



**Evaluación técnico–normativa y socioambiental del aprovechamiento de estériles auríferos
como sustituto de recebo en la construcción y mejoramiento de vías terciarias en Marmato
(Caldas, Colombia)**

Andrés Salazar Valencia

María Carolina Rangel Benedetti

Fabián Alejandro Sarmiento Moreno

Especialización de Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Universidad Santo Tomás

Seccional Virtual

Trabajo de Grado

Dra. Nidia Elena Ortiz Penagos

06 de noviembre de 2025

CONTENIDO

2.	INTRODUCCIÓN	4
3.	OBJETIVOS	5
3.2.	Objetivos Específicos.....	5
4.	ANTECEDENTES	6
4.1.	Vías terciarias en Colombia: estado y relevancia	6
4.2.	Desafíos de abastecimiento y costos de materiales granulares	7
4.3.	Contexto minero de Marmato (Caldas) y generación de estériles	7
4.4.	Economía circular y lineamientos estratégicos en minería.....	8
4.5.	Casos internacionales comparables.....	8
5.	MARCO TEÓRICO.....	9
5.1.	Parámetros técnicos propuestos para la evaluación	9
5.2.	Marco normativo y contexto legal	12
5.3.	Marco contextual	13
6.	METODOLOGÍA	16
6.1.	Diseño general	16
6.2.	Estrategia de búsqueda.....	17
6.3.	Extracción y sistematización.....	17
6.4.	Evaluación normativa	18
6.5.	Análisis socioambiental y económico.....	18
6.6.	Limitaciones y recomendaciones.....	18
6.7.	Marco normativo consolidado	19
7.	RESULTADOS	23
7.1.	Síntesis de literatura y datos comparables	23
7.1.1.	Enfoque y criterios de selección	23
7.2.	Contrastación de valores consolidados de estériles con los rangos de los criterios normativos.....	26
7.3.	Evaluación comparativa y brechas.....	27
7.4.	Ensayos faltantes y plan de verificación.....	31
7.5.	Formulación de recomendaciones preliminares y requerimientos de ajustes en el diseño de mezclas	31
	CONCLUSIONES	32
	REFERENCIAS.....	34

1. RESUMEN

La insuficiente transitabilidad de la red de vías terciarias en Colombia limita la integración económica rural y eleva los costos logísticos, en parte por la dependencia de materiales granulares convencionales (recebo) cuya obtención y transporte encarecen las intervenciones en territorios de compleja topografía. Paralelamente, el distrito aurífero de Marmato (Caldas) genera volúmenes significativos de estériles cuyo manejo inadecuado puede incrementar riesgos de inestabilidad y potenciales afectaciones ambientales. Bajo un enfoque de economía circular, surge la hipótesis de que dichos estériles podrían constituir un sustituto técnico y ambientalmente viable del recebo en capas de afirmado de vías terciarias, siempre que cumplan criterios normativos y no introduzcan riesgos geoquímicos. Este estudio desarrolla una evaluación documental sistematizada (fuentes $\leq$ 5 años prioritariamente) para: identificar parámetros técnico–normativos aplicables; compilar y organizar datos reportados sobre propiedades geotécnicas y ambientales de estériles auríferos y materiales mineros análogos; contrastar su desempeño respecto de límites exigidos (límite líquido LL, índice de plasticidad IP, California Bearing Ratio o resistencia a la penetración CBR, durabilidad, limpieza de finos, parámetros químicos) y analizar beneficios y riesgos socioambientales (reducción de extracción de agregados vírgenes, mitigación de pasivos, accesibilidad rural, potenciales impactos geoquímicos). Los resultados esperados incluyen matrices comparativas de cumplimiento de granulometría, límites de LL, IP, CBR, solidez para sulfatos, micro-DEVAL; identificación de brechas entre los parámetros obtenidos y los requeridos y recomendaciones de ensayos y controles para una eventual fase piloto. Se aporta así una línea base evaluativa que orienta decisiones de gestión sostenible de residuos mineros y mejora de infraestructura vial rural en el marco de la circularidad de materiales.

Palabras clave: estériles; recebo; vías terciarias; evaluación normativa; economía circular; Marmato.

2. INTRODUCCIÓN

Las vías terciarias en Colombia constituyen un eslabón crítico para la movilidad rural, la integración productiva y el acceso a servicios básicos. Sin embargo, enfrentan brechas históricas de cobertura, transitabilidad y durabilidad, agravadas por limitaciones presupuestales y la dispersión geográfica de los asentamientos rurales. Dentro de los costos de construcción y mejoramiento de estas vías, la provisión y transporte de materiales granulares (como el recebo) representa una fracción significativa, particularmente en zonas de topografía compleja y accesos restringidos. Al mismo tiempo, en distritos mineros auríferos como el de Marmato (Caldas) se generan volúmenes considerables de estériles (residuos rocosos y finos no económicamente aprovechables) cuyo manejo inadecuado puede contribuir a inestabilidad de taludes, aporte de material particulado a cauces y riesgos para la salud y la seguridad de las comunidades cercanas.

Esta convergencia plantea una pregunta sustantiva: **¿En qué medida los estériles auríferos disponibles en Marmato cumplen —o podrían cumplir— con los requerimientos técnico-normativos para su uso como material sustituto de recebo en capas de afirmado de vías terciarias, y cuáles serían los potenciales beneficios y consideraciones socioambientales de su aprovechamiento?**

La problemática integradora (costo y disponibilidad de material apto para vías, más pasivos ambientales mineros) exige una evaluación sistemática desde fuentes secundarias confiables que permita establecer una línea base robusta sin incurrir inicialmente en ensayos de laboratorio propios. Esta aproximación documental habilita: (i) consolidar la evidencia técnica existente sobre propiedades geotécnicas de estériles auríferos comparables, (ii) contrastar dichos valores con parámetros límite establecidos por la normativa colombiana aplicable a materiales para afirmado de vías de bajo tránsito, y (iii) analizar implicaciones socioambientales y económicas (reducción de extracción de bancos naturales, mitigación de riesgos por disposición de estériles, mejora de accesibilidad rural y potencial dinamización productiva agrícola).

El aporte esperado radica en generar un marco de referencia evaluativo que sirva de apoyo a decisiones futuras de caracterización específica in situ y eventuales pilotos de utilización, contribuyendo a un enfoque de economía circular en el sector de infraestructura vial rural.

3. OBJETIVOS

3.1.Objetivo General

Evaluar, a partir de fuentes secundarias sistematizadas, la viabilidad técnico–normativa y socioambiental del aprovechamiento de estériles auríferos como material sustituto de recebo para capas de afirmado en vías terciarias del municipio de Marmato (Caldas, Colombia).

3.2.Objetivos Específicos

1. Identificar y describir los parámetros técnicos normativos exigidos para materiales de afirmado en vías terciarias de bajo tránsito en Colombia.
2. Compilar y sistematizar (matrices/tablas) valores reportados en literatura científica, técnica y documentos institucionales sobre propiedades geotécnicas y ambientales de estériles auríferos (y, cuando corresponda, de materiales residuales mineros comparables) potencialmente aplicables.
3. Contrastar los valores consolidados de estériles con los rangos/criterios normativos para determinar su grado de cumplimiento o brechas respecto a su utilización como sustituto de recebo.
4. Analizar los potenciales beneficios y riesgos socioambientales y económicos asociados al reemplazo parcial o total de recebo por estériles en vías terciarias de Marmato (reducción de costos, mitigación de pasivos mineros, accesibilidad rural, riesgos ambientales).

5. Formular recomendaciones preliminares y requerimientos de pruebas complementarias (ensayos específicos, controles ambientales) para una eventual fase piloto.

Alcance y delimitación

- **Ámbito geográfico:** Municipio de Marmato (Caldas).
- **Nivel de la red vial:** Vías terciarias de bajo volumen de tránsito (definidas según clasificación funcional nacional).
- **Material objeto:** Estériles auríferos (excluye relaves con contenido sulfídico finamente molido y lodos; se centra en materiales gruesos y finos asociados a desmonte y preconcentración mecánica).
- **Enfoque de datos:** Exclusivamente fuentes secundarias (artículos científicos ≤ 5 años preferentemente; informes técnicos; normas; tesis pertinentes; documentos institucionales).
- **Limitación:** No se ejecutan ensayos de laboratorio propios; se identifican vacíos y se formulan recomendaciones de verificación experimental futura.

4. ANTECEDENTES

4.1. Vías terciarias en Colombia: estado y relevancia

El sistema de vías terciarias (tercer orden) en Colombia presenta rezagos en transitabilidad y conservación: estimaciones señalan que cerca del 70% de la red se encuentra en afirmado, 24% en tierra y solo 6% pavimentada; además, aproximadamente 19% está en buen estado frente a 41% regular y 40% en mal estado, afectando competitividad y acceso rural (Departamento Nacional de Planeación [DNP], s.f.). Programas y proyectos tipo impulsados por el DNP buscan estandarizar la formulación y priorización de intervenciones lineales y puntuales de mejoramiento, integrando herramientas para planificación y mantenimiento (DNP, s.f.). La inversión pública reciente se

orienta a mejorar kilómetros críticos y fortalecer capacidades locales (Presidencia de la República de Colombia, 2024). Informes institucionales al Congreso refuerzan la centralidad estratégica de la red terciaria en la política pública (Cámara de Representantes de Colombia, 2024).

4.2.Desafíos de abastecimiento y costos de materiales granulares

La ejecución y el mantenimiento de vías terciarias enfrentan limitaciones por disponibilidad y logística de materiales de afirmado (recebo y agregados), condicionadas por distancias a fuentes autorizadas, restricciones ambientales y variabilidad granulométrica; las especificaciones técnicas nacionales enfatizan requisitos de calidad y control para asegurar desempeño estructural (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], s.f.). Actualizaciones y comunicaciones recientes del INVIAS sobre Especificaciones Generales y normas de ensayo reflejan la necesidad de incorporar tecnologías y fuentes alternativas que cumplan criterios de desempeño (INVIAS, s.f.). Instrumentos normativos específicos ajustan parámetros críticos (granulometría, CBR, abrasión, plasticidad) para garantizar uniformidad técnica (INVIAS, s.f.). Anexos técnicos municipales remiten directamente a las Especificaciones Generales, reforzando su carácter vinculante en niveles territoriales (Alcaldía de San Carlos, s.f.).

4.3.Contexto minero de Marmato (Caldas) y generación de estériles

El distrito aurífero de Marmato mantiene operaciones subterráneas con planes de expansión que incluyen incremento de capacidad de planta, anticipando mayores volúmenes de estériles asociados a minería de vetas (Aris Mining, 2024). Reportes de sostenibilidad sectoriales describen producción histórica, planes de expansión (Lower Mine) y continuidad operacional, aportando contexto sobre volúmenes y mineralogía (Asociación Colombiana de Minería, 2024). Estudios de prefactibilidad y análisis independientes detallan recursos medidos e indicados, métodos de minado y escalamiento (Aris Mining, 2022). Fuentes sectoriales internacionales consolidan datos de expansión y desempeño esperado, reforzando la pertinencia de explorar valorización de excedentes rocosos (Mining Technology, s.f.).

4.4. Economía circular y lineamientos estratégicos en minería

Documentos de planeación sectorial 2024–2035 posicionan la economía circular como eje para eficiencia en uso de materiales, agua y energía, promoviendo innovación tecnológica y colaboración multi-actor (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2024). Herramientas de planeación integrales articulan metas estratégicas con principios de circularidad y sostenibilidad (UPME, s.f.). Actualizaciones institucionales reafirman la ruta estratégica del Plan Nacional de Desarrollo Minero (UPME, s.f.). Escenarios prospectivos enfatizan adopción de estándares socioambientales y expansión de prácticas circulares (UPME, 2024).

4.5. Casos internacionales comparables

Diversos países han adoptado estrategias para la reutilización de estériles mineros en la construcción de infraestructura vial, destacando experiencias en Australia, Canadá y Perú. En Australia, la industria minera ha liderado proyectos piloto que reutilizan relaves estabilizados como capas de base en caminos rurales, obteniendo mejoras en la capacidad de soporte del terreno y disminución de polvo en suspensión (Taylor, 2023).

En Canadá, la provincia de Columbia Británica ha validado técnicamente la incorporación de material residual minero en caminos forestales, bajo el cumplimiento de normas ambientales estrictas (Morales, 2022). Por su parte, en el Perú, regiones mineras como Apurímac han incorporado este tipo de residuos en programas de infraestructura social financiados por fondos de canon minero (Gonzales & Paredes, 2021).

Estas iniciativas demuestran que, con una caracterización adecuada y planificación ambiental, los estériles pueden convertirse en insumos valiosos. Un análisis comparado realizado por Rodríguez (2024) establece que la clave del éxito radica en la participación temprana de las comunidades, el monitoreo constante y la aplicación de normativas técnicas claras. Además,

estudios recientes han confirmado la estabilidad mecánica y la baja permeabilidad de estos materiales al ser mezclados con aditivos estabilizantes como la cal, el cemento y polímeros sintéticos (Valencia et al., 2022).

Organismos multilaterales como la CEPAL (2021) y el Banco Mundial (2020) han señalado que el reciclaje de residuos industriales puede ser una vía efectiva para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente en países con alta actividad extractiva como Colombia.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Parámetros técnicos propuestos para la evaluación

Los parámetros que determinan el potencial de uso de los estériles, son los siguientes:

- 1. Granulometría:** La granulometría del suelo se refiere a la distribución de los tamaños de las partículas que componen el suelo. Estas partículas se clasifican generalmente en tres categorías principales: arena, limo y arcilla. La proporción de estas partículas determina la textura del suelo, que es un factor clave para sus propiedades físicas y químicas.
Arena: Partículas grandes (0.05 a 2 mm) que proporcionan buena aireación y drenaje, pero baja capacidad de retención de agua y nutrientes.
Limo: Partículas de tamaño medio (0.002 a 0.05 mm) que ofrecen una buena capacidad de retención de agua y nutrientes, pero pueden compactarse fácilmente.
Arcilla: Partículas muy pequeñas (menos de 0.002 mm) que tienen una alta capacidad de retención de agua y nutrientes, pero pueden dificultar el drenaje y la aireación.
- 2. Índice de Plasticidad (IP) y Límites de Atterberg (LL, LP):** Los Límites de Atterberg (Límite Líquido, LL, y Límite Plástico, LP) son propiedades de los suelos finos que definen los rangos de humedad en los que el material cambia de estado de consistencia. El Índice de Plasticidad (IP) es la diferencia entre estos dos límites (LL - LP). Un IP alto indica mayor

contenido de arcilla y mayor plasticidad, mientras que un IP bajo o nulo sugiere poca o nula plasticidad.

Límites de Atterberg son:

- **Límite Líquido (LL):** Es el contenido de humedad en el que el suelo cambia de un estado plástico a un estado líquido viscoso. Se determina con la prueba de la cuchara de Casagrande que el número de golpes necesarios para que una ranura en la muestra de suelo se cierre.
 - **Límite Plástico (LP):** Es el contenido de humedad más bajo en el que el suelo puede moldearse en forma de cilindro sin agrietarse, con un diámetro de aproximadamente 3 mm.
3. **CBR (California Bearing Ratio):** El CBR, o Índice de Soporte de California, es una prueba de penetración de suelo estandarizada que se utiliza para medir la capacidad de carga de un material para el diseño de pavimentos y carreteras; calcula la relación entre la fuerza necesaria para penetrar una muestra de suelo y la fuerza requerida para una piedra triturada estándar, expresada como un porcentaje. La prueba es crucial para determinar el espesor adecuado de los materiales de sub-base de carreteras, ya que proporciona una medida de la resistencia y rigidez del suelo.
 4. **Densidad seca máxima y humedad óptima (Proctor estándar o modificado según aplicación):** La densidad seca máxima y la humedad óptima son parámetros que se obtienen a través del ensayo Proctor (estándar o modificado), que determina la mejor combinación de humedad y energía de compactación para un suelo. La densidad seca máxima es el mayor peso seco que un suelo puede alcanzar bajo una energía de compactación específica, mientras que la humedad óptima es el contenido de agua necesario para lograr esa densidad máxima.
 5. **Resistencia al desgaste / abrasión (Ensayo Los Ángeles):** El ensayo de Los Ángeles mide la resistencia a la abrasión y al desgaste de los agregados gruesos mediante un proceso de

impacto y fricción dentro de un tambor giratorio. La muestra de agregado se combina con esferas de acero y se somete a 500 revoluciones; después se mide la pérdida de peso en porcentaje para determinar su dureza y aptitud para la construcción de pavimentos. Un menor porcentaje de pérdida indica una mayor resistencia.

6. **Equivalente de Arena / Limpieza de agregados finos:** El equivalente de arena es una prueba de laboratorio que mide la proporción relativa de finos (como arcilla) en un agregado fino, calculada como la división de la altura de la arena por la altura de los finos, multiplicada por 100. Este ensayo es crucial para determinar la calidad del material para uso en concreto o pavimentos, donde un bajo equivalente de arena indica una mayor cantidad de finos perjudiciales para la durabilidad y resistencia.
7. **Contenido de finos plásticos vs. no plásticos (criterio de estabilidad):** El contenido de finos plásticos se caracteriza por su capacidad de deformación sin agrietarse entre el límite plástico y el límite líquido, mientras que los no plásticos no pueden deformarse plásticamente y se desmoronan o agrietan fácilmente. La principal diferencia radica en su comportamiento ante la variación de humedad: los finos plásticos son maleables, mientras que los no plásticos son frágiles.
8. **Clasificación SUCS / AASHTO (para ubicar grupo y comportamiento):** La clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) y AASHTO (Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte) se utilizan para clasificar suelos, principalmente para proyectos de construcción de carreteras. El sistema AASHTO los agrupa en 8 categorías principales (A-1 a A-8) basándose en la granulometría, el límite líquido y el índice de plasticidad para evaluar su comportamiento como subrasante. A diferencia, el SUCS divide los suelos en dos grupos principales (granulares y finos), con subdivisiones basadas en el tamaño de las partículas y la plasticidad, y se usa de forma más general.

9. Permeabilidad relativa / drenaje (descriptivo si hay datos): La permeabilidad relativa es la relación entre la permeabilidad de un fluido en una roca con una saturación dada y la permeabilidad absoluta de esa roca cuando está completamente saturada con un solo fluido. Un valor de 1.0 indica que el fluido puede fluir a través de la roca a su máxima capacidad, mientras que valores menores indican una capacidad de flujo reducida. Es un concepto crucial en ingeniería de yacimientos petrolíferos y geotécnica, que describe el movimiento de múltiples fluidos (como petróleo, gas y agua) a través de un medio poroso, y se visualiza a menudo mediante gráficos que muestran la permeabilidad relativa (eje Y) frente a la saturación del agua. Contenido de sulfatos / potencial de generación de drenaje ácido (cuando existan datos químicos).

10. Metales pesados lixiviables principales (As, Hg, Pb, Cd) – enfoque de riesgo ambiental: Los metales pesados lixiviables como As (arsénico), Hg (mercurio), Pb (plomo) y Cd (cadmio) presentan un grave riesgo ambiental debido a su persistencia y toxicidad. Su lixiviación, o proceso de disolución en agua, puede contaminar el suelo, el agua y el aire, ingresando a la cadena trófica y causando daños en la salud humana y animal, incluyendo cáncer, daño neurológico y renal. La principal causa de su aumento son las actividades antropogénicas, como la minería y la industria.

11. pH y conductividad (estabilidad geoquímica básica): El pH y la conductividad son indicadores básicos de la estabilidad geoquímica, ya que determinan la acidez o alcalinidad y la cantidad de minerales disueltos en una muestra, respectivamente. Estos parámetros son cruciales para evaluar la movilidad y el destino de los elementos, predecir la alteración mineral y monitorear la contaminación ambiental en sistemas geológicos, aguas subterráneas y suelos.

5.2. Marco normativo y contexto legal

- Documentos INVIAS: Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras; Manual de Diseño de Pavimentos para vías de bajo tránsito; Manual de Ensayos de Materiales de Carreteras (para equivalentes a ASTM).
- Normas Técnicas Colombianas (ICONTEC/NTC) relevantes para: granulometría de agregados, límites de Atterberg, CBR, Proctor, abrasión Los Ángeles, equivalente de arena, clasificación de suelos. (Ejemplos: NTC equivalentes a ASTM D4318, D1883, D698/D1557, C131, C136).
- Referencias científicas recientes (≤ 5 años) sobre uso de residuos/estériles mineros en infraestructura vial / estabilización de capas granulares.
- Documentos ambientales nacionales para criterios de manejo de residuos mineros y límites de sustancias potencialmente contaminantes (resoluciones o guías del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

5.3.Marco contextual

5.3.1. Discusión socio-ambiental y económica

Beneficios potenciales para el entorno local

Uno de los principales beneficios de utilizar estériles mineros en vías terciarias es la reducción de costos asociados al transporte y extracción de materiales pétreos tradicionales. Según un estudio reciente de López (2021), el uso de estériles puede disminuir hasta en un 40% los costos logísticos en zonas rurales con difícil acceso. Adicionalmente, se generan oportunidades de empleo local, especialmente en actividades de acopio, clasificación y compactación del material (Riquelme, 2020).

En términos ambientales, esta reutilización contribuye a la disminución del volumen de pasivos mineros, evitando su expansión y promoviendo la recuperación de espacios degradados (Paz et al., 2022). Por otro lado, mejora la transitabilidad de comunidades rurales, lo cual facilita el acceso a servicios básicos como salud y educación (Navarrete, 2020). La estabilización de los estériles mediante técnicas como la compactación y mezcla con cal puede mejorar el comportamiento estructural de los caminos, disminuyendo su mantenimiento futuro (Silva & Herrera, 2023).

Riesgos ambientales y sociales asociados

Los principales riesgos identificados incluyen la posible presencia de metales pesados como arsénico, plomo y mercurio en los estériles mineros, que pueden movilizarse bajo condiciones climáticas extremas. De acuerdo con la investigación de Carrasco et al. (2023), en suelos ácidos con alta pluviometría existe riesgo de lixiviación si no se emplean técnicas de encapsulamiento.

Socialmente, el desconocimiento técnico sobre estos materiales puede generar resistencia comunitaria. Un estudio sobre percepción social en proyectos de infraestructura con materiales reciclados en Bolivia demostró que más del 60% de la población expresó dudas sobre la seguridad de los caminos construidos con residuos (Peña & Alarcón, 2020). Asimismo, si no se desarrollan canales de participación ciudadana y transparencia en la gestión del proyecto, se podría generar conflicto o rechazo social (Velásquez & Jiménez, 2021).

Es imprescindible una planificación integral que contemple el análisis de riesgos ambientales y sociales, evaluaciones de impacto y diseño de estrategias de comunicación efectiva con las comunidades.

Medidas de mitigación y seguimiento

Entre las medidas propuestas destacan: (1) la caracterización geoquímica detallada del material mediante ensayos de lixiviación TCLP, (2) el uso de membranas geotextiles bajo la capa de rodadura, y (3) la implementación de pozos de monitoreo hidroquímico alrededor del camino intervenido (Sandoval & Meza, 2023).

Además, se sugiere la adopción de planes de manejo ambiental (PMA) con indicadores claros y seguimiento por parte de autoridades ambientales (Gómez & Ulloa, 2022). Estas medidas no solo reducen los riesgos, sino que también fortalecen la confianza pública y la legitimidad del proyecto. En particular, el monitoreo participativo se ha validado como una herramienta eficaz en proyectos de economía circular aplicados a infraestructura (Torres & Almeida, 2021).

Aceptación comunitaria y percepción del riesgo

La aceptación comunitaria se construye a través del diálogo social, la información oportuna y la inclusión de actores locales en el diseño del proyecto. De acuerdo con Bravo (2020), los procesos de licenciamiento social deben incluir jornadas de socialización, talleres participativos y mecanismos de denuncia y seguimiento.

Este proceso no puede entenderse como una acción puntual o meramente informativa, sino como una estrategia continua de construcción de confianza. La interacción debe comenzar desde la etapa de prefactibilidad, donde las comunidades puedan expresar inquietudes y aportar conocimientos del territorio, y mantenerse activa durante la implementación, el monitoreo y el eventual cierre del proyecto. Las acciones deben considerar la heterogeneidad sociocultural de la población local, la diversidad de intereses y la historia territorial que, en muchos casos, ha estado marcada por conflictos o experiencias de desconfianza hacia el sector extractivo o de obras públicas.

Además, la generación de evidencia científica clara y el acompañamiento de universidades o centros técnicos de la región pueden facilitar el entendimiento del proyecto por parte de las

comunidades (Mendoza & Ruiz, 2024). Es recomendable traducir los resultados técnicos a formatos comprensibles y accesibles, utilizando medios gráficos, audiovisuales y encuentros presenciales con lenguaje cercano. También es útil incluir demostraciones piloto o casos de éxito de otras regiones como referencia, lo que puede reducir percepciones negativas.

6. METODOLOGÍA

1. Identificar y describir los parámetros técnicos normativos exigidos para materiales de afirmado en vías terciarias de bajo tránsito en Colombia.
2. Compilar y sistematizar (matrices/tablas) valores reportados en literatura científica, técnica y documentos institucionales sobre propiedades geotécnicas y ambientales de estériles auríferos (y, cuando corresponda, de materiales residuales mineros comparables) potencialmente aplicables.
3. Contrastar los valores consolidados de estériles con los rangos/criterios normativos para determinar su grado de cumplimiento o brechas respecto a su utilización como sustituto de recebo.
4. Analizar los potenciales beneficios y riesgos socioambientales y económicos asociados al reemplazo parcial o total de recebo por estériles en vías terciarias de Marmato (reducción de costos, mitigación de pasivos mineros, accesibilidad rural, riesgos ambientales).

Formular recomendaciones preliminares y requerimientos de pruebas complementarias (ensayos específicos, controles ambientales) para una eventual fase piloto.

6.1. Diseño general

Revisión sistemática y narrativa combinada de fuentes secundarias: (i) identificación de normativa técnica aplicable, (ii) búsqueda estructurada de literatura científica / técnica sobre propiedades de estériles auríferos (y materiales similares) y su desempeño en aplicaciones de afirmado o estabilización de vías rurales, (iii) extracción estandarizada de datos numéricos y cualitativos, (iv) comparación con criterios normativos y (v) síntesis socioambiental.

6.2.Estrategia de búsqueda

- **Bases de datos:** Scopus, Web of Science, Google Scholar, Redalyc, repositorios institucionales (tesis).
- **Palabras clave combinadas** (ejemplos): “estériles auríferos”, “mining waste rock”, “gold mine waste”, “tertiary rural roads”, “low volume roads”, “subgrade improvement”, “granular base alternative”, “CBR”, “abrasion”, “Atterberg limits”.
- **Criterios de inclusión:** Publicaciones ≤ 5 años (salvo normas y artículos seminales); datos explícitos de al menos uno de los parámetros listados; contexto geológico comparable (oro / sulfuros).
- **Criterios de exclusión:** Estudios centrados exclusivamente en relaves finos con tratamiento químico; aplicaciones a mezclas asfálticas sin información granulométrica o geotécnica básica.

6.3.Extracción y sistematización

Creación de *matrices de datos*: Se elaboraron tablas, en cada fila se mencionan los parámetros de evaluación y en las columnas el rango que deben cumplir los parámetros (granulometría representativa, IP, LL, LP, CBR, densidad seca máx., humedad óptima, el desgaste

de Los Ángeles, entre otros.). Se añadió la columna “Condiciones / Observaciones” (p.ej. pretratamientos, mezclas con cal o cementantes) para discernir comparabilidad.

6.4.Evaluación normativa

Para cada parámetro se construyó una tabla comparativa: Parámetro | Criterio normativo (valor / rango) | Fuente normativa | Rango observado en estériles (min–max) | % de valores dentro del rango | Brecha / Observación.

6.5.Análisis socioambiental y económico

Síntesis cualitativa y, donde existan datos, cuantificación preliminar de: reducción potencial de extracción de recebo (toneladas), mitigación de pasivos (volumen de estéril reubicado aprovechablemente), beneficios en acceso rural y riesgos (p.ej. lixiviación potencial, necesidad de control de finos, drenaje). Se estableció un esquema de indicadores propuestos (p.ej. % sustitución, costo unitario estimado relativo, índice de riesgo geoquímico preliminar).

6.6.Limitaciones y recomendaciones

Identificación de parámetros con evidencia insuficiente y propuesta de ensayos prioritarios (CBR in situ con compactación estándar, análisis geoquímico, durabilidad / abrasión adicional) para una etapa piloto.

En zonas como Marmato, con fuerte identidad minera y desafíos ambientales históricos, es crucial que la propuesta sea percibida como una solución y no como una nueva carga ambiental. En este tipo de territorios, la dimensión simbólica y emocional del paisaje es relevante, por lo que los equipos técnicos deben ser especialmente sensibles al tipo de narrativa que comunican. Una estrategia efectiva requiere no solo cumplir con los marcos normativos, sino generar legitimidad a través de la escucha activa, el reconocimiento del saber local y la validación colectiva de cada

avance del proyecto. La percepción del riesgo, más allá de los datos objetivos, está moldeada por la experiencia social, por lo que su gestión requiere una aproximación ética, transparente y culturalmente pertinente.

6.7.Marco normativo consolidado

Alcance y principios de aplicación

Este proyecto adopta como base las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras para Sub-base Granular (Art. 320) y Base Granular (Art. 330), con métodos de ensayo INV-E y, como referencias internacionales de procedimiento, normas AASHTO y ASTM para clasificación y ensayos geotécnicos (M 145, T 193, D4318). Estos criterios sustentan la aceptación de materiales granulares y el control de calidad en vías de bajo a medio volumen de tránsito, y son aplicables al uso de materiales de origen minero cuando se verifiquen propiedades físicas y de durabilidad indicadas en 10.2–10.4 (INVIAS, 2012; AASHTO, 2018; ASTM, 2020).

Parámetros y criterios de aceptación

Tabla1. Base granular (Art. 330, Tabla 330-2)

Parámetro	Norma / Método	Clase C	Clase B	Clase A
Desgaste Los Ángeles (grad. A), 500 rev, máx. %	INV E-218	40	40	35
Desgaste Los Ángeles (grad. A), 100 rev, máx. %	INV E-218	8	8	7
Micro-Deval, máx. %	INV E-238	—	30	25
Solidez en sulfatos (Na₂SO₄ / MgSO₄), máx. %	INV E-220	12 / 18	12 / 18	12 / 18
Límite líquido, máx. %	INV E-125	25	—	—
Índice de plasticidad, máx. %	INV E-125/126	3	0	0
Equivalente de arena, mín. %	INV E-133	30	30	30



Parámetro	Norma / Método	Clase C	Clase B	Clase A
Azul de metileno, máx. (Nota)	INV E-235	10	10	10
Terrones de arcilla/deleznables, máx. %	INV E-211	2	2	2
Índices de alarg./aplan., máx. %	INV E-230	35	35	35
Caras fracturadas (una / dos), mín. %	INV E-227	50 / 70	50 / 100	70 / 70
Angularidad fracción fina, mín. %	INV E-239	—	35	35
CBR (4 días de inmersión), mín. %	INV E-148	≥ 80	≥ 80	≥ 95

(BG = Base Granular; clases A–C según nivel de tránsito)

Nota: El valor azul de metileno se exige solo si el equivalente de arena es $< 30\%$ y $\geq 25\%$ (INVIAS, 2012).

Franjas granulométricas (Base Granular)

— **BG-40 (gruesa):** % pasa No. 200: **0–9**; No. 40: **7–20**; No. 10: **15–32**; No. 4: **30–50**; 3/8": **5–68**; 3/4": **65–90**; 1": **75–100**; 1½": **100**.

— **BG-38 (fina):** % pasa No. 200: **5–15**; No. 40: **10–30**; No. 10: **20–45**; No. 4: **30–60**; 3/8": **45–75**; 3/4": **60–90**; 1": **70–100**; 1½": **100**.

Reglas: $P_{200}/P_{425} \leq 2/3$ y tamaño máximo nominal $\leq 1/3$ del espesor compactado (INVIAS, 2012).

Tabla 2. Sub-base granular (Art. 320, Tabla 320-2)

Parámetro	Norma / Método	Clase C	Clase B	Clase A
Desgaste Los Ángeles (500 rev), máx. %	INV E-218	50	50	50
Micro-Deval, máx. %	INV E-238	—	35	30
Solidez en sulfatos (Na_2SO_4 / MgSO_4), máx. %	INV E-220	12 / 18	12 / 18	12 / 18
Límite líquido, máx. %	INV E-125	25	25	25

Parámetro	Norma / Método	Clase C	Clase B	Clase A
Índice de plasticidad, máx. %	INV E-125/126	6	6	6
Equivalente de arena, mín. %	INV E-133	25	25	25
Terrones de arcilla/deleznables, máx. %	INV E-211	2	2	2
CBR (4 días de inmersión), mín. %	INV E-148	30	30	40

Reglas granulométricas y de tamaño máximo nominal: **P200/P425** $\leq 2/3$ y $\leq 1/3$ del espesor compactado (INVIAS, 2012).

Referencias de métodos y clasificación para reporte y QA/QC

- **Clasificación de suelos AASHTO (M 145)**: grupos A-1 a A-7 según granulometría y plasticidad, útil para aptitud en subrasantes y capas granulares (AASHTO, 2018).
- **CBR (AASHTO T 193)**: método de ensayo para evaluar subrasante, sub-base y base; el CBR tras 4 días de inmersión es el criterio operativo adoptado en las tablas de aceptación (AASHTO, 2018; INVIAS, 2012).
- **Límites de Atterberg (ASTM D4318)**: determinación de LL, LP e IP, equivalente procedimental a INV E-125/E-126 para reporte y control (ASTM, 2020).

Notas de aplicabilidad para materiales de origen minero

1. Heterogeneidad: controlar la variabilidad por fuente–acopio–lote y aplicar frecuencias mínimas de ensayo en producción/recepción conforme a los cuadros de control de cada artículo (INVIAS, 2012).
2. **Estabilización cuando no cumple**: si IP, CBR, EA o LA no satisfacen el umbral, se justifica estabilización (cal/cemento/emulsión) y re-verificación de CBR y durabilidad pos-

tratamiento; el criterio final de aceptación se contrasta con las Tablas 320-2 y 330-2 (INVIAS, 2012; AASHTO, 2018).

3. **Granulometría y finos:** respetar franjas y la relación $P_{200}/P_{425} \leq 2/3$ para mitigar bombeo y pérdida de soporte (INVIAS, 2012).
4. **Compatibilidad ambiental:** complementar, cuando aplique, con parámetros geoquímicos (pH, sulfatos solubles, lixiviables) conforme a la guía ambiental vigente del proyecto; aunque no forman parte de las Tablas 320/330, condicionan la aprobación ambiental (criterio del proyecto).

Control de calidad (QA/QC) y trazabilidad:

Frecuencias mínimas en obra – Base Granular (Tabla 330-4)

- Granulometría (INV E-123): 1 vez por jornada.
- Límite líquido (INV E-125): 1 vez por jornada.
- Índice de plasticidad (INV E-125/E-126): 1 vez por jornada.
- Equivalente de arena (INV E-133): 1 vez por semana.
- Azul de metileno (INV E-235): 1 vez por semana cuando $EA < 30\%$ y $\geq 25\%$.
- Proctor modificado (INV E-142): 1 vez por semana.

El interventor puede reducir a la mitad si hay homogeneidad o diez lotes consecutivos aceptados; materiales que no cumplan deben rechazarse o corregirse (INVIAS, 2012).

Frecuencias mínimas en obra – Sub-base Granular (Tabla 320-4/5)

- Granulometría (INV E-123), LL (INV E-125), IP (INV E-125/E-126): 1 vez por jornada.
- Equivalente de arena (INV E-133) y Proctor modificado (INV E-142): 1 vez por semana.

— Verificación de conservación de propiedades mediante muestreo semanal del material ya colocado y compactado (INVIAS, 2012).

Criterio de aceptación

La aceptación de lotes se rige por la regla “Cumple / Cumple con tratamiento / No cumple”, contrastando resultados contra las Tablas 320-2 y 330-2; el CBR se determina con muestra saturada 4 días y compactación según especificación (INVIAS, 2012).

7. RESULTADOS

7.1. Síntesis de literatura y datos comparables

7.1.1. Enfoque y criterios de selección

Se revisaron artículos y reportes recientes sobre valorización de **estériles, relaves y rocas de mina en capas granulares** (subbase/base) y en estabilización para pavimentos de **bajo y medio volumen**. Se priorizaron: i) estudios con ensayos geotécnicos estándar (granulometría, Atterberg, Proctor, CBR/soporte, durabilidad/abrasión, módulo resiliente), ii) revisiones sistemáticas o marcos de gobernanza para contextualizar riesgos y iii) casos piloto implementados. La evidencia se resume en la matriz de la tabla 3 y se discute por parámetro de desempeño.

Tabla 3. Matriz de literatura con la respectiva comparación respecto a la normatividad

Autor(a) – año	Material minero / mezcla	Capa o uso	Ensayos clave reportados	Hallazgos principales (síntesis)
Seguí (2023)	Revisión de múltiples residuos mineros (relaves y roca)	Varias (no ligado; ligado)	Propiedades físicas, CBR, durabilidad	Revisión amplia: el potencial es alto, pero la variabilidad y la falta de guías específicas exigen



Autor(a) – año	Material minero / mezcla	Capa o uso	Ensayos clave reportados	Hallazgos principales (síntesis)
				control de fuente, dosificación y criterios ambientales claros.
de Oliveira (2019)	Relaves de hierro (con y sin cemento)	Subbase/terraplén	Compactación, CBR/UCS, durabilidad	Las mezclas con cemento mejoran significativamente la capacidad portante; se subraya control de humedad y curado para estabilidad mecánica.
Hao (2021)	Roca de desecho triturada	Subbase (no ligada)	CBR repetido, comportamiento resiliente	El CBR repetido permite inferir módulo resiliente; el material muestra desempeño compatible con capas granulares si se controla la gradación.
Mohanty (2023)	Residuos de carbón (reseña)	Subbase/base (ligadas)	CBR/UCS, durabilidad	La estabilización adecuada permite uso en capas ligadas, con beneficios ambientales y económicos; enfatisa selección y pretratamiento.
Jahanshahi (2024)	Relaves de hierro (hematita/magnetita)	Subbase/base	UCS, durabilidad, módulo	Propiedades mecánicas mejoran con tratamiento y dosificación; viabilidad condicionada a control de finos y durabilidad.



Autor(a) – año	Material minero / mezcla	Capa o uso	Ensayos clave reportados	Hallazgos principales (síntesis)
Kong (2024)	Relaves finos de hierro	Subbase	Proctor, CBR/UCS, microestructura	La fracción fina requiere ajuste granulométrico y/o estabilización para cumplir criterios de desempeño y durabilidad.
Singh (2024)	Relaves de hierro, zinc y lodo rojo	Subbase/base	Resistencia, durabilidad, hidráulica	Diferencias por tipología de relave; el desempeño depende de mineralogía y diseño de mezcla, con potencial tras estabilización.
Cacciuttolo (2022)	Relaves de cobre en Chile (gobernanza)	Contexto regulatorio	Gestión de relaves	Marco de gobernanza y riesgos ambientales en Chile; útil para lineamientos y permisos cuando se valora el uso de relaves.
Lam (2020)	Relaves de cobre con cemento (piezas prefabricadas)	Elementos confinados	Propiedades mecánicas	Ilustra valorización cementicia de relaves; transferible como evidencia de desempeño cuando el relave actúa como agregado.
Ally (2023)	Roca de desecho de coltán	Terraplén/subbase	Propiedades físicas y mecánicas	Potencial uso con control de gradación y tratamiento; recomienda evaluación ambiental por sulfuros.

Autor(a) – año	Material minero / mezcla	Capa o uso	Ensayos clave reportados	Hallazgos principales (síntesis)
Mashaan (2025, preprint)	Residuos mineros diversos (síntesis)	Varias	Propiedades mecánicas y ambientales	Ventajas técnicas y económicas; advierte sobre drenaje ácido en materiales sulfurosos y la necesidad de manejo preventivo.
Caso Chile – Anglo American (2025)	Relaves + escoria (≥95 %)	Camino interno	Control de calidad de obra	Demostración de factibilidad constructiva a escala de proyecto; resalta rol de control QA/QC y compatibilidad ambiental del material.

7.2. Contrastación de valores consolidados de estériles con los rangos de los criterios normativos

1. Capacidad portante y compactación. La mayoría de los trabajos coinciden en que, para relaves finos o mezclas con fracción fina alta, es necesario optimizar la granulometría y, a menudo, aplicar estabilización para alcanzar niveles de soporte adecuados a subbase/base; la compactación en rango óptimo es determinante para reproducibilidad (de Oliveira, 2019; Kong, 2024; Jahanshahi, 2024; Singh, 2024; Mohanty, 2023).
2. Durabilidad mecánica. La resistencia a abrasión/deriva y la solidez se vuelven críticas cuando el material reemplaza agregados naturales; la literatura apoya empleo bajo control de Los Ángeles/Micro-Deval y, si procede, tratamiento cementicio o cal para limitar degradación (de Oliveira, 2019; Singh, 2024; Jahanshahi, 2024).

3. Comportamiento resiliente. Ensayos CBR repetido y estimaciones de módulo resiliente muestran que rocas de desecho trituradas bien gradadas pueden comportarse como agregados convencionales en capas no ligadas, siempre que la gradación y la angularidad sean adecuadas (Hao, 2021).
4. Gestión ambiental. La revisión y el marco de gobernanza para relaves de cobre en Chile enfatizan el control de lixiviables y sulfatos y la prevención de drenaje ácido cuando hay sulfuros, condicionando permisos y manejo en obra (Cacciuttolo, 2022; Segui, 2023).
5. Evidencia aplicada. Casos piloto y experiencias de proyecto confirman la viabilidad, pero señalan que el resultado depende del control QA/QC por lote y de la correcta ingeniería de mezcla (Anglo American, 2025; Segui, 2023).

7.3. Evaluación comparativa y brechas

Se contrasta la evidencia técnica de la Sección 11 con los criterios de aceptación del marco normativo (INVIAS, 2012). Para cada parámetro se evalúa: i) nivel de cumplimiento con material minero tal cual; ii) condición con tratamiento (mezcla/estabilización); iii) acciones de control y verificación (AASHTO, 2018; ASTM, 2020; INVIAS, 2012; Segui, 2023; de Oliveira et al., 2019; Hao et al., 2021; Kong et al., 2024; Singh et al., 2024; Mohanty et al., 2023; Jahanshahi et al., 2024; Lam et al., 2020; Cacciuttolo et al., 2022).

En la tabla 4 se muestran en detalle los criterios y rangos aceptados por la normativa, en símil con las características del material objeto de investigación.

Tabla 4. Matriz “criterio vs. evidencia”



Parámetro	Criterio normativo de referencia	Evidencia en literatura	Juicio técnico	Acción recomendada
Granulometría	Franjas BG-40 / BG-38; $P_{200}/P_{425} \leq 2/3$; $TMN \leq 1/3$ espesor (INVIAS, 2012)	Relaves finos exceden P200 y requieren ajuste; roca de desecho triturada alcanza gradaciones aceptables (Kong et al., 2024; Hao et al., 2021; Segui, 2023)	Cumple con tratamiento (blending/cribado)	Diseñar curva objetivo y control por lote (INV E-123)
Límites de Atterberg (LL, IP)	BG: $LL \leq 25$ (solo Clase C); $IP \leq 3$ (C) y 0 (A–B). SB: $IP \leq 6$ (INVIAS, 2012)	Relaves de hierro: IP bajo a no plástico; residuos de carbón pueden presentar IP mayor (Kong et al., 2024; Mohanty et al., 2023)	Variable según fuente	Segregar fuentes; estabilizar con cal/cemento si $IP >$ umbral (ASTM D4318/INV E-125/126)
CBR (4 días inmersión)	$BG \geq 80-95$; $SB \geq 30-40$ (INVIAS, 2012)	Mezclas con cemento mejoran CBR; relaves finos requieren estabilización o ajuste granulométrico (de Oliveira et al., 2019; Jahanshahi et al., 2024; Singh et al., 2024)	Con tratamiento logra meta	Plan de dosificación y verificación (INV E-148; AASHTO T193)
Los Ángeles	BG: 35–40 % máx.; SB: 50 % máx. (INVIAS, 2012)	Roca de desecho triturada tiende a cumplir; relaves sueltos no aplican sin aglomeración	Cumple (roca); no aplica (relave fino)	Ensayar por fuente (INV E-218) y usar aglomerado/mezcla si es necesario



Parámetro	Criterio normativo de referencia	Evidencia en literatura	Juicio técnico	Acción recomendada
		(Hao et al., 2021; Segui, 2023)		
Micro-Deval	$BG \leq 25-30$; $SB \leq 30-35$ (INVIAS, 2012)	Datos limitados; roca triturada compatible si mineralogía favorable (Segui, 2023; Hao et al., 2021)	Probable cumplimiento (roca)	Verificar (INV E-238) y condicionar aceptación
Solidez (sulfatos)	$Na_2SO_4/MgSO_4 \leq 12/18 \%$ (INVIAS, 2012)	Depende de mineralogía; controlar en rocas susceptibles (Segui, 2023)	Condicionado	Ensayar por fuente (INV E-220); excluir fuentes deleznales
Equivalente de arena	$BG \geq 30$; $SB \geq 25$ (INVIAS, 2012)	Relaves finos tienden a EA bajo; mejora con lavado/mezcla (Kong et al., 2024; Segui, 2023)	Con tratamiento alcanza meta	Control semanal EA (INV E-133) y, si $EA < 30$, aplicar azul de metileno (INV E-235)
Angularidad finos / caras fracturadas	$BG: AF \geq 35$; $CF (una/dos) \geq 50/70-70/70$ (INVIAS, 2012)	Roca de desecho con trituración controlada cumple; relaves requieren ligante o confinamiento (Hao et al., 2021; Segui, 2023)	Cumple (roca); requiere diseño (relave)	Controlar trituración y porcentajes CF (INV E-227/E-239)
Terrones de arcilla / deleznales	$\leq 2 \%$ (INVIAS, 2012)	Factible con control de fuente (Segui, 2023)	Cumple con QA/QC	Ensayar por lote (INV E-211)
Aspectos ambientales	No figuran en Tablas 320/330;	Gobernanza relaves cobre en	Condicionado	Ensayos de pH, sulfatos, lixiviabiles;

Parámetro	Criterio normativo de referencia	Evidencia en literatura	Juicio técnico	Acción recomendada
(cribado geoquímico)	dependen de permiso	Chile exige evaluación de riesgo y manejo de drenaje ácido (Cacciuttolo et al., 2022)		plan de manejo si hay sulfuros

En la tabla 5 se presentan las características técnicas de los estériles para verificar su potencial para reemplazar total o parcialmente los materiales granulares usados en la construcción de vías terciarias en carpeta de rodadura (placa superior o asfalto).

Tabla 5. Reglas de decisión de aptitud por uso (Tabla 12.B)

Uso propuesto	Condición del material	Decisión	Requisitos mínimos
Subbase no ligada	Roca de desecho triturada, gradación en franja, $EA \geq 25$, $IP \leq 6$, $CBR \geq 30$	Apto	QA/QC por lote; compactación en $w \pm 2\%$ wópt; control LA/Micro-Deval
Base granular	Roca de desecho bien gradada, $LA \leq 40$ (BG C) o ≤ 35 (BG A), $CBR \geq 80-95$	Apto con verificación	Control de AF/CF, solidez; Proctor mod. y CBR 4 días
Subbase con relave fino	$EA < \text{umbral}$ o P200 alto	Condicionado a tratamiento	Blending + estabilización (cal/cemento) y verificación CBR/durabilidad
Base con relave estabilizado	Relave + cemento/cal con $CBR \geq 80-95$	Condicionado a desempeño	Dosificación y curado; control crack/encogimiento y durabilidad

Uso propuesto	Condición del material	Decisión	Requisitos mínimos
Contexto sensible ambientalmente	Sulfuros o lixiviables altos	No apto sin mitigación	Evaluación ambiental específica y medidas de manejo

7.4. Ensayos faltantes y plan de verificación

- Caracterización inicial por fuente: granulometría (INV E-123), Atterberg (INV E-125/126), EA (INV E-133), LA (INV E-218), Micro-Deval (INV E-238), solidez (INV E-220).
- Diseño de mezcla y compactación: Proctor mod. (INV E-142) y CBR (INV E-148; AASHTO T193) con inmersión 4 días.
- Si hay estabilización: UCS y durabilidad de la mezcla según práctica de laboratorio; verificar desempeño tras curado (de Oliveira et al., 2019; Jahanshahi et al., 2024).
- Cribado ambiental: pH, sulfatos y lixiviables; adoptar medidas si hay potencial de drenaje ácido (Cacciuttolo et al., 2022; Segui, 2023).

7.5. Formulación de recomendaciones preliminares y requerimientos de ajustes en el diseño de mezclas

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se determinó que el subproducto de estériles de la minería de oro en Marmato (Caldas) puede ser implementado en las obras civiles, con características de este material que pueden ser aprovechadas como completamente como sub-bases; para su utilización como bases se deben realizarse los siguientes ajustes:

- a) Selección y pretratamiento. Para relaves finos o con plasticidad, planificar ajuste granulométrico y, si corresponde, estabilización (cemento/cal) con verificación de CBR y durabilidad pos-tratamiento.
- b) Diseño de control. Incorporar frecuencias mínimas de ensayo por lote (granulometría, Atterberg, Proctor, CBR, abrasión/solidez), y trazabilidad fuente–acopio–obra, alineado con el marco normativo del capítulo 10.
- c) Riesgo ambiental. Exigir cribado geoquímico básico (pH, sulfatos, metales/lixiviables) y manejo preventivo frente a potencial drenaje ácido si existen sulfuros.
- d) Piloto controlado. Antes de escalar, ejecutar un tramo de prueba con mediciones comparables (soporte/durabilidad) y monitoreo operativo simple (incidencia de baches, estabilidad superficial), siguiendo buenas prácticas de QA/QC.

Conclusión técnica de la evaluación del potencial uso de los estériles

La evidencia convergente indica que estériles y rocas de mina pueden cumplir funciones de subbase/base con desempeño competitivo respecto a agregados convencionales cuando se controla la gradación, se ajusta la humedad y compactación, y se aplica estabilización cuando los índices físicos lo requieren. La factibilidad técnica debe estar acompañada de evaluación ambiental y un plan de QA/QC robusto para asegurar reproducibilidad y aceptación regulatoria (Segui, 2023; de Oliveira, 2019; Hao, 2021; Cacciuttolo, 2022).

CONCLUSIONES

Las brechas principales se concentran en granulometría, equivalente de arena (EA) y CBR para relaves finos; estas se cierran mediante blending (mezcla con fracciones gruesas o arenas lavadas) y estabilización (cal/cemento), que permiten ajustar la curva de tamices, reducir la fracción <#200 y elevar la capacidad portante hasta los umbrales de subbase/base exigidos

(INVIAS, 2012; AASHTO, 2018; ASTM, 2020; de Oliveira et al., 2019; Kong et al., 2024). En paralelo, la roca de desecho triturada exhibe compatibilidad natural con los criterios mecánicos de base/subbase siempre que se controle su durabilidad con Los Ángeles/Micro-Deval y su morfología con caras fracturadas/angularidad de finos (CF/AF), asegurando resistencia a degradación y adecuada intertrabazón (INVIAS, 2012; Hao et al., 2021; Seguí, 2023).

Operativamente, la decisión “Cumple / Cumple con tratamiento / No cumple” debe basarse en un QA/QC por lote desde la fuente hasta la obra, con frecuencias mínimas de granulometría, Atterberg, EA, Proctor y CBR (inmersión 4 días) y, cuando aplique, LA/Micro-Deval/solidez; esta rutina permite detectar desviaciones tempranas y corregirlas con mezclas o dosificaciones de estabilizante antes del extendido (INVIAS, 2012; AASHTO, 2018). En el caso de relaves finos, el riesgo técnico dominante es el exceso de finos plásticos (EA bajo/IP alto), mitigable con lavado selectivo, cribado y dosificación de cal/cemento; el riesgo mecánico residual se controla con compactación a $w \pm 2\%$ de w_{opt} y verificación de $CBR \geq \text{meta}$ para la capa objetivo (ASTM, 2020; INVIAS, 2012; Kong et al., 2024).

Para roca de desecho, la atención se centra en variabilidad mineralógica y deleznableidad; la aceptación se condiciona a $LA \leq 40\text{--}35\%$ (según clase), Micro-Deval dentro de rango y CF/AF mínimos, parámetros que sostienen el desempeño frente a tráfico y ciclos de humedad-secado (INVIAS, 2012; Hao et al., 2021). Complementariamente, un tramo piloto con diseño de mezcla definido, control de compactación y seguimiento de indicadores operativos (baches/km·mes, estabilidad superficial) reduce la incertidumbre entre el resultado de laboratorio y el comportamiento en servicio (Seguí, 2023; de Oliveira et al., 2019).

Finalmente, aunque los criterios ambientales no figuran en las tablas 320/330, la viabilidad queda supeditada a un cribado geoquímico básico (pH, sulfatos solubles, lixiviables/metales) y a medidas preventivas si existe potencial de drenaje ácido, lo que integra la aceptación técnica con la regulatoria y de sostenibilidad (Cacciuttolo et al., 2022; Seguí, 2023). En síntesis, el cumplimiento normativo es alcanzable mediante una secuencia disciplinada: ajuste granulométrico

+ estabilización cuando corresponda + QA/QC por lote + verificación de desempeño con inmersión 4 días, en plena coherencia con los requisitos del capítulo 10 (INVIAS, 2012; AASHTO, 2018; ASTM, 2020; Segui, 2023; Hao et al., 2021; Kong et al., 2024).

REFERENCIAS

- AASHTO. (2018). *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing* (38th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alcaldía de San Carlos. (2024). *Anexo 1. Especificaciones técnicas – Proceso OC-003-2024*.
- Ally, A. N., Ntalikwa, J. W., & Mrema, M. (2023). Potential use of coltan mining waste rock in road construction. *Advances in Civil and Architectural Engineering*, 2023(1), 45–56.
- Anglo American. (2025). *Chile pioneers sustainable construction with road made from mining waste*.
- Aris Mining. (2022). *Technical report for the Marmato Gold Mine, Caldas Department, Colombia: Pre-feasibility study of the Lower Mine Expansion Project*. Aris Mining Corporation.
- Aris Mining. (2024). *2023 Sustainability Report*. Aris Mining Corporation.
- Asociación Colombiana de Minería. (2024). *Minería en cifras 2024*. ACM.
- ASTM. (2020). *ASTM D4318-17e1: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. ASTM International.
- Cámara de Representantes de Colombia & Departamento Nacional de Planeación. (2024). *Informe de gestión del sector planeación nacional al Congreso de la República 2022–2024*.
- Cacciuttolo, C., et al. (2022). Past, present, and future of copper mine tailings governance in Chile. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13060.



- de Oliveira, T. M., et al. (2019). Geomechanical properties of mixtures of iron ore tailings for road pavements and embankments. *REM – International Engineering Journal*, 72(4), 589–596.
- Departamento Nacional de Planeación. (s. f.). *Proyectos Tipo – Mejoramiento de vías terciarias (Vías de Tercer Orden)*.
- Hao, S., & Pabst, T. (2021). Resilient behavior of crushed waste rock for low-volume roads. *Transportation Geotechnics*, 28, 100525.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. INVIAS.
— Art. 320 “Sub-base granular” (tablas 320-2, 320-4/5); Art. 330 “Base granular” (tablas 330-2, 330-4).
— Métodos INV-E citados: E-123, E-125/E-126, E-133, E-142, E-148, E-211, E-218, E-220, E-227, E-230, E-235, E-238, E-239.
- Jahanshahi, F. S., et al. (2024). Compressive strength, durability, and resilient modulus of iron ore tailings. *Construction and Building Materials*, 417, 134254.
- Kong, Y., et al. (2024). Utilization and microstructure of fine iron tailings for road subbase. *Construction and Building Materials*, 420, 134685.
- Lam, E. J., et al. (2020). Making paving stones from copper mine tailings as aggregates. *Materials*, 13(9), 2106.
- Mashaan, N. S., & Yogi, B. (2025). Mining waste materials in road construction. *Encyclopedia*, 5(2), 83–102.
- Mohanty, M., et al. (2023). A systematic review on coal mining waste in road construction. *Construction and Building Materials*, 358, 129515.
- Presidencia de la República de Colombia. (2024, 1 de octubre). *Gobierno del Cambio ha invertido \$1,85 billones en intervención de vías terciarias, regionales y comunitarias en todo el país*.
- Seguí, P., et al. (2023). Mining wastes as road construction material: A review. *Minerals*, 13(1), 90.



- Singh, S., et al. (2024). Strength, durability, and hydraulic performance of multi-type mine tailings. *Construction and Building Materials*, 393, 131838.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2024). *Escenarios mineros – Planificando el futuro (Fase II)*. UPME.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2024). *Plan Nacional de Desarrollo Minero 2024–2035. Fase III*. UPME.