



Reutilización de Relaves Auríferos en la Mina Quintana: Un Enfoque hacia la Economía Circular.

Linda Bibiana Zapata Peña 1

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Sanitario

Asesora

Juliana Katherine Tovar Ardila, Ingeniera Ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Sanitaria
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita

(Zapata Peña, 2024)

Referencia

(Zapata Peña, 2024). *Reutilización de Relaves Auríferos en la Mina Quintana: Un Enfoque hacia la Economía Circular*. [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Estilo APA 7 (2020)



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	11
1 Planteamiento del problema	13
2 Justificación.....	14
3 Objetivos	16
3.1 Objetivo general	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4 Marco teórico	17
5 Metodología	20
6 Resultados	23
7 Análisis y discusión: casos exitosos o aplicables al contexto de la Mina	33
8 Recomendaciones.....	38
9 Conclusiones	40
10 Referencias	42

Lista de tablas

Tabla 1. Documentos de importancia en la fase diagnóstica.	20
Tabla 2. Balance de generación y destinación residuos en el semestre 2022-I.....	26
Tabla 3. Generación de colas y estériles diarias durante el semestre 2022-I.	26
Tabla 4. Resultados prueba CRETIB.	30
Tabla 5. Usos de Relaves Mineros y Conclusiones de Estudios.....	32
Tabla 6. Recomendaciones para la aplicación de las opciones viables.....	38

Lista de figuras

Figura 1. Gestión de Relaves Mineros.	14
Figura 2. Estrategia de búsqueda y revisión.....	21
Figura 3. Criterios de selección de los documentos.....	21
Figura 4. Circuito de extracción de oro por cianuración en la Mina Quintana.	24
Figura 5. Diagrama de procesos (entradas y salidas).....	25
Figura 6. Diagrama disposición de colas y estériles 2022-I.....	26
Figura 7. Depósito de relaves, Mina Quintana.....	27
Figura 8. Resultados del análisis de toxicidad por Lixiviación (Ar, Cr, Ag, Pb y Ba).	29
Figura 9. Resultados del análisis de toxicidad por Lixiviación (Hg, Se y Cd).	30
Figura 10. Composición porcentual del material de los filtros finales.....	36
Figura 11. Importancia de los filtros en el tratamiento de las AR.	37

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ACM	Asociación Colombiana de Minería
ACI	American Concrete Institute
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
ANM	Agencia Nacional de Minería
ATG	Asesorías Técnicas Geológicas
CAR	Corporación Autónoma Regional
CRETIB	Prueba de caracterización de peligrosidad
DAM	Drenaje Ácido Minero
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
EPA	Environmental Protection Agency
ICA	Informe de Cumplimiento Ambiental
ICONTEC	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
LA	Licencia Ambiental
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MINENERGÍA	Ministerio de Minas y Energía
PAM	Pasivo Ambiental Minero
PTO	Plan de Trabajos y Obras
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
SGC	Servicio Geológico Colombiano
UPME	Unidad de Planeación Minero Energético
DAM	Drenaje Ácido de Mina
AR	Agua Residual
pH	Potencial de Hidrogeno

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo dar a conocer oportunidades de reutilización viables para la mina Quintana en Remedios, Antioquia, en un contexto de economía circular. Para lograr esto, se realizó una revisión bibliográfica que aborda diferentes alternativas de reutilización de relaves mineros a nivel nacional e internacional. Se analizan investigaciones que exploraron el uso de relaves como agregado en materiales de construcción tales como morteros, concreto y pavimentos, así como la recuperación de metales valiosos presentes en los relaves. Además, se examinan tecnologías y prácticas de remediación ambiental para mitigar los impactos negativos de la actividad minera.

Los resultados de esta revisión indican que existe un potencial reúso de relaves mineros en diversos sectores, siendo la principal la utilización como agregado en la construcción de cemento y pavimentos. Esto podría contribuir a la optimización de los espacios destinados al almacenamiento de relaves y a la reducción del impacto ambiental de la minería. Se identifican proyectos piloto exitosos y se discuten sus beneficios y desafíos. En base a estos hallazgos, se formulan recomendaciones de acuerdo con las necesidades específicas de la empresa Quintana SAS, proponiendo soluciones que reduzcan la cantidad de residuos dispuestos en la relavera e incorporándose en proyectos de la mina, como la estabilización de taludes, obras dentro del recinto e incluso evaluando la viabilidad de su uso en la mejora de las vías terciarias utilizadas para el acceso a la mina.

Palabras clave: relaves auríferos, gestión, reúso, residuos mineros, pasivos ambientales mineros, y economía circular.

Abstract

The objective of this work is to present viable reuse opportunities for the Quintana mine in Remedios, Antioquia, within a circular economy context. To achieve this, a literature review was conducted that addresses different alternatives for the reuse of mining tailings at both national and international levels. Research exploring the use of tailings as an aggregate in construction materials such as mortar, concrete, and pavements, as well as the recovery of valuable metals present in the tailings, was analyzed. Additionally, technologies and environmental remediation practices to mitigate the negative impacts of mining activities were examined.

The results of this review indicate that there is potential for the reuse of mining tailings in various sectors, with the primary use being as an aggregate in the construction of cement and pavements. This could contribute to the optimization of spaces designated for tailings storage and the reduction of the environmental impact of mining. Successful pilot projects were identified, and their benefits and challenges were discussed. Based on these findings, recommendations are formulated according to the specific needs of the company Quintana SAS, proposing solutions that reduce the amount of waste disposed of in the tailings storage facility and incorporating them into mine projects, such as slope stabilization, on-site works, and even evaluating the feasibility of their use in improving the tertiary roads used to access the mine.

Keywords: auriferous tailings, management, reuse, mining waste, mining environmental liabilities, and circular economy.

Introducción

Colombia cuenta con una abundante riqueza de recursos naturales, resultado de procesos geológicos a lo largo de la historia. En la época precolombina, los indígenas aprovecharon los recursos minerales, extrayendo sal, oro y esmeraldas de manera artesanal (PNUMA & MADS, 2012). En la segunda mitad del siglo XIX el carbón adquirió relevancia, impulsado por la revolución industrial, por lo cual la actividad minera se convirtió en un componente importante en la economía colombiana, debido al potencial de exportación a los mercados internacionales (Bustamante Baena et al., 2019). Esto marcó el comienzo de la extracción artesanal de materiales, como el hierro, carbón, gravas, arenas, yeso, arcilla y mármol destinados a la construcción y la industria en general (PNUMA & MADS, 2012).

La minería del oro se estableció en diferentes zonas de Colombia tal que algunos de los municipios auríferos más representativos son Marmato en Caldas, Buenos Aires en el Cauca, Santa Rosa del Sur en el departamento de Bolívar, en el departamento de Chocó los municipios de Istmina y Tadó y Remedios y Segovia en el departamento de Antioquia (PNUMA & MADS, 2012), éste último es un departamento que ha tenido una larga tradición de minería aurífera, las comunidades indígenas ya practicaban minería artesanal en la región en tiempos precolombinos (Rodríguez, 2021; Romero, s.f.; Arango & Olaya, 2012). Durante la época de la Colonia, e incluso luego de la independencia del país en 1819, el oro era la principal fuente de ingresos de Antioquia, principalmente debido a la minería artesanal y de pequeña escala. Gradualmente, el café fue reemplazando al oro como la principal fuente de ingresos, pero Antioquia continuó siendo el mayor productor de oro del país durante gran parte del siglo XX (Massé & Munévar, 2016; MADS, 2019).

En la actualidad, el incremento de la demanda de materias primas a nivel mundial por parte de los países desarrollados ha posicionado el petróleo y los minerales colombianos en el mercado internacional (PNUMA & MADS, 2012; ACM, 2018). El oro ha sido durante años la inversión más segura y ha sido acumulado como reservas por los bancos de muchos países del mundo (Reguera, 2023), debido a esto en épocas de incertidumbre financiera aumenta su demanda y se vuelve parte fundamental de la economía de países como Colombia.

Esto representa la importancia económica de la minería para el país; sin embargo, aunque se busca minimizar el impacto ambiental, toda actividad humana va a tener repercusiones o una respuesta en el ecosistema; la explotación aurífera ha dejado daños al medio ambiente, afectaciones

a la salud de los pobladores de los municipios donde se desarrolla e incluso ha sido fuente de varios conflictos sociales (PNUMA & MADS, 2012). De acuerdo con Quintero & Díaz (2020) existe una relación directa entre la producción de oro y la generación de residuos, tales como los relaves que son una mezcla de agua con cianuro y arenas finas resultantes del procesamiento del mineral y pueden significar un problema si no se les da una adecuada disposición. Sin embargo, Colombia no cuenta con reglamentación para el manejo y la gestión de los relaves, más allá de las medidas de prevención, mitigación o compensación que toman los titulares mineros dentro de las obligaciones adquiridas en la licencia ambiental (Valencia, 2006; CORANTIOQUIA & CNPMLTA, 2016) que generalmente consisten en acciones como las descritas anteriormente. Por el contrario, países como Chile y Perú tienen leyes que reglamentan el uso de los relaves para mitigar el impacto que generan los PAM (Gutiérrez, 2022), además de disminuir la explotación de canteras para la obtención de materiales de construcción (Arango & Olaya, 2012).

La compañía minera QUINTANA SAS, con trayectoria desde 2007 en la industria extractiva, se ha destacado por su compromiso con la sostenibilidad y responsabilidad ambiental, cuenta con licencia ambiental, para la explotación de oro en veta y demás minerales concesibles en la Mina Quintana (CORANTIOQUIA, 2007). El proyecto se encuentra localizado en la vereda las Camelias del Municipio de Remedios – Antioquia. En el proceso de beneficio del mineral aurífero se generan los relaves, cuyo manejo actual consiste en depositarlos en áreas denominadas relaveras, que son estructuras diseñadas para contener las arenas (MINENERGÍA & ATG, 2020). Sin embargo, estos depósitos conllevan problemas medioambientales y de seguridad (Quintero & Díaz, 2020), ya que, sin un manejo adecuado, pueden fallar y causar graves daños ambientales y materiales, e incluso poner en riesgo vidas humanas (Fierro, 2019). Además, las prácticas irresponsables de explotación minera han deteriorado tierras fértiles, reservas naturales y forestales, y han contaminado fuentes de agua (CORANTIOQUIA & CNPMLTA, 2016). En busca de un manejo responsable de los relaves, la empresa los cubre con material vegetal mediante hidrosiembras y otros métodos de revegetalización para disminuir su impacto ambiental. Esto evita que las arenas se dispersen como material particulado hacia las comunidades cercanas y también contribuye a devolver estabilidad al suelo y mejorar el paisaje.

El presente trabajo propone alternativas para que la empresa QUINTANA SAS conozca los usos potenciales de los relaves generados, de manera que los resultados aporten soluciones para optimizar los espacios destinados a su almacenamiento (relaveras). Este objetivo se alcanza

mediante una revisión bibliográfica que exploró los diversos usos dados a estos relaves tanto en Colombia como a nivel mundial.

1 Planteamiento del problema

La gestión de relaves mineros en Colombia ha sido un desafío debido a la falta de experiencia en grandes estructuras de contención y la necesidad de actualizar las regulaciones para incluir nuevas tecnologías (Beltrán-Rodríguez et al., 2018). En Antioquia se encuentran ubicadas varias operaciones mineras de oro de mediana y gran escala (Massé & Munévar, 2016). Este desafío es significativo en términos de impacto ambiental y seguridad, ya que la minería se desarrolla en un período finito de tiempo (Arango & Olaya, 2012). La extracción de recursos no renovables produce cambios, a menudo irreversibles, en el medio ambiente (Romero & Flores, 2010; CORANTIOQUIA & CNPMLTA, 2016).

La Mina Quintana, ubicada en Antioquia, Colombia, tiene grandes desafíos en relación a la necesidad de un sistema eficiente y sostenible para la disposición y gestión de los relaves generados durante el proceso de extracción y beneficio del oro. Actualmente, estos relaves se depositan en áreas conocidas como relaveras, lo que conlleva riesgos ambientales y la ocupación de grandes extensiones de terreno (Gutiérrez, 2022). Aunque la empresa ha implementado medidas como la revegetalización para disminuir el impacto ambiental, devolver estabilidad al suelo y mejorar el paisaje, estas prácticas podrían resultar insuficientes para abordar los riesgos ambientales, de manera integral.

Los relaves están siendo investigados para ser usados en el sector de la construcción reemplazando parte del material de playa usado en la fabricación de ladrillos, baldosas, muros de contención e incluso en pavimentación (Romero & Flores, 2010). Con este potencial, la Mina Quintana ha mostrado interés en la implementación de soluciones que transformen los pasivos en activos ambientales; por tanto se evidencia la necesidad de identificar las diversas opciones que ofrece la industria y la investigación en torno al reúso de relaves para proponer alternativas viables y sostenibles para su manejo, considerando los aspectos ambientales, sociales y económicos, que busquen reducir el impacto ambiental negativo y promover un uso más eficiente de los recursos disponibles.

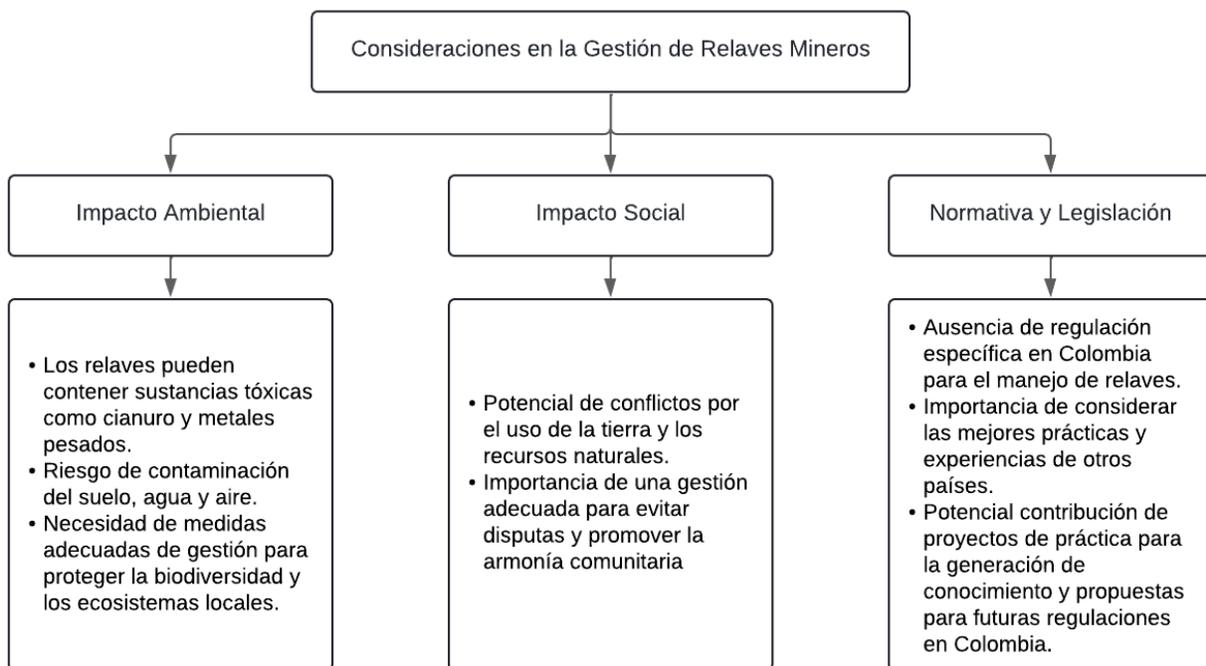
2 Justificación

Al abordar la gestión de los relaves desde una perspectiva de economía circular y de sostenibilidad, se pueden desarrollar estrategias que no solo mitiguen los impactos ambientales, sino que también generen beneficios económicos y sociales para la comunidad local.

La ingeniería juega un papel fundamental en la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles para los desafíos ambientales y sociales asociados con la industria minera. Es fundamental que la Mina Quintana adopte un enfoque proactivo, basado en evidencia para la gestión de sus relaves, implementando tecnologías y prácticas innovadoras que hayan demostrado ser efectivas en otros contextos similares. Este proyecto de práctica ofrece la oportunidad de aplicar conocimientos técnicos y metodológicos para desarrollar alternativas de gestión de relaves que sean eficientes, seguras y respetuosas con el medio ambiente teniendo presente los aspectos que se detallan a continuación:

Figura 1

Gestión de Relaves Mineros.



Fuente. Adaptado de MADS (2022) y MINENERGÍA & ATG (2020).

La implementación de prácticas sostenibles en la gestión de relaves también tiene un impacto positivo en la comunidad local y en la imagen corporativa de la empresa. Al adoptar soluciones innovadoras para la reutilización de los relaves, la empresa demuestra su compromiso con la responsabilidad social y ambiental, lo que puede mejorar sus relaciones con las comunidades cercanas. Además, la reducción de riesgos ambientales y de seguridad asociados con la acumulación de relaves puede contribuir a un entorno más seguro y saludable para los trabajadores y residentes locales. La reutilización de los relaves generados en la Mina Quintana no solo abordaría la problemática de su acumulación y los riesgos asociados, sino que también ofrece múltiples beneficios económicos, ambientales y sociales.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Proponer posibles oportunidades de reúso viables para la mina Quintana, Remedios, Antioquia, en un marco de economía circular.

3.2 Objetivos específicos

- Describir los relaves auríferos y sus principales características.
- Recopilar información sobre los actuales usos y aplicaciones de los relaves auríferos en proyectos similares a nivel mundial.
- Analizar estrategias exitosas de economía circular en la gestión de residuos mineros, centrándose en ejemplos prácticos y aplicables a la situación de la mina Quintana.

4 Marco teórico

Colombia es un país con una tradición minera artesanal y de pequeña escala por la gran riqueza en cuanto a recursos naturales se trata (PNUMA & MADS, 2012); El desarrollo de la minería en el país se remonta a periodos anteriores a la conquista española. Durante la colonia la minería de oro en Antioquia y el chocó creció de manera importante llegando a marcar momentos históricos en la región antioqueña como centro de extracción y acopio (Romero, s. f.), posteriormente en la época de la independencia el oro fue fuente de financiación para el ejército de los libertadores; más tarde, durante la República, la producción de oro y piedras preciosas superó en importancia a otros sectores básicos como la agricultura (MADS, 2019).

La actividad minera y su relación con el medio ambiente es un tema polémico debido a que la minería es una de las industrias más importantes para el desarrollo económico del país, aportando aproximadamente un cuarto de los ingresos fiscales durante los últimos años (Valdés, 2017). En 2020, las exportaciones mineras alcanzaron los 7.7 mil millones de dólares y representan el 25% de las exportaciones totales del país (Celis & Monsalve, 2023). Sin embargo, las consecuencias ambientales de la explotación minera en los territorios, provoca gran malestar social, los impactos mal gestionados que crean pasivos ambientales, las malas prácticas de minería, la ilegalidad y el conflicto armado han ocasionado grandes problemáticas socio ambientales e incluso han resultado en la interrupción de proyectos mineros (La Rotta & Torres, 2017).

El sector minero en Colombia está dirigido por el Ministerio de Minas, responsable de las políticas mineras (Colombia. Congreso de la República, 2001; MADS, 2022; UPME, s.f.). La Unidad de Planeación Minero Energética planifica el desarrollo minero-energético; la Agencia Nacional de Minería administra los recursos mineros, otorga títulos y supervisa la exploración y explotación (Colombia. Ministerio de Minas y Energía, 2011); mientras que el Servicio Geológico Colombiano investiga el potencial del subsuelo y monitorea amenazas geológicas.

Para realizar actividades mineras se requiere un título minero inscrito en el Registro Minero Nacional y las autorizaciones ambientales correspondientes. Según el código de minas (Colombia. Congreso de la República, 2001), estas autorizaciones incluyen el Programa de Trabajo y Obras y la Licencia Ambiental, la cual está sujeta a la evaluación del Estudio de Impacto Ambiental por parte de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, que otorga las licencias para proyectos de gran minería y las Corporaciones Autónomas Regionales y Urbanas para mediana y pequeña

minería; mediante la evaluación de los impactos ambientales y sociales y la propuesta de medidas de mitigación y compensación (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Lo anterior significa que, en Colombia, la evaluación ambiental se materializa especialmente a través del proceso de licenciamiento, orientado a la consolidación del desarrollo sostenible en el largo, mediano y corto plazo, con el objeto de reducir los efectos de los proyectos en los aspectos biofísicos, económicos, sociales y culturales (MADS, 2019). Es aquí donde los residuos generados como consecuencia de la actividad minera se vuelven importantes; algunos de estos residuos pueden llegar a convertirse en pasivos ambientales mineros si no se establecen planes para su manejo (Castro, 2015). Los PAM son daños no compensados producidos a lo largo del funcionamiento (exploración, construcción, operación y cierre) de un proyecto minero (Arango & Olaya, 2012).

Los depósitos de relaves son algunas de las estructuras más masivas construidas en el último tiempo y también requieren de un cuidadoso trabajo de monitoreo y mantenimiento para asegurar su correcta operación (Beltrán-Rodríguez et al., 2018), por lo que reaprovecharlos también es una oportunidad para poner en valor un enorme volumen de residuos y así evitar seguir acumulándolos (Corporación Alta Ley, 2023). Uno de los retos más significativos es la gestión integral de estos residuos para desarrollar una actividad más sostenible, con un enfoque en la economía circular que permita reducir el impacto ambiental asociado a la explotación de los recursos naturales (MADS, 2019). En este contexto, todos los proyectos mineros de oro de mediana y gran escala cuentan con depósitos de relaves que acumulan materiales sólidos finos, descartados durante las operaciones de separación y obtención de los valores metálicos de aprovechamiento (Pardavé et al., 2022; Beltrán-Rodríguez, 2018). La composición de estos sólidos sedimentados en los depósitos de relaves es muy variada y depende de las características del mineral y de los procesos (físicos, químicos y metalúrgicos) a los que se ha sometido la veta (Espín, et al., 2017).

El proceso metalúrgico, comprende las etapas de: trituración, molienda, lixiviación o flotación y electro disposición, filtros donde se obtiene concentrado de mineral para su posterior refinación (CORANTIOQUIA & CNPMLTA, 2016). Al final, como remanente del proceso de lixiviación o flotación quedan los relaves, sin aparente valor económico comercial. Significa que los relaves contienen los materiales no recuperados y los reactivos utilizados en todo proceso de beneficio, principalmente, reactivos de lixiviación. (Espín et al., 2017).

Los relaves provenientes del proceso metalúrgico tienen que ser almacenados, adecuadamente, aplicando tecnologías ecológicas y económicamente viables, a fin de proteger la integridad física de las personas, el ambiente y medio sociocultural circundante (Cárdenas, 2019; Beltrán-Rodríguez, 2018). A nivel mundial se han desarrollado investigaciones para mejorar los métodos de almacenamiento de los relaves; para darles tratamiento por métodos de fitorremediación e incluso para recuperar más minerales de estos residuos (Henao Casas, 2023; Ika Minería, 2023; Zamareño & Díaz, 2021; Jaramillo & Muñoz, 2019; Gonzáles & García, 2011).

Uno de los principales desafíos al utilizar los relaves radica en su potencial categorización como residuos peligrosos, especialmente cuando se originan tras procesos de lixiviación con cianuro para extraer el oro (Romero & Flores, 2010). En esta técnica de extracción, las colas resultantes se pueden lixiviar con otros metales presentes en el mineral, generando la movilización de todos estos elementos en el suelo y por infiltración entran en contacto con el agua produciendo la contaminación por metales pesados a partir de la generación de drenajes ácidos (Pardavé et al, 2022); según Quintero & Díaz (2020), cuando el beneficio del oro se realiza a través del proceso de flotación, es decir, por separación físico-química, el material residual si bien contiene otros metales, éstos se encuentran en su condición inerte y por tanto no podrán liberarse al suelo ni cuerpos de agua por lo que no presentan condición de peligrosidad.

No obstante, según lo establecido en el Decreto 1076 de 2015, la combinación de residuos peligrosos con aquellos que no lo son confiere a la mezcla las características de peligrosidad, requiriendo su manejo como residuo peligroso (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Por esta razón, en el ámbito minero es común realizar una Caracterización de Peligrosidad mediante la prueba CRETIB para confirmar la inocuidad o peligrosidad del residuo resultante. Las conclusiones sobre la peligrosidad de los relaves se basan en un análisis de características peligrosas conforme a estándares establecidos por metodologías como las de la EPA, la Resolución 0062 de 2007 y los lineamientos del Título 6 del Decreto 1076 de 2015, así como la parte 261 del CFR EPA 40 (Quintana, 2023).

5 Metodología

La metodología empleada para la realización del presente trabajo se dividió en 4 fases que permitieron cumplir con el objetivo general, brindando un paso a paso para el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos; estas fases se detallan a continuación:

Fase diagnóstica:

La revisión de la información del proyecto minero Quintana se realizó considerando y analizando varios documentos fundamentales para la evaluación y gestión de proyectos mineros. Estos documentos incluyen los EIA, el PTO, la LA y los PMA. A continuación, se detalla el propósito y las acciones realizadas:

Tabla 1

Documentos de importancia en la fase diagnóstica.

Documento	Propósito	Acciones
Estudios de Impacto Ambiental – EIA	Conocer la información sobre el manejo de relaves	Se analizó la descripción del proyecto y sus componentes. Se revisó e identificó la gestión de los relaves, los impactos y las medidas de mitigación propuestas.
Plan de Obras y Trabajos -POT	Conocer los procesos que se llevan a cabo en el proyecto.	Se revisó la planificación de la extracción, las técnicas y tecnologías propuestas para el manejo de relaves y el diseño de las instalaciones de almacenamiento.
Licencia Ambiental – LA	Comprobar que el proyecto cumple con las condiciones ambientales específicas para el manejo de relaves.	Se revisaron e identificaron las condiciones y restricciones relacionadas con la gestión de los relaves.
Planes de Manejo Ambiental – PMA	Conocer las estrategias de gestión de relaves.	Se revisaron los planes de manejo e identificaron las acciones específicas para la gestión y disposición de relaves.

Fuente. Elaboración propia.

También, se recopiló y revisó la información relevante en torno al estado de generación y gestión de los relaves contenidos en los ICA desde el año 2020 y los informes de resultados de las pruebas CRETIB realizadas a los relaves para la caracterización y seguimiento de peligrosidad.

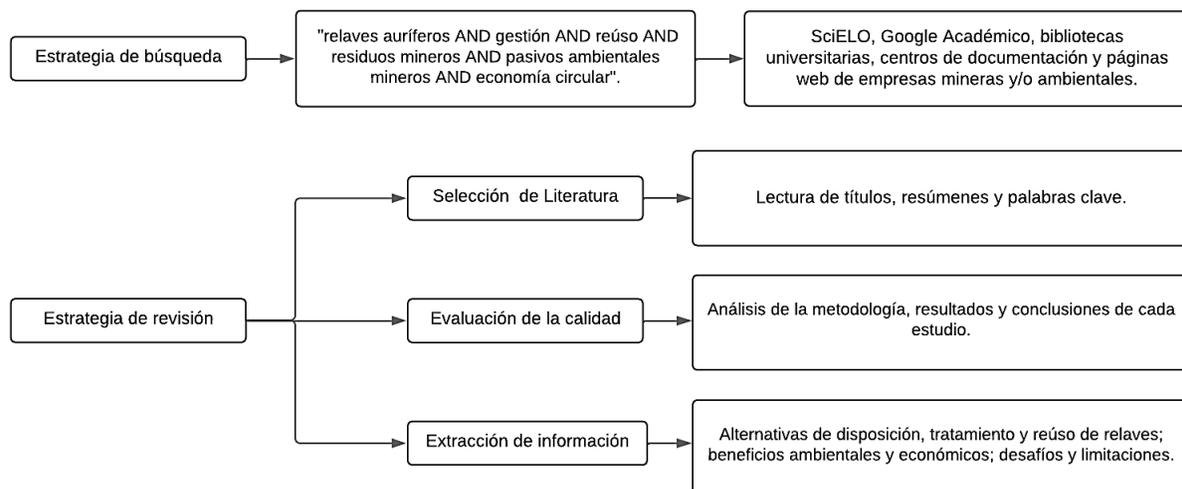
Con lo anterior, se logró reconocer qué son los relaves auríferos, cómo se generan estos residuos en el proceso de extracción de oro y cuáles son sus principales características. Todo esto teniendo en cuenta los factores específicos del proyecto minero Quintana, la escala de producción, los métodos de procesamiento y beneficio del mineral.

Fase de identificación:

En esta fase se buscaba identificar diferentes formas de reúso para los relaves auríferos que se estaban implementando para disminuir el impacto de estos residuos en el ambiente. Esto se llevó a cabo por medio de las siguientes acciones:

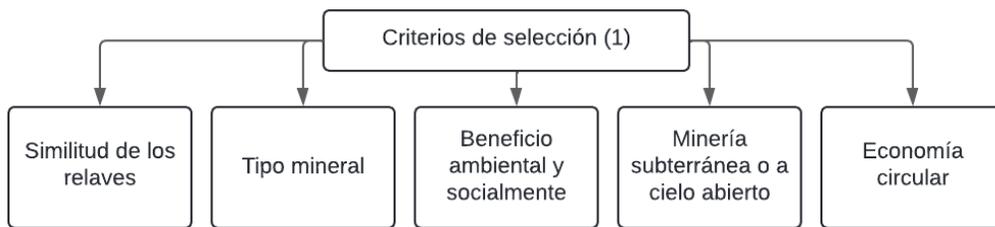
Figura 2

Estrategia de búsqueda y revisión.



Fuente. Elaboración propia.

En total se encontraron 120 documentos relacionados con los relaves (disposición, generación, almacenamiento y usos); luego se seleccionaron los documentos relevantes mediante la lectura de títulos, resúmenes y palabras clave; se buscó que la literatura obtenida presentara similitudes como el tipo de mineral, relave, técnicas de extracción y beneficio, además de que se aplicaran procesos de reúso; de esta selección se obtuvieron un total de 60 documentos a los que posteriormente se revisó la metodología, resultados y conclusiones; de esta revisión se seleccionaron 37 artículos a los que finalmente, se procedió a extraer la información más relevante.

Figura 3*Criterios de selección de los documentos.**Fuente.* Elaboración propia.

Es importante mencionar, que durante el proceso de búsqueda se evidenció poca documentación abierta sobre los potenciales usos de los relaves, ya que muchas compañías u organizaciones catalogan como privada sus investigaciones. Por lo tanto, para subsanar la falta de información se recurrió a la buscar artículos citados dentro de los documentos encontrados en la búsqueda inicial.

Fase de Análisis de Casos Exitosos:

Se analizaron casos de éxito donde se implementó la economía circular en la gestión de residuos mineros, haciendo énfasis en los relaves. Se extrajeron lecciones aprendidas y estrategias aplicables al contexto de la mina Quintana. A partir de la investigación previa, se sintetizó la información y se organizó en esquemas o tablas que permitieron determinar las especificaciones técnicas y materiales necesarios para obtener un sistema que mantuviera beneficios como la mitigación de la contaminación del suelo y del agua, así como ahorros en costos y espacio de disposición.

Fase de Conclusiones y Recomendaciones:

Se sintetizaron los hallazgos de la revisión bibliográfica y se formularon recomendaciones específicas para la implementación de prácticas sostenibles y económicamente viables en la gestión de relaves auríferos en la mina Quintana, teniendo en cuenta los beneficios potenciales en términos ambientales, económicos y sociales, así como la factibilidad técnica de implementación en el contexto específico del proyecto.

6 Resultados

Proceso de Explotación y Beneficio en el proyecto Minero Quintana.

La empresa Quintana SAS, realiza la explotación de oro (minería aurífera subterránea) en el corregimiento de Santa Isabel del municipio de Remedios, Antioquia, a través del proyecto minero Mina Quintana. Este proyecto, establecido desde antes del 2007, cuenta con servicios básicos e infraestructura en un área de 7 hectáreas, que incluye una mina, planta de beneficio, campamento y helipuerto (Quintana SAS, 2007).

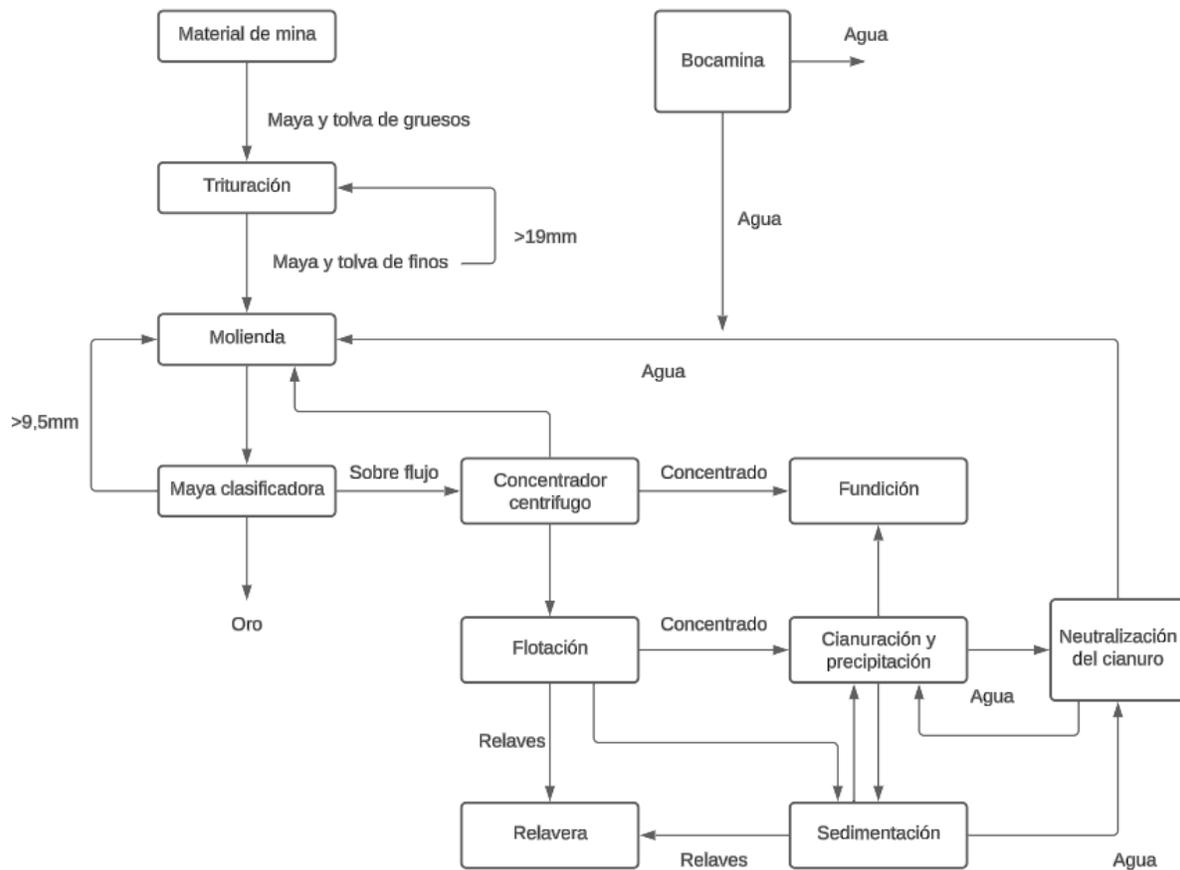
Para garantizar un planeamiento adecuado, el proyecto minero analizó detalladamente los resultados de la exploración para la elaboración del Plan de Trabajos y Obras. Según la UPME (2007), la falta de una adecuada planeación de la técnica de extracción y beneficio conlleva a una alta pérdida del mineral debido al desconocimiento de las características del yacimiento.

La técnica de extracción empleada en la Mina Quintana es el método de explotación por Corte y Relleno Modificado. Este método, respaldado por el PTO (Quintana SAS, 2007), asegura una buena recuperación del mineral, brinda seguridad en las actividades mineras y tiene una baja incidencia en la superficie. Consiste en el arranque del material en paneles verticales avanzando de manera descendente (Castro-Caicedo et al., 2019); posteriormente, el espacio generado es llenado con el material estéril proveniente del mismo frente de extracción y con las colas resultantes de la planta de beneficio. Este método puede ser modificado según los requerimientos técnicos de las vetas, como cambios de rumbo y buzamiento (Quintana SAS, 2022).

Una vez extraída del subsuelo, la roca que contiene el oro es trasladada a los acopios cercanos a la planta para someterla a diversos procesos físicos y químicos, como trituración, molienda, concentración gravimétrica, celdas de flotación, cianuración, filtración, precipitación y fundición con crisol. Transformando el mineral extraído para obtener el producto en su mayor utilidad; en la Figura 1 se presenta el circuito de beneficio que garantiza la eficiente recuperación del oro en la Mina Quintana, siguiendo los estándares de seguridad y sostenibilidad establecidos por la empresa.

Figura 4

Circuito de extracción de oro por cianuración en la Mina Quintana.



Fuente: Elaboración propia.

*El procesamiento ilustrado en la **Figura 4***

Circuito de extracción de oro por cianuración en la Mina Quintana. es responsable de la generación de relaves. Sin embargo, es importante distinguir que los métodos físicos, como la trituración, molienda y clasificación por centrífugos, producen arenas (gruesas y finas), que se consideran material estéril. Dado que estas arenas no presentan características de peligrosidad, pueden ser reutilizadas para rellenar el socavón de la mina.

Por otro lado, los procesos de flotación y cianuración implican la adición de reactivos para facilitar la separación de las arenas del mineral valioso (Heno Casas, 2023). Tras la recuperación del oro, las arenas resultantes se convierten en desechos. En la **Figura 5** se describen a detalle los procesos de flotación, cianuración, precipitación y sedimentación, proporcionando un panorama de las características de los relaves generados en la Mina Quintana.

Figura 5*Diagrama de procesos (entradas y salidas).*

	Flotación	Cianuración	Precipitación	Sedimentación
Entrada	Pulpa mineral, reactivos colectores y espumantes.	Pulpa de concentrado, cianuro de sodio.	Solución pregnant, zinc, acetato de plomo.	Pulpa residual, floculantes.
Objetivo	Separación sólido-sólido.	Lixiviación de metales preciosos.	Precipitación de metales preciosos.	Separación sólido-líquido.
Salida	Concentrado (minerales con oro) y colas (relaves).	Solución pregnant.	Precipitado (metales).	Sólido, líquido (agua residual recuperada).

Fuente. Elaboración propia.

El proceso de flotación tiene como objetivo separar sólidos para extraer minerales asociados al oro, como la plata y el cobre (Flores et al., 2019). Esto se logra mediante la adición de reactivos colectores y espumantes que forman una espuma donde se concentran los minerales, permitiendo su separación (Jaramillo & Muñoz, 2019). Los resultados incluyen un concentrado de minerales valiosos y colas, que se descargan a la relavera por gravedad (Quintana SAS, 2007). La cianuración se utiliza para la lixiviación de metales preciosos, controlando variables como el tamaño de partícula, la densidad de la pulpa, la aireación, la agitación, el pH y la concentración de cianuro, resultando en una solución denominada o pregnant que contiene los metales disueltos y que pasa a la etapa de precipitación. En la precipitación, se añaden zinc, acetato de plomo y cianuro disuelto en solución barren para recuperar los metales preciosos, produciendo un precipitado que se seca y funde en barras de metal. Finalmente, la sedimentación reduce el agua en la pulpa, recupera agua residual y facilita el manejo del material mediante el uso de espesadores y floculantes, resultando en sólidos extraídos por bombas y líquidos retirados por rebose.

Balance y Disposición de Relaves

El proyecto tiene una gestión estructurada para los relaves, con una capacidad de procesamiento diaria y un plan de disposición final en diferentes áreas (Figura 7

*Depósito de relaves, Mina Quintana., asegurando una vida útil de hasta 10.5 años combinando todas las áreas disponibles. Se estima que la generación diaria de material estéril en la mina es de 30,292 toneladas y la generación diaria de relaves es de 31,125 toneladas. En las **Tabla 2**, **Tabla 3**, y la **Figura 6***

Diagrama disposición de colas y estériles 2022-I., se presenta la capacidad de procesamiento, la generación y disposición de relaves.

Tabla 2

Balance de generación y destinación residuos en el semestre 2022-I.

BLANCE DE MINERAL, COLAS Y ESTÉRIL (Ton / semestre)							
Generación / semestre			Destinación / semestre				
Periodo	Mineral	Estéril	Colas	Relleno con estéril	Relleno con colas	Relavera (colas)	Vías (estéril)
2022 - I	3.919	3.635	3.735	1.520	1.613	2.122	2.115
			95,30%	41,80%	43,19%	56,81%	58,18%

Fuente. (Quintana SAS, 2022).

Tabla 3

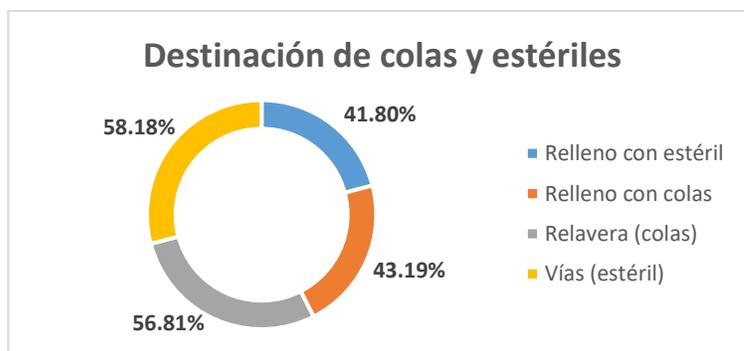
Generación de colas y estériles diarias durante el semestre 2022-I.

Generación	Ton/día
<i>Estéril</i>	30,292
<i>Colas</i>	31,125

Fuente. (Quintana SAS, 2022).

Figura 6

Diagrama disposición de colas y estériles 2022-I.



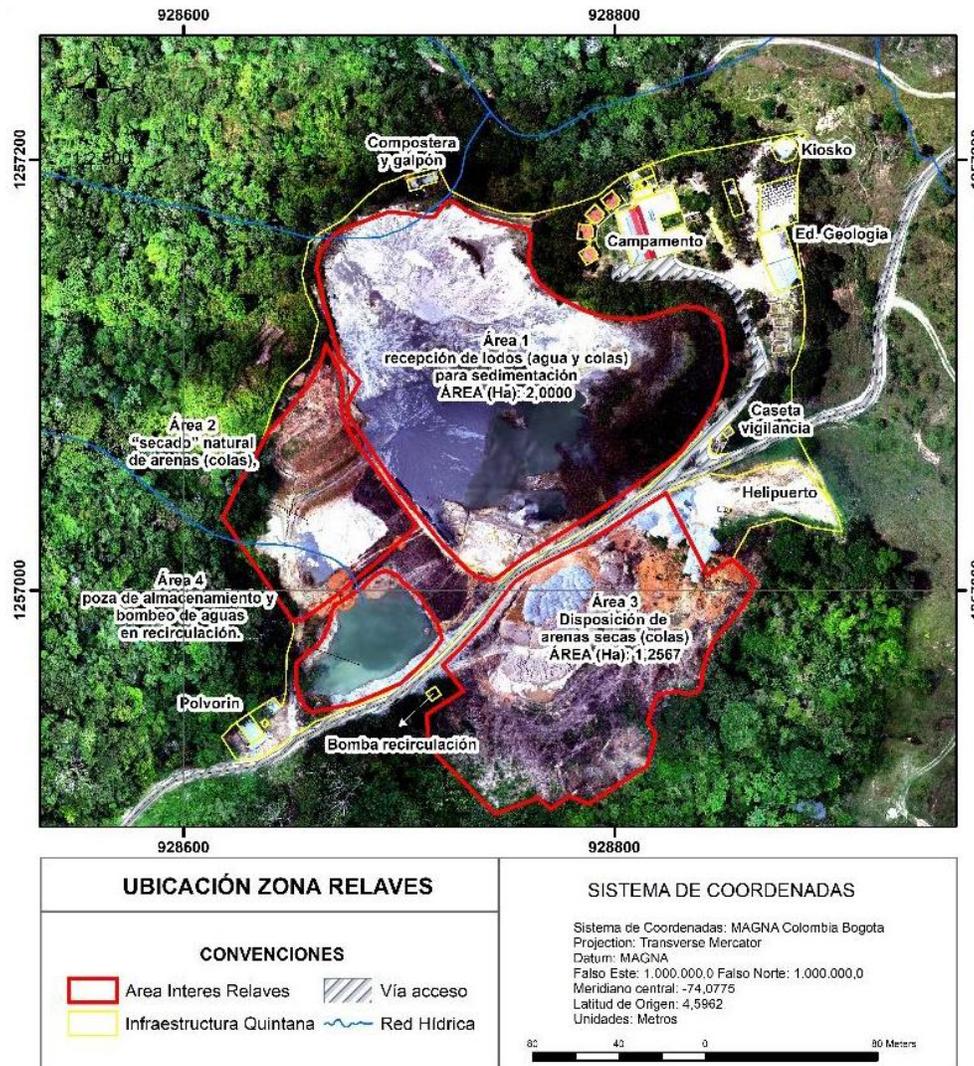
Fuente. (Quintana SAS, 2022).

Actualmente, el proyecto cuenta con un depósito de relaves con capacidad suficiente para la recepción de colas de hasta 200 ton/día de mineral, ya que, la planta de beneficio de la Mina Quintana tiene una capacidad de procesamiento de 200 ton/día y se estima que la generación de colas es del 95% del mineral procesado (190 ton/día); estas colas son enviadas al área 1 (A1), allí son deshidratadas hasta alcanzar una humedad final del 15%, dando como resultado un total de 161,5 ton/día que son pasadas a disposición final al área 2 (A2) o al área 3 (A3).

Con un estimado de 360 días/año, se disponen un promedio de 58.140 ton/año de relaves y considerando una capacidad de recepción final de 379.414 ton, la vida útil de las relaveras en el área A2 y A3 es de 6,5 años. Una vez agotadas estas áreas, se destinará el área A1 para la gestión final, reduciendo anualmente el área de recepción de manera gradual (por ejemplo, un 30%), lo que generará una nueva área libre disponible y proporcionará una vida útil adicional para disposición durante otros 4 años.

Figura 7

Depósito de relaves, Mina Quintana.



Fuente. Quintana SAS (2022).

Análisis y control de la peligrosidad de los relaves

Para asegurar que los relaves procedentes de los procesos de flotación y cianuración no son peligrosos la empresa realiza periódicamente la prueba CRETIB; las muestras son tomadas y analizadas por un laboratorio acreditado por el IDEAM.

Los resultados de las pruebas CRETIB (Figura 8

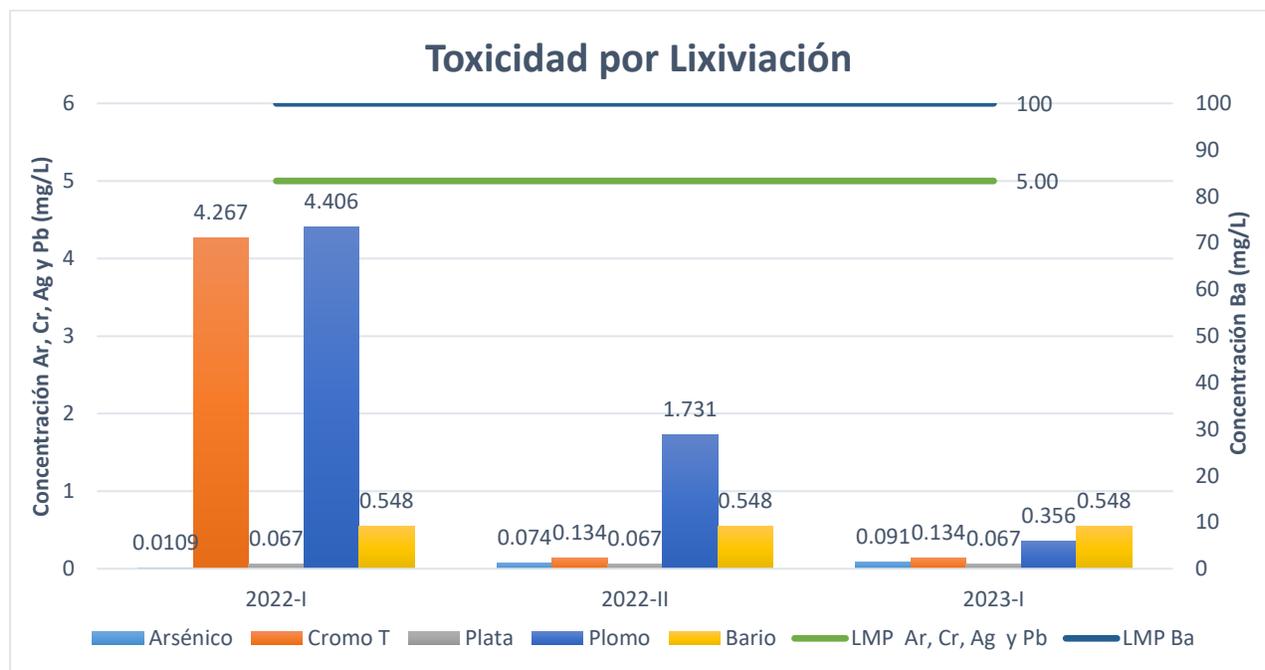
Resultados del análisis de toxicidad por lixiviación (Ar, Cr, Ag, Pb y Ba).Figura 9, Tabla 4

Resultados prueba CRETIB.) realizadas a los relaves de la mina permiten concluir que estos no presentan características de peligrosidad, ya que no muestran características de corrosividad según los métodos electrométrico, reserva ácido álcali y corrosión al acero. Tampoco presentan

inflamabilidad en pruebas de residuos sólidos ni reactividad en pruebas de sustancias que desprenden gases inflamables al contacto con agua. Además, no presentan toxicidad para metales como arsénico, bario, cadmio, cromo total, mercurio, plata, plomo y selenio, ni toxicidad acuática para las algas de la especie *Chlorella Vulgaris* y para la *Daphnia* de la especie Magna.

Figura 8

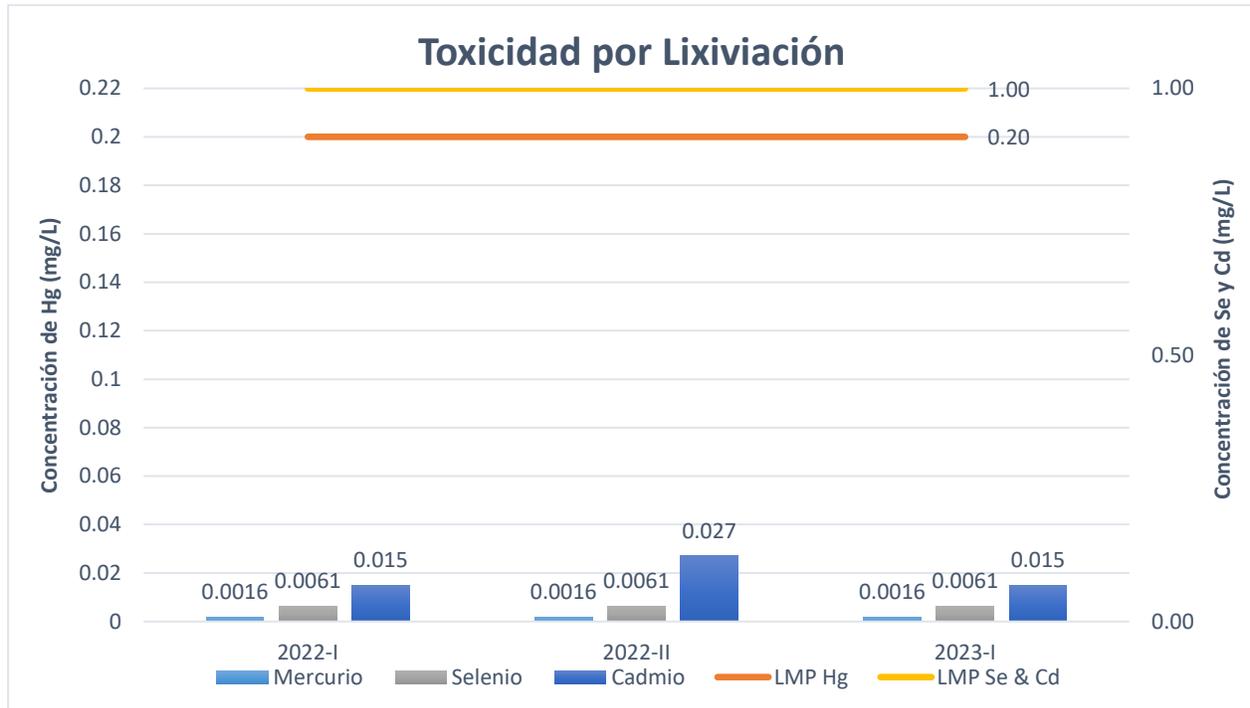
Resultados del análisis de toxicidad por lixiviación (Ar, Cr, Ag, Pb y Ba).



Fuente. (Quintana SAS, 2023).

Figura 9

Resultados del análisis de toxicidad por lixiviación (Hg, Se y Cd).



Fuente. (Quintana SAS, 2023).

Tabla 4

Resultados prueba CRETIB.

ANÁLISIS	UNIDADES	INCERTIDUMBRE	VALOR DE REFERENCIA		RESULTADO			Estado
			Resolución 0062 de 2007 IDEAM	Decreto 1076 de 2015	2022-I	2022-II	2023-I	
CORROSIVIDAD	Unidades de pH	0.020		≤2 o ≥ 12.5	7.377	7.767	6.468	Cumple
SULFURO REACTIVO	mg S ²⁻ /kg	10.06			<65.56	<65.56	<65.56	No hay Limite
CIANURO REACTIVO	mg CN ⁻ /kg	1.14			<15.79	<15.79	<15.79	No Cumple
REACTIVIDAD AL AGUA	L/kg.h	0.011		>1	Negativa	Negativa	Negativa	
ECOTOXICIDAD	% de inmovilización	0.3		50	5	0	20	
RESERVA ÁCIDO-ÁLCALI				pH + 1/12 ≥ 14.5 o pH - /12 ≤ 0.5	Negativa	Negativa	Negativa	
INFLAMABILIDAD EN SÓLIDOS	mm/s			Velocidad > 2.2	Negativa	Negativa	Negativa	

Fuente. (Quintana SAS, 2023).

Estos resultados indican que los procesos llevados a cabo en la planta de beneficio no confieren características de peligrosidad al residuo denominado relave y es consecuente con lo mencionado por Quintero & Díaz (2020), que expresa que el material residual del proceso de flotación, si bien contiene metales, al estar en condición inerte y no podrán liberarse al suelo ni cuerpos de agua por lo que no presentan condición de peligrosidad.

Usos de Relaves Mineros: Estudios y Aplicaciones

En Colombia, la gestión de relaves mineros ha sido un desafío debido a la falta de experiencia en grandes estructuras de contención y la necesidad de actualizar las regulaciones para incluir nuevas tecnologías (Quintero & Díaz, 2020). Según Beltrán et al. (2018), en el país se tiene poca experiencia en grandes estructuras de contención, como las relaveras o presas de colas, debido a la poca producción minera de gran escala. Sin embargo, recientes investigaciones y proyectos han demostrado que los relaves pueden ser reutilizados de manera efectiva y segura en diversas aplicaciones, ofreciendo tanto beneficios económicos como ambientales y sociales (Rodríguez & Ulloa, 2018; Soler, 2021).

Se han estudiado una amplia gama de usos y aplicaciones para los relaves mineros (Tabla 5). Por ejemplo, Arias (2022) y otros autores han demostrado que el uso de relaves en la construcción de pavimentos puede mejorar la calidad del agregado y reducir los costos. Además, estudios como el de Acosta (2021) y Gutiérrez (2022) han mostrado que los relaves pueden ser utilizados para fabricar ladrillos y bloques de concreto que cumplen con las normativas técnicas.

En el ámbito de la recuperación de metales y la remediación ambiental, se han propuesto diversas técnicas para caracterizar y recuperar metales presentes en los relaves. Asimismo, la recuperación de metales presentes en los relaves no solo proporciona un beneficio económico, también contribuye a la reducción de residuos mineros, como lo indican Flores et al. (2019) y González & García (2011). Finalmente, la incorporación de relaves en mezclas de mortero y concreto no solo mejora la resistencia y la permeabilidad del material, sino que también representa una alternativa sostenible para la industria de la construcción (Celis & Monsalve, 2023; Gutiérrez, 2022).

Tabla 5
Usos de relaves mineros y conclusiones de estudios.

Autores	Usos	Conclusion	¿Aporta a los procesos de la Mina Quintana?
(Arias, 2022; AngloGold Ashanti, 2021; Aucasi, 2018; Valdés, 2017)	Pavimento	La incorporación de relave minero a la subbase del pavimento flexible influye de manera favorable en el aspecto económico y técnico, mejorando la calidad del agregado.	Si
(Celis & Monsalve, 2023; Arias, 2022; Suarez, 2022; Arias et al., 2021; Cárdenas, 2019; Rodríguez & Ulloa, 2018; Arenas, 2016)	Mezclas de mortero y concreto	Los relaves presentan características homogéneas y pueden ser utilizados en aplicaciones de mortero de revoque y como agregado grueso en mezclas de concreto, cumpliendo con los estándares establecidos en el sector de la construcción. Además, la sustitución del agregado fino por relave en el concreto mejora la resistencia a la compresión y la permeabilidad del material.	Si
(Corporación Alta Ley, 2023; Gutiérrez, 2022; Minería Chilena, 2021; Acosta, 2021; Flores et al, 2019; Pereira, 2018; Romero & Flores, 2010)	Ladrillos, baldosas y bloques de concreto	La elaboración de bloques de concreto y ladrillos sólidos con relaves cumple con normativas técnicas, ofreciendo una solución viable y sostenible para la construcción de estructuras. Además, las propiedades del cemento encapsulan los metales pesados.	No
(Escobar, 2022)	Vitrificación	Los relaves mineros tienen un punto de fusión muy elevado y presentan alta viscosidad, lo que dificulta su trabajabilidad y demanda una gran cantidad de fundentes lo que hace inviable el tratamiento técnica y económicamente.	No
(Henao Casas, 2023; Ika Minería, 2023; Zamareño & Díaz, 2021; Flores, et al., 2019; Jaramillo & Muñoz, 2019; Gonzáles & García, 2011)	Recuperación de metales	Se propone la caracterización y recuperación de metales presentes en los relaves para su aprovechamiento económico y el desarrollo de la minería de metales raros; con técnicas como la flotación, concentración gravimétrica y la biolixiviación.	Si
(Revista Nueva Minería y Energía, 2024; PortalMinero, 2022)	Hormigón normal y tipo shotcret	Las arenas de relave tienen características similares a la arena convencional, o al menos suficientes para ser utilizada en el hormigón para la fortificación de túneles subterráneos.	Si
(Pardavé, et al, 2022)	Filtros	Es posible incluir el relave minero como material filtrante en la elaboración de filtros para la neutralización del pH en los Drenajes Ácidos Mineros.	Si
(Espin et al., 2021; Quintero Araque & Díaz González, 2020; Fontana & Fracassi, 2020; Bustamante Baena et al., 2019; Beltrán-Rodríguez et al., 2018)	Optimización del almacenamiento y disposición: Espesamiento, filtrado, retrolenado, realce y disposición submarina.	Las alternativas emergentes para el manejo de relaves en la minería de oro tienden a ser beneficiosas, por lo que implementar este tipo de tecnologías podría garantizar un manejo óptimo y seguro de los relaves. Sin embargo, técnicas como la disposición submarina deben evitarse.	Si
(Camargo, 2018)	Cemento	Mediante un nuevo tratamiento térmico y mecánico de estos residuos, se puede duplicar la capacidad del cemento, llegando a reemplazar hasta un 40% del cemento por relave.	No

Fuente. Elaboración propia.

7 Análisis y discusión: casos exitosos o aplicables al contexto de la Mina

Mezclas de mortero y concreto.

Arias et al. (2021) evaluaron el uso de los relaves del Bajo Cauca Antioqueño en mezclas de mortero y concreto. La caracterización granulométrica de estos relaves mostró una distribución de partículas homogénea y perteneciente a la fracción fina, lo que los hace adecuados para aplicaciones como mortero de revoque. Los estudios de granulometría, contenido de materia orgánica, y pruebas de no plasticidad confirmaron que estos relaves cumplen con los estándares establecidos en el sector de la construcción (Icontec, 2017).

El análisis de Arias et al. (2021) también indicó que las muestras de relaves, aunque homogéneas, presentaban una distribución de tamaño de partícula heterogénea, permitiendo su uso como agregado fino y grueso en mezclas de concreto. Utilizando cemento Portland tipo I y siguiendo la metodología del ACI (2002), las pruebas mostraron que los cilindros de concreto, fabricados con estos relaves, presentaron mayores resistencias que las especificadas a los 28 días, sugiriendo que los cálculos estructurales fueron correctos.

Estos hallazgos no solo demuestran la viabilidad técnica, sino que otros estudios también destacan mejoras en la resistencia a la compresión y permeabilidad del concreto con la sustitución del agregado fino por relaves (Rodríguez & Ulloa, 2018; Arias, 2022; Suárez, 2022). Esto refuerza la idea de que los relaves mineros pueden ser una alternativa viable y efectiva para la Mina Quintana en la producción de morteros y concreto.

Investigaciones como las de Cárdenas (2019) sugieren que el uso de geopolímeros, como la cal y el cemento, puede encapsular metales pesados, mitigando riesgos ambientales. Aunque es importante destacar que los resultados de toxicidad por lixiviación de metales pesados mostrados en las **Figura 8** **Figura 9** evidencian que el residuo de la Mina Quintana no presenta riesgo, permitiendo su uso sin afectar la salud y el ambiente.

En resumen, la reutilización de los relaves en la Mina Quintana no solo es viable, sino también beneficiosa, al cumplir con los estándares de construcción y no presentar riesgos ambientales significativos.

Recuperación de Metales y Remediación Ambiental.

González y García (2011) caracterizaron relaves en la provincia geológica de Pastora, Venezuela, identificando metales valiosos como oro, mercurio y el platino, además de elementos como niobio, vanadio, indio y rubidio, en cantidades atractivas para su recuperación. Proponen métodos de remolienda para recuperar el mercurio mediante testación, aplicar cianuración para la recuperación de oro y finalmente adicionar agua regia, hidróxido sódico y precipitar con cloruro de amonio el platino, seguidos de técnicas de flotación y concentración gravimétrica para convertir los relaves en agregados de construcción (Flores et al., 2019).

Para la mina Quintana, esta opción sería viable por varias razones como que la recuperación de metales contenidos en los relaves ofrece beneficios económicos significativos, ya que los metales valiosos como el oro y el platino tienen un alto valor en el mercado. Por otra parte, al caracterizar las arenas resultantes del proceso de extracción del oro y la plata, la mina puede reprocesar el material con la maquinaria existente, maximizando el uso de sus recursos actuales sin necesidad de realizar grandes inversiones adicionales. Esto no solo genera ingresos, sino que también contribuye a la reducción de desechos y al mejor aprovechamiento de los recursos naturales.

Además, al convertir los relaves en agregados de construcción, la mina puede reducir la necesidad de almacenar grandes volúmenes de residuos, lo que mejora la sostenibilidad de las operaciones y disminuye el impacto ambiental. Esta práctica también se alinea con los principios de la economía circular, donde los residuos se convierten en nuevos recursos, promoviendo una gestión más eficiente y responsable de los desechos mineros.

Construcción de Vías.

Auccasi (2018) desarrolló una mezcla de pavimento con adición de relaves mineros, logrando una resistencia a compresión del 99.40% en comparación con mezclas estándar. La incorporación de relaves optimizó el uso del agregado fino en un 25%. Rodríguez y Ulloa (2018) encontraron que la sustitución del 10% del agregado fino por relaves en concreto de bajo tránsito incrementó la resistencia a la compresión en un 10% y redujo la permeabilidad en un 52%.

Arias (2022) también encontró que la incorporación de un 30% de relave minero en la subbase del pavimento flexible mejora la calidad del agregado y proporciona beneficios

económicos y técnicos. El proyecto minero Quebradona implementó el uso de relaves en la pavimentación de vías terciarias en Jericó, con resultados preliminares positivos en términos de seguridad y eficiencia (AngloGold Ashanti, 2021).

La viabilidad de esta opción se destaca porque la incorporación de relaves en la construcción de pavimentos y otros materiales de construcción no solo mejora las propiedades técnicas de estos materiales (como la resistencia a la compresión y la permeabilidad), también optimiza el uso de los recursos disponibles. Esto es particularmente relevante para la Mina Quintana, ya que permite reutilizar residuos que de otro modo requerirían almacenamiento costoso y potencialmente perjudicial para el medio ambiente.

Además, la adopción de esta práctica puede proporcionar beneficios económicos significativos. La optimización del uso de agregado fino y la mejora en la calidad del material de construcción pueden reducir costos de producción y mejorar la eficiencia operativa. Los estudios citados demuestran que la sustitución parcial de agregados tradicionales por relaves mineros puede llevar a ahorros considerables en materiales y mejorar la durabilidad y seguridad de las infraestructuras.

Es especialmente importante señalar que el proyecto de la mina Quintana necesita realizar mantenimiento y mejorar las vías de acceso a la mina. La utilización de relaves en la pavimentación de estas vías no solo facilitaría el transporte y las operaciones dentro de la mina, sino que también podría contribuir al mejoramiento de las vías en su área de influencia. Esto no solo beneficiaría a la empresa en términos de logística y costos, sino que también tendría un impacto positivo en las comunidades locales, mejorando la infraestructura vial y fortaleciendo las relaciones con la comunidad.

Tratamiento de Aguas Residuales.

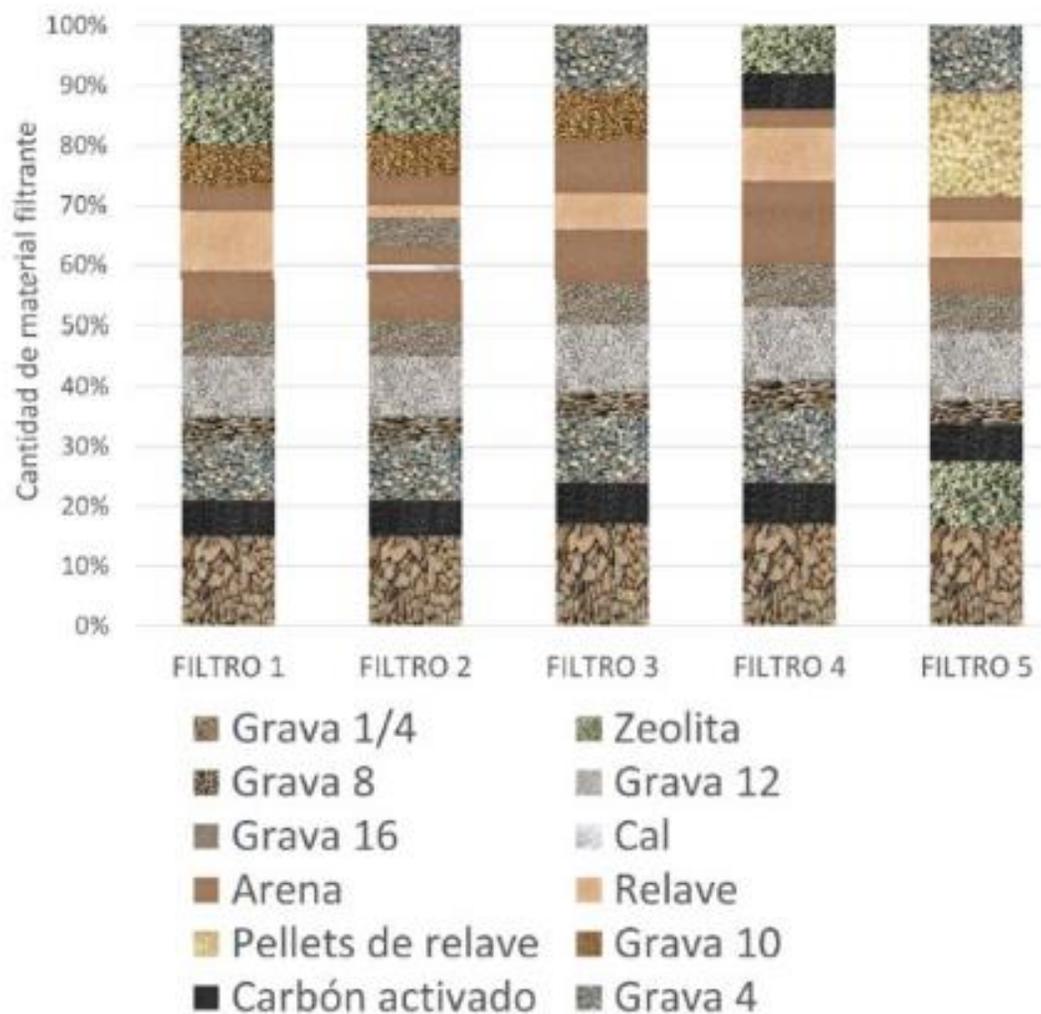
Pardavé et al. (2022) presenta una propuesta de mitigación de PAM mediante el diseño de cinco filtros que incluyen relaves o residuos mineros en su mezcla. Estos filtros fueron producto de cuatro fases exploratorias en las que se construyeron 20 filtros variando sus materiales filtrantes y sometiéndolos a pruebas de neutralización de DAM. Los filtros finales fueron seleccionados y construidos teniendo en cuenta la velocidad de filtrado, neutralización del pH y remoción de sólidos. Las pruebas realizadas durante 17 días mostraron que todos los filtros lograron neutralizar

el pH del efluente dentro de los rangos permitidos por la resolución 0631 de 2015 para vertimientos en el sector minero aurífero (6 a 9) (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Los filtros 1 y 3 (**Figura 10**

Composición porcentual del material de los filtros finales.), aunque con procesos de filtración más lentos, demostraron ser efectivos en la remoción de sólidos y la neutralización del pH de manera consistente durante el periodo evaluado.

Figura 10

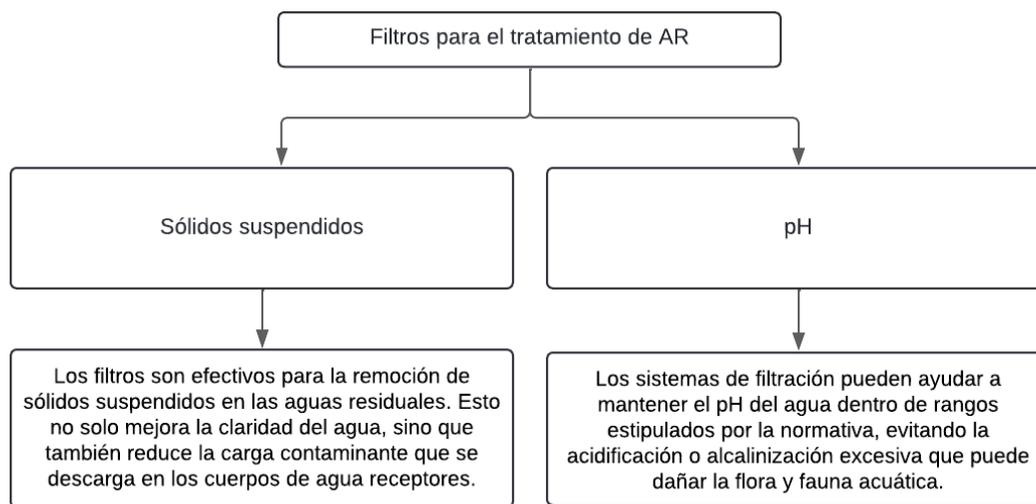
Composición porcentual del material de los filtros finales.



Fuente. (Pardavé et al., 2022).

Figura 11

Importancia de los filtros en el tratamiento de las AR.



Fuente. Elaboración propia.

En la operación minera, se generan aguas residuales tanto domésticas como industriales. La correcta gestión y tratamiento de estas aguas es esencial para minimizar el impacto ambiental y proteger las fuentes de agua superficial y subterráneas. La integración de sistemas de filtración en el tratamiento de aguas residuales del proyecto minero no solo es aplicable, sino esencial para garantizar la sostenibilidad ambiental y la protección de los recursos hídricos. La mejora en la calidad de los vertimientos contribuye a la preservación de los ecosistemas acuáticos y al bienestar de las comunidades circundantes.

8 Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones se hacen en busca de aportar al mejoramiento de la gestión de los relaves mineros, reduciendo su impacto ambiental y contribuyendo al desarrollo sostenible de la empresa Quintana SAS y de la región donde opera:

Tabla 6

Recomendaciones para la aplicación de las opciones viables.

Aplicación	Plazo	Método
Mantenimiento y/o mejoramiento de Vías	Corto	Incorporar los relaves en las mezclas sustituyendo entre el 25 al 30 % del agregado fino (arenas) por relaves
Mezclas de morteros y concreto		
Filtros	Mediano	Mezclar y ensamblar los materiales de filtrado de acuerdo con las proporciones y el orden indicados en la Figura 10, para el filtro 1. Nota: las dimensiones del filtro dependerán del caudal a tratar; para que el relave no se filtre con el AR debe estar entre dos capas de arena.
Reprocesamiento de los relaves	Largo	Realizar la caracterización minuciosa de los relaves de manera que se identifiquen los metales presentes en este residuo que puedan ser recuperados con el reprocesamiento de estos en la planta de beneficio

Fuente. Elaboración propia.

- Realizar pruebas piloto para explorar diversas alternativas de reutilización de los relaves, incluyendo su uso en la construcción de mortero, concreto y pavimentos, para el mejoramiento de la infraestructura del proyecto, las vías y las obras civiles necesarias para la comunidad. Además, se sugiere utilizar estos materiales para la fabricación de bloques, adoquines, pilares, etc., contribuyendo con la economía local.
- Implementar proyectos piloto para evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de las diferentes alternativas de reutilización de los relaves; haciendo énfasis en la construcción de infraestructura vial, para monitorear y evaluar su impacto ambiental a largo

plazo. Estos proyectos pueden ayudar a identificar los beneficios y desafíos asociados con cada opción y proporcionar información clave para la toma de decisiones.

- Trabajar en colaboración con expertos en gestión de relaves, minería sostenible e ingeniería ambiental para obtener asesoramiento técnico y apoyo en la implementación de nuevas prácticas. Colaborar con autoridades gubernamentales para asegurar el cumplimiento de las regulaciones ambientales y promover prácticas de gestión responsables.
- Involucrar a la comunidad local en el proceso de gestión de relaves, proporcionando información transparente y fomentando la participación en la toma de decisiones en búsqueda de un beneficio conjunto. Incluir estos temas en los programas de educación ambiental para promover la conciencia sobre la importancia de la gestión sostenible de los recursos naturales.
- Adoptar tecnologías como la reprocesamiento de los relaves, para la separación y recuperación de metales valiosos de los relaves auríferos, generando ingresos adicionales y reduciendo la cantidad de desechos almacenados.
- Continuar investigando y desarrollando tecnologías para la caracterización y recuperación de metales presentes en los relaves, con el fin de maximizar su aprovechamiento económico y reducir su impacto ambiental.

9 Conclusiones

La recuperación de metales valiosos presentes en los relaves mineros no solo presenta una oportunidad económica significativa al transformar estos residuos en recursos útiles para la industria metalúrgica, sino que también contribuye a la reducción del impacto ambiental asociado a la disposición de relaves. Métodos como la flotación y la concentración gravimétrica son eficaces para extraer estos metales, proporcionando una fuente adicional de ingresos y promoviendo una gestión de residuos más sostenible.

La utilización de relaves mineros en la construcción de vías demuestra beneficios claros en términos de resistencia y permeabilidad de los materiales, optimizando el uso de recursos de construcción. Proyectos como el de Quebradona evidencian que incorporar relaves en la pavimentación no solo mejora las condiciones del suelo y reduce la cantidad de cemento necesario, sino que también puede disminuir los costos operativos de la minería al integrar el uso de relaves en múltiples obras del proyecto, promoviendo prácticas de infraestructura más sostenibles y eficientes.

La instalación de sistemas de filtración requiere una inversión inicial; sin embargo, los beneficios a largo plazo en términos de cumplimiento normativo y reducción de impactos ambientales justifican esta inversión.

La elaboración de ladrillos, baldosas, bloques y cemento requiere una inversión significativa en maquinaria, personal y espacio, además de permisos adicionales. Por ello, no se considera una opción viable en este trabajo, ya que se buscan alternativas que puedan contribuir a los procesos que se llevan a cabo en el proyecto sin generar inversiones adicionales.

Los estudios revisados destacan métodos de optimización del almacenamiento y disposición de relaves, como el espesamiento, el retrolenado y realce; algunos de los cuales ya implementa Quintana SAS. Sin embargo, es importante que la empresa continúe explorando y adoptando técnicas innovadoras para mejorar sus prácticas actuales, lo que permitirá optimizar la gestión de relaves y contribuir al desarrollo sostenible de la región.

Los estudios realizados en diferentes aplicaciones de los relaves mineros han demostrado que estos pueden ser utilizados de manera efectiva en la construcción de pavimentos, fabricación de materiales de construcción, recuperación de metales y elaboración de morteros. Estas prácticas no solo proporcionan una solución sostenible para la gestión de relaves, sino que también mejoran

las propiedades técnicas y económicas de los productos resultantes, contribuyendo a la mitigación de impactos ambientales y a la optimización de recursos en la industria minera. La caracterización detallada de los relaves y la evaluación de sus propiedades físicas y químicas son esenciales para determinar su idoneidad en diversas aplicaciones, ofreciendo una alternativa sostenible y económica para la industria de la construcción.

10 Referencias

- Acosta, M. (2021). *Relave minero como alternativa de reciclaje para la industria de la construcción. Petroenergía*. <https://shre.ink/8Uk4>
- American Concrete Institute Committee [ACI]. (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.*, Pub. L. No. ACI 211.18, 121.
- AngloGold Ashanti. (2021, 18 febrero). *Relaves de mina en Jericó podrían ser usados para pavimentación de vías terciarias*. AngloGold Ashanti Colombia. <https://shre.ink/8UkN>
- Arango, M., & Olaya, Y. (2012). *Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. DOAJ (DOAJ: Directory Of Open Access Journals)*, 125-133. <https://shre.ink/8UkE>
- Arenas, C. (2016). *Investigación tecnológica para el uso de relaves mineros como agregado del concreto - Arequipa 2015 [Universidad Alas Peruanas]*. <https://shre.ink/8UkR>
- Arias, S., Córdoba, J., & Gómez, M. (2021). *Alternatives for the use of waste from the mining industry of El Bajo Cauca Antioqueño in the construction sector*. Dialnet. <https://shre.ink/8Uki>
- Arias, V. (2022). *Incorporación de Relave Minero en Subbase del Pavimento Flexible Km 0+000 al Km 1+000 Carretera Ananea – Rinconada, Putina, Puno, 2022*". Universidad César Vallejo.
- Asociación Colombiana de Minería [ACM]. (2018). *Desarrollo del Sector Minero Colombiano 2018 - 2022*. <https://shre.ink/8UBR>
- Auccasi, H. (2018). *Diseño de mezcla con adición de relaves mineros para pavimentos de resistencia media, Ayacucho 2018*. Universidad Alas Peruanas.
- Beltrán-Rodríguez, L. N., Larrahondo, J. M., & Cobos, D. (2018). *Tecnologías Emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia*. <https://shre.ink/8UkX>

- Bustamante Baena, P., Bustamante Rúa, M. O., Osorio Botero, J. D., & Daza Álvarez, C. A. (2019). *Diseño geométrico de espesador-sedimentador y espesador en contracorriente (CCD) en minería de oro para disposición de relaves*. Boletín de Ciencias de La Tierra, 46, 19–26. <https://doi.org/10.15446/rbct.n46.77553>
- Camargo, R. (2018). *Chile duplica desempeño del cemento a partir de mezclas con relaves de cobre*. Guía Minera de Chile. <https://shre.ink/8Ukv>
- Cárdenas, F. (2019). *Propuesta de uso de relaves de mina polimetálica en la fabricación de unidades de albañilería - caso ex unidad minera Mercedes 3*. <https://shre.ink/8Ukh>
- Castro, L. M. (2015). *La planificación ambiental en Colombia*. <https://shre.ink/8UkL>
- Castro-Caicedo, A. J., Alejano, L. R., Oliveros, J. E. M., & Montiel, A. B. (2019). *Diseño geotécnico de pilares en minas subterráneas de vetas auríferas en casos de Colombia*. Dyna, 86(209), 337-346. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.74041>
- Celis, B., & Monsalve, L. (30 de mayo de 2023). *Análisis de la viabilidad en la Sustitución de Agregado Fino por Residuos de Relave*. Universidad de Santander. Repositorio udes. Relave minero en pavimentos flexibles. <https://shre.ink/8U8R>
- Colombia. Congreso de la Republica. (2001). *Ley 685 de 2001 (agosto 15): por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 44.545.
- Colombia. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia [CORANTIOQUIA]. (2007, 9 noviembre). *Resolución N°130ZF-2952: por la cual se otorga una licencia ambiental*.
- Colombia. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia [CORANTIOQUIA] & Centro Nacional de Producción Más Limpia [CNPMLTA]. (2016). *Manual de Producción y Consumo Sostenible, Gestión del Recurso Hídrico: Minería de Oro: Convenio 1506-93*. Actúa.
- Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2007). *Resolución 685 de 2007 (marzo 30): por la cual se adoptan los protocolos de muestreo y análisis de*

laboratorio para la caracterización fisicoquímica de los residuos o desechos peligrosos en el país. Diario Oficial No. 46.703.

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2019). *Documento técnico de investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera y los impactos de la actividad minera y la explotación ilícita de minerales, en los ecosistemas del territorio colombiano* [Proyecto de investigación sentencia T 445 de agosto de 2016].

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2022, 14 enero). *Diagnóstico de la información ambiental y social respecto a la actividad minera y la extracción ilícita de minerales -Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.* <https://shre.ink/8UTT>

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631 de 2015 (marzo 17): por la cual se establecen los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.* Diario Oficial No. 49.486.

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 de 2015 (mayo 26): por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.* 26 de mayo de 2015. D. O. No. 49.523.

Colombia. Ministerio de Minas y Energía [MINENERGÍA] & Asesorías Técnicas Geológicas [ATG]. (2020). *Contrato de consultoría GGC-468-2020: Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves en minería.* <https://shre.ink/8UTU>

Colombia. Ministerio de Minas y Energía. (2011). *Decreto 4134 de 2011 (noviembre 3): por el cual se crea la Agencia Nacional de Minería, ANM, se determina su objetivo y estructura orgánica.* Diario Oficial No. 48.242.

Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (s. f.). *Marco Legal Minero.* [Upme.gov.co](http://upme.gov.co). <https://shre.ink/8Uka>

-
- Corporación Alta Ley. (2023, 2 noviembre). *Ladrillo ecológico hecho a partir de relaves: la innovación que generaría un triple impacto en la región de*. Portal Minero. <https://shre.ink/8UkH>
- Escobar, C. (2022). *Viabilidad técnica del proceso de vitrificación como alternativa al manejo de relaves mineros*. Repositorio Institucional Universidad Eia. <https://shre.ink/8UkU>
- Espín, D., Jarrin, J., & Escobar, O. M. (2021). *Manejo, gestión, tratamiento y disposición final de relaves mineros generados en el proyecto río blanco*. Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa, 2(4), 12. <https://doi.org/10.24133/rcsd.v2n4.2017.01>
- Fierro, J. (2019, 11 febrero). *Los desechos de la minería y las presas de relave: una bomba de tiempo*. Razón Pública. <https://shre.ink/8Uk1>
- Flores, S., Núñez, P., Zegarra, E., & Flores, J. (2019). *Metodología de tratamiento de remediación de pasivos ambientales mineros de Cerro El Toro de Huamachuco para el desarrollo sostenible*. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas/Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 22(44), 85-94. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v22i44.17289>
- Fontana, B. G., & Fracassi, G. (2020). *Innovación en la presa de relaves: Almacenamiento con geotextiles Optimización de almacenamiento Presa de Relave El Chocho*. Congreso Nacional de Ingeniería. <https://shre.ink/8Ur1>
- González, V., & García, Y. (2011, 1 diciembre). *caracterización de las arenas de relaves producidas en el proceso de amalgamación de minerales auríferos para su aprovechamiento económico en la pequeña minería*. Document - Gale Academic OneFile. <https://shre.ink/8UTP>
- Gutiérrez, K. (2022). *Uso del relave en la elaboración de ladrillo maquinado y/o artesanal, obtenido del proceso de concentración metalúrgica de minerales auríferos por gravimetría y flotación - planta prosuyo S.A [Tesis de Doctorado]*. Universidad Nacional de Piura.

-
- Hena Casas, J. (2023). *Recuperación de oro libre y asociado a la pirita de los relaves de la minera El Roble por el método de flotación: Parte 2*. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/35762>
- Ika Minería. (2023, 19 octubre). *Nuevas Tecnologías de Gestión de Relaves Mineros para un Futuro Sostenible*. IKA. <https://shre.ink/8UT6>
- información ambiental y social respecto a la actividad minera y la extracción ilícita de Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC]. (2007). *Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado*. <https://shre.ink/8UT0>
- Jaramillo, R., & Muñoz, N. (2019). *Diseño del procesamiento de menas auríferas refractarias provenientes del Municipio Buenos Aires, Colombia*. <https://shre.ink/8UTO>
- La Rotta, Á. M., & Torres, M. H. T. (2017). *Explotación minera y sus impactos ambientales y en salud. El caso de Potosí en Bogotá*. *Saúde Em Debate*, 41(112), 77-91. <https://doi.org/10.1590/0103-1104201711207>
- Massé, F., & Munévar, J. (2016). *Informe debida diligencia en la cadena de suministros de oro colombiana minería aurífera en Antioquia*. *Oecd.org*. <https://shre.ink/8UTy>
- minerales - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://shre.ink/8UTT>
- Minería Chilena. (2021, 29 junio). *Radiografía: Soluciones para el manejo y reaprovechamiento de relaves | Mch*. <https://shre.ink/8UTC>
- Pardavé, W., Serrano, B., & Castillo, C. (2022). *Mitigación de pasivos ambientales de Drenajes Ácidos Mineros DAM mediante reúso del relave minero*. *Dialnet*. <https://shre.ink/8UdY>
- Pereira, S. F. (2018). *Estudio de factibilidad técnica de aprovechamiento de relave abandonado de oro "coordinadas UTN N-6252732 y E-319762*. [Tesis de pregrado, Universidad Andrés Bello]. <https://shre.ink/8UdV>
- PortalMinero. (2022, 12 septiembre). *Proyecto usa arena de relaves para la fortificación de túneles en minería subterránea - Portal Minero*. *Portal Minero*. <https://shre.ink/8Udz>

-
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] & Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2012). *Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala: proyecto: contribución a la construcción de un plan estratégico regional para la reducción del uso de mercurio en la minería aurífera artesanal y de pequeña escala (ASGM, siglas en inglés)*. <https://shre.ink/8UWi>
- Quintana SAS. (2007). *Estudio de impacto ambiental Proyecto Mina Quintana* (1.^a ed.).
- Quintana SAS. (2022). *Estudio de Impacto ambiental Proyecto Mina Quintana* (2.^a ed.).
- Quintana SAS. (2023). *Consolidado Informes de cumplimiento ambiental - ICA*.
- Quintero Araque, E., & Díaz González, D. (2020). *Identificación de alternativas de almacenamiento de relaves generados en la minería aurífera en Colombia*. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <https://shre.ink/8UWo>
- Reguera, E. (2023, 5 agosto). *La importancia del oro en la economía: beneficios y perspectivas*. Aprende Economía. <https://shre.ink/8UWM>
- Revista Nueva Minería y Energía. (2024, 2 febrero). *Material de Relaves Reemplaza A Áridos En el Hormigón*. <https://shre.ink/8UWT>
- Rodríguez, J., & Ulloa, F. (2018, 10 enero). *Influencia de la sustitución del agregado fino por relave minero en la resistencia a compresión y permeabilidad de un concreto de bajo tránsito, Parcoy - La Libertad - 2018*. <https://shre.ink/8UWH>
- Rodríguez, S. D. (2021). *Estudio arqueológico de la minería aurífera: un análisis de la minería de oro en el complejo minero del zancudo en Titiribí, Antioquia durante el periodo de 1850 a 1940*. Repositorio Digital Institucional de la Universidad Externado de Colombia. <https://shre.ink/8Usz>
- Romero, A. (s. f.). *La minería y la industrialización del país. Una mirada desde Antioquia* [Memoria. Universidad de Antioquia: protagonista y testigo]. <https://shre.ink/8Usj>

-
- Romero, A., & Flores, S. (2010). *Reúso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas*. Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial, 75-82. <https://shre.ink/8Us5>
- Soler, D. M. (2021, 18 febrero). *Relaves de mina de Jericó serían usados para pavimentar vías terciarias en Antioquia*. Diario la República. <https://shre.ink/8Ust>
- Suarez, A. (2022). *El relave minero como agregado del concreto en el diseño de mezcla en $f'c=350$ kg/cm² al 5%, 15%, 25 % en el centro poblado de Chicrin – 2021*. Universidad de Huánuco.
- Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2007). *Producción más limpia en la minería del oro en Colombia: Mercurio, cianuro y otras sustancias*. upme.gov.co.
<https://shre.ink/8UsM>
- Valdés, V. (2017). *Estudio de factibilidad técnica y económica del aprovechamiento integral de un relave aurífero, coordenadas UTM N 6338565; E 318500, comuna de tilitil, región metropolitana*.
- Valencia, J. (2006). *Tecnologías limpias en las industrias extractivas minero-metalúrgica y petrolera* (R. Bôas & M. Sánchez, Eds.) [Indicadores de Sostenibilidad para la Industria Extractiva Mineral]. <https://shre.ink/8Us8>
- Zamarreño, R., & Díaz, F. (2021). *Recuperación de metales económicamente importantes desde relaves mineros abandonados, usando biolixiviación en columnas de fase inversa, de bajo costo y ambientalmente sostenible*. Avances En Ciencia E Ingeniería, ISSN:0718-8706.
<https://shre.ink/8Usk>