cumplir con el Estándar Colombiano de Recursos y Reservas (ECRR).
- ✓ Diseño minero y geotécnico aprobado.
- ✓ Planes de trabajo y obras (PTO) con diseño de taludes y drenajes.
- ✓ Plan de gestión de riesgos.
- ✓ Reporte de monitoreo y cumplimiento.



AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA

UNA OPERACIÓN RESPONSABLE GARANTIZA SEGURIDAD, SOSTENIBILIDAD Y CUMPLIMIENTO LEGAL



1. TIPOS DE TALUDES EN UNA CANTERA



Talud natural
Formado por el terreno natural. Estable si el material es competente y no presenta fracturas.



Talud excavado
Generado por la explotación de bancos. Requiere diseño geotécnico y control.



Talud final o de cierre
Diseñado para el cierre y la estabilización ambiental. Pendiente más suave y revegetación.

6. CONDICIONES TÉCNICAS GENERALES

- ✓ Realizar estudio geotécnico del macizo rocoso.
- ✓ Definir diseño de bancos: altura, ángulo, bermas.
- ✓ Controlar el agua superficial y subterránea.
- ✓ Monitorear estabilidad de taludes y fracturas.
- ✓ Realizar mantenimiento de vías, cunetas y drenajes.
- ✓ Capacitar al personal y aplicar plan de emergencias.

5. PLATAFORMAS PARA LA OPERACIÓN

- ✓ Anilizar mínimo según el equipo más grande que transite.
- ✓ Superficie estable, nivelada y compactada.
- ✓ Pendiente transversal 2% – 5%, hacia el drenaje.
- ✓ Bermas de seguridad en el borde (0,5 – 1,0 m mínimo).
- ✓ Señalización y demarcación de vías internas.

4. DRENAJE ADECUADO

Drenaje de coronación

Canal perimetral para desviar aguas lluvias fuera de la zona de explotación.

Drenaje en bancos

Pendiente 2% a 5% hacia cunetas longitudinales que conducen las aguas hacia el drenaje principal.

Drenaje de fondo

Cuneta colectora que conduce el agua a un sedimentador antes de la descarga.

9. BUENAS PRÁCTICAS AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD

- ✓ Proteger cuerpos de agua.
- ✓ No intervenir más área de la aprobada.
- ✓ Controlar polvo y emisiones.
- ✓ Revegetar taludes y zonas intervenidas.
- ✓ Disponer adecuadamente los residuos.
- ✓ Señalar zonas de riesgo y accesos.



AUTORIDAD AMBIENTAL

CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD MINERA DURANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE ECONOMÍA CIRCULAR

Las estrategias de economía circular orientadas al aprovechamiento de estériles, materiales de descapote, finos de trituración, subproductos mineros y demás materiales susceptibles de valorización deberán desarrollarse garantizando la protección de los trabajadores, las instalaciones y el entorno.

Es importante precisar que el Decreto 1886 de 2015 corresponde a labores mineras subterráneas (modificado por el Decreto 944 de 2022). Para canteras y material de arrastre, que son operaciones a cielo abierto, el reglamento aplicable es el Decreto 539 de 2022 (Reglamento de Higiene y Seguridad en las Labores Mineras a Cielo Abierto, que actualiza el Decreto 2222 de 1993).

La implementación de actividades de reutilización, clasificación, almacenamiento, procesamiento o comercialización de materiales no exime al titular minero del cumplimiento de la normatividad vigente en materia de seguridad minera, seguridad y salud en el trabajo, gestión del riesgo y protección ambiental.

Durante las etapas de explotación y procesamiento se recomienda:

- Mantener condiciones seguras de estabilidad en taludes, bancos y frentes de explotación.
- Implementar sistemas de drenaje para controlar aguas superficiales y evitar procesos erosivos o inestabilidades geotécnicas.
- Garantizar condiciones seguras para el almacenamiento temporal de materiales aprovechables y subproductos mineros.
- Realizar inspecciones periódicas de las áreas destinadas al aprovechamiento o valorización de materiales.
- Controlar la generación de polvo, ruido y material particulado durante las actividades de procesamiento.
- Delimitar y señalizar adecuadamente las áreas de trabajo y almacenamiento.
- Capacitar al personal sobre los riesgos asociados a las actividades de explotación y aprovechamiento de materiales.
- Verificar que las actividades de economía circular no generen nuevas condiciones de riesgo para los trabajadores o la operación minera.

Las actividades descritas en la presente guía deberán desarrollarse en cumplimiento de la normatividad minera vigente, incluyendo las disposiciones aplicables en materia de seguridad minera, gestión del riesgo y seguridad y salud en el trabajo.

La economía circular busca maximizar el aprovechamiento de los recursos minerales y reducir la generación de residuos; sin embargo, estas prácticas deben implementarse garantizando condiciones operacionales seguras. El aprovechamiento de materiales, estériles o subproductos no debe comprometer la estabilidad de los taludes, la seguridad de los trabajadores ni las condiciones técnicas de la explotación minera.

En **LA ETAPA DE EXTRACCIÓN A CIELO ABIERTO**, la economía circular se enfoca en el diseño eficiente del minado y la clasificación en la fuente de los materiales. La economía circular no es un proceso posterior a la explotación; debe diseñarse desde la planeación del PTO, asegurando que las zonas de acopio de materiales aprovechables sigan las condiciones de seguridad que dicta el Decreto 539 de 2022. A continuación, encontraran un resumen de tres ítems importantes que se deben tener en cuenta en esta etapa, priorizando el enfoque circular y la seguridad, a su vez se articulan directamente al Decreto 539 de 2022:

Gestión de Estériles y Co-productos

a.

- **Enfoque Circular:** El material estéril (capa vegetal y sobrecapa) no debe considerarse un residuo, sino un recurso. Debe ser acopiado adecuadamente para su posterior uso en la restauración geomorfológica del paisaje o como subbase en vías internas.
- **Seguridad (Artículos 40-45, Decreto 539 de 2022):** Los botaderos de estéril y los acopios temporales deben diseñarse garantizando su estabilidad mecánica. Se deben realizar estudios de mecánica de suelos para evitar fallas de talud o deslizamientos que pongan en riesgo al personal y la maquinaria.

b.

Diseño de Taludes y Bermas

- **Enfoque Circular:** Un diseño óptimo de las terrazas de explotación permite un mejor aprovechamiento del yacimiento, reduciendo la cantidad de material movilizado innecesariamente.
- **Seguridad (Capítulo II, Decreto 539 de 2022):** La explotación debe realizarse mediante el sistema de bancos y bermas. La altura y el ángulo de los taludes deben estar técnicamente definidos en el PTO (Programa de Trabajos y Obras) para evitar desprendimientos. Queda estrictamente prohibido el "descalce" o socavamiento de la base del talud.

c.

Control de Aguas de Escorrentía y Coproductos Hídricos

- **Enfoque Circular:** Captación y direccionamiento de aguas lluvias para su reutilización en el control de emisiones fugitivas (aspersión de vías).
- **Seguridad (Artículos sobre Manejo de Aguas):** Mantener las cunetas y canales perimetrales limpios para evitar la saturación de los taludes, lo cual es la principal causa de inestabilidad en canteras durante épocas de lluvia.

Para **LA ETAPA DE PROCESAMIENTO Y BENEFICIO** se busca aumentar la eficiencia de materiales y la mitigación de riesgos. En las plantas de trituración, clasificación y lavado, la circularidad busca el residuo cero y el cierre de ciclos del agua. A continuación, encontraran un resumen de tres ítems importantes que se deben tener en cuenta en esta etapa, priorizando el enfoque circular y la seguridad, a su vez se articulan directamente al Decreto 539 de 2022:

a.

Aprovechamiento de finos y material de rechazo

- **Enfoque Circular:** Los finos resultantes del proceso de trituración (arenas finas o lodos de lavado secos) pueden ser reincorporados como materia prima para la fabricación de bloques industriales, aditivos para asfalto o estabilización de suelos.
- **Seguridad (Prevención de riesgo químico y físico):** El acopio de finos secos genera material particulado. El Decreto 539 de 2022 exige el control del polvo en la fuente (sistemas de aspersión húmeda o encerramiento de tolvas) para proteger la salud respiratoria de los trabajadores (prevención de silicosis) y garantizar la visibilidad en las áreas de operación.

b.

Recirculación de agua en plantas de lavado (Material de arrastre)

- **Enfoque Circular:** Implementación de piscinas de sedimentación en serie o sistemas de clarificación para recuperar hasta el 80% del agua del proceso de lavado, reintroduciéndola al ciclo operativo.
- **Seguridad (Estabilidad de estructuras de almacenamiento):** Las piscinas de sedimentación y lodos deben contar con diques de contención técnicamente calculados. El Decreto 539 de 2022 estipula el monitoreo constante de estas estructuras para evitar desbordamientos o rupturas que puedan inundar los frentes de trabajo o vías de evacuación.

c.

Mantenimiento preventivo y logística de maquinaria

- **Enfoque Circular:** Alargar la vida útil de las mandíbulas de trituración, bandas transportadoras y cribas mediante planes de soldadura de aporte y blindaje. Gestión de aceites usados y llantas de maquinaria pesada a través de canales autorizados de postconsumo.
- **Seguridad (Capítulo de maquinaria y equipos):** Todo mantenimiento debe realizarse con los equipos apagados, desenergizados y bloqueados (sistema de etiquetado y candado - Lockout/Tagout), tal como lo exige la norma de seguridad minera a cielo abierto para evitar atrapamientos accidentales.

Tabla 5.1. Matriz de Concurrencia: Economía Circular vs. Decreto 539 de 2022

Acción de Economía Circular	Beneficio Ambiental / Económico	Requisito de Seguridad Aplicable (Decreto 539/2022)
Reutilización de estériles en el llenado de zonas explotadas o huecos mineros.	Reducción de huella en superficie y restauración del entorno.	Control de Estabilidad: El llenado debe ser compactado para evitar asentamientos o fallas del terreno.
Recirculación de lodos y aguas de lavado.	Disminución del consumo de agua fresca y vertimientos cero.	Inspección de Diques: Monitoreo diario de las paredes de las piscinas de sedimentación para evitar colapsos.
Aprovechamiento de finos de trituración.	Nuevas líneas de negocio (coproductos).	Sistemas de Mitigación de Polvo: Uso de EPP respiratorio y humectación de acopios para cumplir con los límites de exposición ocupacional.
Estabilización de vías con subproductos de la cantera.	Menor compra de materiales externos y mejora de la logística interna.	Diseño de Vías de Acarreo: Mantener el ancho mínimo requerido (tres veces el ancho del vehículo más grande) y bermas de seguridad en los bordes.

5.1 CONCEPTOS INICIALES PARA ENTENDER LAS ETAPAS MINERAS DENTRO DE UNA CANTERA

Cuando hablamos de minería, muchas veces pensamos solamente en sacar material, pero una cantera realmente es un sistema completo donde cada tipo de roca, suelo o material tiene un comportamiento, un valor y un uso diferente.

Entender una cantera no significa sólo saber dónde está la piedra de interés comercial. Significa entender qué material sirve, cuál genera pérdidas, cuál puede reutilizarse y cuál debe manejarse correctamente para evitar impactos y costos innecesarios.

En una operación de cantera encontramos materiales útiles, pero también estériles, rechazos, finos, sobretamaños y suelos orgánicos. Si todos se mezclan, la cantera pierde eficiencia, aumenta costos y genera más impacto ambiental. Por eso, antes de hablar de explotación, trituración o economía circular, primero debemos entender qué representa cada material dentro de la cantera y cómo se comporta durante toda la operación minera.

La base de una cantera eficiente no es producir más... es clasificar mejor, aprovechar mejor y reducir las pérdidas desde el inicio. En una cantera, el problema muchas veces no es la falta de material, sino no entender qué hacer con cada material.

a.

Árido: Es un material granular natural, triturado o procesado que se usa en construcción. Puede ser:
Árido grueso: grava, piedra triturada, gravilla.
Árido fino: arena natural o triturada.
Finos: partículas pequeñas generadas en trituración, lavado o clasificación.

b.

Estéril: Material removido que no cumple las especificaciones del producto comercial o que debe retirarse para acceder al material útil. En una cantera puede ser suelo vegetal, arcillas, material alterado o roca de baja calidad.

c.

Rechazo: Material generado en planta que no cumple tamaño, forma, limpieza o resistencia requerida. No siempre es residuo; puede ser reprocesado o usado en aplicaciones de menor exigencia.

f.

Suelo orgánico: Capa superficial con materia orgánica. No debe mezclarse con áridos. Se debe retirar, almacenar y conservar para el cierre y revegetación.

e.

Finos de trituración: Material muy fino generado durante la trituración, molienda o clasificación. Puede usarse en mezclas, rellenos, estabilización, prefabricados o como adición en ciertas aplicaciones, siempre que cumpla calidad técnica y ambiental.

d.

Sobretamaño: Fragmentos de roca demasiado grandes que no pasan por la etapa de clasificación. Pueden retornar a trituración secundaria o usarse en enrocados, gaviones o control de erosión.

Ahora vamos a entender cada uno de estos conceptos y por qué son fundamentales para producir mejor, reducir costos y avanzar hacia una minería más eficiente y circular.

La siguiente figura 5.2 resume precisamente eso, cómo se ve una cantera, qué materiales aparecen durante la explotación y qué importancia tiene cada uno dentro del proceso productivo.

Figura 5.2. Conceptos clave para entender una cantera



5.1.2 Criterios básicos para la estabilidad de taludes en explotaciones de materiales de construcción

La estabilidad de los taludes es uno de los aspectos más importantes para garantizar la seguridad de los trabajadores, equipos e infraestructura minera. Antes de definir la altura de los bancos, el ángulo de explotación o la disposición de los materiales extraídos, se recomienda evaluar las condiciones geológicas y geotécnicas del terreno.

El diseño geométrico de taludes, bancos y bermas en minería a cielo abierto debe cumplir el Decreto 539 de 2022 (Reglamento de Higiene y Seguridad en las Labores Mineras a Cielo Abierto). Los valores de Factor de Seguridad indicados corresponden a condición estática y de largo plazo (drenada); en análisis pseudo-estático o sísmico se admiten factores menores (del orden de $FS \geq 1,0-1,1$), que deben verificarse según el estudio geotécnico.

Existen diferentes metodologías reconocidas internacionalmente y son las más utilizadas en ingeniería geotécnica para analizar y evaluar la estabilidad de taludes. Estas herramientas permiten estimar el margen de seguridad frente a la falla o deslizamiento de un talud bajo determinadas condiciones de carga, pendiente y presencia de agua.

5.1.2.1 Metodología de Bishop

La metodología de Bishop evalúa la estabilidad de taludes conformados por suelos o materiales sueltos, como arenas, gravas y depósitos aluviales (suelos homogéneos).

De manera sencilla, este método permite evaluar el margen de seguridad frente a un posible deslizamiento debido a la acción de la gravedad, el peso propio del material o la presencia de agua.

La metodología supone que el posible deslizamiento ocurre a través de una superficie curva o circular bajo el talud. Para realizar el análisis, el terreno se divide en varias secciones imaginarias y se evalúan las fuerzas que favorecen el deslizamiento y las fuerzas que lo resisten.

El resultado se expresa mediante un Factor de Seguridad (FS):

- $FS > 1,5$: Talud generalmente estable.
- FS entre 1,3 y 1,5: Condición aceptable bajo ciertas circunstancias.
- $FS < 1,3$: Existe riesgo de inestabilidad y se recomienda revisar el diseño.
- $FS < 1,0$: El talud puede presentar falla o deslizamiento.

¿Cuándo puede aplicarse en minería de materiales de construcción?

La metodología de Bishop es especialmente útil para:

- Explotaciones de materiales de arrastre.
- Bancos conformados por arenas y gravas.
- Taludes de corte en depósitos aluviales.
- Pilas de almacenamiento de materiales.
- Rellenos y terraplenes asociados a la operación minera.

¿Qué evalúa?

- Posibles superficies de deslizamiento circulares.
- Influencia del peso del material.
- Resistencia del suelo al corte.

¿Cuándo se recomienda?

- Explotaciones de materiales de arrastre.
- Bancos conformados principalmente por arenas, gravas y materiales finos.
- Taludes con geometrías simples.

¿Qué información se necesita?

Para realizar el análisis normalmente se requiere:

- Altura del talud.
- Ángulo de inclinación.
- Tipo de material presente.
- Peso específico del suelo.
- Cohesión del material.
- Ángulo de fricción interna.
- Nivel freático o presencia de agua.

Recomendación para el pequeño minero

Aunque el cálculo debe ser realizado por un profesional competente en geotecnia o ingeniería geológica, el pequeño minero puede utilizar este criterio como referencia para comprender que:

- Taludes más altos requieren mayor evaluación técnica.
- La presencia de agua reduce la estabilidad.
- Las grietas en la parte superior del talud pueden indicar una posible superficie de falla.
- Los materiales arcillosos o saturados suelen presentar mayor riesgo de deslizamiento.

La metodología de Bishop es una herramienta de análisis geotécnico reconocida internacionalmente para evaluar la estabilidad de taludes en materiales sueltos y que su aplicación requiere información específica del terreno y personal técnico calificado.

5.1.2.2 Metodología de Janbu

La metodología de Janbu evalúa la estabilidad de taludes en condiciones más complejas que las consideradas por otros métodos tradicionales.

A diferencia del método de Bishop, que generalmente analiza superficies de falla circulares, la metodología de Janbu permite evaluar tanto superficies de deslizamiento circulares como irregulares o no circulares, lo que la hace especialmente útil en terrenos donde existen diferentes tipos de materiales, estratos geológicos o geometrías complejas.

En términos sencillos, este método analiza si las fuerzas que mantienen estable el terreno son suficientes para resistir las fuerzas que podrían generar un deslizamiento. Para ello divide el talud en varias secciones o "rebanadas" y calcula el equilibrio de fuerzas que actúan sobre cada una de ellas.

¿Qué evalúa?

- Taludes con geometrías irregulares.
- Materiales con diferentes características geotécnicas.
- Influencia de condiciones complejas de terreno.

La metodología permite analizar:

- Posibles deslizamientos en suelos y rocas.
- Taludes con geometrías irregulares.
- Taludes conformados por varios tipos de materiales.
- Influencia del agua subterránea.
- Efecto de sobrecargas cercanas al borde del talud.

¿Cuándo se recomienda?

- Canteras con estratificación variable.
- Taludes con diferentes tipos de materiales.
- Explotaciones en laderas.

¿Cuándo puede aplicarse en minería de materiales de construcción?

Es especialmente útil cuando:

- Existen diferentes capas de material en el depósito.
- La explotación se desarrolla sobre laderas naturales.
- Se presentan cambios importantes en la inclinación de los taludes.
- Se observan zonas con materiales blandos mezclados con materiales más resistentes.
- Se requiere analizar taludes de mayor altura.

¿Qué información se necesita?

Para realizar el análisis normalmente se requiere:

- Altura e inclinación del talud.
- Características geológicas del depósito.
- Peso específico del material.
- Cohesión y ángulo de fricción interna.
- Nivel freático o presencia de agua.
- Geometría del terreno natural y del diseño minero.

Recomendación para el pequeño minero

El método de Janbu es especialmente útil cuando el terreno no es uniforme. Por ejemplo, si durante la explotación se observan capas alternadas de arena, grava, arcilla o roca meteorizada, o si la cantera se desarrolla en una ladera, es recomendable que la estabilidad sea evaluada mediante estudios geotécnicos que consideren este tipo de metodología.

Como medida preventiva, el pequeño minero debe prestar atención a señales como:

- Grietas en los bancos o taludes.
- Deformaciones del terreno.
- Presencia de agua o filtraciones.
- Desprendimientos frecuentes de material.
- Cambios en la inclinación de árboles, cercas o estructuras cercanas.
-

Interpretación general del Factor de Seguridad

Los resultados suelen expresarse mediante un Factor de Seguridad (FS):

Factor de Seguridad	Interpretación
$FS > 1,5$	Talud generalmente estable
$FS \ 1,3 - 1,5$	Condición aceptable con monitoreo
$FS < 1,3$	Posible inestabilidad; revisar el diseño
$FS < 1,0$	Falla probable del talud

La metodología de Janbu es una herramienta reconocida internacionalmente para el análisis de estabilidad de taludes con geometrías complejas o materiales heterogéneos. Su aplicación requiere información geológica y geotécnica específica de cada explotación y debe ser desarrollada por profesionales competentes en geotecnia o ingeniería geológica. Sin embargo, la presente guía da a conocer principios que permite al titular minero comprender la importancia de evaluar adecuadamente la estabilidad de los taludes y gestionar los riesgos asociados a la operación minera.

5.1.2.3 Metodología de Morgenstern - Price

La metodología de Morgenstern-Price es una de las herramientas más completas y confiables utilizadas en ingeniería geotécnica para evaluar la estabilidad de taludes. Su principal ventaja es que permite analizar

condiciones complejas del terreno considerando de manera más detallada las fuerzas que actúan dentro del talud.

De forma sencilla, este método busca determinar si un talud tiene suficiente resistencia para mantenerse estable o si existe riesgo de deslizamiento. Para ello, divide el terreno en varias secciones o "rebanadas" y analiza tanto las fuerzas que favorecen el movimiento como las que ayudan a mantener la estabilidad.

A diferencia de otros métodos más simples, Morgenstern-Price puede evaluar situaciones donde existen diferentes tipos de materiales, presencia de agua, cargas de equipos, vibraciones o geometrías complejas de explotación.

¿Qué evalúa?

- Interacción entre diferentes sectores del talud.
- Efecto del agua subterránea.
- Condiciones complejas de carga.

La metodología permite analizar:

- Taludes en suelo, roca o materiales mixtos.
- Efectos del agua subterránea y lluvias.
- Diferentes tipos de superficies de falla.
- Cargas producidas por maquinaria o acumulación de material.
- Condiciones complejas de explotación minera.

¿Cuándo se recomienda?

- Proyectos mineros de mayor escala.
- Taludes altos.
- Zonas con antecedentes de inestabilidad.

¿Cuándo puede aplicarse en minería de materiales de construcción?

- Se recomienda especialmente en:
- Canteras con varios bancos de explotación.
 - Explotaciones ubicadas en laderas.
 - Taludes de gran altura.
 - Zonas donde se presentan filtraciones o acumulación de agua.
 - Proyectos donde existen antecedentes de movimientos de masa.
 - Explotaciones con diferentes capas de suelo, grava y roca.

¿Qué información se necesita?

- Para realizar el análisis normalmente se requiere:
- Topografía del terreno.
 - Altura y geometría de los taludes.
 - Características geológicas del depósito.
 - Propiedades geotécnicas de los materiales.
 - Nivel freático o condiciones de drenaje.
 - Información sobre cargas asociadas a equipos o almacenamiento de material.

Recomendación para el pequeño minero

Aunque la aplicación de esta metodología requiere software especializado y personal técnico capacitado, es importante que el pequeño minero comprenda que la estabilidad de un talud no depende únicamente de su inclinación.

Factores como:

- Lluvias intensas.
- Presencia de agua en el frente de explotación.

- Acumulación de material cerca del borde.
- Incremento de la altura de los bancos.
- Fracturas o zonas débiles del terreno.

pueden reducir significativamente la estabilidad del talud y aumentar el riesgo de deslizamientos. Por esta razón, cuando se proyecten explotaciones con taludes altos o condiciones geológicas complejas, es recomendable solicitar una evaluación geotécnica especializada.

Interpretación general del Factor de Seguridad

Factor de Seguridad	Interpretación
FS > 1,5	Talud generalmente estable
FS entre 1,3 y 1,5	Condición aceptable con monitoreo
FS < 1,3	Posible inestabilidad; revisar el diseño
FS < 1,0	Falla probable del talud

Ventajas de la metodología

- Es una de las metodologías más precisas para análisis de estabilidad.
- Permite evaluar condiciones geológicas complejas.
- Considera la influencia del agua y las cargas externas.
- Es ampliamente utilizada en minería, infraestructura y geotecnia.

La metodología de Morgenstern-Price es reconocida internacionalmente como una de las herramientas más completas para evaluar la estabilidad de taludes. Su aplicación requiere información geológica y geotécnica específica de cada explotación y debe ser desarrollada por profesionales competentes en geotecnia o ingeniería geológica. No obstante, conocer sus principios permite al titular minero comprender la importancia de controlar factores como el agua, la geometría de los taludes y las condiciones del terreno para prevenir deslizamientos y garantizar una operación segura.

5.1.2.4 Metodología de Hoek & Bray

La metodología de Hoek & Bray es una de las herramientas más reconocidas a nivel mundial para evaluar la estabilidad de taludes en roca (macizos rocosos). A diferencia de otros métodos que se enfocan principalmente en suelos y materiales sueltos, esta metodología analiza cómo las fracturas, grietas y discontinuidades presentes en la roca pueden influir en la estabilidad de una cantera.

En términos sencillos, este método permite identificar si bloques o masas de roca pueden desprenderse, deslizarse o volcarse debido a la inclinación del talud y a la orientación de las fracturas naturales del macizo rocoso.

La metodología parte del principio de que una roca no siempre falla por romperse completamente, sino que muchas veces falla porque los bloques se desplazan a través de planos de debilidad ya existentes.

¿Qué evalúa?

- Presencia de fracturas.
- Discontinuidades geológicas.
- Caída de bloques y cuñas rocosas.

La metodología permite analizar:

- Deslizamiento de bloques sobre fracturas o discontinuidades.
- Caída de rocas desde los taludes.
- Formación de cuñas rocosas inestables.
- Volcamiento de bloques (toppling).
- Influencia de la orientación de las fracturas respecto al talud.

¿Cuándo se recomienda?

- Explotaciones en roca.
- Canteras de materiales pétreos.
- Taludes desarrollados en macizos fracturados.

¿Cuándo puede aplicarse en minería de materiales de construcción?

Es especialmente útil en:

- Canteras de roca para agregados pétreos.
- Explotaciones de caliza.
- Explotaciones de arenisca.
- Canteras de granito.
- Canteras de basalto.
- Frentes de explotación donde se observan fracturas o diaclasas visibles.

¿Qué información se necesita?

Para realizar este tipo de análisis normalmente se requiere:

- Levantamiento geológico del frente de explotación.
- Identificación de fracturas, diaclasas y fallas.
- Orientación de las discontinuidades.
- Altura del talud.
- Ángulo del talud.
- Resistencia de la roca.
- Presencia de agua en las fracturas.

¿Qué debe observar un pequeño minero?

Durante las actividades de explotación es importante identificar:

- Grietas abiertas en la roca.
- Bloques parcialmente separados del macizo.
- Fracturas inclinadas hacia el frente de explotación.
- Caídas frecuentes de roca.
- Filtraciones de agua en las discontinuidades.
- Zonas altamente fracturadas o meteorizadas.

Cuando estas condiciones son observadas, se recomienda realizar una evaluación geotécnica antes de aumentar la altura o la inclinación de los taludes.

Tabla 5.2. Tipos de falla más comunes en roca

Tipo de falla	Descripción sencilla
Deslizamiento plano	La roca se desliza sobre una fractura inclinada hacia el frente del talud.
Falla en cuña	Dos fracturas se intersectan formando un bloque que puede deslizarse.
Volcamiento (Toppling)	Los bloques se inclinan y caen hacia adelante por efecto de la gravedad.
Caída de roca	Fragmentos o bloques se desprenden directamente del talud.

Recomendación para el pequeño minero

Antes de incrementar la altura de los bancos o la inclinación de los taludes se recomienda:

- Inspeccionar visualmente los taludes antes de iniciar actividades, identificando grietas, fracturas o deformaciones visibles.
- Retirar bloques inestables cuando sea seguro hacerlo.
- Verificar la presencia de agua en el frente de explotación

- Controlar la infiltración de agua en los frentes de explotación.
- Mantener sistemas de drenaje adecuados.
- Evitar taludes o cortes excesivamente verticales.
- Realizar inspecciones periódicas después de lluvias intensas o voladuras.
- Solicitar evaluación geotécnica cuando se proyecten taludes altos o existan antecedentes de deslizamientos.
- Implementar bermas de seguridad para interceptar caídas de roca.
- Suspender labores en zonas donde se identifiquen bloques inestables.

Ventajas de la metodología

- Es una metodología ampliamente utilizada en minería y obras civiles.
- Permite identificar mecanismos de falla específicos en roca.
- Facilita el diseño seguro de taludes en canteras.
- Ayuda a prevenir accidentes por caída de bloques.

La metodología de Hoek & Bray es una herramienta de referencia internacional para evaluar la estabilidad de taludes en roca y el comportamiento de fracturas y discontinuidades. Su aplicación requiere estudios geológicos y geotécnicos específicos; sin embargo, conocer sus principios permite al titular minero identificar condiciones de riesgo asociadas a bloques inestables, fracturas y caídas de roca, contribuyendo a una explotación más segura y sostenible del recurso mineral.

Las metodologías Bishop, Janbu, Morgenstern-Price y Hoek & Bray constituyen herramientas reconocidas para la evaluación técnica de estabilidad; sin embargo, su aplicación requiere información geológica y geotécnica específica de cada explotación y debe ser realizada por profesionales competentes en geotecnia o ingeniería geológica.

Nota: La presente guía no sustituye los estudios geológicos y geotécnicos requeridos por la normatividad minera vigente. Los criterios aquí descritos tienen carácter orientador y buscan sensibilizar al titular minero sobre la importancia de la estabilidad de taludes en el aprovechamiento sostenible y seguro del recurso mineral.

5.2 ETAPA DE EXPLORACIÓN EN CANTERA

La exploración es la etapa más importante de una cantera, porque es donde realmente se define si el proyecto va a ser rentable, eficiente y sostenible o si va a generar pérdidas desde el inicio.

Figura 5.3. Elementos importantes a considerar durante la exploración de una cantera



Muchas veces se piensa que explorar es solamente abrir huecos o mirar la roca superficialmente, pero técnicamente la exploración significa entender cómo es el depósito, qué calidad tiene el material, cuánto existe, cómo cambia en profundidad y qué zonas realmente sirven para explotación.

En una cantera no toda la roca tiene el mismo comportamiento. Hay zonas con material resistente y útil para concreto o vías, pero también hay zonas alteradas, fracturadas, arcillosas o húmedas que pueden generar rechazos, más trituración, mayor consumo de energía, y problemas de calidad.

Por eso, antes de iniciar la explotación, es fundamental conocer aspectos geológicos, geotécnicos y operacionales del depósito para planear correctamente la mina y evitar mover material que no tiene valor. Durante la exploración se busca identificar: ver la figura 5.3.

Una buena exploración permite separar desde el inicio el material útil y de valor económico del material con poco valor económico o de rechazo, optimizar la explotación y reducir costos en trituración, transporte y procesamiento. Además, explorar bien también reduce impactos ambientales, porque evita extraer material innecesario, disminuye la generación de estériles y facilita el aprovechamiento de subproductos dentro de un enfoque de economía circular.

En cantera, explorar bien evita extraer material que luego no sirve. La exploración en una cantera no es “ir a sacar piedra para ver qué pasa”. La exploración sirve para: saber dónde está el mejor material, cuánto hay, qué calidad tiene, y qué zonas NO vale la pena explotar.

Por eso ahora vamos a revisar cuáles son las principales actividades y conceptos que se deben desarrollar durante la exploración de una cantera y en la presente guía se desarrollarán unos lineamientos y oportunidades de economía circular que es muy importante tenerlas en cuenta:

5.2.1 Lineamiento 1: caracterización geológica y geotécnica del depósito

La identificación de amenazas geológicas y de procesos de remoción en masa constituye una actividad fundamental durante la caracterización geológica y geotécnica de una cantera, ya que permite reconocer las condiciones del terreno que pueden afectar la estabilidad de los bancos de explotación, taludes, botaderos y demás áreas intervenidas por la actividad minera.

Las características geológicas del macizo rocoso o de los materiales no consolidados, la presencia de fracturas, fallas geológicas, zonas meteorizadas, infiltraciones de agua, pendientes pronunciadas y la acción de las lluvias pueden favorecer la ocurrencia de procesos como deslizamientos, caída de rocas, erosión, hundimientos o flujos de material, generando riesgos para los trabajadores, la infraestructura minera y el medio ambiente.

La identificación temprana de estas amenazas permite al titular minero planificar de manera más segura la explotación, definir medidas de prevención y mitigación, optimizar el diseño de bancos y taludes, implementar sistemas adecuados de drenaje y reducir la generación de pérdidas de material y de pasivos ambientales. De esta manera, se contribuye al aprovechamiento eficiente del recurso mineral y al cumplimiento de los principios de la economía circular, promoviendo una explotación segura, sostenible y ambientalmente responsable.

Si bien la evaluación detallada de la estabilidad geotécnica debe realizarse mediante estudios especializados cuando las condiciones del proyecto lo requieran, el pequeño minero puede efectuar inspecciones periódicas e identificar oportunamente señales de alerta que indiquen posibles condiciones de inestabilidad, permitiendo adoptar medidas preventivas antes de que se presenten fallas que comprometan la seguridad de la operación o la recuperación del área intervenida.

Nota: Esta identificación tiene un carácter preventivo y orientador. No reemplaza los estudios geológicos y geotécnicos exigidos por la normatividad minera vigente, sino que constituye una herramienta para fortalecer la gestión del riesgo y apoyar la toma de decisiones durante la planeación, operación, cierre y recuperación de la cantera.

¿Por qué es importante?

Durante la explotación de materiales de construcción en canteras y depósitos de arrastre pueden presentarse condiciones geológicas que generen inestabilidad de taludes, afectando la seguridad de los trabajadores, equipos e infraestructura.

La identificación temprana de amenazas geológicas permite implementar medidas preventivas que reduzcan el riesgo de accidentes y pérdidas operacionales.

¿Qué son los procesos de remoción en masa?

Son movimientos de suelo, roca o material suelto que se desplazan por efecto de la gravedad. Estos procesos pueden ocurrir de forma lenta o repentina y generalmente aumentan durante temporadas de lluvia o por prácticas inadecuadas de explotación.

Los procesos más comunes en minería de materiales de construcción son:

- Deslizamientos de suelo.
- Caída de rocas.
- Volcamiento de bloques.
- Erosión de taludes.
- Flujos de lodo o material saturado.
- Derrumbes localizados en bancos de explotación.

Matriz simplificada para identificación de amenazas geológicas

Tabla 5.3. Matriz simplificada para identificación de amenazas geológicas

Amenaza Identificada	Señales de Alerta en Campo	Nivel de Riesgo Preliminar	Acción Recomendada
Grietas en la parte superior del talud	Apertura de fisuras o separación del terreno.	Alto	Suspender actividades cercanas y solicitar evaluación técnica
Caida frecuente de fragmentos de roca	Presencia de bloques sueltos o desprendimientos.	Alto	Retirar material inestable y establecer zona de seguridad.
Presencia de agua en taludes	Filtraciones, surgencias o encharcamientos.	Alto	Implementar drenajes superficiales y controlar infiltraciones.
Erosión superficial	Surcos o cárcavas producidas por escorrentía.	Medio	Construir canales y controlar aguas lluvias.
Taludes muy inclinados	Pendientes cercanas a la vertical.	Alto	Evaluar reducción de ángulos y conformación de bancos.
Materiales muy blandos o saturados	Hundimientos o deformaciones visibles.	Alto	Restringir tránsito de equipos y revisar estabilidad.
Vegetación inclinada o deformada	Árboles o arbustos inclinados.	Medio	Inspeccionar posibles movimientos lentos del terreno.
Acumulación desordenada de estériles	Pilas con pendientes pronunciadas.	Medio - Alto	Reperilar y compactar adecuadamente.

Tabla 5.4. Clasificación práctica del nivel de amenaza

Recomendaciones para el pequeño minero

- Inspeccionar diariamente los frentes de explotación.
- Verificar el estado de los taludes después de lluvias intensas.

Nivel	Descripción	Acción
Bajo	No se observan evidencias de inestabilidad.	Continuar operación con monitoreo periódico.
Medio	Existen señales tempranas de erosión o deformación.	Implementar medidas preventivas y aumentar inspecciones.
Alto	Se observan grietas, desprendimientos o presencia significativa de agua.	Suspender actividades en el área y realizar evaluación técnica especializada.

- Mantener sistemas de drenaje funcionales.
- Evitar cortes verticales innecesarios.
- No acumular material cerca del borde de los taludes.
- Reportar inmediatamente cualquier grieta o deformación observada.
- Mantener registros fotográficos de las condiciones del frente minero.
- Solicitar apoyo técnico cuando se identifiquen condiciones de riesgo alto.

Las estrategias de economía circular deben implementarse garantizando la estabilidad geotécnica de la explotación. El aprovechamiento de materiales, estériles o subproductos mineros no debe generar condiciones que incrementen el riesgo de deslizamientos, erosión o fallas de taludes, por lo que toda actividad de valorización deberá considerar las condiciones geológicas y geotécnicas del sitio.

Oportunidades de economía circular

- Reducir extracción de material no apto.
- Separar desde el inicio materiales de alta, media y baja calidad.
- Definir usos por calidad: concreto, vía, relleno, drenaje, restauración.
- Evitar mezclar suelo orgánico con material pétreo.

Mientras más conozcamos la cantera, mejor podremos aprovechar el recurso, reducir desperdicios y darle uso adecuado a cada material generado durante la operación.

¿Qué se debe hacer?

¿Qué se analiza en un levantamiento geológico?

1

Levantamiento geológico

El levantamiento geológico es una de las primeras y más importantes actividades dentro de la exploración minera, porque permite entender cómo está conformado el terreno antes de iniciar cualquier explotación.

En una cantera no basta con ver la roca en superficie. Es necesario conocer qué tipo de roca existe en el subsuelo, hasta qué profundidad se extiende su yacimiento, cómo cambia en profundidad, qué zonas son competentes, cuáles están alteradas y cómo se distribuyen los materiales dentro del depósito.

El levantamiento geológico funciona como una radiografía del terreno. A través de recorridos de campo, observaciones técnicas y toma de información, se identifican las características geológicas que van a definir la calidad del material, el diseño de explotación y el comportamiento de la cantera durante toda su vida útil.

Por eso ahora vamos a revisar qué información se obtiene durante un levantamiento geológico y cómo esa información ayuda a tomar decisiones técnicas dentro de la cantera.

Durante el levantamiento geológico se busca identificar: Ver figura 5.4.

¿Por qué es importante?

Porque permite:

- Planear mejor la explotación porque se identifica cómo se comporta el terreno
- Identificar dónde está la mejor roca, para evitar explotar material que no sirve, reduciendo pérdidas y dilución en la planta
- Identificar dónde hay material de poco valor o desecho para evitar mezclarlo con material bueno
- Disminuir costos operacionales, como voladuras sobredimensionadas y de combustible
- Mejorar y garantizar la calidad del producto final.
- Reducir impactos ambientales y alteraciones al macizo rocoso

Figura 5.4. Elementos que se identifican en el levantamiento geológico de una cantera



2

Calicatas, apiques o perforaciones

Después del levantamiento geológico, el siguiente paso en la exploración de una cantera es conocer qué existe debajo de la superficie y cómo cambia el material en profundidad.

Para lograrlo se utilizan excavaciones y métodos de investigación que permiten observar directamente el terreno, tomar muestras y verificar la calidad real del depósito.

Las herramientas más utilizadas durante esta etapa son las calicatas, los apiques y las perforaciones (ver figura 5.5), y cada una tiene un objetivo diferente dependiendo de la profundidad, el tipo de material y el nivel de detalle que se necesita.

Estas actividades son fundamentales porque permiten identificar zonas útiles, detectar materiales problemáticos y reducir la incertidumbre antes de iniciar la explotación.

Con estas actividades se puede conocer:

- Espesor del depósito.
- Continuidad del material.
- Calidad de la roca.
- Presencia de arcillas o humedad.
- Niveles freáticos y presencia de acuíferos.
- Fracturas y alteración.
- Condiciones geotécnicas.
- Volumen explotable.

Figura 5.5. Métodos de exploración en canteras

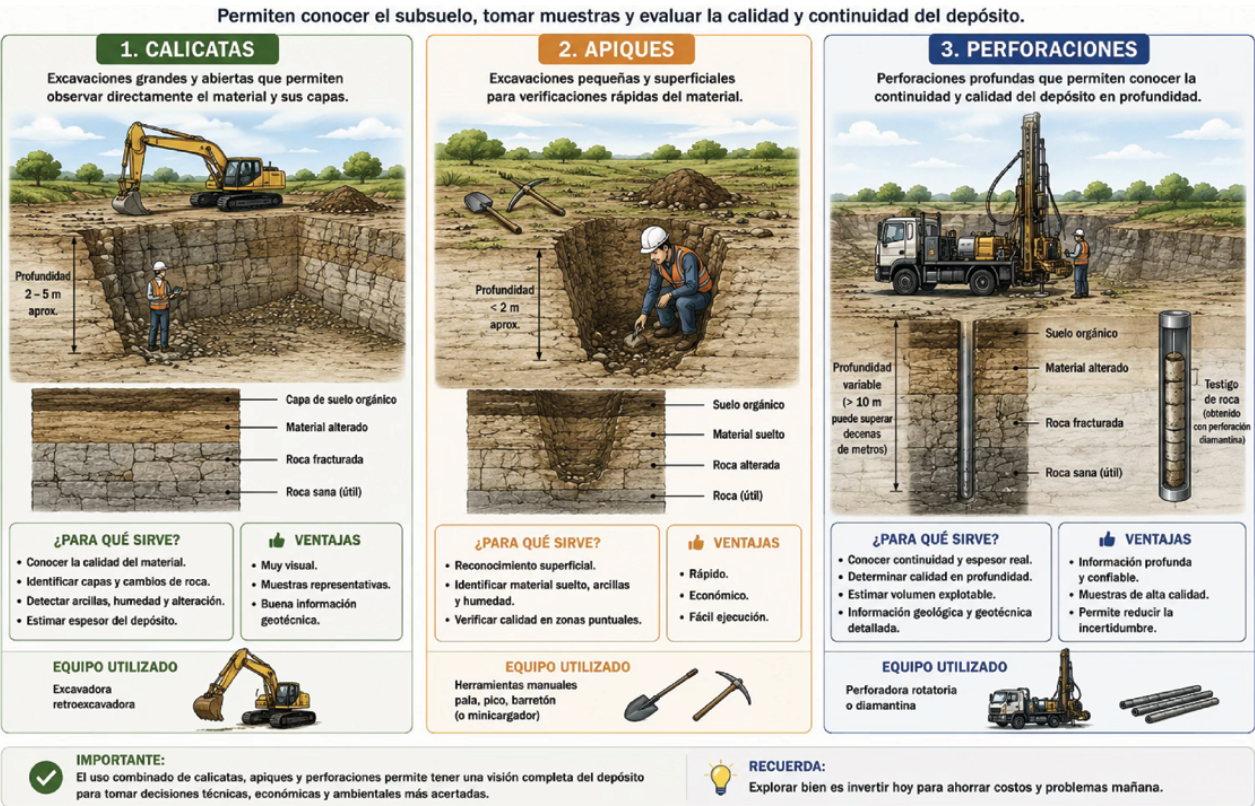


Tabla 5.5. Diferencias en diferentes parámetros para calicatas, apiques y perforaciones

Parámetro	Calicatas	Apiques	Perforaciones
¿Qué son?	Excavaciones abiertas de mediana profundidad.	Excavaciones pequeñas para revisar el material superficial.	Perforaciones profundas con equipos especializados para saber cómo sigue la roca debajo.
Objetivo principal	Tomar muestras representativas y observar: • capas del terreno • profundidad útil • humedad • arcillas • tamaño del material • cambios de roca	• Muestreo rápido • revisar calidad inicial • verificar continuidad	• Continuidad del depósito • espesor • fracturas • calidad en profundidad
Profundidad típica	2-5 m aprox.	<2 m aprox.	Variable (puede superar decenas de metros).
Equipo usado	Retroexcavadora o excavadora.	Manual o minicargador.	Perforadora rotatoria o diamantina.
Tipo de información	Estratigrafía y calidad del material.	Reconocimiento preliminar.	Geología profunda y continuidad.
¿Permite ver directamente el material?	Sí.	Sí.	Parcialmente (testigos o ripios).
Costo	Medio.	Bajo.	Alto.
Tiempo de ejecución	Medio.	Rápido.	Más lento.
Cobertura	Local.	Muy puntual.	Profunda y amplia.
Ventaja principal	Muy visual y representativa.	Rápido y económico.	Información profunda y detallada.
Limitación principal	Limitada por profundidad.	Información superficial.	Mayor costo y complejidad.
Uso típico en cantera	Evaluar calidad y espesor.	Reconocimiento inicial.	Evaluar continuidad del depósito.
Información geotécnica	Buena.	Básica.	Muy buena.
Muestreo representativo	Bueno.	Limitado.	Muy bueno.
Aplicación en diseño minero	Alta.	Baja-media.	Muy alta.

¿Por qué es importante todo esto? Porque muchas veces en superficie el material se ve bueno y poco alterado, pero en profundidad el material puede ser de calidad inferior o el yacimiento no se extiende por muchos metros, o el caso contrario, a veces en superficie el material está muy meteorizado pero en profundidad la roca está sana y de buena calidad.

Uno de los errores más comunes en una cantera es pensar que cualquier muestra sirve para evaluar la calidad del material. En realidad, una muestra mal tomada puede generar resultados equivocados y decisiones técnicas incorrectas durante toda la operación minera.

El muestreo representativo es el proceso mediante el cual se obtiene una muestra que realmente muestre las condiciones reales del depósito o del material explotado. En una cantera los materiales cambian constantemente en tamaño, dureza, humedad, contenido de finos, presencia de arcillas y grado de alteración. Por eso es necesario aplicar procedimientos técnicos que aseguren que la muestra tomada represente correctamente todo el material y no solamente una parte específica.

¿Por qué es importante?

Porque un muestreo representativo permite:

- Evaluar correctamente la calidad del material.
- Reducir errores de laboratorio.
- Diseñar mejor la explotación.
- Controlar la calidad del producto.
- Evitar pérdidas económicas.
- Y cumplir con requisitos técnicos y ambientales.

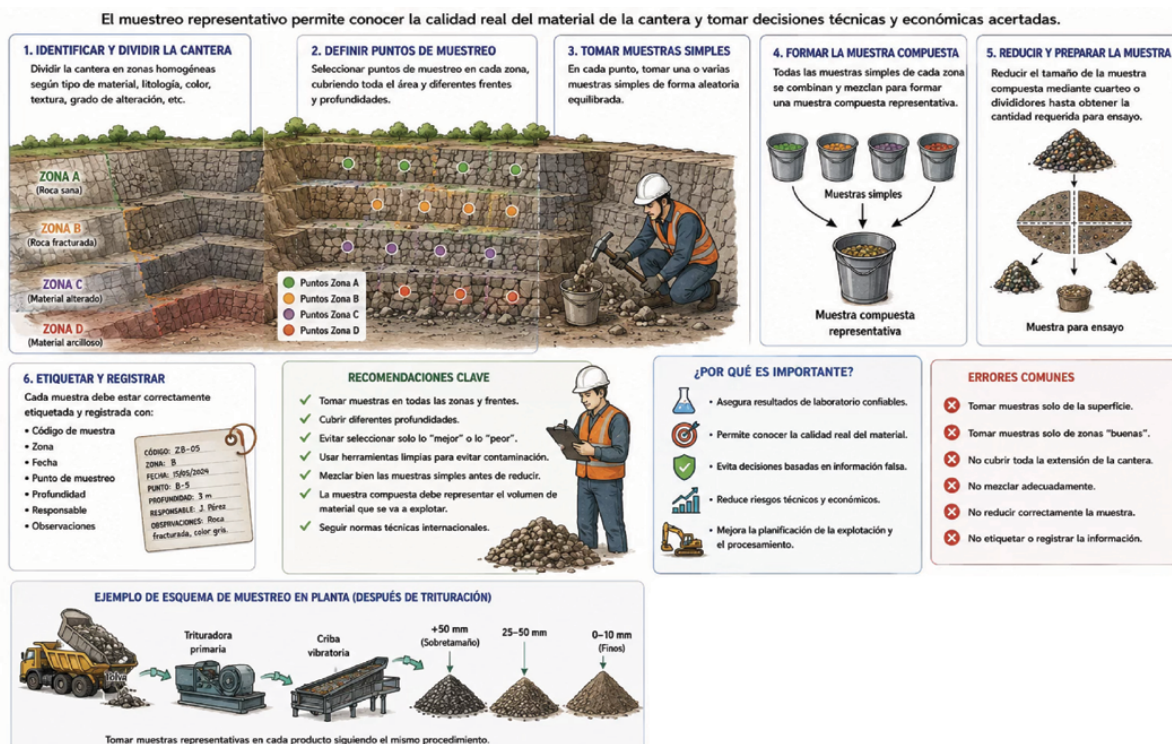
Una cantera puede parecer buena visualmente, pero solo un muestreo adecuado permite saber si realmente cumple las especificaciones para vías, concretos, rellenos o agregados.

El muestreo también ayuda a:

- Identificar materiales contaminados.
- Detectar exceso de arcillas o finos.
- Controlar drenajes y sedimentos.
- Evaluar posibles usos de subproductos.
- Delimitar zonas con material bueno y material de rechazo.
- Apoyar estrategias de economía circular.

Por eso ahora vamos a revisar en la siguiente figura 5.6 cómo se debe realizar correctamente un muestreo representativo en una cantera conforme a criterios técnicos, mineros y ambientales.

Figura 5.6. Cómo hacer un muestreo representativo en una cantera



En minería y especialmente en una cantera, no basta con extraer material y llevarlo al laboratorio. Todo el proceso de exploración, muestreo, caracterización y control de calidad debe realizarse bajo normas técnicas y ambientales que garanticen resultados confiables y operaciones seguras.

La bibliografía técnica y la normatividad sirven como guía para definir cómo se debe tomar una muestra, cómo se debe analizar, cómo interpretar los resultados y cómo asegurar que las decisiones mineras y ambientales estén basadas en información real y verificable. Ver tabla 5.2.

Estas normas permiten estandarizar los procedimientos y evitar errores comunes como tomar muestras no representativas, mezclar materiales, perder finos o generar resultados de laboratorio que no reflejan las condiciones reales de la cantera. Gracias a estas metodologías es posible determinar qué materiales pueden reutilizarse, valorizarse o aprovecharse en vías, concretos, rellenos o procesos de restauración ambiental. Por eso ahora revisaremos las principales normas y referencias técnicas utilizadas en Colombia para garantizar un muestreo representativo y una caracterización adecuada en canteras y materiales pétreos.

Tabla 5.6. Bibliografía técnica y normatividad como guía en la toma de muestras

Documento / Norma	Entidad	¿Qué regula o define?	Aplicación en canteras	Importancia técnica y ambiental
INV E-201-13 – Muestreo de agregados para construcción de carreteras	INVIAS	Procedimientos para toma de muestras representativas de agregados.	Muestreo en frentes, pilas, bandas, tolvas y producción.	Garantiza que la muestra represente realmente el material explotado.
INV E-202 – Reducción de muestras por cuarteo	INVIAS	Métodos para reducir muestras sin perder representatividad.	Preparación de muestras para laboratorio.	Evita segregación y errores en ensayos.
NTC 129 – Muestreo de agregados minerales	ICONTEC	Procedimientos para toma de muestras representativas de agregados.	Muestreo en frentes, pilas, bandas, tolvas y producción.	Garantiza que la muestra represente realmente el material explotado.
ASTM D75 – Practice for Sampling Aggregates	ASTM International	Práctica internacional para muestreo de agregados.	Muestreo técnico de materiales pétreos.	Base internacional para representatividad estadística.
ASTM C702 – Reducing Samples of Aggregate to Testing Size	ASTM International	Reducción de muestras para ensayos.	Preparación de muestras en laboratorio.	Mantiene homogeneidad y confiabilidad.
ASTM D3665 – Random Sampling of Construction Materials	ASTM International	Muestreo aleatorio de materiales de construcción.	Control de calidad en explotación y planta.	Reduce sesgos de selección.
ASTM D3370 – Sampling Rock for Engineering Purposes	ASTM International	Muestreo de roca para fines geotécnicos e ingenieriles.	Exploración y geotecnia en cantera.	Evaluación estructural y mecánica del macizo rocoso.
Guía de buenas prácticas para materiales de arrastre	Agencia Nacional de Minería (ANM)	Recomendaciones técnicas para exploración, muestreo y estimación.	Pequeña minería y materiales pétreos.	Soporte técnico para cumplimiento minero.
Términos de referencia EIA minería	ANLA	Lineamientos ambientales para caracterización y monitoreo.	Licenciamiento ambiental y estudios base.	Exige representatividad y trazabilidad ambiental.
Resolución 631 de 2015	Ministerio de Ambiente	Límites máximos permisibles en vertimientos.	Control de aguas de cantera y sedimentación.	Cumplimiento ambiental de descargas.
Decreto 1076 de 2015	Ministerio de Ambiente	Decreto único reglamentario ambiental.	Manejo ambiental integral en minería.	Base legal ambiental.
Decreto 1886 de 2015	Ministerio de Minas y Energía	Seguridad minera en labores a cielo abierto y subterráneas.	Operación segura en cantera.	Control geotécnico y operacional.
NSR-10 – Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente	Gobierno de Colombia	Requisitos técnicos para materiales de construcción.	Calidad de agregados para concreto.	Verifica aptitud estructural.
INVÍAS 2022 – Especificaciones Generales de Construcción	INVIAS	Especificaciones de materiales para vías.	Bases, subbases y afirmados.	Define calidad mínima exigida.
ASTM C33 – Standard Specification for Concrete Aggregates	ASTM International	Requisitos para agregados de concreto.	Producción de arena y grava para concreto.	Control de granulometría, limpieza y durabilidad.

5.2.1.1 Ensayos de laboratorio

La idea ya no es solo “que la piedra sirva”, sino también: que la cantera sea estable, que no genere contaminación, que controle drenajes, que minimice riesgos, y que permita valorización y cierre adecuado. La minería moderna de canteras debe integrar geología, geotecnia, ambiente, hidráulica y economía circular para garantizar operaciones técnicamente eficientes y ambientalmente sostenibles.

¿Qué se analiza?

Ensayos analíticos para una cantera responsable técnica, minero, geotécnica y ambientalmente.

Ensayos geotécnicos: (estabilidad y seguridad minera)

En una cantera no solamente es importante que la roca sirva para producir agregados o materiales de construcción, también es fundamental entender cómo se comporta el terreno y qué tan estable será durante la explotación.

Los ensayos geotécnicos permiten evaluar las propiedades físicas y mecánicas de la roca y del suelo para garantizar que la cantera pueda operar de forma segura, eficiente y estable. A través de estos ensayos se analiza la resistencia del material, el comportamiento de los taludes, la presencia de fracturas, la infiltración de agua y la capacidad del terreno para soportar cargas y excavaciones.

Dado lo anterior, estos ensayos ayudan a evitar deslizamientos, caída de taludes o rocas, inestabilidad de taludes, erosión, colapsos, hundimientos y problemas de drenaje por infiltraciones y fallas operacionales.

Una cantera puede tener muy buena roca, pero si el terreno no es estable o el diseño geotécnico es incorrecto, la operación puede volverse insegura y generar pérdidas económicas.

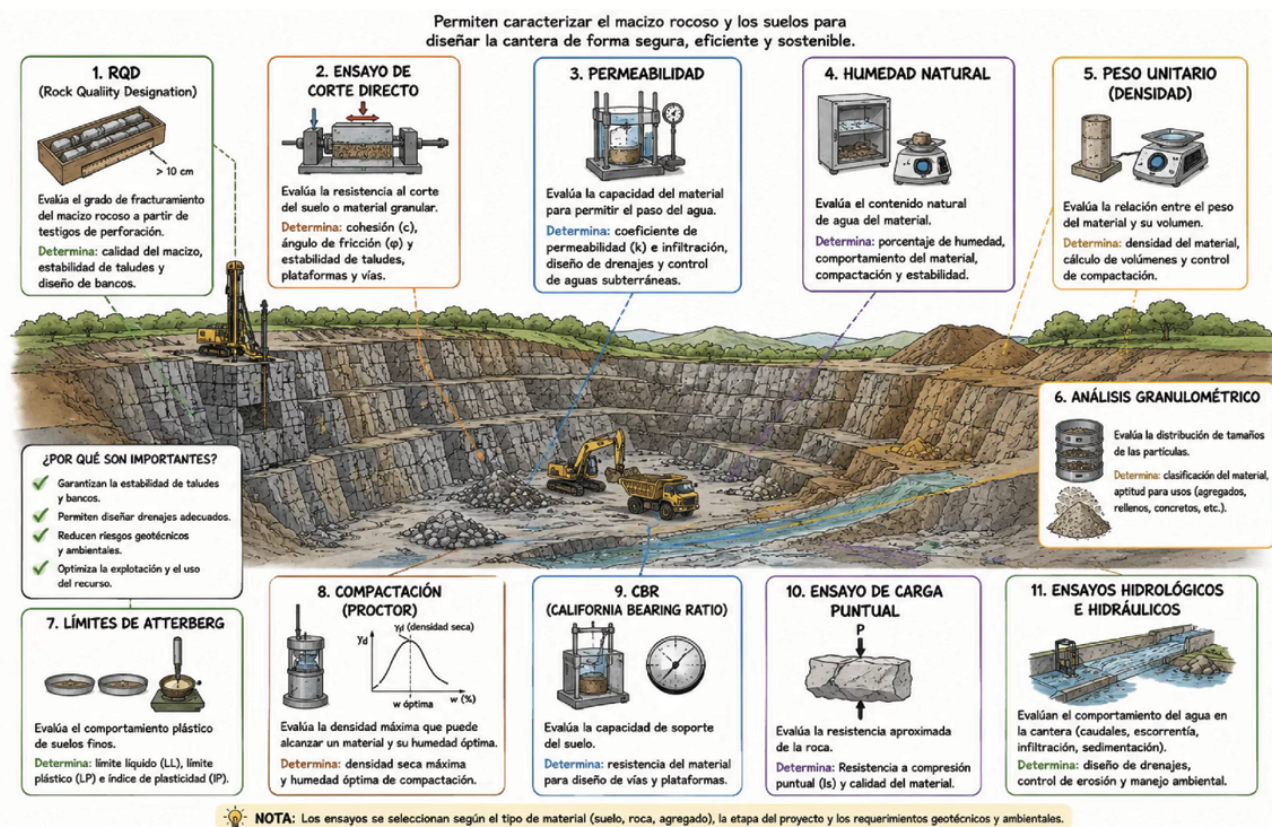
Por eso ahora vamos a revisar cuáles son los principales ensayos geotécnicos utilizados en una cantera y qué información aporta cada uno para la toma de decisiones técnicas y ambientales.

¿Qué permiten definir los ensayos geotécnicos?

- Estabilidad de taludes.
- Altura y ángulo de bancos.
- Comportamiento de fracturas.
- Capacidad de soporte.
- Comportamiento frente al agua.
- Diseño de drenajes y plataformas.
- Seguridad operacional.



Figura 5.7. Ensayos geotécnicos para una cantera



Resistencia a compresión simple (UCS) (Unconfined Compressive Strength)

Es uno de los ensayos geotécnicos más importantes porque permite conocer qué tan resistente es una roca antes de romperse bajo carga, es decir nos dice qué tanta fuerza aguanta la roca antes de fracturarse, lo que permite diseñar mejor la cantera, reducir riesgos y optimizar toda la operación minera.

Este ensayo evalúa la capacidad de la roca para soportar esfuerzos de compresión axial sin confinamiento lateral. En términos simples se aplica presión sobre una muestra cilíndrica de roca, hasta que la roca falla o se rompe. El resultado normalmente se expresa en: MPa (Megapascuales) o psi y permite determinar:

- Resistencia de la roca
- Competencia geomecánica
- Comportamiento frente a excavación
- Estabilidad de taludes
- Capacidad de soporte
- Dificultad de trituración
- Diseño de bancos y voladuras.

Clasificación general (referencial)

UCS (MPa)	Clasificación
< 5 MPa	Muy débil
5 - 25 MPa	Débil
25 - 50 MPa	Media
50 - 100 MPa	Fuerte
>100 MPa	Muy fuerte

Índice de Calidad de la Roca (RQD — Rock Quality Designation)

Es uno de los parámetros geotécnicos más utilizados en minería, túneles y canteras para evaluar la calidad estructural del macizo rocoso. Fue desarrollado por Deere (1964) y sirve para medir qué tan fracturada o competente es una roca.

El RQD no mide la resistencia de la roca directamente. Lo que mide es: calidad estructural, fracturamiento, continuidad.



Si la roca tiene muchas fracturas **será menos estable, más débil, más riesgosa.**



Si la roca tiene pocas fracturas **será más competente, más estable, más segura.**

¿Qué evalúa exactamente?

- Grado de fracturamiento
- Continuidad de la roca
- Competencia del macizo rocoso
- Calidad estructural del terreno

¿Qué determina el RQD?

- Estabilidad de taludes
- Comportamiento de bancos
- Riesgo de caída de bloques
- Necesidad de sostenimiento
- Calidad geotécnica del macizo
- Diseño minero y seguridad

Clasificación general del RQD

RQD (%)	Calidad del macizo rocoso
0 - 25%	Muy mala
25 - 50%	Mala
50 - 75%	Regular
75 - 90%	Buena
90 - 100%	Excelente

Diferencia entre UCS y RQD

Ensayo	Evalúa
UCS	Resistencia de la roca
RQD	Fracturamiento y calidad estructural

Ensayo de corte directo (Direct Shear Test)

Es un ensayo geotécnico utilizado para evaluar la resistencia que tiene un suelo o material granular frente al deslizamiento. En canteras es muy importante porque ayuda a entender si un material puede mantenerse estable o si existe riesgo de falla, erosión o deslizamiento.

¿Qué evalúa exactamente?

Evalúa la resistencia al esfuerzo cortante del material. Es decir, la capacidad del suelo, grava, arena o roca triturada para resistir movimientos o desplazamientos internos. Los materiales que analizan son: suelos, arenas, gravas, estériles, finos, materiales compactados, relaves estabilizados.

¿Qué determina el ensayo?

El ensayo permite determinar principalmente los siguientes parámetros:

Cohesión (C): la capacidad del material para mantenerse unido.



Alta cohesión: material más estable.



Baja cohesión: material se desarma fácilmente.

Angulo de fricción interna (ϕ): representa la resistencia al movimiento entre partículas.



Mayor fricción: mayor estabilidad.



Menor fricción: más facilidad de deslizamiento.

- Resistencia al corte,
- Comportamiento frente a cargas y pendientes.

Los resultados generalmente incluyen:

Parámetro	Unidad
Cohesión	kPa
Ángulo de fricción	grados (°)
Resistencia al corte	kPa o MPa

El ensayo de corte directo nos permite saber qué tan estable puede ser un material cuando está sometido a peso, pendientes o presencia de agua. En minería, entender cómo se comporta el material frente al deslizamiento es fundamental para garantizar seguridad, estabilidad y sostenibilidad en la operación.

Permeabilidad (k)

La permeabilidad es una propiedad geotécnica e hidrogeológica que indica qué tan fácil puede circular el agua a través de un suelo, roca o material granular. En canteras es muy importante porque el agua controla gran parte de la estabilidad, erosión y comportamiento ambiental de una operación minera.

La permeabilidad nos dice qué tan fácil el agua entra, atraviesa o se mueve dentro del terreno.

¿Qué evalúa exactamente?

Evalúa:

- Velocidad de flujo del agua
- Capacidad de infiltración
- Conectividad entre poros y fracturas
- Comportamiento hidráulico del material

Se expresa normalmente como unidad cm/s, m/s. El resultado al dar alta permeabilidad indica que el agua circula fácilmente, ejemplo: gravas, arenas gruesas, roca muy fracturada y al dar baja permeabilidad indica que el agua circula lentamente, ejemplo: arcillas, limos, roca compacta.

¿Qué determina?

La permeabilidad ayuda a determinar:

- Infiltración de agua
- Estabilidad de taludes
- Drenajes internos
- Acumulación de presión de agua
- Generación de erosión
- Comportamiento ambiental del terreno

Clasificación general

Material	Permeabilidad
Gravas	Muy alta
Arenas	Alta
Limos	Media-baja
Arcillas	Muy baja
Roca fracturada	Alta variable
Roca sana compacta	Baja

Humedad natural

La humedad natural es la cantidad de agua que contiene un material en el estado en que se encuentra en campo, antes de secarlo o modificarlo.

Es uno de los parámetros más básicos pero también más importantes en minería, geotecnia y canteras, porque el agua cambia completamente el comportamiento del terreno y de los materiales.

¿Qué evalúa exactamente?

Evalúa:

- Contenido de agua presente en el material
- Grado de saturación
- Comportamiento físico del suelo o roca alterada

Este ensayo es importante para:

- 1- **La estabilidad de taludes** porque la permeabilidad ayuda a entender cómo se mueve el agua, dónde puede acumularse.
- 2- **Diseño de drenajes** porque permite diseñar cunetas, filtros, drenes, canales, sedimentadores
- 3- **Manejo ambiental** porque ayuda a controlar infiltración de contaminantes, arrastre de sedimentos, afectación de acuíferos, erosión.
- 4- **Control de aguas subterráneas**, les permite entender comportamiento del nivel freático, ingreso de agua a excavaciones, zonas saturadas.
- 5- **Diseño de botaderos y rellenos**, importante para estabilidad, drenaje interno y control de lixiviados
- 6- **Relación con drenaje ácido de mina (DAM)** porque controla ingreso de oxígeno y agua, oxidación de sulfuros, movilidad de contaminantes. Una alta permeabilidad puede acelerar DAM.

¿Qué determina?

La humedad natural ayuda a determinar:

- Estabilidad del terreno
- Comportamiento de compactación
- Riesgo de deslizamiento
- Facilidad de trituración y clasificación
- Presencia de agua subterránea
- Comportamiento de arcillas y finos

El resultado se expresa en porcentaje (%) indicando lo siguiente:

Condición	Efecto
Baja humedad	Material más estable
Humedad media	Mejor compactación
Alta humedad	Riesgo de inestabilidad
Saturación	Posible falla geotécnica

5.2.1.2 . Ensayos hidrológicos e hidráulicos

El agua es uno de los factores que más influye en el comportamiento técnico, operacional y ambiental de una cantera. Puede afectar la estabilidad de los taludes, generar erosión, transportar sedimentos y modificar completamente las condiciones del terreno.

Por esta razón, dentro de la exploración y operación minera es fundamental realizar ensayos y evaluaciones hidrológicas e hidráulicas que permitan entender cómo se mueve el agua dentro y alrededor de la cantera. Muchas fallas en minería no ocurren solamente por la roca, ocurren porque no se entendió correctamente el comportamiento del agua. Por eso ahora revisaremos los principales ensayos y parámetros hidrológicos e hidráulicos utilizados para diseñar canteras más seguras, eficientes y ambientalmente responsables.

Tabla 5.7. Relación de ensayos hidrológicos

Ensayo / Parámetro	¿Qué mide o evalúa?	¿Qué determina?	Importancia en canteras	Importancia ambiental
Caudal	Cantidad de agua que circula por unidad de tiempo.	Volumen de agua superficial o subterránea.	Diseño de drenajes, cunetas, bombeo y control hidráulico.	Prevención de inundaciones y erosión.
Permeabilidad	Capacidad del suelo o roca para permitir el paso del agua.	Velocidad de infiltración y flujo interno.	Estabilidad de taludes y comportamiento hidrogeológico.	Riesgo de infiltración y contaminación.
Nivel freático	Profundidad del agua subterránea.	Saturación del terreno y presencia de acuíferos.	Riesgo geotécnico e ingreso de agua a excavaciones.	Protección de aguas subterráneas.
Infiltración	Entrada del agua al suelo o roca.	Capacidad de absorción del terreno.	Diseño de drenajes y manejo de escorrentía.	Control de erosión y recarga hídrica.
Escorrentía superficial	Movimiento del agua sobre la superficie.	Comportamiento hidráulico en lluvias.	Diseño de canales y control de aguas lluvias.	Prevención de sedimentación y erosión.
Turbidez	Cantidad de partículas suspendidas en agua.	Calidad visual y presencia de sedimentos.	Control de lavado y manejo de aguas de proceso.	Protección de quebradas y ríos.
Sólidos suspendidos totales (SST)	Concentración de sedimentos en agua.	Nivel de arrastre de partículas.	Eficiencia de sedimentadores y drenajes.	Cumplimiento en el control ambiental de vertimientos.
pH	Acidez o alcalinidad del agua.	Comportamiento químico del agua.	Control de drenajes y aguas de proceso.	Detección de contaminación o DAM.
Conductividad eléctrica	Cantidad de sales o minerales disueltos.	Calidad química del agua.	Monitoreo de infiltraciones y lixiviados	Identificación de contaminación.
Sedimentación	Capacidad de deposición de partículas.	Formación de lodos y acumulación de sedimentos.	Diseño de pozas y sedimentadores.	Control de impacto en cuerpos de agua
Evaporación	Cantidad de agua perdida al ambiente.	Balance hídrico del proyecto.	Gestión de reservorios y recirculación.	Manejo sostenible del recurso hídrico.
Precipitación (lluvia)	Cantidad e intensidad de lluvia.	Riesgo de erosión e inundación.	Diseño hidráulico y planeación minera.	Manejo ambiental y prevención de contingencias.
Velocidad del agua	Rapidez de circulación del flujo.	Potencial erosivo del agua.	Protección de taludes y drenajes.	Prevención de erosión y socavación.
Presión de poros	Presión ejercida por agua dentro del terreno.	Estabilidad geotécnica.	Riesgo de falla y deslizamiento.	Seguridad de taludes y botaderos.

Ensayo / Parámetro	¿Qué mide o evalúa?	¿Qué determina?	Importancia en canteras	Importancia ambiental
Capacidad hidráulica de canales	Volumen máximo de agua que puede transportar un drenaje.	Dimensionamiento hidráulico.	Diseño de cunetas y canales mineros.	Prevención de reboses y erosión.
Calidad fisicoquímica del agua	Condiciones químicas y físicas del agua.	Estado ambiental del recurso hídrico.	Manejo de aguas industriales y de cantera.	Cumplimiento ambiental.
Metales disueltos	Concentración de metales en agua.	Posible contaminación minera.	Control de drenajes y lixiviados.	Protección de ecosistemas y salud.
Sulfatos	Concentración de sulfatos disueltos.	Oxidación de sulfuros y riesgo geoquímico.	Identificación de drenaje ácido.	Prevención de contaminación hídrica.
Oxígeno disuelto	Cantidad de oxígeno en agua.	Condición biológica del agua.	Monitoreo ambiental de descargas.	Protección de vida acuática.
Demanda química de oxígeno (DQO)	Materia orgánica y oxidables presentes.	Calidad química del agua.	Evaluación de aguas residuales.	Control de contaminación.

5.2.1.3. Ensayos ambientales

La minería moderna no solamente debe garantizar que el material tenga buena calidad técnica; también debe asegurar que la operación no genere impactos negativos sobre el agua, el suelo, el aire y los ecosistemas. Por esta razón, dentro de una cantera es fundamental realizar ensayos ambientales que permitan identificar posibles riesgos de contaminación y evaluar cómo se comportan los materiales y las aguas durante la explotación minera.

Una cantera responsable debe controlar no solamente cuánto material extrae, sino también cómo maneja el agua, los residuos, los finos, los drenajes y las emisiones generadas durante toda la operación.

¿Qué se busca determinar?

- Si el material puede contaminar
- Si existen metales peligrosos
- Si el agua cumple calidad ambiental
- Si hay riesgo de drenaje ácido
- Si los materiales pueden reutilizarse de forma segura

Tabla 5.8. Relación de ensayos ambientales

Parámetro	TCLP	SPLP
Nombre completo	Toxicity Characteristic Leaching Procedure.	Synthetic Precipitation Leaching Procedure.
¿Qué simula?	Condiciones de lixiviación en rellenos o disposición de residuos.	Lluvia ácida e infiltración natural.
¿Para qué sirve?	Saber si el material libera contaminantes peligrosos.	Saber cómo se comporta el material en ambiente natural.
Medio de extracción	Solución ácida fuerte (ácido acético).	Solución ácida débil simulando lluvia.
Ambiente que representa	Botaderos, rellenos, confinamiento.	Suelo, lluvia y escorrentía.
Uso principal	Clasificar residuos peligrosos.	Evaluar impacto ambiental real.
¿Qué evalúa?	Movilidad potencial de metales tóxicos.	Liberación ambiental de contaminantes.
Aplicación en minería	Relaves, estériles, lodos contaminados.	Botaderos, pilas, material expuesto a lluvia.
Metales típicos	Hg, As, Pb, Cd, Cr, Zn.	Hg, As, Pb, Cd, Fe, Mn, sulfatos.
Resultado crítico	Si el residuo es peligroso o no.	Si puede contaminar aguas y suelos.
Uso regulatorio	Muy usado en residuos peligrosos.	Muy usado en evaluación ambiental minera.
Relación con DAM	Indirecta.	Más representativa del comportamiento real del DAM.

5.2.1.4. Ensayos mineralógicos y geoquímicos

En una cantera, conocer únicamente el tamaño, la resistencia o la apariencia de la roca no es suficiente para tomar decisiones técnicas responsables. Para entender realmente el comportamiento del material, es necesario conocer su composición interna: de qué minerales está formado y qué elementos químicos contiene.”

Aquí es donde cobran importancia los ensayos mineralógicos y geoquímicos, porque permiten caracterizar el material desde su estructura y composición, ayudando a predecir su comportamiento durante la explotación, procesamiento, uso comercial y su interacción con el ambiente.

¿Por qué son importantes?

Porque ayudan a responder preguntas críticas:

- ¿El material sirve para construcción?
- ¿Tiene arcillas problemáticas?
- ¿Puede reaccionar en concreto?
- ¿Tiene sulfuros que generan drenaje ácido?
- ¿Contiene metales contaminantes?
- ¿Puede valorizarse como subproducto?

Tabla 5.9. Relación de ensayos mineralógicos

Parámetro	DRX	FRX	SEM	ICP (OES/MS)
Nombre completo	Difracción de Rayos X.	Fluorescencia de Rayos X.	Microscopía Electrónica de Barrido.	Plasma Acoplado Inductivamente.
¿Qué identifica?	Minerales.	Elementos químicos / óxidos.	Forma y superficie de partículas.	Concentración exacta de elementos.
Pregunta que responde	¿Qué minerales hay?.	¿Qué elementos contiene?.	¿Cómo se ve el material?.	¿Cuánto metal hay?.
Resultado típico	Pirita, cuarzo, calcita.	Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ .	Imágenes microscópicas.	ppm, mg/L.
Tipo de información	Mineralógica.	Química elemental.	Morfológica.	Cuantitativa.
¿Ve minerales?	Sí.	No directamente.	Parcialmente.	No.
¿Ve metales?	Indirecto.	Sí.	Sí (EDS).	Muy preciso.
¿Mide concentración exacta?	No.	Semi-cuantitativo.	No.	Sí.
¿Da imágenes?	No.	No.	Sí.	
Aplicación principal	Mineralogía.	Composición química.	Textura y asociación mineral.	Cuantificación química.
Uso en DAM	Detecta sulfuros.	Detecta Fe, S, As.	Ve oxidación y fracturas.	Mide metales disueltos.
Uso en relaves	Minerales presentes.	Óxidos y metales.	Tamaño y morfología.	Contenido exacto.
Uso en oro	Pirita, arsenopirita.	Fe, As, Si.	Oro fino y asociaciones.	Au, As, Hg, Pb.
Muestra típica	Roca, relave.	Roca, suelo, relave.	Sólidos.	Agua o digestión ácida.
Costo relativo	Medio.	Medio.	Alto.	Alto.

Figura 5.8. Elementos de un laboratorio de mineralogía, geoquímica y ambiental



Ejemplo práctico

Una roca visualmente puede parecer adecuada, pero si contiene:

arcillas expansivas, sílice reactiva, sulfuros, altos contenidos de hierro alterado, puede generar problemas técnicos y ambientales. No todos los materiales geológicamente similares se comportan igual; su composición mineralógica y geoquímica define su verdadero desempeño.

La roca no se evalúa sólo por cómo se ve o qué tan dura es; se evalúa por lo que realmente contiene y cómo ese contenido define su comportamiento técnico y ambiental. Por eso, los ensayos mineralógicos y geoquímicos son una herramienta fundamental para una minería técnicamente confiable, ambientalmente responsable y alineada con principios de economía circular.

5.2.1.5. Ensayos operacionales

En una cantera no basta con saber que la roca existe o que cumple calidad geológica; también es fundamental entender cómo se comportará operacionalmente durante la extracción, trituración y producción.

Los ensayos operacionales permiten evaluar qué tan eficiente será el procesamiento del material, cuánta energía se necesitará para fragmentarlo, cuánto desgaste generará en los equipos y qué calidad tendrá el producto final. En otras palabras, estos ensayos ayudan a responder una pregunta clave en cualquier cantera: **¿qué tan rentable y eficiente será convertir esta roca en un producto comercial?**

Estos ensayos ayudan a:

- Reducir nuevamente una trituración innecesaria
- Minimizar generación de finos
- Optimizar uso energético
- Aumentar el aprovechamiento del recurso

Tabla 5.10. Relación de ensayos operacionales

Ensayo	¿Qué evalúa?	¿Qué determina?	Importancia en canteras	Impacto operacional
Índice de trituración	Facilidad o dificultad del material para fragmentarse.	Comportamiento frente a trituración mecánica.	Selección de equipos y eficiencia del proceso.	Control de consumo energético y generación de finos.
Índice de trabajo Bond (Wi)	Energía requerida para triturar o moler el material.	Resistencia del material a reducción de tamaño.	Diseño del circuito de trituración.	Costos energéticos y productividad.
Forma de partículas	Geometría, angularidad y textura del agregado producido.	Calidad del producto final.	Aptitud para concreto, vías y compactación.	Desempeño comercial y cumplimiento normativo.

Parámetro	Responde
Índice de trituración	¿Qué tan fácil se rompe?
Bond	¿Cuánta energía cuesta romperla?
Forma de partículas	¿Qué calidad tiene el producto final?

Estos ensayos convierten la geología en rentabilidad, porque permiten entender si la roca no solo existe, sino si realmente puede producir de manera eficiente y competitiva.

5.2.1.6. Ensayos para economía circular

En una cantera, no todo el material extraído termina necesariamente como producto principal. Durante la explotación y el procesamiento se generan finos, rechazos granulométricos, estériles, materiales fuera de especificación y subproductos que, si se gestionan adecuadamente, pueden convertirse en recursos útiles en lugar de residuos.

Aquí es donde la economía circular toma un papel clave: aprovechar mejor los materiales generados, reducir desperdicios y darles un uso técnico seguro en aplicaciones como vías, rellenos, plataformas o estabilización de suelos.

Para demostrar técnicamente que estos materiales pueden reutilizarse, no basta con decir que 'sirven'; es necesario evaluarlos mediante ensayos que permitan conocer su comportamiento mecánico y estructural.

Tabla 5.11. Relación de ensayos para economía circular

Ensayo	¿Qué evalúa?	¿Qué determina?	Aplicación en economía circular	Importancia
Compactación Proctor	Relación humedad-densidad.	Humedad óptima y densidad máxima.	Rellenos, plataformas, vías internas.	Aprovechamiento técnico de materiales sueltos.
CBR	Resistencia al soporte bajo carga.	Capacidad portante del material.	Subbases, afirmados, caminos.	Sustitución de materiales vírgenes.
Resistencia de mezclas estabilizadas	Comportamiento mecánico de mezclas tratadas.	Resistencia estructural.	Estabilización de finos, estériles y rechazos.	Valorización avanzada de subproductos.

Ejemplo

Finos + cemento: pueden transformarse en material estructural.

Estos ensayos convierten materiales descartados en oportunidades técnicas, permitiendo que la cantera pase de un modelo lineal de extracción a uno de aprovechamiento circular.

Ensayo	Responde
Proctor	¿Se puede compactar bien?
CBR	¿Aguanta la carga?
Mezclas estabilizadas	¿Puede mejorarse para reutilizarse?

La economía circular en minería no consiste en reutilizar por reutilizar; consiste en demostrar técnicamente que un material puede cumplir una nueva función de forma segura y eficiente.

5.2.1.7. Ensayos de calidad del aire, polvo, ruido y vibraciones en canteras

En una cantera, los impactos ambientales no se limitan al agua o al suelo. La explotación, perforación, voladura, trituración, cargue, transporte y clasificación generan emisiones atmosféricas, ruido y vibraciones que pueden afectar tanto a los trabajadores como a las comunidades cercanas y al entorno natural. Por esta razón, una minería responsable debe monitorear no solamente la calidad del material explotado, sino también la calidad del aire y las emisiones físicas generadas durante la operación.

Tabla 5.12. Relación de ensayos de calidad de aire, polvo, ruido y vibraciones

Parámetro	¿Qué evalúa?	¿Qué determina?	Importancia En canteras	Impacto ambiental / Socia
PM10	Partículas inhalables ≤10 micras.	Concentración de polvo suspendido.	Control de trituración, vías y cargue.	Salud respiratoria y calidad del aire.
PM2.5	Partículas respirables finas ≤2.5 micras.	Exposición crítica para salud.	Evaluación de riesgo ocupacional y comunitario.	Alta afectación pulmonar y cardiovascular.
Ruido	Nivel de presión sonora.	Intensidad sonora generada por equipos.	Control operacional y ocupacional.	Molestias, estrés y afectación comunitaria.
Vibraciones	Movimiento inducido en suelo o estructuras.	Energía transmitida por operación o voladuras.	Seguridad operacional y control de daños.	Riesgo estructural y conflicto social.

Muchas veces el principal conflicto entre una cantera y su comunidad no es la explotación en sí, sino el polvo, el ruido o las vibraciones mal controladas. Una cantera puede cumplir técnicamente con su producción, pero si no controla sus emisiones, puede fallar ambiental y socialmente.

Ensayo	Responde
PM10	¿Cuánto polvo inhalable hay?
PM2.5	¿Cuánto polvo peligroso respirable hay?
Ruido	¿Qué tan fuerte suena la operación?
Vibraciones	¿Qué tanto se mueve el terreno?

Controlar aire, ruido y vibraciones no solo protege el ambiente; protege a las personas, la continuidad operacional y la relación de la cantera con su entorno. Una cantera técnicamente eficiente también debe ser ambientalmente silenciosa, respirable y controlada.

5.2.1.8. Ensayos para calidad de agregados

(Control técnico para uso en concreto, vías, rellenos y obras civiles). La calidad de un agregado no se define solo por “verse bien” o por el tamaño de la piedra. Técnicamente debe evaluarse desde sus propiedades físicas, mecánicas, químicas, mineralógicas y de durabilidad, dependiendo del uso final.

Ensayos físicos (Caracterización básica del agregado)

Tabla 5.13. Relación de ensayos físicos dirigidos a la caracterización del agregado

Ensayo	¿Qué evalúa?	¿Por qué importa?
Granulometría	Distribución de tamaños de partículas.	Define cumplimiento para concreto, mezclas y vías.
Módulo de finura	Tamaño promedio del agregado fino.	Control de trabajabilidad y diseño de mezcla.
Densidad (masa específica)	Peso unitario del material.	Diseño de mezclas y rendimiento.
Absorción	Capacidad de absorber agua.	Control de humedad y dosificación.
Peso unitario suelto y compactado	Densidad aparente del agregado.	Diseño volumétrico.
Contenido de humedad	Agua natural del material.	Ajuste de mezclas y operación.
Vacios entre partículas	Espacios libres entre agregados.	Compactación y desempeño.

Ensayos mecánicos (Resistencia y comportamiento estructural)

Tabla 5.14. Relación de ensayos mecánicos dirigidos al comportamiento estructural

Ensayo	¿Qué evalúa?	¿Por qué importa?
Abrasión Los Ángeles	Resistencia al desgaste e impacto.	Durabilidad en vías y concreto.
Micro-Deval	Resistencia al desgaste por fricción húmeda.	Muy útil para agregados viales.
Trituración / Crushing value	Resistencia a fragmentación.	Calidad estructural.
10% Fines Value	Resistencia a compresión indirecta.	Uso vial y estructural.
Impact Value	Resistencia al impacto.	Material sometido a cargas dinámicas.

Ensayos de forma y textura (Desempeño mecánico y adherencia)

Tabla 5.15. Relación de ensayos de forma y textura para conocer el desempeño mecánico

Ensayo	¿Qué evalúa?	¿Por qué importa?
Índice de lajas (Flakiness Index)	Partículas planas.	Mala compactación si es alto.
Índice de elongación	Partículas alargadas.	Reduce desempeño estructural.
Angularidad	Forma geométrica.	Mejora trabazón mecánica.
Textura superficial	Rugosidad.	Adherencia en concreto.

Ensayos de limpieza y contaminantes (Control de impurezas)

Tabla 5.16. Relación de ensayos de limpieza para control de impurezas

Ensayo	¿Qué evalúa?	¿Por qué importa?
Equivalente de arena	Contenido de finos/arcillas.	Calidad del agregado fino.
Azul de metileno	Arcillas activas.	Muy importante en arenas trituradas.
Material que pasa malla #200	Exceso de finos.	Control de calidad.
Materia orgánica	Contaminación orgánica.	Problemas en concreto.
Terrones de arcilla y partículas friables	Impurezas débiles.	Reduce resistencia.

Ensayos de durabilidad (Comportamiento frente a ambiente)

Tabla 5.17. Relación de ensayos de durabilidad

Ensayo	¿Qué evalúa?	¿Por qué importa?
Durabilidad / Sanidad (sulfato sodio/magnesio)	Resistencia a ciclos ambientales.	Vida útil del agregado.
Congelamiento-deshielo (si aplica)	Resistencia climática.	Ambientes severos.
Resistencia a humedecimiento-secado	Estabilidad física	Muy útil en materiales marginales.

Ensayos químicos (Compatibilidad y contaminación)

Tabla 5.18. Relación de ensayos químicos para compatibilidad y contaminación

Ensayo	¿Qué evalúa?	¿Por qué importa?
Reactividad álcali-sílice (ASR)	Riesgo de expansión en concreto.	Crítico en concreto estructural.
Sulfatos solubles	Contaminación química.	Riesgo de deterioro.
Cloruros	Corrosión potencial.	Muy importante en concreto armado.
pH	Comportamiento químico.	Compatibilidad.

Ensayos mineralógicos (Composición interna)

Tabla 5.19. Relación de ensayos mineralógicos para conocer la composición

Ensayo	¿Qué evalúa?	¿Por qué importa?
Petrográfico	Mineralogía y alteración.	Calidad y durabilidad.
DRX	Fases minerales.	Identificación de arcillas/reactivos.
FRX	Composición química.	Calidad y contaminantes.

Ensayos geotécnicos (Si el agregado será usado en vías / rellenos)

Tabla 5.20. Relación de ensayos geotécnicos

Ensayo	¿Qué evalúa?	¿Por qué importa?
Proctor	Compactación.	Subbases y rellenos.
CBR	Capacidad de soporte.	Vías.
Permeabilidad	Drenaje.	Obras hidráulicas.
Corte directo	Resistencia al corte.	Estabilidad.

Según uso final

Para concreto. Imprescindibles:

- granulometría
- absorción
- densidad
- equivalente de arena
- materia orgánica
- ASR
- petrográfico
- abrasión Los Ángeles

Para vías. Imprescindibles:

- granulometría
- abrasión Los Ángeles
- CBR
- Proctor
- equivalente de arena
- forma de partículas
- Micro-Deval

Para rellenos. Imprescindibles:

- granulometría
- humedad
- Proctor
- CBR
- Corte directo

5.2.2. Identificación de zonas útiles y zonas de descarte

En la minería de cantera, la identificación precisa de las zonas útiles y las zonas de descarte es fundamental para optimizar los recursos y garantizar la eficiencia del proceso extractivo. La correcta clasificación de estas áreas permite determinar qué partes del material extraído son aptas para su procesamiento y comercialización, y cuáles deben ser descartadas por no cumplir con los requisitos de calidad o tamaño. Este proceso no solo contribuye a maximizar la productividad y reducir costos, sino que también ayuda a minimizar el impacto ambiental, promoviendo una gestión más sostenible de los recursos minerales.

Por tanto, la identificación adecuada de estas zonas es una etapa clave en el manejo eficiente de la cantera, asegurando que las operaciones sean rentables y responsables.

No toda roca sirve para concreto, vías o base granular. Una mala exploración genera más rechazo, más trituración innecesaria y más residuos.

5.2.3. Mapeo de fracturas, alteración, arcillas y humedad

En la minería de cantera, la identificación y evaluación de ciertas características del material rocoso son esenciales para garantizar operaciones eficientes, seguras y sostenibles. Entre estos aspectos, las fracturas, la alteración, las arcillas y la humedad juegan un papel clave en determinar la calidad y la viabilidad del material extraído. Analizar estos factores permite planificar mejor la extracción, reducir costos, mejorar la calidad del producto final y minimizar el impacto ambiental.

Importancia de cada aspecto:

- **Fracturas:** Las fracturas facilitan la fragmentación de la roca, lo que puede acelerar la extracción y reducir costos. Sin embargo, un exceso o una distribución desigual pueden debilitar la estructura de la roca, complicando el proceso y afectando la calidad del material. Evaluar las fracturas ayuda a planificar técnicas de corte y carga más efectivas.
- **Alteración:** La alteración puede cambiar las propiedades físico-químicas de la roca, afectando su resistencia y durabilidad. Conocer el grado de alteración permite determinar si el material es apto para diferentes usos y si requiere tratamientos adicionales, asegurando la calidad del producto final.

- **Arcillas:** La presencia de arcillas puede disminuir la resistencia de la roca y afectar su estabilidad durante la extracción y transporte. Identificar las arcillas ayuda a decidir si el material necesita tratamientos especiales o si su uso será limitado, garantizando la durabilidad y funcionalidad del producto.
- **Humedad:** El contenido de humedad influye en la manipulación, transporte y procesamiento del material. Demasiada humedad puede dificultar la fragmentación y afectar la calidad, además de incrementar costos. Evaluar la humedad permite planificar mejor las operaciones y mantener la calidad del material.

¿Por qué se mapea todo esto?

Para:

- Planear bien la explotación
- Separar materiales
- Evitar pérdidas

La calidad de una cantera no empieza cuando entra la trituradora, empieza cuando entendemos correctamente el terreno con el conocimiento geológico del mismo. Explorar bien significa mover menos material malo y vender más material bueno.

5.2.4. Lineamiento 2: planeación selectiva de la cantera oportunidades de economía circular

- Menos rechazo en la planta.
- Menor consumo de combustible.
- Mejor control de calidad.
- Mayor rendimiento comercial del depósito.

¿Qué se debe hacer?

Diseñar el avance de explotación considerando la calidad del material y no solo el volumen.

¿Cómo se aplica?

- Separar zonas de buena roca.
- Definir bancos por calidad.
- No mezclar material alterado con material sano.
- Definir áreas para acopio por tipo de producto.
- Planear rutas internas para reducir transporte.

Figura 5.9. Flujo selectivo en cantera





5.3. ETAPA DE EXPLOTACIÓN EN CANTERA

La etapa de explotación en una cantera consiste en la extracción del material rocoso de manera planificada y controlada para su uso en diferentes aplicaciones. Es la fase en la que se realiza la remoción de la roca de manera eficiente, segura y respetuosa con el medio ambiente, siguiendo los métodos adecuados para obtener el máximo rendimiento y calidad del material.

Aspectos a tener en cuenta para un buen desarrollo como se muestra en la siguiente figura 5.10.

- Planificación y diseño del frente de trabajo: definir áreas de extracción, pendientes y rutas para maquinaria.
- Control de fracturas y alteraciones: para facilitar la fragmentación y evitar accidentes.
- Manejo del agua y humedad: para prevenir problemas durante la extracción y transporte.
- Seguridad laboral: implementar protocolos y equipos adecuados para proteger a los trabajadores.
- Impacto ambiental: gestionar residuos, reforestar áreas y reducir ruidos y polvo.
- Control de calidad: verificar la calidad del material extraído para cumplir con los requisitos del mercado.

1

Exploración

2

Mapa de calidad

3

Zonificación del yacimiento

4

Explotación selectiva

5

Separación en frente

6

Acopios diferenciados

7

Destino según calidad

Importancia: Esta etapa es crucial porque determina la productividad, la calidad del producto final, la seguridad de los trabajadores y el impacto ambiental. Una explotación bien planificada asegura una operación eficiente, minimiza costos y riesgos, y prolonga la vida útil de la cantera.

Figura 5.10. aspectos a tener en cuenta para un buen desarrollo en una cantera



Extraer el material con mínima pérdida, mínima dilución y máxima seguridad. En cantera, la dilución ocurre cuando se mezcla material útil con suelo, arcilla, roca alterada o material fuera de especificación.

5.3.1. Lineamiento 3: explotación selectiva y control de dilución

5.3.1.1. Oportunidades de economía circular

- Reusar suelo orgánico en restauración.
- Usar roca de menor calidad en rellenos o caminos internos.
- Usar sobretamaños en obras de control de erosión.
- Reducir rechazos en trituración.

Una cantera técnicamente eficiente debe combinar buena exploración, planeación selectiva y control de dilución para convertir el recurso geológico en un producto rentable, seguro y ambientalmente responsable, como se ilustra en la siguiente figura 5.11.

En una cantera, una de las mayores pérdidas económicas ocurre cuando el material útil se mezcla con material de menor calidad, alterado o que no cumple especificaciones. A ese fenómeno lo conocemos como dilución.

La explotación selectiva es la estrategia técnica que permite extraer el recurso de manera controlada, separando materiales según su calidad, comportamiento geológico y uso final, para maximizar el aprovechamiento del yacimiento.”

Figura 5.11. Cómo desarrollar una explotación selectiva con control de dilución en una cantera



¿Qué es explotación selectiva?

Es un método de operación donde no se explota toda la cantera como si fuera homogénea, sino que se trabaja con criterio técnico, separando zonas según:

- Calidad geológica
- Resistencia de la roca
- Fracturamiento
- Alteración
- Contenido de finos o arcillas
- Humedad
- Valor comercial

¿Qué es dilución?

La dilución ocurre cuando el material útil se mezcla con:

- Estéril
- Roca alterada
- Material meteorizado
- Arcillas
- Material fuera de especificación

Ejemplo simple

Si una roca apta para concreto se mezcla con material alterado:

- Baja la calidad
- Aumenta rechazo
- Incrementa retritución
- Suben costos

¿Por qué es importante?

Porque impacta directamente:

- Calidad del producto final
- Recuperación del recurso
- Rentabilidad
- Vida útil de la cantera
- Eficiencia operacional

¿Qué se debe hacer?

- Retirar suelo orgánico antes de explotar
- Separar material alterado
- Mantener frentes limpios
- Controlar perforación y voladura
- Evitar contaminación con lodos o arcillas
- Clasificar material desde el frente

¿Por qué?

Porque si el material limpio se mezcla con arcilla o suelo, pierde valor y puede dejar de cumplir especificaciones.

Factores clave para controlar dilución:

- Buen mapeo geológico
- Delimitación clara de zonas
- Control del frente de explotación
- Carguío selectivo
- Separación en acopios
- Control de fragmentación
- Monitoreo de calidad

Cuando se controla la dilución, también es más fácil separar materiales valorizables para otros usos, en lugar de convertirlos automáticamente en residuos. La explotación selectiva no consiste en sacar más material; consiste en sacar el material correcto, en el lugar correcto y con la calidad correcta.

En una cantera, extraer material no significa necesariamente aprovechar bien el recurso. La rentabilidad, la calidad del producto final y el desempeño ambiental dependen de qué material se extrae, en qué momento y bajo qué criterio técnico. Por eso, la explotación selectiva por calidad es una estrategia fundamental para transformar un depósito geológico en una operación minera eficiente y sostenible.

La realidad técnica es que un yacimiento no es homogéneo. Dentro de una misma cantera pueden coexistir materiales con comportamientos completamente distintos debido a variaciones geológicas, estructurales y geotécnicas. Es común encontrar zonas con roca competente de alta resistencia y buen desempeño mecánico, mientras otras presentan meteorización, fracturamiento, alteración mineralógica, presencia de arcillas, humedad elevada o incluso zonas estructuralmente afectadas por fallas. Estas diferencias impactan directamente propiedades críticas como resistencia a compresión (UCS), abrasión Los Ángeles, absorción, generación de finos, durabilidad y cumplimiento de especificaciones comerciales.

En ese contexto, la explotación selectiva consiste en identificar, clasificar y extraer cada dominio del yacimiento según su calidad real, evitando mezclar materiales útiles con material alterado, estéril o de menor desempeño. Esto implica que la minería deja de operar bajo el criterio de “extraer todo por igual” y pasa a trabajar bajo un modelo de zonificación geológica, control de calidad y secuenciación de minado.

La figura 5.12 muestra precisamente esa lógica operativa. Primero se desarrolla el conocimiento técnico del depósito mediante cartografía geológica, muestreo representativo y ensayos de laboratorio, con el fin de construir un modelo de calidad del macizo rocoso. A partir de ese modelo se delimitan dominios o zonas con diferente comportamiento técnico y valor comercial, lo que permite definir una secuencia de explotación coherente con los objetivos del proyecto.

Es importante resaltar un concepto clave: la calidad no depende exclusivamente de la profundidad, sino de la geología. Aunque en muchos casos la superficie puede presentar materiales más alterados por meteorización, agua o fracturamiento, también pueden existir escenarios donde estratos superiores sean técnicamente mejores que materiales más profundos. Por ello, la secuencia de minado no debe definirse por intuición, sino por información geológica y ensayos.

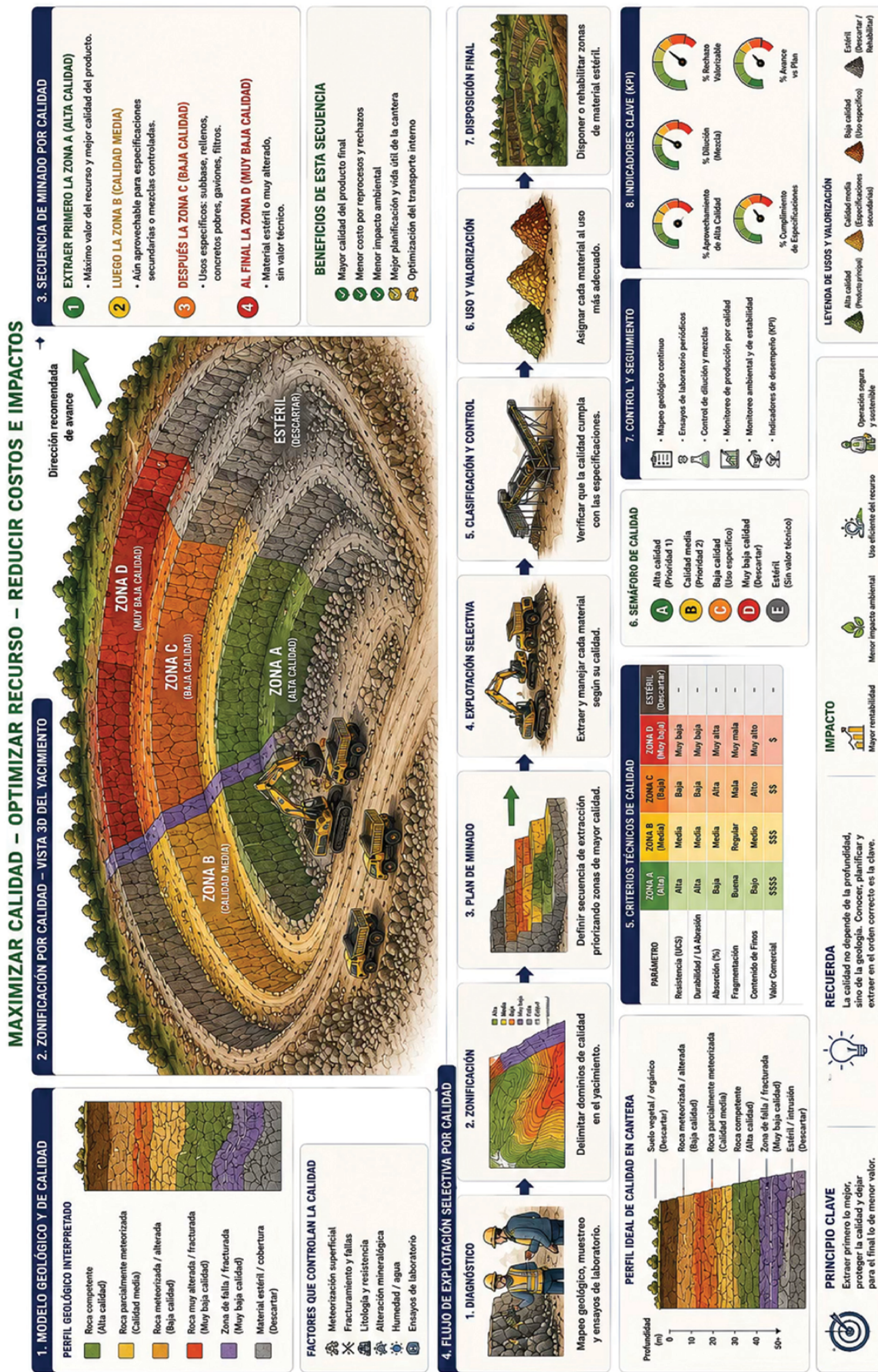
Bajo este enfoque, la explotación selectiva busca priorizar el aprovechamiento del material de mayor valor técnico y comercial, dirigir materiales intermedios a usos compatibles con sus propiedades, gestionar adecuadamente los materiales de baja calidad y separar claramente el estéril o material sin aprovechamiento técnico. Esto reduce la dilución, minimiza reprocesos, disminuye generación innecesaria de finos, mejora la eficiencia energética y optimiza el costo por tonelada producida.

En términos prácticos, esta metodología conecta directamente la geología con la operación minera, el procesamiento, la calidad del producto final y la sostenibilidad del proyecto.

En síntesis, una cantera eficiente no es la que extrae más material, sino la que conoce su depósito, explota selectivamente y asigna cada material al uso técnicamente correcto.



Figura 5.12. Explotación selectiva por calidad



PRINCIPIO CLAVE

Extraer primero lo mejor, proteger la calidad y dejar para el final lo de menor valor.

RECUERDA

La calidad no depende de la profundidad, sino de la geología. Conocer, planificar y extraer en el orden correcto es la clave.

IMPACTO

- Menor impacto ambiental
- Uso eficiente del recurso
- Operación segura y sostenible
- Mayor rentabilidad

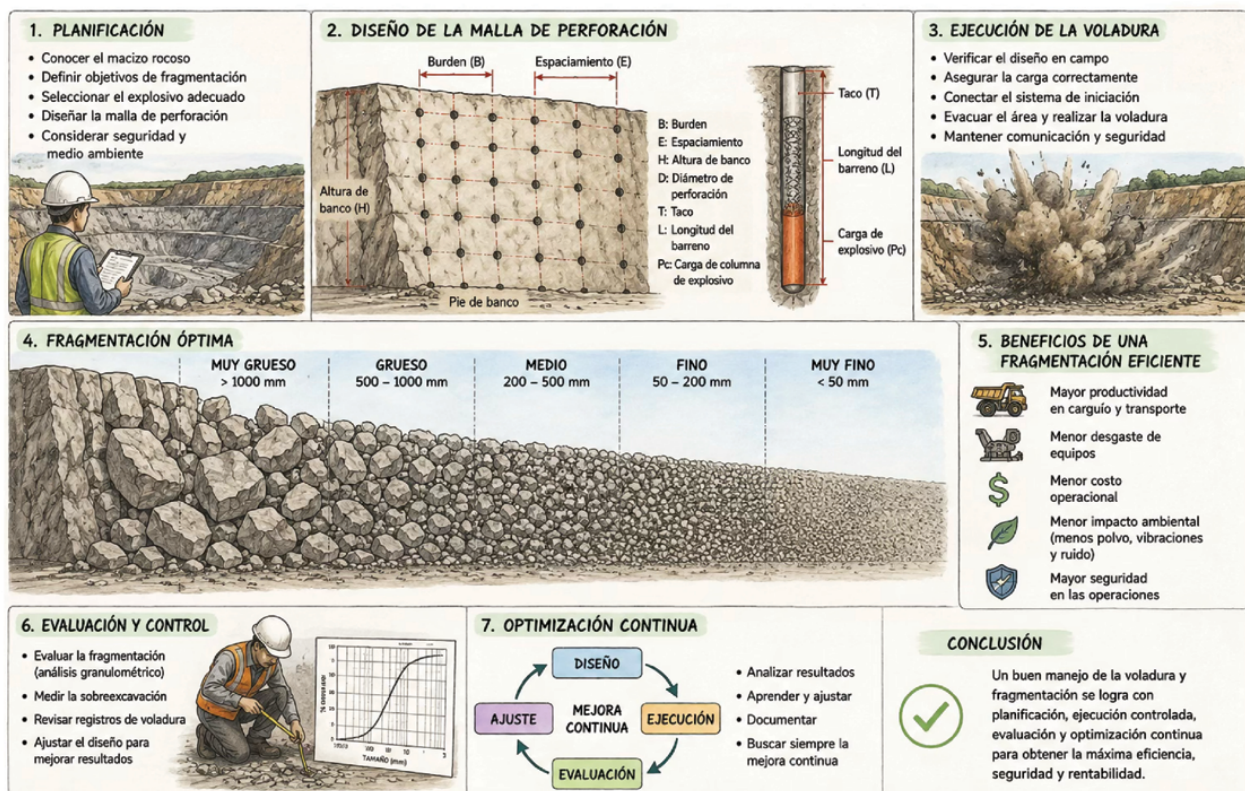
5.3.2. Lineamiento 4. Manejo eficiente de voladura y fragmentación

5.3.2.1. Oportunidades de economía circular

- Menor energía en trituración.
- Menor generación de polvo.
- Mejor granulometría.
- Menor desgaste de equipos.
- Mayor aprovechamiento del material.

En una cantera, romper la roca no significa simplemente usar explosivos; significa hacerlo de manera técnica, segura, eficiente y controlada para obtener el tamaño de fragmento que realmente necesita la operación, sin generar pérdidas, riesgos o impactos innecesarios. Para un pequeño minero legal, una voladura bien diseñada puede marcar la diferencia entre una operación rentable y una operación costosa e ineficiente.

Figura 5.13. Manejo eficiente de voladura y fragmentación



En una cantera de pequeña minería a cielo abierto, la representación del diseño de la malla de perforación no debe mostrarse como una malla “vertical en fachada” (tipo cuadrícula dibujada sobre el talud), sino como una malla horizontal en planta (vista superior del banco), porque así es como realmente se diseña, controla y ejecuta operacionalmente la voladura.

¿Por qué debe ser horizontal (vista en planta)?

- 1** La perforación se distribuye sobre la superficie del banco. Los barrenos se perforan desde la plataforma superior del banco hacia abajo, no “dibujados sobre la pared” del talud. La lógica real es:

- Se prepara el banco
- Se define el área a disparar
- Se marca la malla sobre el terreno
- Se perforan los barrenos
- Se cargan explosivos
- Se detona hacia la cara libre

Vista real:

PLANTA (correcto)
Cara libre del banco



B = Burden

E = Espaciamiento

No así:

FACHADA (incorrecto como diseño principal)



porque eso induce a pensar que se perfora lateralmente sobre el talud.

2

Burden y espaciamiento se miden horizontalmente.

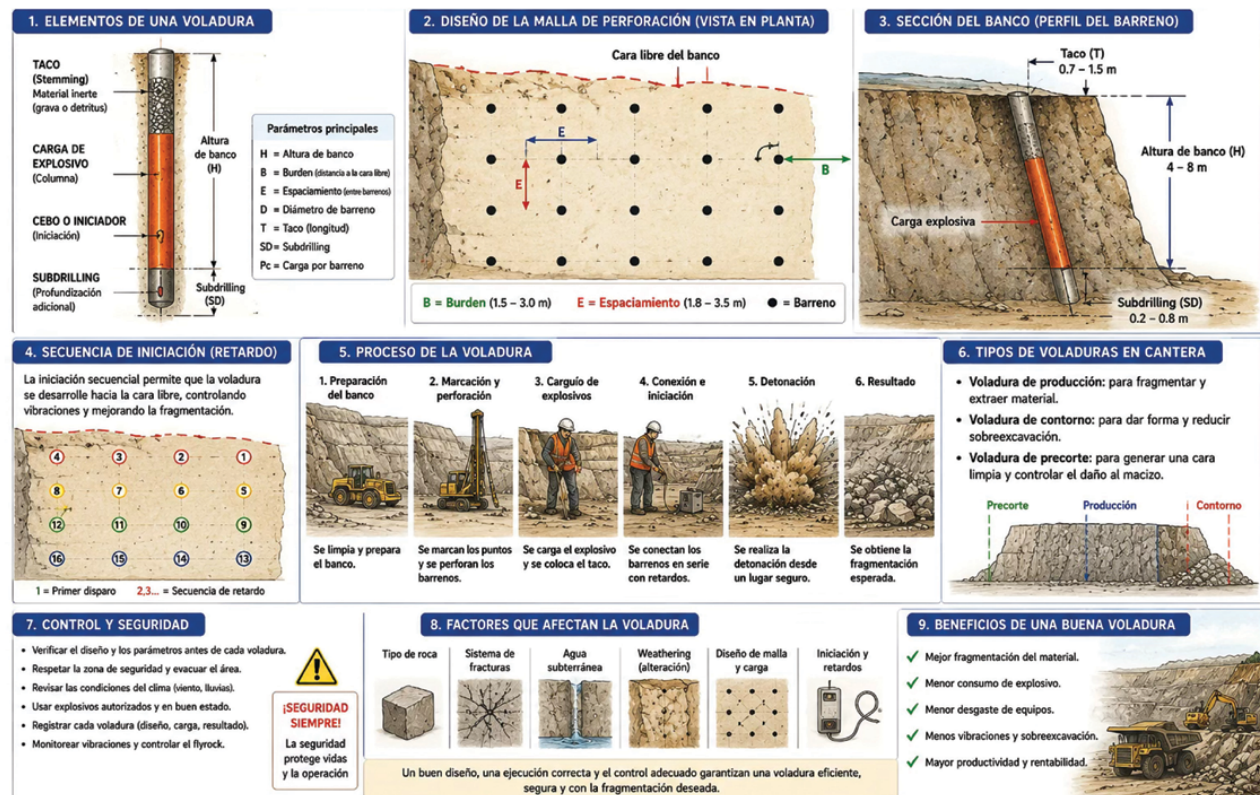
Los parámetros principales del diseño son: Burden (B): Distancia entre el barreno y la cara libre. Espaciamiento (E): Separación entre barrenos adyacentes.

Ambos se definen en planta horizontal.

Si se dibuja verticalmente:

- el burden pierde sentido geométrico
- no se entiende la dirección de alivio
- se distorsiona el patrón de detonación

Figura 5.14. Voladuras en canteras, proceso seguro y eficiente



3

La energía necesita una cara libre horizontalmente definida.

La voladura rompe roca porque la energía se libera hacia una cara libre.

- En cantera:
- La cara libre es el frente del banco
- La onda de choque rompe hacia ese vacío

Si la representación parece vertical en muro:

- Parecería perforación de túnel o banqueo especial
- No refleja cantera convencional

4

La pequeña minería usa equipos simples de perforación.

Normalmente:

- jackleg
- wagon drill pequeño
- perforadora neumática
- martillo en fondo (DTH) ligero

Estos equipos trabajan sobre:

- banco nivelado
- superficie accesible
- plataforma operativa
- No se perfora lateralmente sobre la pared rocosa.

5

Permite controlar fragmentación y sobreexcavación.

Con diseño horizontal puedes controlar:

- burden
- spacing
- subdrilling
- stemming (taco)

- secuencia de retardo

Esto impacta:

- tamaño de fragmento
- vibración
- flyrock
- sobre rotura
- consumo de explosivo

La malla debe representarse horizontalmente porque el diseño de voladura en cantera se define geométricamente en planta, donde se controlan burden, espaciamiento y dirección de alivio hacia la cara libre. La vista vertical solo complementa el diseño para mostrar la configuración interna del barreno, pero no debe ser el esquema principal del patrón de perforación.



Figura 5.15. Manejo de la voladura

MANEJO EFICIENTE DE VOLADURA Y FRAGMENTACIÓN EN UNA CANTERA LEGAL PARA UN PEQUEÑO MINERO

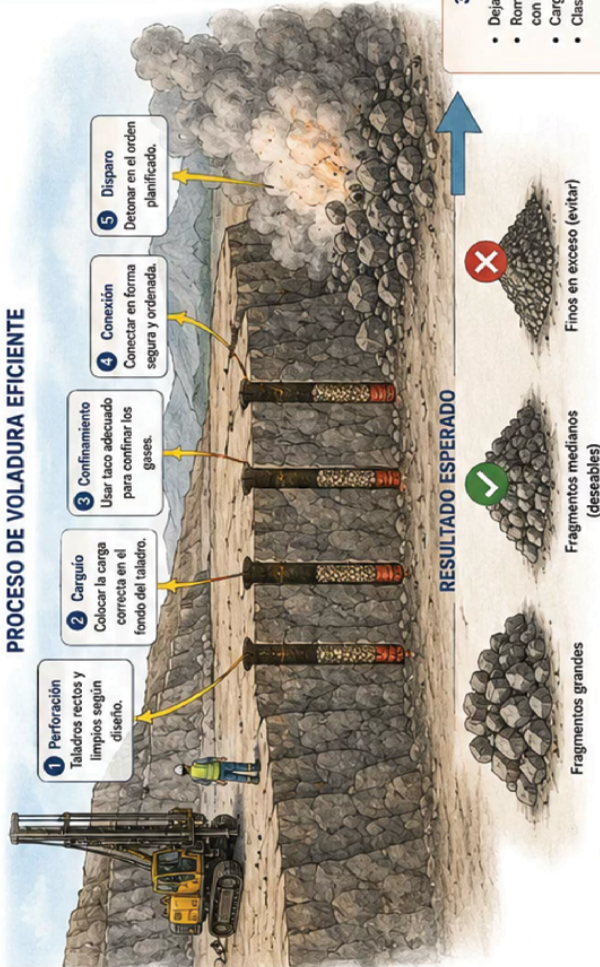
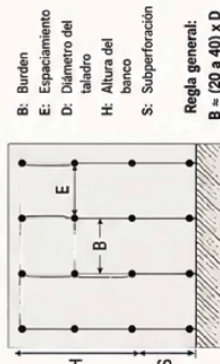
SEGURIDAD – EFICIENCIA – CALIDAD – AMBIENTE – CUMPLIMIENTO LEGAL

PROCESO DE VOLADURA EFICIENTE

1. PLANIFICACIÓN DE LA VOLADURA

- ✓ Conocer la roca: ensayos y mapeo geológico.
- ✓ Definir el objetivo: romper sin sobrerromper.
- ✓ Diseñar el patrón de perforación
- ✓ Calcular carga de explosivo adecuada.
- ✓ Elegir explosivos y accesorios
- ✓ Obtener permisos y avisar a la comunidad.
- ✓ Inspeccionar el área y verificar condiciones.

DISEÑO DE PATRÓN



2. CONTROL DE LA VOLADURA

- Usar la menor carga posible que logre la fragmentación requerida.
- Respetar burden, espaciamiento y taco.
- Usar iniciación adecuada (retardos) para una buena secuencia.
- Evitar sobrecarga (rompe demasiado) o subcarga (no rompe suficiente).
- Monitorear vibraciones y proyecciones.

BENEFICIOS

- ✓ Menos costo en explosivo
- ✓ Menor daño a la roca (menos dilución)
- ✓ Menos vibraciones y molestias
- ✓ Mayor seguridad
- ✓ Mejor fragmentación y rendimiento

3. MANEJO DE LA FRAGMENTACIÓN

- Dejar que el material se enfríe y asiente antes de moverlo.
- Romper los bloques muy grandes (si es necesario) con martillo o secundaria.
- Cargar y transportar con equipos adecuados.
- Clasificar por tamaños en la planta de trituración.

4. BUENAS PRÁCTICAS DE SEGURIDAD

- ✓ Capacitar al personal.
 - ✓ Usar EPP completo.
 - ✓ Verificar el área y evacuar antes del disparo.
 - ✓ Usar señales y avisos.
 - ✓ No fumar ni consumir alcohol.
 - ✓ Respetar el plan de voladura.
- Iconos de seguridad: Casco, Gafas, Protección auditiva, Guantes, Botas, Chaleco reflectivo.

5. CONTROL AMBIENTAL

- Regar vías y frentes para controlar el polvo.
- Usar retardos para reducir vibraciones y ruidos.
- Manejar adecuadamente residuos y lubricantes.
- Reforestar y conservar áreas intervenidas.

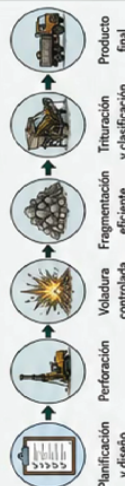
6. CONTROL DE CALIDAD

- Tomar muestras representativas.
- Verificar granulometría y resistencia.
- Ajustar el diseño de voladura según resultados.
- Asegurar que el producto cumpla con los requisitos del cliente.

7. REGISTRO Y MEJORA CONTINUA

- Llevar registros de cada voladura (diseño, carga, resultados).
- Evaluar resultados y ajustar el diseño.
- Aprender y mejorar en cada disparo.
- Cumplir siempre la normatividad minera y ambiental.

FLUJO GENERAL DEL PROCESO



RECUERDA

Una buena voladura no es la que más explosivo usa, sino la que mejor resultado da al menor costo y con seguridad.

Conoce tu roca, diseñla bien, carga lo necesario y dispara con responsabilidad.

Menos dilución = mejor calidad = más rentabilidad.

Minería responsable es minería legal, segura y sostenible.

¿Por qué es tan importante?

Porque la voladura es el primer paso del proceso productivo y condiciona directamente:

- Facilidad de cargue
- Transporte
- Trituración
- Consumo energético
- Desgaste de equipos
- Seguridad de la operación

¿Qué pasa si la voladura es deficiente?

Puede generar:

- Bloques sobredimensionados (sobretamaño)
- Exceso de finos
- Retrabajos
- Mayor consumo de combustible
- Mayor desgaste de trituradoras
- Vibraciones innecesarias
- Proyección de roca
- Inestabilidad del frente

¿Qué es fragmentación eficiente?

Es lograr que la roca se rompa al tamaño adecuado para la operación. Es decir:

- Ni demasiado grande
- Ni demasiado fina
- Sino al tamaño óptimo según el proceso

Ejemplo práctico

Si la roca sale demasiado grande:

- hay que romper nuevamente
- Se pierde tiempo
- Suben costos

Si sale demasiado fina:

- Se pierde material útil
- Aumenta polvo
- Baja rendimiento comercial



Importancia minera

Una buena gestión de voladura permite:

- Mejor productividad
- Mejor fragmentación
- Menor dilución
- Menor retrabajo
- Mayor control del frente



Importancia en seguridad

En una cantera legal, la voladura debe ejecutarse bajo control porque involucra riesgos críticos:

- Proyección de fragmentos
- Vibraciones
- Ruido

- Gases
- Inestabilidad del frente



Importancia ambiental

También ayuda a controlar:

- Emisiones de polvo,
- Vibraciones,
- Ruido,
- Daño innecesario del macizo rocoso.



Importancia económica

Una fragmentación eficiente reduce:

- Costo de trituración
- Consumo de energía
- Tiempo de ciclo
- Mantenimiento de equipos

Relación con explotación selectiva

Una mala voladura puede:

- Mezclar materiales
- Generar dilución
- Romper zonas alteradas con material útil

Por eso debe integrarse con:

planeación geológica + control del frente + calidad del producto.

¿Qué se debe hacer?

- Diseñar mallas de perforación adecuadas
- Controlar carga explosiva
- Reducir sobrefragmentación
- Evitar exceso de finos
- Ajustar voladura al tipo de roca

¿Por qué?

Una mala voladura genera demasiado fino, bloques sobredimensionados, más trituración, más energía y más costos.

La mejor voladura no es la que rompe más roca; es la que rompe la roca correctamente con seguridad y al menor costo posible porque la voladura es el inicio de la eficiencia de la cantera; si se hace mal, todo el proceso siguiente será más costoso y más riesgoso.

Figura 5.16. Voladura eficiente en una cantera



5.3.3. Lineamiento 5. Gestión del agua y control de sedimentos

5.3.3.1. Oportunidades de economía circular

- Recircular agua de lavado
- Recuperar finos sedimentados
- Reducir vertimientos
- Mejorar cumplimiento ambiental
- Disminuir el consumo de agua fresca

En una cantera, el agua puede ser un aliado o uno de los mayores problemas operacionales y ambientales, dependiendo de cómo se gestione. Si se controla adecuadamente, facilita la operación; si no se controla, genera erosión, arrastre de material, inestabilidad, contaminación y pérdidas económicas.

La gestión eficiente del agua consiste en entender cómo entra, circula, se infiltra, se acumula y sale el agua dentro de la operación minera, para manejarla de forma segura, técnica y ambientalmente responsable.

¿Cómo hacer una gestión eficiente del agua en una cantera? Ver figura 5.13.

La gestión eficiente del agua en una cantera consiste en controlar, conducir, tratar, reutilizar y descargar el agua de manera técnica, evitando que afecte la operación, la estabilidad geotécnica y el ambiente. Es decir, el agua debe ir por donde yo la controlo, no por donde ella quiera.

1

Entender el agua del sitio (diagnóstico hídrico)

Primero hay que entender de dónde viene y cómo se mueve.

Identificar:

- Aguas lluvias
- Escorrentía superficial
- Infiltración
- Nivel freático
- Manantiales o rezumes
- Drenajes naturales

Preguntas clave:

- ¿Por dónde entra el agua?
- ¿Dónde se acumula?
- ¿Dónde erosiona?
- ¿Dónde se infiltra?
- ¿Dónde sale?

¿Qué hacer?

- Levantamiento topográfico
- Evaluación hidrológica
- Estudio hidrogeológico
- Identificación de puntos críticos

2

Separar agua limpia de agua de operación

Principio crítico: no mezclar agua limpia (escorrentía externa no contaminada) con agua de proceso / cantera (con sólidos, finos o sedimentos).

3

¿Cómo?

Con:

- Cunetas perimetrales
- Canales de desvío
- Coronas hidráulicas

Controlar escorrentía superficial

El agua de lluvia debe manejarse.

¿Qué hacer?

Instalar:

- Cunetas laterales
- Canales revestidos
- Bajantes controladas
- Disipadores de energía

¿Objetivo?

Evitar:

- Erosión
- Socavación
- Inundación

4

Controlar sedimentos

El agua arrastra material fino.

Ese material termina en:

- Drenajes
- Quebradas
- Sedimentadores

Figura 5.17. Gestión eficiente de agua en una cantera

CONTROLAR – CONducir – TRatar – REutilizar – DESCARGAR RESPONSABLEMENTE

EL AGUA DEBE IR POR DONDE YO LA CONTROLLO, NO POR DONDE ELLA QUIERA



¿Qué hacer?

Implementar:

- Trampas de sedimentos: captura rápida.
- Pozas de sedimentación: decantación de sólidos.
- Check dams: pequeñas barreras de control.
- Geotextiles: filtración.

Objetivo

Reducir: turbidez + SST.

5

Drenar frentes y taludes

El agua acumulada se desestabiliza.

¿Qué hacer?

- Drenes internos
- Subdrenes
- Cunetas de banco
- Drenes horizontales

¿Evita qué?

- Presión de poros
- Saturación
- Deslizamientos

6

Controlar nivel freático

Si la cantera intercepta agua subterránea.

Opciones

- Bombeo controlado
- Pozos de alivio
- Drenaje pasivo

Importancia

Reduce:

- Inundación
- Inestabilidad

7

Reutilizar el agua

Muy importante reusar agua para:

- Control de polvo
 - Lavado de materiales
 - Riego de vías
 - Procesos
- Beneficio: Menor captación externa.

8

Proteger taludes y superficies

Evitar erosión.

¿Cómo?

- Revegetación
- Geomantas
- Escollera
- Canales revestidos

9

Controlar descargas

Antes de descargar evaluar:

- Turbidez
- SST
- Ph
- Aceites y grasas (si aplica)

Nunca descargar agua cargada de sólidos.

10

Monitorear

Sistema dinámico. Entonces, monitorear:

- Lluvias
- Sedimentadores
- Drenajes
- Turbidez
- Erosión
- Infiltraciones

¿Qué se debe hacer?

- Construir canales perimetrales
- Separar aguas limpias de aguas de proceso
- Usar sedimentadores
- Recircular agua de lavado
- Evitar descargas con sólidos suspendidos

¿Por qué?

El principal impacto ambiental de una cantera suele estar asociado a turbidez, sedimentos, arrastre de finos y afectación de drenajes naturales.

Figura 5.18. Esquema simple de gestión del agua



5.4. ETAPA DE BENEFICIO O PROCESAMIENTO EN CANTERA

La etapa de beneficio o procesamiento en una cantera consiste en transformar el material extraído en productos útiles mediante diversas operaciones como trituración, molienda, clasificación y limpieza. El objetivo es obtener un producto final de alta calidad que cumpla con las especificaciones del mercado y sea apto para su uso en construcción, industria u otras aplicaciones.

Importancia

Esta fase es fundamental porque determina la calidad y la utilidad del producto final, influye en los costos de producción y en la competitividad de la cantera. Un buen proceso asegura eficiencia, minimiza pérdidas y maximiza el valor del material extraído.

Aspectos a tener en cuenta

- Control de calidad del material: asegurarse de que cumple con las especificaciones requeridas.
- Selección de equipos adecuados: para triturar, clasificar y limpiar eficientemente.
- Optimización de procesos: para reducir costos y aumentar la productividad.
- Gestión de residuos: manejo adecuado de escombros y materiales no útiles.
- Condiciones de seguridad: protección del personal durante las operaciones.
- Impacto ambiental: minimizar emisiones, polvo y uso de agua.

Transformar el material extraído en productos comerciales con especificación técnica. Incluye trituración, clasificación, lavado, zarandeo, acopio y despacho.

Figura 5.19. Procesamiento en cantera

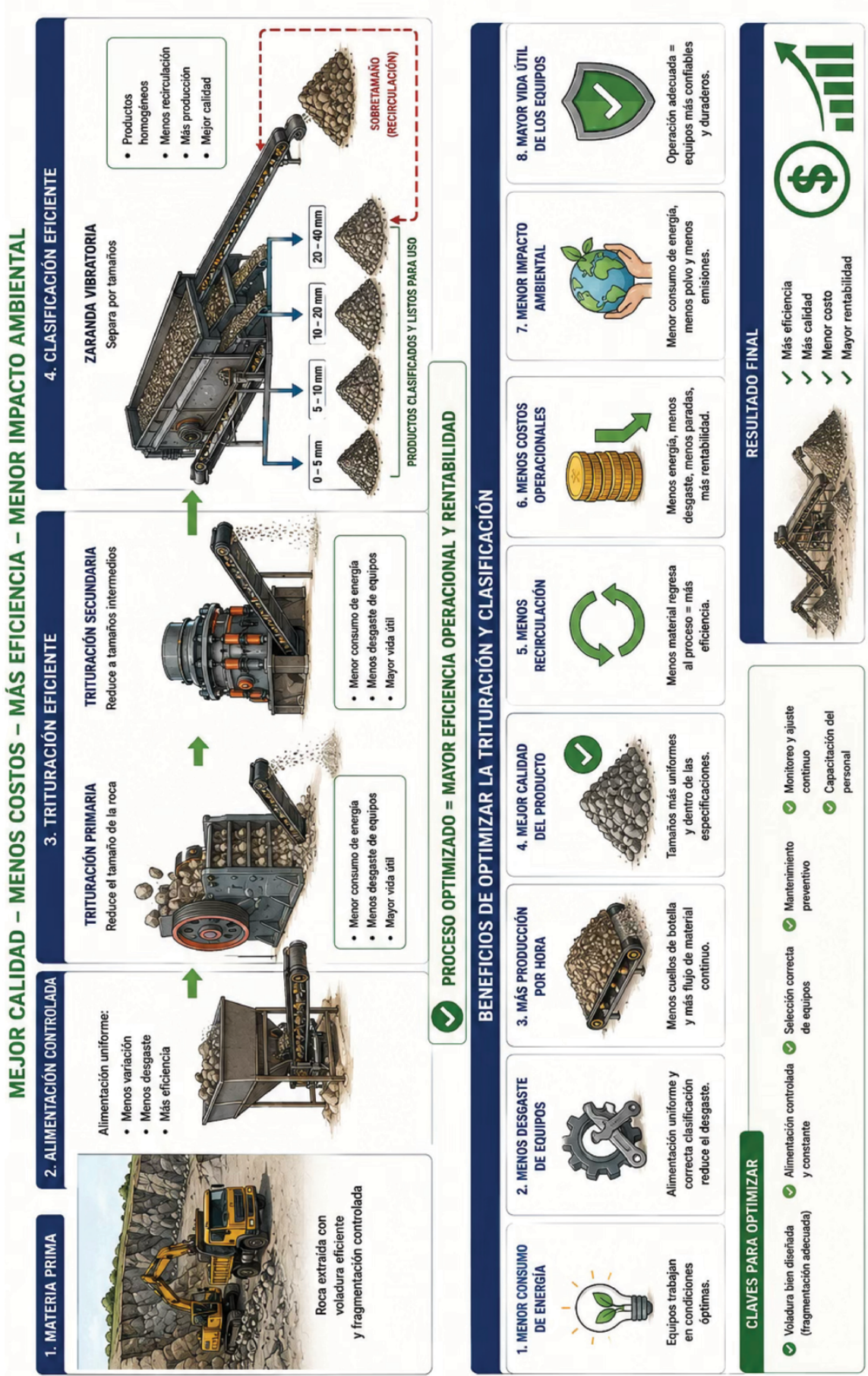
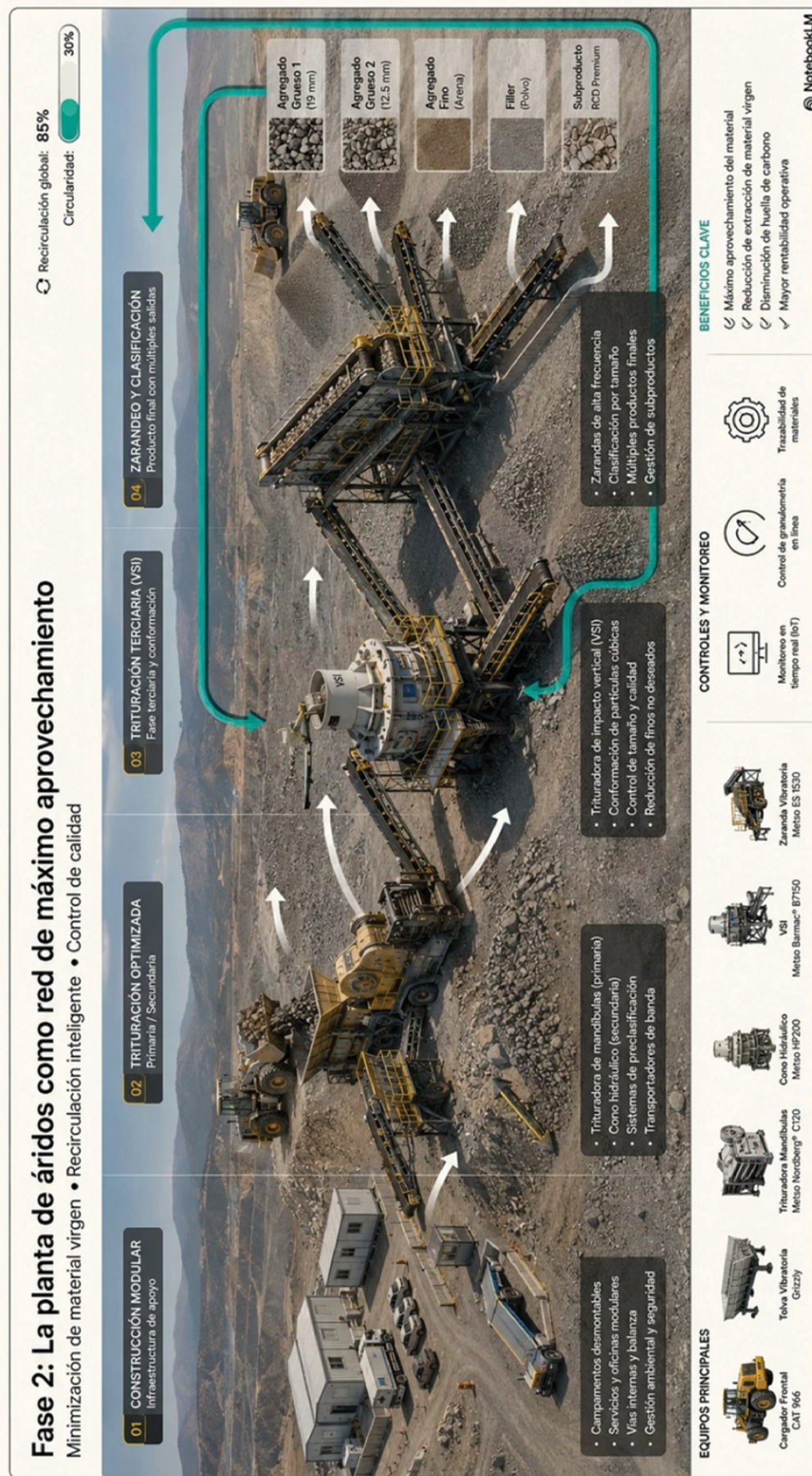


Figura 5.20. Equipos de procesamiento en cantera



5.4.1. Lineamiento 6. Optimización de trituración y clasificación

5.4.1.1. Oportunidades de economía circular

- Menor consumo energético
- Menor generación de finos
- Mayor producción vendible
- Menor desgaste de mandíbulas, conos y mallas
- Mejor calidad de producto

En una cantera, extraer roca es solo el inicio; el verdadero valor del negocio se genera cuando ese material se transforma eficientemente en productos que cumplan especificaciones técnicas y demanda comercial. La trituración y clasificación son el corazón del procesamiento en cantera, porque allí se define la calidad del producto final, la productividad de la planta, el consumo energético y buena parte de los costos operacionales.

¿Qué significa optimizar?

Optimizar significa hacer que el proceso produzca más, con mejor calidad, menor consumo de energía, menos desgaste y menos pérdidas. No es simplemente triturar más, es triturar correctamente.

¿Qué se busca?

Una operación optimizada debe lograr:

- Tamaño de producto requerido
- Granulometría estable
- Menor generación de finos innecesarios
- Mínima recirculación
- Mayor capacidad de producción
- Menor costo por tonelada producida

Ejemplo práctico

Si una trituradora está mal ajustada:

- El producto sale fuera de especificación
- La zaranda rechaza más material
- Ese material vuelve al circuito
- Aumenta recirculación
- Sube el consumo energético

Es decir: más costo para producir lo mismo.

¿Qué se debe hacer?

- Ajustar trituradoras al tamaño requerido
- Controlar zarandas
- Separar productos por granulometría
- Retornar sobretamaños al circuito
- Evitar retritución innecesaria

¿Por qué?

Cada pasada por trituradora consume energía, genera polvo, desgaste y finos.

¿Qué variables se deben controlar?

La optimización depende de controlar:



Alimentación

- tamaño máximo de entrada
- uniformidad
- humedad
- presencia de finos o arcillas



Trituración

- tipo de trituradora
- apertura (CSS)
- relación de reducción
- desgaste de revestimientos
- capacidad



Clasificación

- tamaño de malla
- inclinación
- amplitud
- frecuencia
- cegamiento de mallas



Recirculación

- retorno de sobretamaños
- carga circulante
- eficiencia del circuito

No se trata de romper roca indiscriminadamente; se trata de producir exactamente el tamaño que el mercado necesita, con la menor pérdida posible. Por eso, optimizar trituración y clasificación no es solo un tema de planta; es una decisión técnica que mejora rentabilidad, calidad del producto y sostenibilidad operacional.

Figura 5.21. Procesamiento en cantera

FICHA TÉCNICA: OPTIMIZACIÓN DE TRITURACIÓN Y CLASIFICACIÓN EN CANTERA

OBJETIVO

Producir materiales de calidad con la granulometría requerida, minimizando costos, consumo de energía, desgaste de equipos y reutilización innecesaria.

BENEFICIOS

- ✓ Mejor calidad del producto
- ✓ Menos consumo de energía
- ✓ Menos desgaste de equipos
- ✓ Menos paradas y mantenimiento
- ✓ Mayor producción
- ✓ Menor costo por tonelada

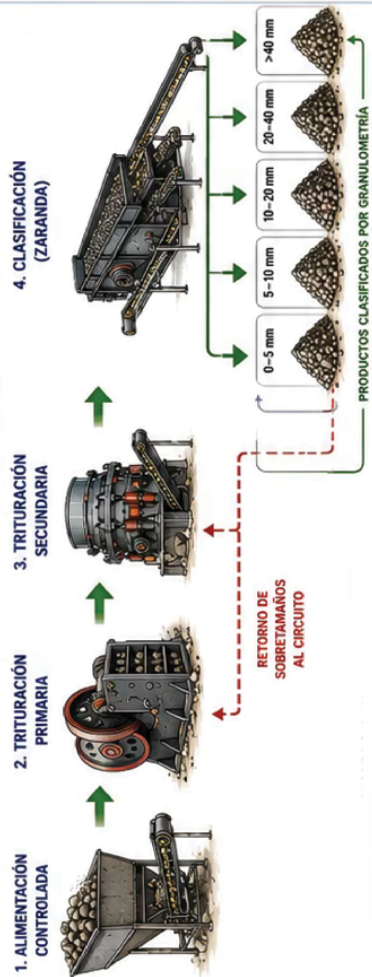
VARIABLES CLAVE

VARIABLE	DESCRIPCIÓN / CONTROL
Alimentación	Tamaño máximo, humedad, composición, forma del material.
Tamaño de salida	Según especificación del producto (0-5-10-10-20-40-60 mm, etc.).
Capacidad	Toneladas por hora (TPH). Ajuste según demanda.
Ajuste de trituradora	Apertura de descarga (CSS) adaptada al producto requerido.
Zarandas	Inclinación, amplitud, velocidad, condición de mallas.
Recirculación	% de retorno de sobretamaños al circuito de trituración.
Humedad	Afecta la clasificación y la producción. Controlar en rango óptimo.
Granulometría	Distribución de tamaños del producto final.
Desgaste	Estado de martillos, mandíbulas, revestimientos, mallas.
Consumo energético	kWh/ton. Monitoreo y optimización continua.

CONDICIONES OPERACIONALES

- Alimentación uniforme y continua.
- No sobrealimentar los equipos.
- Material libre de elementos metálicos o extraños.
- Humedad dentro del rango recomendado.
- Mantenimiento preventivo al día.
- Monitoreo constante de parámetros.

ESQUEMA DEL PROCESO OPTIMIZADO



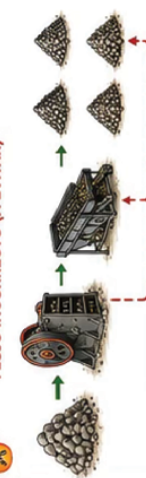
PARÁMETROS DE CONTROL Y RANGOS RECOMENDADOS

PARÁMETRO	RANGO RECOMENDADO	CÓMO CONTROLAR	EFFECTO EN EL PROCESO
Tamaño máximo de alimentación	80% del tamaño de boca de la trituradora	Control en frente de carga	Evita atoros y desgaste excesivo
Ajuste de trituradora (CSS)	Según producto requerido (p.e. 20 - 40 mm)	Medir y ajustar regularmente	Define el tamaño de salida
Carga de la trituradora	70% – 90% de la capacidad	Regular velocidad de alimentador	Evita sobrecarga y paradas
Inclinación de zaranda	15° – 20° (según material)	Ajuste mecánico	Mejora separación
Amplitud de zaranda	4 – 8 mm	Ajuste del vibrador	Mejora eficiencia de cribado
Velocidad de zaranda	800 – 1200 rpm	Ajuste del vibrador	Evita engastamiento de mallas
Porcentaje de retorno	10% – 40% (según material)	Control de flujo de retorno	Optimiza producción y costos
Humedad del material	3% – 8% Ideal	Monitoreo y control de agua	Evita pagado y baja producción
Granulometría del producto	Según especificación	Muestreo y análisis	Asegura calidad final
Consumo energético	1.0 – 2.5 kWh/ton (según planta)	Monitoreo de motores	Indicador de eficiencia
Desgaste de equipos	Según horas de operación	Inspecciones periódicas	Previene fias y sobrecostos

FLUJO CORRECTO DEL MATERIAL



FLUJO INCORRECTO (A EVITAR)



INDICADORES DE DESEMPEÑO (KPIs)

Producción (TPH)	% Retorno	Consumo energético	Granulometría cumple especificación	Disponibilidad de equipos	Costo por tonelada
Toneladas por hora obtenidas.	Porcentaje de material que regresa al circuito.	kWh por tonelada producida.	% de producto dentro de especificaciones.	Horas operativas vs horas programadas.	Costos totales / toneladas producidas.

ACCIONES CLAVE

1 AJUSTAR TRITURADORAS

- Ajustar la abertura de salida (CSS) según el tamaño de producto deseado.
- Verificar desgaste de mandíbulas, conos, martillos y revestimientos.



2 CONTROL ZARANDAS

- Ajustar inclinación, amplitud y velocidad.
- Revisar tensión y condición de mallas.
- Evitar mallas cegadas o dañadas.



3 SEPARAR PRODUCTOS POR GRANULOMETRÍA

- Clasificar correctamente para cumplir especificaciones.
- Asegurar que cada fracción tenga su acopio separado.



4 RETORNAR SOBRETAMAJOS AL CIRCUITO

- El material que no cumple tamaño vuelve a la trituradora.
- Evita acumulación de material fuera de especificación.



5 EVITAR RETRITURACIÓN INNECESARIA

- No triturar material que ya cumple especificación.
- Controlar la clasificación para reducir vueltas innecesarias.



RECOMENDACIONES FINALES

- Monitorear, medir y ajustar constantemente.
- Trabajar con alimentación uniforme.
- Mantener equipos en buen estado.
- Capacitar al personal.
- Llevar registros diarios de operación.



5.4.2. Lineamiento 7. Valorización de finos, rechazos y subproductos

En una operación minera o una cantera, no todo el material extraído termina convertido en producto principal. Durante la extracción, trituración, clasificación y procesamiento se generan finos, rechazos granulométricos y materiales secundarios que muchas veces se consideran residuos, cuando en realidad pueden representar una oportunidad técnica y económica.

La valorización consiste en identificar cuándo esos materiales pueden dejar de ser un desecho para convertirse en un recurso útil, siempre que se demuestre técnica, ambiental y comercialmente su aprovechamiento.

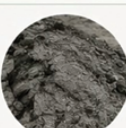
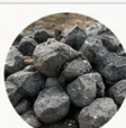
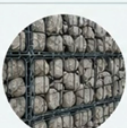
Preguntas que debe responder la valorización

- ¿Sirve técnicamente?
- ¿Es ambientalmente seguro?
- ¿Tiene mercado?
- ¿Requiere tratamiento?
- ¿Es rentable?



Catálogo de valorización

De pasivo ambiental a producto comercial

 SUBPRODUCTO	 DESTINO TRADICIONAL (LINEAL)	 APLICACIÓN CIRCULAR
 Polvo de piedra caliza (< 75 µm) Material fino proveniente de la trituración de roca caliza.	 Escombrera Disposición en botaderos o escombreras.	 Filler para asfalto/cemento (EN 13043) Mejora la trabajabilidad y durabilidad de mezclas asfálticas y cementicias.
 Arena Manufacturada (0–4.75 mm) Arena obtenida del proceso de trituración y clasificación.	 Residuo de trituración Material sin uso específico o de bajo aprovechamiento.	 Concreto estructural (NTC 174) Sustitución parcial de arena natural en concretos estructurales.
 Limos y arcillas de poza Finos plásticos generados en el tratamiento de aguas y lodos.	 Lodo descartado Disposición en lagunas o celdas de sedimentación.	 Insumo cerámico (ladrillo/teja) Aprovechamiento en la fabricación de productos cerámicos.
 Rechazo grueso (> 100 mm) Fragmentos grandes de roca sin uso directo en la operación.	 Enterrado Disposición final en rellenos o zonas de relleno.	 Rajón para gaviones (INVIAS) Uso en obras de contención, estabilización de taludes y protección de cauces.

¿Qué son estos materiales?



Finos

Material de granulometría fina generado en:

- trituración,
- zarandeo,
- lavado,
- manipulación.

Ejemplo: arena fina, polvo de trituración, lodos secos.



Rechazos

Material que no cumple especificación inmediata.

Ejemplo:

- sobretamaños,
- material fuera de granulometría,
- mezcla contaminada con arcilla.



Subproductos

Material secundario con potencial de aprovechamiento.

Ejemplo:

- arenas especiales,
- agregados secundarios,
- material para rellenos,
- material para restauración.

¿Por qué es importante?

Porque en muchas canteras ocurre esto:

- Se extrae gran volumen de material
- Solo una parte cumple especificaciones comerciales
- El resto termina acumulado en botaderos o patios

¿Qué materiales pueden valorizarse?

- Finos de trituración
- Arenas lavadas
- Lodos secos
- Sobretamaños
- Roca alterada

- Material fuera de granulometría
- Polvo de roca

Condición clave

No todo subproducto sirve directamente. Debe cumplir:

- Granulometría
- Plasticidad
- Resistencia
- Limpieza
- Ausencia de contaminantes
- Estabilidad física
- Compatibilidad con el uso final

Usos posibles

Material	Uso potencial
Finos de trituración	Morteros, estabilización, prefabricados, rellenos
Rechazos granulométricos	Subbases, afirmados, caminos internos
Sobretamaños	Enrocados, gaviones, control de erosión
Lodos deshidratados	Rellenos, restauración, mezclas estabilizadas
Suelo orgánico	Cierre y revegetación
Roca baja calidad	Bermas, rellenos, conformación paisajística

La mejor cantera no es la que más extrae; es la que mejor aprovecha cada tonelada del recurso. Por eso, valorizar finos, rechazos y subproductos no es solo una estrategia ambiental; es una decisión técnica, operativa y económica que mejora la competitividad de la cantera.



Figura 5.22. Criterios para la definición de fino, rechazos y subproductos



5.4.3. Lineamiento 8. Control de polvo y emisiones

5.4.3.1. Oportunidades de economía circular

- Menor pérdida de material fino.
- Mejor ambiente laboral.
- Menor conflicto social.
- Mayor eficiencia operativa.

Toda actividad en una cantera genera movimiento de material, y cada vez que movemos, trituramos, cargamos o transportamos roca, también generamos polvo y emisiones. Por eso, controlar estos impactos no es un tema opcional; es parte esencial de una operación minera técnica, segura y ambientalmente responsable.

El control de polvo y emisiones busca prevenir, reducir y monitorear la liberación de partículas y contaminantes al ambiente, protegiendo la salud de los trabajadores, las comunidades cercanas, los equipos y el cumplimiento normativo.

¿Por qué es tan importante?

Porque el polvo no es solo suciedad visible.

Técnicamente puede afectar:

- Calidad del aire
- Salud respiratoria, partículas finas como pm10 y pm2.5 Son especialmente críticas porque pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio
- Visibilidad operacional
- Desempeño de equipos
- Ambiente circundante

Y las emisiones pueden generar:

- Afectación comunitaria
- Conflictos sociales
- Incumplimientos regulatorios

Principales fuentes en cantera

Las mayores fuentes son:

- Perforación
- Voladura
- Trituración
- Zarandeo
- Transferencia entre bandas
- Cargue y descargue
- Tránsito de volquetas
- Acopios expuestos
- Superficies secas
- Combustión de maquinaria

¿Qué se debe hacer?

- Humectación controlada
- Encapsulamiento de bandas
- Cubrir puntos de transferencia
- Barreras vivas
- Mantenimiento de vías
- Control de velocidad de vehículos

¿Por qué?

El polvo afecta salud, equipos, comunidades y cumplimiento ambiental.

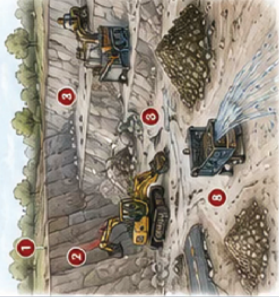
Una cantera eficiente no solo controla toneladas producidas; también controla las partículas que libera al ambiente. Por eso, el control de polvo y emisiones no debe verse como un costo adicional, sino como una herramienta clave para proteger la operación, las personas y la sostenibilidad del proyecto.



Figura 5.23. Control de polvo y emisiones

¿QUÉ SE DEBE HACER Y CÓMO?

El control de polvo y emisiones protege la salud, el ambiente, la maquinaria y la productividad, cumpliendo la normativa y generando buena relación con la comunidad.

1. ¿QUÉ SE DEBE HACER?		2. ¿CÓMO HACERLO EN LA CANTERA?		3. FUENTES COMUNES DE POLVO Y EMISIONES	
1	Identificar las fuentes de polvo y emisiones.	2.1 HUMECTACIÓN DE VÍAS	2.2 CONTROL EN VOLADURAS	2.3 RIEGO EN FRENTE DE CARGA Y TRITURACIÓN	
2	Prevenir la generación de polvo en las actividades.	 • Riego con agua en vías internas, frentes de trabajo y patios. • Frecuencia según clima, tráfico y velocidad del viento. • Usar camiones cisterna con sistema de aspersión.	 • Usar explosivos adecuados y cargar correctamente. • Iniciar riego antes y después de la voladura. • Usar retardos adecuados para minimizar emisión de polvo.	 • Riego directo en frentes de carga. • Riego en tolvas, trituradoras y zarandas. • Instalar boquillas de niebla o aspersores.	
3	Controlar el polvo en su origen.	2.4 CONTROL EN PUNTOS DE TRANSFERENCIA	2.5 TRANSPORTE DE MATERIAL	2.6 ESTABILIZACIÓN DE SUPERFICIES	
4	Controlar el polvo en la vía de transporte.	 • Encerrar o cubrir puntos de caída. • Instalar faldones, sellos y cortinas de goma. • Usar sistemas de aspersión o niebla.	 • Cubrir la carga con lonas. • Evitar sobrecarga. • Velocidad máxima en vías (ej. 20 km/h).	 • Estabilizar taludes y áreas descubiertas. • Usar hidrosiembra, mulch, geotextiles o revegetación. • Evitar suelos sueltos.	
5	Controlar el polvo en puntos de transferencia.	2.7 BARRERAS NATURALES Y CORTINAS ROMPEVIENTO	2.8 USO EFICIENTE DEL AGUA	2.9 MANTENIMIENTO DE EQUIPOS Y VÍAS	
6	Mantener buenas condiciones de orden y limpieza.	 • Plantar barreras vegetales alrededor de la cantera. • Instalar mallas rompedoriento en zonas críticas.	 • Usar sólo el agua necesaria. • Verificar boquillas y sistemas para evitar desperdicios. • Reutilizar agua cuando sea posible.	 • Revisión periódica de frenos, motores y escape. • Mantener vías niveladas, compactadas y sin baches. • Lubricar equipos y sistemas de transporte.	
7	Monitorear y evaluar.	2.10 PROTECCIÓN DE TRABAJADORES	BUENAS PRÁCTICAS GENERALES		
8	Capacitar y concientizar al personal.	 • Entregar EPP adecuado (mascarillas N95 o superiores). • Limitar exposición en zonas de mayor emisión. • Promover pausas y buena ventilación en cabinas.	 • Planificar las actividades para reducir movimientos innecesarios. • Mantener orden y limpieza constante en la operación. • Evitar acumulación de material fino en patios y tolvas. • Usar sistemas de aspiración eficientes (niebla fina preferible). • Coordinar con las condiciones climáticas (viento, sequedad).		
CONSIDERACIONES CLAVE					
	Más polvo en clima seco, altas temperaturas y vientos fuertes.		El riego oportuno es la medida más efectiva y económica.		La vegetación reduce polvo y mejora el paisaje.
	La constancia y disciplina garantizan resultados efectivos.				
6. NORMATIVA DE REFERENCIA (Ejemplos)					
• Normativa ambiental nacional sobre calidad del aire y emisiones. • Límites permisibles de material particulado (PM10, PM2.5). • Guías de buenas prácticas ambientales para actividades extractivas. • Requisitos de EPP y seguridad ocupacional.					

5.5. ETAPA DE CIERRE Y RESTAURACIÓN

La etapa de cierre y restauración en una cantera consiste en finalizar las actividades de extracción, cerrar las áreas de explotación de manera segura y rehabilitar el entorno natural. Esto incluye la revegetación, control de erosión y recuperación del paisaje para reducir el impacto ambiental.

El cierre de una cantera no debe entenderse como el final de la actividad minera, sino como el inicio de la recuperación del territorio intervenido. Una operación técnicamente responsable no termina cuando se agota el material; termina cuando el área queda en condiciones seguras, estables y ambientalmente recuperadas.

La etapa de cierre y restauración busca devolver funcionalidad al terreno, controlar riesgos geotécnicos y ambientales, y garantizar que el espacio pueda tener un nuevo uso compatible con las condiciones del entorno.

Cuando hablamos del cierre de una cantera, muchas veces se piensa equivocadamente que simplemente se trata de detener la extracción y abandonar el área. Técnicamente, eso no es un cierre; eso sería dejar un pasivo ambiental y un riesgo de seguridad. Por lo tanto, el cierre no debe esperar al final. Debe hacerse progresivamente, dejando el área estable, segura y con uso futuro definido.

Un cierre minero responsable es un proceso técnico planificado que busca dejar el área física, geotécnica, hidráulica, ambiental y socialmente estable para un uso futuro seguro y sostenible, es decir, en devolverle funcionalidad al territorio, no simplemente dejar de operar.

¿Qué significa realmente cerrar una cantera?

Significa intervenir el área para corregir y estabilizar todo lo que la explotación modificó:

- Relieve
- Taludes
- Drenajes
- Suelos
- Cobertura vegetal
- Seguridad del sitio

¿Por qué debe planearse por componentes?

Porque una cantera no tiene un solo problema al cierre. Tiene múltiples frentes que deben manejarse simultáneamente:

- Geotécnicos
- Hidráulicos
- Ambientales
- Operacionales
- Sociales

Ejemplo:

No sirve revegetar si:

- El talud sigue inestable
- El agua erosiona
- El suelo no soporta vegetación.

Por eso el cierre se ejecuta por componentes integrados como se ilustra en la figura 5.20.

Importancia: Es fundamental para minimizar daños al medio ambiente, garantizar la seguridad de la zona y promover la sostenibilidad a largo plazo. Una correcta restauración ayuda a devolver el ecosistema a su estado natural o adaptado, permitiendo el uso futuro del terreno.

Figura 5.24. Aspectos clave para un cierre y restauración exitosa en canteras

DEJAR EL ÁREA ESTABLE, SEGURA Y CON USO FUTURO DEFINIDO

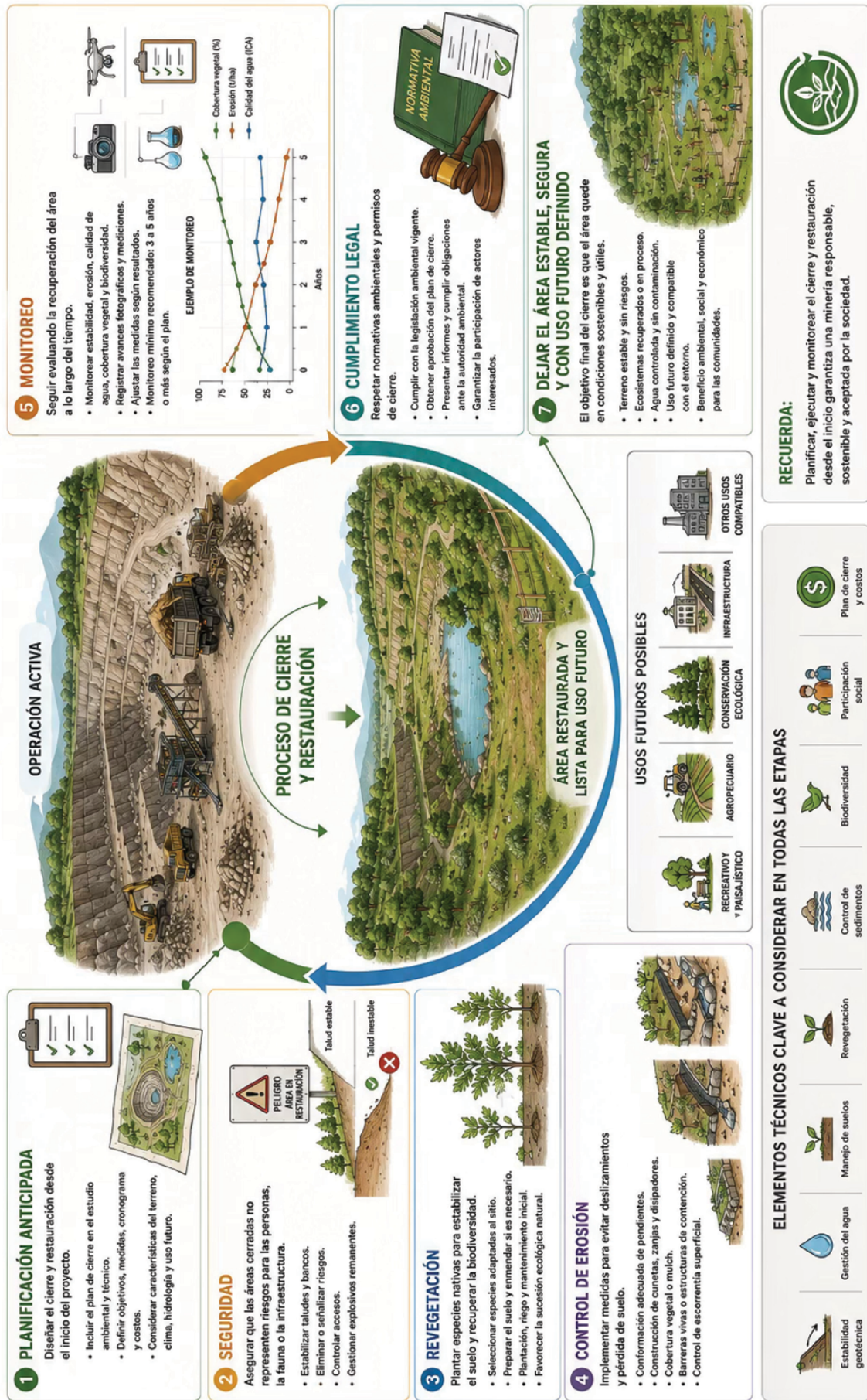


Figura 5.25. Componentes del cierre de una cantera

Un cierre responsable devuelve estabilidad, seguridad y vida al territorio

¿QUÉ ES UN CIERRE DE CANTERA?		COMPONENTE	¿QUÉ INCLUYE?	¿CÓMO HACERLO?				RESULTADO ESPERADO				
Es el conjunto de acciones técnicas, ambientales y sociales que se ejecutan al finalizar la operación minera para dejar el área estable, segura y con un uso futuro definido, minimizando impactos y promoviendo la recuperación del ecosistema. OBJETIVO Dejar el área en condiciones estables, seguras, ambientalmente recuperadas y socialmente aceptadas, para un uso futuro sostenible.	1. PLANIFICACIÓN Diseñar el cierre desde el inicio del proyecto, considerando aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos. 2. EJECUCIÓN Implementar las medidas de cierre y restauración según lo planificado. 3. MONITOREO Evaluar y verificar el progreso y efectividad de las acciones ejecutadas. 4. ENTREGA Y SEGUIMIENTO Entregar el área para el uso futuro definido y seguir monitoreando según lo establecido.	1. ESTABILIDAD GEOTÉCNICA	• Estabilidad de taludes • Estabilidad de bancos y frentes • Control de riesgos geotécnicos	1	Evaluar la estabilidad geotécnica del área.	2	Rediseñar taludes con pendientes estables.	3	Remover bloques inestables y material suelto.	4	Conformar y compactar superficies.	Taludes estables, sin riesgos de deslizamiento.
		2. GESTIÓN DEL AGUA	• Drenaje superficial • Control de escorrentía • Manejo de aguas sedimentadas • Prevención de contaminación	1	Diseñar drenajes para captar y conducir aguas.	2	Construir cunetas, zanjas y disipadores de energía.	3	Construir/adequar pozos de sedimentación.	4	Monitorear calidad del agua y mantener obras.	Agua controlada, sin erosión ni contaminación.
		3. CONTROL DE EROSIÓN	• Protección de suelos • Control de erosión hídrica y eólica • Estabilización de superficies	1	Cubrir superficies expuestas con material adecuado.	2	Construir barreras vivas, fajinas o trinchos.	3	Instalar geomembranas, geotextiles o enrocados en zonas críticas.	4	Realizar mantenimiento periódico.	Menor erosión, suelos protegidos y superficies estables.
		4. RESTAURACIÓN DEL SUELO	• Manejo de suelo orgánico • Reposición de cobertura • Acondicionamiento del suelo	1	Rescatar y almacenar suelo orgánico (capa fértil).	2	Extender suelo orgánico en las áreas a restaurar.	3	Mejorar el suelo (enmiendas orgánicas, fertilizantes según necesidad).	4	Nivelar y preparar el terreno.	Suelos recuperados para soportar vegetación.
		5. REVEGETACIÓN	• Selección de especies nativas • Siembra y plantación • Mantenimiento de la cobertura vegetal	1	Seleccionar especies nativas adaptadas a la zona.	2	Realizar siembra o plantación en época adecuada.	3	Implementar riego, mulch y protección inicial.	4	Realizar mantenimiento hasta el establecimiento de la vegetación.	Cobertura vegetal estable y aumento de biodiversidad.
		6. MANEJO DE RESIDUOS Y MATERIALES	• Retiro de equipos y estructuras • Disposición adecuada de residuos • Limpieza general del área	1	Retirar maquinaria, estructuras y materiales no reutilizables.	2	Clasificar y disponer adecuadamente los residuos.	3	Transportar a sitios autorizados.	4	Dejar el área limpia y libre de residuos.	Área limpia, sin residuos ni pasivos ambientales.
		7. USO FUTURO DEL ÁREA	• Definición del uso futuro • Adecuación para el uso • Integración con la comunidad	1	Definir el uso futuro del área (agrícola, recreativo, ecológico, forestal, etc.).	2	Adecuar el área según el uso definido.	3	Implementar infraestructura mínima necesaria (fenderos, cercas, señalización, etc.).	4	Entregar el área y promover su uso responsable.	Área con uso futuro definido, productivo y sostenible.
CRITERIOS DE ÉXITO DEL CIERRE • Estabilidad física garantizada • Control de erosión y calidad del agua • Cobertura vegetal estable • Seguridad para personas y fauna • Uso futuro definido y beneficioso • Cumplimiento legal y aceptación social		CRITERIOS DE ÉXITO DEL CIERRE • Estabilidad física garantizada • Control de erosión y calidad del agua • Cobertura vegetal estable • Seguridad para personas y fauna • Uso futuro definido y beneficioso • Cumplimiento legal y aceptación social		BENEFICIOS DE UN CIERRE BIEN EJECUTADO • Reduce impactos ambientales • Mejora la imagen y relación social • Cumple la normativa y evita sanciones • Genera valor a largo plazo				BENEFICIOS DE UN CIERRE BIEN EJECUTADO • Reduce impactos ambientales • Mejora la imagen y relación social • Cumple la normativa y evita sanciones • Genera valor a largo plazo				
MONITOREO Y SEGUIMIENTO (TRANSVERSAL A TODOS LOS COMPONENTES) • Monitorear estabilidad de taludes y obras. • Monitorear calidad del agua y del suelo. • Evaluar el crecimiento y cobertura vegetal. • Registrar y reportar resultados. • Ajustar acciones cuando sea necesario.		MONITOREO Y SEGUIMIENTO (TRANSVERSAL A TODOS LOS COMPONENTES) • Monitorear estabilidad de taludes y obras. • Monitorear calidad del agua y del suelo. • Evaluar el crecimiento y cobertura vegetal. • Registrar y reportar resultados. • Ajustar acciones cuando sea necesario.										
PRINCIPIOS CLAVE • Prevención y minimización de impactos • Estabilidad física y química • Seguridad para las personas y el entorno • Recuperación ambiental y paisajística • Participación y comunicación • Cumplimiento legal y normativo		PRINCIPIOS CLAVE • Prevención y minimización de impactos • Estabilidad física y química • Seguridad para las personas y el entorno • Recuperación ambiental y paisajística • Participación y comunicación • Cumplimiento legal y normativo										

¿Qué busca cada componente?

Cada componente responde a un riesgo específico:

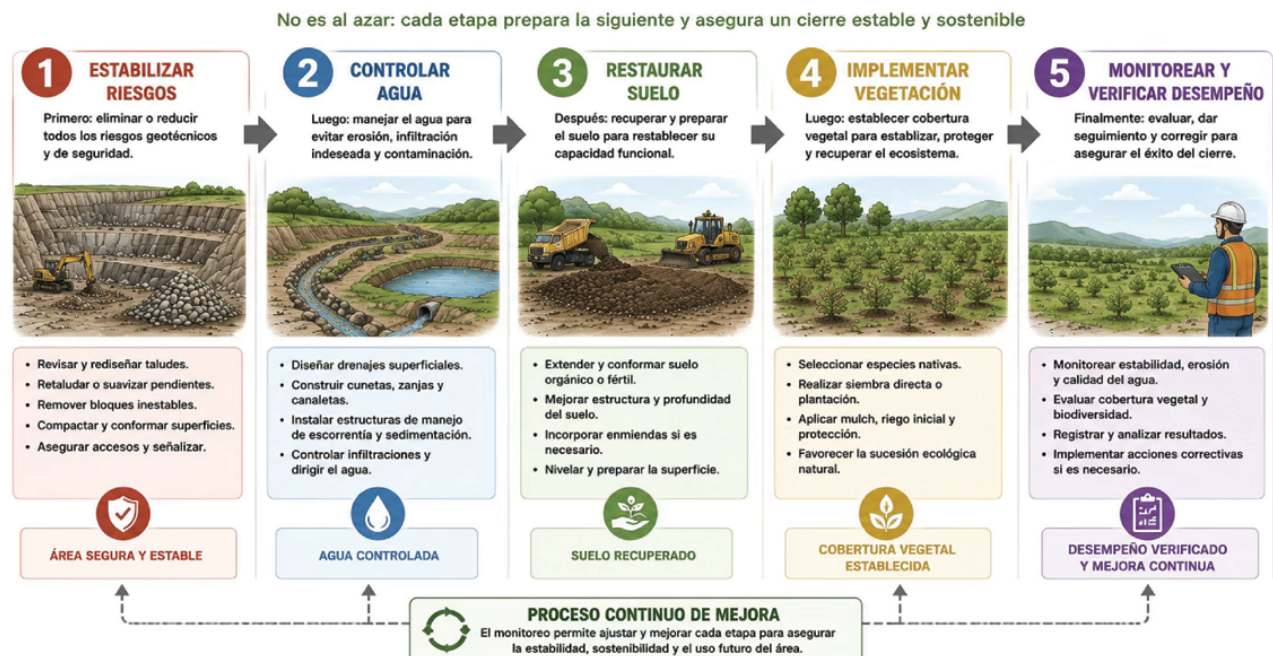
- 
Estabilidad geotécnica
 Para evitar:
 - deslizamientos
 - caída de bloques
 - colapso de bancos
- 
Gestión del agua
 Para controlar:
 - escorrentía
 - erosión
 - sedimentación
 - contaminación
- 
Control de erosión
 Para evitar:
 - pérdida de suelo
 - cárcavas
 - degradación superficial
- 
Recuperación de suelos
 Para restablecer la capacidad biológica y funcional.
- 
Revegetación
 Para:
 - estabilizar
 - recuperar biodiversidad
 - mejorar el paisaje
- 
Manejo de residuos
 Para eliminar:
 - chatarra
 - combustibles
 - estructuras abandonadas
 - residuos peligrosos
- 
Definición de uso futuro
 Porque el terreno debe quedar con un propósito:
 - ecológico
 - productivo
 - recreativo
 - paisajístico
 - comunitario

Este esquema muestra que un cierre exitoso no depende de una sola acción, sino de varios componentes técnicos que deben ejecutarse en orden y de manera integrada.

¿Cómo debe ejecutarse?

Con una secuencia lógica. No es al azar. Ver Figura 5.21.

Figura 5.26. Pasos para un cierre y restauración adecuada



5.5.1. Lineamiento 9. Cierre progresivo y reconformación geomorfológica

5.5.1.1. Oportunidades de economía circular

- Usar estériles para reconformación
- Usar lodos secos como parte de rellenos, si cumplen
- Reutilizar suelo orgánico almacenado
- Convertir el área en reservorio, parque, zona forestal, agrícola o infraestructura comunitaria, según viabilidad

Una cantera responsable no espera al final de la vida útil para empezar a recuperar el terreno. La restauración eficiente debe comenzar mientras la operación aún está activa, mediante un enfoque de cierre progresivo que reduzca riesgos, costos e impactos ambientales acumulados.

Dentro de este proceso, la reconformación geomorfológica es una de las herramientas más importantes, porque permite reconstruir formas del terreno física e hidráulicamente estables, compatibles con el paisaje y con un uso futuro definido.

¿Qué es cierre progresivo?

Es la recuperación planificada y gradual de las áreas que ya no seguirán siendo explotadas, mientras otras zonas continúan operando. En términos prácticos, en lugar de dejar toda la cantera impactada hasta el final, se recupera por etapas.



¿Qué es la reconformación geomorfológica?

Es el rediseño técnico del relieve intervenido para devolverle estabilidad y funcionalidad.

No significa “rellenar huecos sin criterio”. Significa reconstruir el terreno considerando:

- Topografía
- Estabilidad geotécnica
- Drenaje
- Erosión
- Uso futuro

¿Qué se debe hacer en los componentes técnicos?



Taludes

Rediseño de:

- altura
- pendiente
- geometría

Objetivo: estabilidad física.



Drenajes

Reconstrucción de:

- cunetas
- canales
- disipadores
- drenajes naturales

Objetivo: control hidráulico.



Superficies

Conformación de:

- terrazas
- pendientes suaves
- plataformas estables



Suelos

Reposición de:

- suelo orgánico
- material de crecimiento vegetal

En conclusión,

- Rellenar zonas agotadas.
- Suavizar taludes.
- Controlar drenajes.
- Estabilizar bancos.

- Colocar suelo orgánico.
- Revegetar por etapas.
- Evitar cuerpos de agua inseguros.

¿Por qué?

Una cantera mal cerrada puede generar erosión, inestabilidad, accidentes, sedimentación y pasivos ambientales.

Cerrar progresivamente no significa producir menos; significa operar con inteligencia y reducir el problema futuro desde hoy. Por eso, el cierre progresivo y la reconformación geomorfológica deben entenderse como parte del diseño técnico de la cantera, no como una actividad correctiva de último momento.

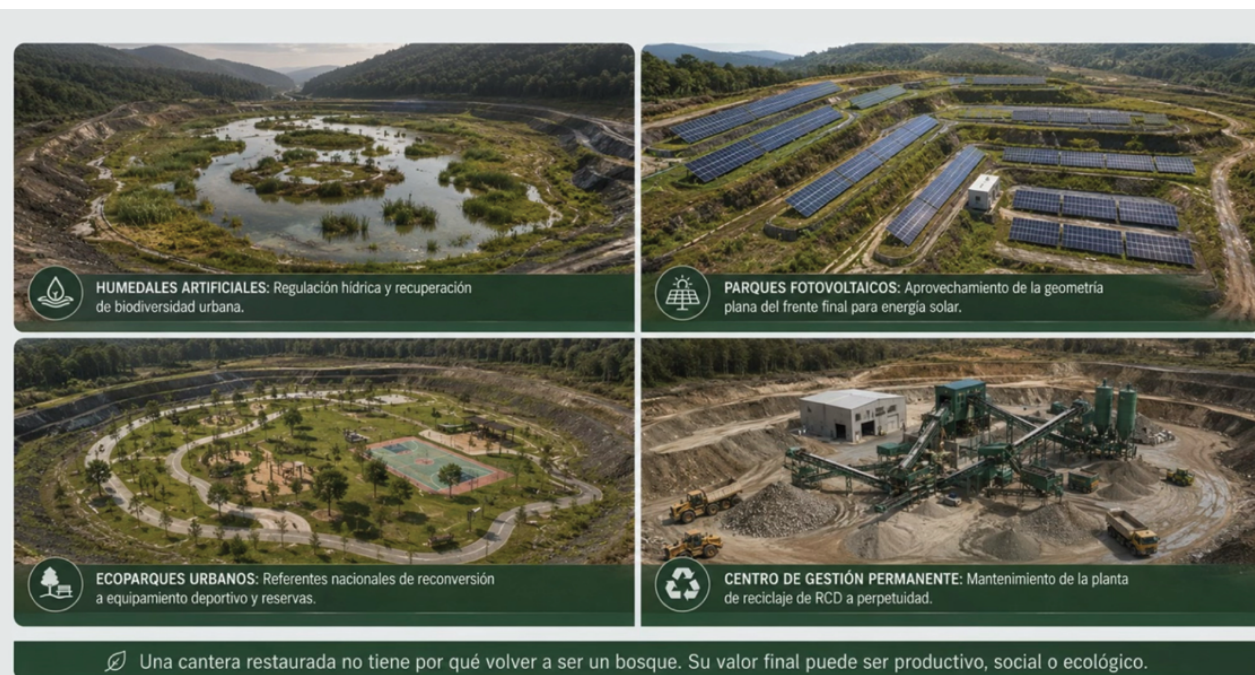
Figura 5.27. Ejemplo de restauración de canteras



5.5.2. Lineamiento 10. Reconversión del uso del suelo

La actividad minera transforma temporalmente el territorio para aprovechar un recurso geológico, pero una vez finalizada la explotación, el suelo no debe quedar como un espacio degradado o sin propósito. La reconversión del uso del suelo busca precisamente transformar esa área intervenida en un territorio funcional, seguro y con un nuevo valor ambiental, social o productivo. En otras palabras, no se trata únicamente de cerrar una cantera; se trata de definir qué función útil tendrá ese terreno después de la minería.

Figura 5.28. Ejemplo de reconversión del uso del suelo



¿Qué es la reconversión del uso del suelo?

Es el proceso técnico de redefinir el uso futuro del área intervenida, adaptándola para una nueva función compatible con:

- Sus condiciones físicas
- Estabilidad geotécnica
- Disponibilidad hídrica
- Contexto ambiental
- Necesidades sociales y territoriales

¿Qué busca técnicamente?

La reconversión debe asegurar que el terreno quede:

- Estable
- Drenable
- Seguro
- Ambientalmente compatible
- Útil para un nuevo propósito.

¿Qué factores deben evaluarse?

Antes de definir el nuevo uso hay que analizar:

**Geotecnia**

- estabilidad de taludes,
- capacidad portante,
- asentamientos.

**Contexto territorial**

- vocación del suelo,
- ordenamiento territorial,
- necesidades comunitarias.

**Uso o área productiva**

zonas logísticas, almacenamiento, infraestructura liviana.

**Hidrología**

- drenajes,
- escorrentía,
- nivel freático,
- inundabilidad.

**Posibles usos futuros**

Dependiendo de las condiciones del sitio:

**Uso comunitario**

equipamientos compatibles, educación ambiental.

**Calidad del suelo**

- fertilidad,
- compactación,
- contaminación,
- profundidad efectiva.

**Uso ecológico**

- restauración ecosistémica,
- corredores verdes,
- humedales.
- reservorio de agua

**Área forestal.**

Zona de conservación.
Plataforma industrial.
Infraestructura local.

**Geomorfología**

- forma del relieve,
- pendientes,
- conectividad hidráulica.

**Uso agropecuario:**

si el suelo lo permite:

- pasturas,
- sistemas agroforestales,
- agricultura controlada.

**Restricciones ambientales**

- áreas protegidas,
- ecosistemas,
- corredores biológicos.

**Uso recreativo**

- parques,
- senderos,
- lagunas recreativas.

La mejor restauración no es solo recuperar el terreno; es devolverle una función útil y sostenible. Por eso, la reconversión del uso del suelo debe planearse desde el diseño del cierre, integrando criterios técnicos, ambientales y territoriales para asegurar que el área intervenida tenga un futuro definido y funcional.

La mejor restauración no es solo recuperar el terreno; es devolverle una función útil y sostenible. Por eso, la reconversión del uso del suelo debe planearse desde el diseño del cierre, integrando criterios técnicos, ambientales y territoriales para asegurar que el área intervenida tenga un futuro definido y funcional.

5.6. LINEAMIENTO TRANSVERSAL: INDICADORES DE ECONOMÍA CIRCULAR

Para que la economía circular no quede solo en discurso, se deben medir indicadores.

La economía circular en cantera no se trata solo de sacar piedra, se trata de sacar mejor, separar mejor, vender más, botar menos y cerrar bien porque cada material que se pierde, cada fino que se bota y cada agua que se descarga sucia es plata y riesgo que se van de la cantera.

Tabla 5.21. Indicadores recomendados

Indicador	Qué mide
% material aprovechado	Cuánto del material extraído se convierte en producto
% rechazo en planta	Cuánto se pierde por mala clasificación
Consumo de agua por tonelada	Eficiencia hídrica
% agua reciclada	Circularidad del agua
kWh/t procesada	Eficiencia energética
t de finos valorizados	Aprovechamiento de subproductos
ha restauradas / ha intervenidas	Avance de cierre progresivo
% suelo orgánico recuperado	Capacidad de restauración
Polvo sedimentable	Control ambiental
Sólidos suspendidos en agua	Control de sedimentos

La economía circular en la minería de cantera se puede aplicar mediante estrategias que maximicen el uso eficiente de los recursos, reduzcan residuos y promuevan la sostenibilidad. Algunas formas de hacerlo son:

- Reutilización de residuos: Utilizar los escombros y sobrantes de la trituración para otros usos, como relleno, estabilización de suelos o materiales para construcción.
- Reciclaje de agua: Implementar sistemas de reciclaje y reutilización del agua utilizada en los procesos, minimizando el consumo y el impacto ambiental.
- Optimización de recursos: Mejorar los procesos para reducir el consumo de energía y materiales, aumentando la eficiencia en la extracción y procesamiento.
- Rehabilitación y restauración: Restaurar áreas explotadas para que puedan ser reutilizadas en actividades agrícolas, recreativas o ecológicas, cerrando así el ciclo del uso del territorio.
- Innovación tecnológica: Incorporar tecnologías que permitan aprovechar al máximo los recursos, reducir residuos y disminuir la huella ambiental.

Figura 5.29. Ciclo de la economía circular en minería de cantera





6

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 pirita) y Potencial de Neutralización (PN): Depende de minerales carbonatados (caliza, dolomita). Se calcula un balance: $PN - PA$.

Apique: se usa mucho en minería y geotecnia, y es similar a “calicata”, pero con un matiz técnico importante. Es una excavación puntual, generalmente más profunda y localizada, que se realiza para exploración o extracción directa de material.

Cc

Calicatas: es una excavación manual o mecánica de poca profundidad que se realiza para inspeccionar directamente el suelo o material geológico. Allí se observa estratos del suelo, color (indicador mineralógico), humedad, presencia de agua, tamaño de partículas y materia orgánica.

Una calicata es una herramienta de conocimiento del terreno, pero si no se restaura, se convierte en un impacto ambiental.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC): es un parámetro fundamental de suelos y materiales finos. Es la capacidad que tiene un suelo para retener e intercambiar iones positivos (cationes) en su superficie, indicando si un suelo puede inmovilizar o liberar contaminantes. En relaves y suelos una CIC Alta retiene Hg y metales, menor riesgo de lixiviación, puede ayudar a estabilizar y una CIC Baja metales se movilizan fácilmente y con mayor riesgo ambiental.

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.

Deslamado: es un proceso de separación en el que se eliminan las partículas finas (lodos, arcillas y limos) de una mezcla de material (pulpa), antes de su procesamiento.

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.

Estratigrafía: estudia la disposición en capas (estratos) de los sedimentos/rocas, su orden, espesor, continuidad y edad relativa. En placeres auríferos es clave para ubicar la capa productiva (pay layer) y optimizar la explotación.

Excavaciones exploratorias: son aperturas controladas del terreno (calicatas, apiques, trincheras y hoyos) para identificar, muestrear y cuantificar el depósito aurífero antes de explotar. Su objetivo es reducir incertidumbre (ley, espesor, continuidad) y minimizar movimiento de material estéril.

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

Geología de placer: es un depósito sedimentario secundario donde minerales densos (como el oro) se han concentrado mecánicamente por acción del agua (ríos, corrientes, lluvias).

Geomembrana de HDPE (Polietileno de Alta Densidad): es una lámina sintética impermeable usada para confinar líquidos y evitar infiltraciones, ampliamente aplicada en minería, obras hidráulicas y manejo de residuos.

Hh

Hoyo: es una excavación puntual y generalmente irregular, producto de actividades de exploración o extracción (p. ej., extracción manual de gravas auríferas), que no sigue una geometría técnica definida como una zanja, calicata o apique.

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.

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 (H_2O_2), 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.

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 en la roca principalmente pirita (FeS_2), cuando se oxida, produce ácido. 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.

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.

| Ss

Sedimentología: estudia cómo se generan, transportan, depositan y se organizan los sedimentos. En minería aluvial es la base para entender dónde está el oro, cómo separarlo y cómo controlar los impactos (SST/ erosión).

SST (sólidos suspendidos totales): es la cantidad de partículas sólidas que están flotando o suspendidas en el agua, y que no están disueltas, sino que se han sedimentado, se expresa en mg/L (miligramos por litro) y sirve como indicador de calidad del agua, control ambiental y para evaluar eficiencia de sedimentos.

| 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.

Trincheras: es una excavación lineal, continua y más profunda que una zanja, utilizada principalmente para exploración geológica o evaluación de materiales en superficie.

| Vv

Velocidad cuasi laminar: intermedio, pero controlado y sin turbulencia fuerte (lo que se busca en sedimentación, que las partículas caigan por gravedad sin ser arrastradas).

Velocidad de flujo cuasi-laminar: es un flujo muy suave, ordenado y lento, donde el agua se mueve en “capas” sin mezclarse violentamente.

Velocidad de flujo laminar puro: capas totalmente ordenadas (ideal teórico).

Velocidad de flujo turbulento: caótico, con remolinos.

| Zz

Zanja: es una excavación lineal y alargada, generalmente poco profunda, utilizada para conducir, desviar o controlar agua, o para instalación de infraestructura.

Fichas técnicas

FICHA TÉCNICA

TROMMEL

MINERÍA DE ORO ALUVIAL (PEQUEÑA ESCALA)



FUNCIÓN PRINCIPAL
Clasificación y deslamado del material para mejorar la recuperación de oro.

1. DESCRIPCIÓN

El trommel es un equipo de clasificación rotatorio que separa el material por tamaño mediante una malla perforada, mientras se lava con agua para remover arcillas y finos.

Aplicación:
Preparación del material previo a la concentración gravimétrica.

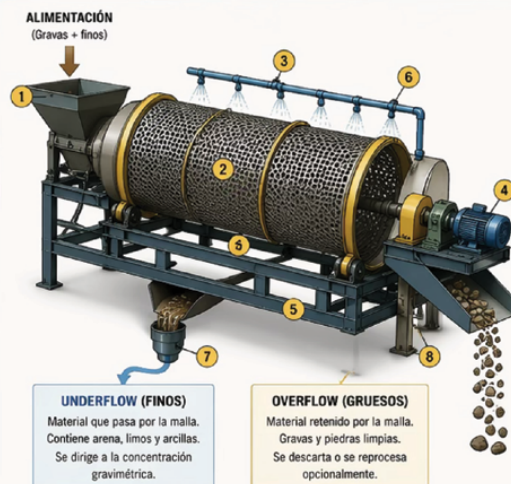
2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

PARÁMETRO	VALOR RECOMENDADO
Diámetro del tambor	0.8 – 1.5 m
Longitud del tambor	2 – 4 m
Tamaño de malla (perforación)	2 – 10 mm
Capacidad de procesamiento	5 – 20 m³/h
Velocidad de rotación	15 – 25 rpm
Inclinación del tambor	3° – 7°
Potencia requerida	3 – 10 HP
Consumo de agua	1 – 5 m³/h
Material del tambor	Acero al carbono
Tipo de transmisión	Motor eléctrico + reductor + piñón
Dimensiones generales (referenciales)	Según diseño

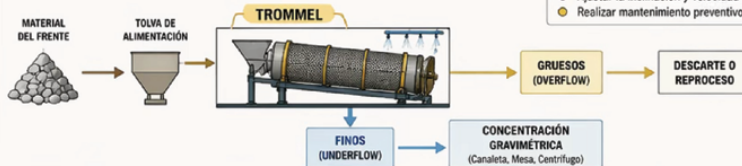
3. COMPONENTES PRINCIPALES

- 1 TOLVA DE ALIMENTACIÓN
- 2 TAMBOR ROTATORIO (cilíndrico con malla)
- 3 AROS DE SOPORTE Y REFUERZO
- 4 SISTEMA DE TRANSMISIÓN (motor + reductor + piñón)
- 5 CHASIS ESTRUCTURAL
- 6 SISTEMA DE LAVADO (spray de agua)
- 7 DESCARGA DE FINOS (underflow)
- 8 DESCARGA DE GRUESOS (overflow)

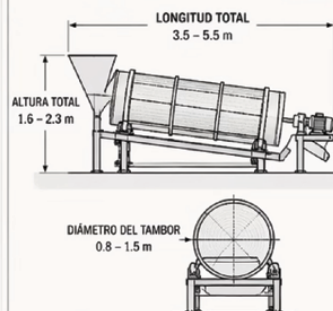
4. DIAGRAMA DEL EQUIPO



8. FLUJO DE PROCESO



5. DIMENSIONES REFERENCIALES



6. VENTAJAS

- ✓ Remueve arcillas y finos que atrapan el oro.
- ✓ Mejora la eficiencia de recuperación.
- ✓ Clasificación efectiva por tamaño.
- ✓ Equipo robusto, simple y de bajo mantenimiento.
- ✓ Apto para operaciones de pequeña escala.

7. CONSIDERACIONES OPERATIVAS

- Mantener flujo de agua constante para un buen deslamado.
- No exceder la capacidad de alimentación.
- Revisar y limpiar la malla periódicamente.
- Ajustar la inclinación y velocidad según el material.
- Realizar mantenimiento preventivo en transmisión y rodamientos.

FICHA TÉCNICA

ZARANDA VIBRATORIA GRIZZLY

MINERÍA DE ORO ALUVIAL – CLASIFICACIÓN GRUESA



FUNCIÓN PRINCIPAL
Separar y clasificar el material grueso, protegiendo los equipos aguas abajo y mejorando la eficiencia del proceso.

1. DESCRIPCIÓN

La zaranda vibratoria tipo grizzly es un equipo de clasificación primaria que separa el material grueso del fino mediante barras paralelas vibrantes, permitiendo el paso del material menor a través de los espacios entre barras.

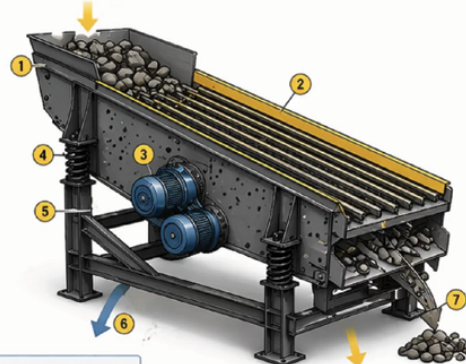
2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

PARÁMETRO	VALOR TÍPICO
Ancho de zaranda	0.8 – 1.5 m
Longitud de zaranda	1.5 – 3.0 m
Abertura entre barras	30 – 150 mm
Inclinación de trabajo	15° – 25°
Capacidad de procesamiento	20 – 80 m³/h
Frecuencia de vibración	700 – 1100 rpm
Amplitud de vibración	4 – 8 mm
Potencia del vibrador	2 x 1.5 – 2 x 5 HP
Número de decks (pisos)	1 deck
Material de barras	Acero al manganeso
Tipo de accionamiento	2 Vibradores eléctricos
Peso aproximado	600 – 1800 kg

3. COMPONENTES PRINCIPALES

- 1 ESTRUCTURA DE ALIMENTACIÓN
- 2 BARRAS GRIZZLY (fijas o reemplazables)
- 3 CAJA O CUERPO DE ZARANDA
- 4 VIBRADORES ELÉCTRICOS
- 5 RESORTES DE SUSPENSIÓN
- 6 DESCARGA DE FINOS (PASANTE)
- 7 DESCARGA DE GRUESOS (RECHAZO)
- 8 CHASIS DE SOPORTE

ALIMENTACIÓN
(Material Grueso)

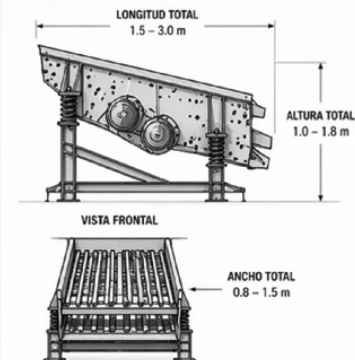


NOTA:
La abertura entre barras define el tamaño de corte del equipo.

7. FLUJO DE PROCESO



4. DIMENSIONES REFERENCIALES



5. VENTAJAS

- ✓ Alta capacidad de clasificación gruesa.
- ✓ Resistente a impactos y materiales abrasivos.
- ✓ Protege equipos de trituración y transporte.
- ✓ Bajo mantenimiento y fácil instalación.
- ✓ Mejora la eficiencia del circuito de proceso.

6. CONSIDERACIONES OPERATIVAS

- Verificar ajuste de vibradores y tensión de resortes.
- Mantener barras limpias para evitar atascos.
- Revisar pernos y soldaduras periódicamente.
- Asegurar una alimentación uniforme.
- No operar con sobrecarga.

8. SELECCIÓN DE ABERTURA (GUÍA RÁPIDA)

APLICACIÓN	ABERTURA ENTRE BARRAS
Preclasificación gruesa	100 – 150 mm
Clasificación media	60 – 100 mm
Clasificación fina	30 – 60 mm



Bibliografía

- Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2016). Términos de referencia para estudios de impacto ambiental: Proyectos de explotación minera. ANLA.
- 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.
- 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.
- AMIRA International (2002). ARD Test Handbook, Project P387A, secciones 4.5-4.7. Miller, S., Robertson, A. & Donahue, T. (1997). Advances in acid drainage prediction using the NAG test. *Proc. 4th ICARD*.
- Anglo American. (2024). Premios Avonni: proyecto de relaves deshidratados reduce impacto ambiental. [Comunicado de prensa].
- ANLA. (2016). Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental - Proyectos de Explotación Minera.
- ANM (2022), Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas Minerales de Depósitos de Placer, p. 48 y p. 66.
- ASOMIAT. (2023). Experiencias de biorremediación pasiva en minería de oro. Tadó, Chocó. [Documentación de proyecto].
- Bigham, J.M. & Nordstrom, D.K. (2000). Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters. *Reviews in Mineralogy* 40, 351-403.
- Bigham, J.M. & Nordstrom, D.K. (2000). *Reviews in Mineralogy* 40, 351-403. Cornell, R.M. & Schwertmann, U. (2003). *The Iron Oxides*, 2nd ed. Wiley-VCH.
- Boger, D. V. (2013). Rheology and the resource industries. *Chemical Engineering Science*.
- Botz, M. M. (2001). Overview of cyanide treatment methods. In *Mining Environmental Management*. Mining Journal Books.
- Burt, R. Gravity concentration technology. In *Development of Mineral Processing*, 5th ed.; Fuerstenau, D.W., Ed.; Elsevier: New York, NY, USA, 1984; p. 605.
- CARDER. (2010). Guía para la elaboración del Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua en la minería de metales preciosos y carbón – PUEAA.
- CEPAL. (2020). Estado del arte de las estadísticas mineras del uso de agua y energía en los países andinos. Santiago de Chile.
- CEPAL. (2021). La ENAMI de Chile: Modelo y buenas prácticas para pequeña minería y artesanal. CEPAL.
- CEPIS. (1988). Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades. Lima, Perú.
- Chalov, S. R., et al. (2014). Anthropogenic sediment redistribution and impacts on river systems. *Water Resources Research*, 50(3), 2264–2280.
- Chibueze, V. O., et al. (2020). Assessment of heavy metal contamination from artisanal gold mining in alluvial sediments and soils. *Environmental Monitoring and Assessment*.
- Colombia. Decreto 050 de 2018. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015 en materia de vertimientos.
- Colombia. Decreto 1076 de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Colombia. Decreto 1090 de 2018. Relacionado con el Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA).
- Colombia. Decreto 4741 de 2005. Prevención y manejo de residuos peligrosos.
- Colombia. Ley 373 de 1997. Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.
- Colombia. Ley 685 de 2001. Código de Minas. Diario Oficial.
- Colombia. Ley 2250 de 2022. Por la cual se establece un marco jurídico especial en materia de Legalización y Formalización Minera. Diario Oficial 52.092, 11 de julio de 2022.
- Colombia. Ley 2327 de 2023. Régimen para la identificación y gestión de pasivos ambientales en Colombia.
- Colombia. Resolución 0330 de 2017. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).

- Colombia. Resolución 631 de 2015. Parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales.
- Colombia. Resolución 865 de 2004. Metodología para el cálculo del índice de escasez.
- Colombia. Resolución 1256 de 2021. Por la cual se reglamenta el reúso de las aguas residuales.
- Colombia. Resolución 1362 de 2007. Registro de generadores de RESPEL.
- Colombia. Resolución 1402 de 2018. Metodología general para la elaboración de estudios ambientales.
- COCHILCO. (2024). Consumo de Agua en la Minería del Cobre. Actualización 2024. Santiago de Chile.
- Davies, M. P., & Rice, S. (2001). An alternative to conventional tailings management: Dry stack filtered tailings. *Proceedings of Tailings and Mine Waste '01*.
- Department of Energy (DOE). (2023). *Rainwater Harvesting Systems Technology Review*. U.S. DOE.
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*.
- 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*.
- Evaluation of gold mining sands and gravels as construction aggregates, Méndez, J. A., Ramírez, F. J., & López, A. M. (2022); An integrated framework for evaluating leaching in waste materials, Kosson, D. S. et al. (2002); y las Normas Técnicas Colombianas NTC 1522 (Ensayo Proctor estándar) y NTC 77 (Análisis granulométrico por tamizado) del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC, 2011, 2013.
- EY-SNMPE. (2021). *Economía Circular en la Minería: Oportunidades y desafíos*.
- FAO. (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia en América Latina y el Caribe*.
- FAO Colombia. (2023). *Con lluvia potabilizada, comunidades de la Amazonía colombiana se proveen de agua*.
- Geological Survey of Finland (GTK). (2024). *Mine closure guidance*.
- Gerson, J. R., & O'Connor, G. A. (2014). Mercury in soils of mining regions: pathways and environmental fate. *Environmental Science & Technology*.
- GISTM. (2020). *Global Industry Standard on Tailings Management*. ICMM, UNEP, PRI.
- González-Valencia, J. E., et al. (2012). Aproximación a la estimación de la Huella Hídrica de la minería del oro en Segovia, Antioquia.
- Grayson, R. (2007). *World Placer Journal* vol. 7, p. 73 Figs. 8-11; p. 75 Fig. 14.
- Grayson, R. (2007). *Fine Gold Recovery — Alternatives to Mercury and Cyanide*. *World Placer Journal*, vol. 7, pp. 127-128.
- Gunson, A. J., et al. (2012). Water use and sustainability in mining. *Journal of Cleaner Production*
- Haggard, E. L., et al. (2015). *Water footprint for a South African platinum mine*. University of the Witwatersrand.
- Hentschel, Priester & Hruschka, (2002). *Global Report on Artisanal and Small-Scale Mining*. IIED/WBCSD.
- ICMM. (2017). *Water Stewardship Position Statement*. Londres.
- ICMM. (2019). *Integrated mine closure: Good practice guide* (2nd ed.). Londres.
- ICMM. (2021). *Water Stewardship Framework*. Londres.
- ICMM. (2023). *Water Stewardship Maturity Framework*. Londres.
- ICONTEC. (2011). NTC 1522: Ensayo Proctor estándar.
- ICONTEC. (2013). NTC 77: Análisis granulométrico por tamizado.
- ICONTEC. (2020). GTC 314 – Marco para la implementación de los principios de la economía circular.
- IDEAM. (2020). *Atlas Interactivo Climatológico de Colombia*.
- IMTA. (2024). *Plataforma Agua y Minería – Huella Hídrica*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Intergovernmental Forum on Mining (IGF). (2017). *Global trends in artisanal and small-scale mining (ASM)*.
- Intergovernmental Forum on Mining (IGF). (2025). *Best practices for responsible ASM gold supply chains*.
- *International Journal of Coal Science & Technology* (2022) 9:32 <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00502-3> pag. 5.
- International Network for Acid Prevention (INAP). (2009). *Global acid rock drainage guide (GARDGuide)*.
- Instituto Tecnológico Geominero de España. (1989). *Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería*.
- Jewell, R. J., & Fourie, A. B. (2006). *Paste and thickened tailings*. Australian Centre for Geomechanics.
- Julca, J. (2023). *Economía Circular en la Minería: Marco conceptual y aplicaciones*.

- Kerguelen Bendeck, J. L. (2016). Caracterización y Aprovechamiento de Recursos Minerales en Colas de Terrazas Aluviales del Distrito Bagre-Nechí [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Facultad de Minas, Medellín, Colombia.
- Kondolf, G. M., et al. (2002). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning*.
- Kosson, D. S., et al. (2002). An integrated framework for evaluating leaching in waste materials. *Environmental Engineering Science*, 19(3).
- Kurşunoglu, S. (2025). A review on the recovery of critical metals from mine and mineral processing tailings: Recent advances. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 11, 2023–2050. <https://doi.org/10.1007/s40831-025-01126-y>.
- Li, X., et al. (2014). Mixed-integer programming model for optimal waste rock dump design. *SME Annual Meeting*.
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer.
- Marcello M. V., Aaron J. G. (2020, 18 de noviembre). Gravity Concentration in Artisanal Gold Mining. <https://www.mdpi.com/2075-163X/10/11/1026>.
- Marrugo Negrete, J., et al. (2017). Removal of mercury from gold mine effluents using *Limnocharis flava*. *Chemosphere*, 167.
- Marrugo Negrete, J. L., Paternina Uribe, R. de J., & Navarro Frómata, 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. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14826208>
- Matebese, F., et al. (2024). Mining wastewater treatment technologies and resource recovery techniques: A review. *Heliyon*, 10(3).
- Mathioudakis et al., (2023). Mathioudakis, S., Xiroudakis, G., Petrakis, E., & Manoutsoglou, E. (2023). Alluvial Gold Mining Technologies from Ancient Times to the Present. *Mining*, 3(4), 618–644. <https://doi.org/10.3390/mining3040034>
- MEND. (2004). Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings.
- Méndez, J. A., et al. (2022). Evaluation of gold mining sands and gravels as construction aggregates. *Construction and Building Materials*, 314.
- Metso. (2024). Tailings filtration and water recovery solutions. Metso Corporation.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) & DNP. (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000).
- Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM). (2005). Guía ambiental para el manejo de relaves mineros.
- Ministerio de Minas y Energía & Universidad de Córdoba. (2021). Propuesta de lineamientos técnicos de buenas prácticas de economía circular para la minería del oro.
- Ministerio de Minas y Energía & ATG Ltda. (2022). Lineamientos Técnicos de Buenas Prácticas de Economía Circular para la Actividad Minera.
- Mudd, G. M. (2008). Sustainability reporting and water resources. *Environmental Management*.
- Mudder, T. I., et al. (2001). *Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes* (2nd ed.). Mining Journal Books.
- Nordstrom, D.K. & Alpers, C.N. (1999). Geochemistry of acid mine waters. En *Reviews in Economic Geology* 6A, 133-160.
- Northey, S. A., et al. (2016). Water use in mining. *Journal of Cleaner Production*.
- Ochoa Correa, L.I. (2022). Tesis MSc UNAL, pp. 75, 107, 112, 139-140.
- O'Kane, M., & Wels, C. (2003). Mine waste cover system design. *Proceedings of ICARD*, Cairns.
- OPS. (2004). Guía de diseño para captación del agua de lluvia. Organización Panamericana de la Salud.
- Pardavé, W., & Delvasto, P. (2017). Evaluación de la huella hídrica en la mina Reina de Oro, Vetás (Santander). UIS.
- Pat-Espadas, A. M., et al. (2018). Review of Constructed Wetlands for Acid Mine Drainage Treatment. *Water*, 10(11).
- Peragallo, N., & Martínez, P. (2023). Uso de relaves como relleno de labores subterráneas. *Revista de Minería y Geología*, 39(2).

- PlanetGOLD (2022). Best practices for water management in artisanal and small-scale gold mining. United Nations Environment Programme / GEF. <https://www.planetgold.org/>
- Poling y Hamilton, 1986 Poling, G.W.; Hamilton, J.F. Fine Gold Recovery of Selected Sluicelox Configuration; University of British Columbia. Report of Program 3, Placer Mining; The University of British Columbia: Vancouver, BC, Canada, 1986; p. 85. Available online: https://www.hecklerfabrication.com/files/fine_gold_recovery_sluiceloxes__Poling.pdf
- Portal Minero Chile. (2020). Consumo de agua en procesos mineros. [Fuente web].
- Price, W. A. (2009). Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic materials. MEND Report 1.20.1.
- Ráez, E. (2018). Gestión del agua en minería: Desafíos y oportunidades para la sostenibilidad.
- Rötting, T. S., et al. (2008). Improved passive treatment of high-strength acid mine drainage. *Environmental Science & Technology*, 42(24).
- 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).
- Society for Ecological Restoration (2019). International Principles and Standards for the Practice of Ecological Restoration, 2nd ed. *Restoration Ecology* 27(S1), S1-S46.
- Sobek, A. A., et al. (1978). Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. U.S. EPA.
- Teschner et al. (2017). *Minerals Engineering* 105, 44-51.
- Tremblay, G.A. & Hogan, C.M. (Eds.) (2001). MEND Manual. Volumes 1-6. Mining Environment Neutral Drainage Program.
- UICN. (2016). Defining nature-based solutions. UICN.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). Global mercury assessment 2018. UNEP.
- Universidad de Córdoba. (2025). Estado del Arte de las Mejores Técnicas Disponibles y Alternativas de Economía Circular para la Pequeña Minería Aurífera.
- UPME (2007), Producción Más Limpia en la Minería del Oro en Colombia, p. 13.
- UPME. (2015). Guía de orientación para el manejo de vertimientos en minería de metales preciosos y carbón.
- UPME. (2024). Plan Nacional de Desarrollo Minero 2024–2035. UPME.
- U.S. Environmental Protection Agency (2007). Method 1313: Liquid-Solid Partitioning. SW-846.
- Veiga, M. M., & Gunson, A. J. (2020). Gravity Concentration in Artisanal Gold Mining. *Minerals*, 10(11), 1026. <https://doi.org/10.3390/min10111026>
- Vekua, N., et al. (2023). Gravity concentration techniques for fine gold recovery: A review of sustainable practices.
- Villegas, C., et al. (2015). Artisanal and Small-scale Gold Mining in Colombia.
- Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of mining wastewater. *Ecological Engineering*.
- Von der Heyden, C. J., & New, M. G. (2010). Sediment dynamics and environmental contamination in gold-mining areas. *Journal of Soils and Sediments*.
- WEF (World Economic Forum). (2015). Mining & Metals in a Sustainable World 2050.
- Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology*, 8th ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016; p. 498.
- Williams, D. J., et al. (2006). Kidston waste rock dump design and performance. *Proceedings of ICARD*, St. Louis.
- World Bank. (2020). Climate-Smart Mining: Minerals for Climate Action. Washington, D.C.
- Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Springer.

GUÍA DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LAS ETAPAS MINERAS

DE
MATERIALES
PARA LA
CONSTRUCCIÓN



Energía



"VIGILADA MINEEDUCACIÓN"

