

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS NORMATIVAS AMBIENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MINAS  
SUBTERRÁNEAS EN ESPAÑA Y COLOMBIA**

Sebastián Montenegro Casas



UNIVERSIDAD  
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería

Universidad La Gran Colombia

Bogotá D.C.

Mayo de 2025

Análisis comparativo de las normativas ambientales para la construcción de minas subterráneas en  
España y Colombia

Sebastián Montenegro Casas

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de:

**Especialista en diseño y construcción de obras de infraestructura y edificaciones**

Director:

Ing. Andrés Felipe Alonso Rodríguez

Doctor en Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD  
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Especialización en diseño y construcción de obras de infraestructura y edificaciones, Facultad de

Ingeniería

Universidad La Gran Colombia

Bogotá D.C.

Mayo de 2025

### **Dedicatoria**

Este proyecto se lo dedico, en primer lugar, a mi madre, Lina María Casas Casas, por ser el pilar fundamental de mi vida y quien, con su amor, ejemplo de perseverancia y fortaleza inquebrantable, me ha inspirado a no rendirme ante las adversidades y a quien estoy muy agradecido, también quiero dedicárselo a mi padre José Walter Montenegro Vivas, por su guía silenciosa y firme. A mi hermana, Katherine Andrea Lamilla Casas, quién me dio la guía y sé que estaría completamente orgullosa pues no solo nos unieron lazos de sangre, sino también sueños, luchas y aprendizajes, los cuales estoy cumpliendo gracias al apoyo de mi querida hermana, en el cielo donde te encuentras, muchas gracias. A mi abuelo, José Antonio Montenegro Buitrago, cuya sabiduría y temple han sido faro en momentos de incertidumbre. Y a mi abuela, María Oliva Vivas De Montenegro, por su amor incondicional y su apoyo constante en todos los momentos de mi vida.

Cada uno de ellos, desde su lugar, ha contribuido de manera esencial a la culminación de este proceso académico, el cual les pertenece tanto como a mí.

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mi profundo agradecimiento al docente Andrés Felipe Alonso Rodríguez, por su acompañamiento comprometido, sus valiosas orientaciones tanto técnicas como metodológicas y por fomentar en mí una visión crítica y rigurosa del ejercicio investigativo, he de admitir que su apoyo constante durante las distintas fases del trabajo ha sido determinante para alcanzar los objetivos propuestos.

Extiendo también mi gratitud a la Universidad La Gran Colombia por brindarme el espacio académico y las herramientas necesarias para el desarrollo de esta investigación, así como a los profesionales que, directa o indirectamente, contribuyeron mediante información, comentarios o experiencias compartidas a lo largo de este proyecto enriqueciéndolo cada vez más.

Finalmente, agradezco de corazón a mi familia: a mi madre, padre, hermanos, abuelo y abuela, por ser el sustento emocional y espiritual que me impulsó a culminar este proyecto con determinación y entrega.

## Tabla de contenido

<b>I. FOREWORD .....</b>	<b>9</b>
<b>II. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
<b>III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>12</b>
<b>IV. MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>14</b>
GLOSARIO .....	14
ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	16
<b>V. MARCO NORMATIVO .....</b>	<b>18</b>
MARCO NORMATIVO APLICABLE EN COLOMBIA .....	18
MARCO NORMATIVO APLICABLE EN ESPAÑA Y LA UNIÓN EUROPEA .....	20
<b>VI. ASPECTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>24</b>
ENFOQUE METODOLÓGICO APLICADO.....	24
CRITERIOS DE COMPARACIÓN NORMATIVA.....	26
<b>VII. RESULTADOS .....</b>	<b>29</b>
MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN SUBTERRÁNEA MÁS COMUNES.....	29
PRINCIPALES RETOS TÉCNICOS ASOCIADOS A LA MINERÍA SUBTERRÁNEA.....	30
PRINCIPALES RETOS ASOCIADOS A LA MINERÍA SUBTERRÁNEA A NIVEL AMBIENTAL .....	31
COMPARATIVO DE NORMATIVAS AMBIENTALES EN MINERÍA SUBTERRÁNEA: COLOMBIA VS. ESPAÑA/UE .....	32
<b>VIII. HALLAZGOS CLAVE .....</b>	<b>34</b>
OBSERVACIONES TÉCNICAS Y AMBIENTALES.....	37
IMPLICACIONES PARA LA INGENIERÍA CIVIL Y LA SOSTENIBILIDAD .....	40
<b>IX. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>42</b>
INTEGRACIÓN AMBIENTAL EN EL DISEÑO: PAISAJE, BIODIVERSIDAD Y REUTILIZACIÓN POST-EXPLOTACIÓN .....	52
NORMATIVAS SOBRE RELAVES, DRENAJES ÁCIDOS Y GESTIÓN DE RESIDUOS MINEROS .....	54

CONECTIVIDAD NORMATIVA Y TRANSVERSALIDAD ENTRE EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y LOS PROYECTOS MINEROS.....	56
<b>X. CONCLUSIONES .....</b>	<b>59</b>
<b>XI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>61</b>
<b>XII. LISTA DE REFERENCIA O BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>64</b>
<b>XIII. ANEXOS.....</b>	<b>66</b>
COMPENDIO NORMATIVO DE REFERENCIA – COLOMBIA .....	66
COMPENDIO NORMATIVO DE REFERENCIA – UNIÓN EUROPEA Y ESPAÑA .....	67

**Lista de Figuras**

Ilustración 1 Diagrama metodología aplicada .....	24
Ilustración 2-Método de Cámaras y Pilares .....	29
Ilustración 3-Hundimiento por bloques (Block Caving) .....	30
Ilustración 4-Corte y relleno (Cut and Fill) .....	30

**Lista de Tablas**

Tabla 1 - Comparativo de Normativas Ambientales en Minería Subterránea: Colombia vs.  
España/UE..... 33

## I. Foreword

La Ingeniería Civil, como disciplina amplia y diversa que es, incluye entre sus diversas ramas, la construcción de minas subterráneas, una especialidad que integra conocimientos en geotecnia, estructuras, planificación y gestión de obras, con esta combinación de saberes, el propósito de este trabajo es analizar las normas ambientales aplicadas a la minería subterránea en dos contextos distintos, es decir entre España y Colombia, en donde se permite desarrollar proyectos mineros seguros y sostenibles bajo tierra, lo que demuestra el papel fundamental de la Ingeniería Civil en este tipo de proyectos de construcción.

La construcción de minas subterráneas representa un reto significativo tanto en España como en Colombia, debido a la complejidad geotécnica, los altos costos operativos y las estrictas exigencias en materia de seguridad y sostenibilidad, a esto se suman los desafíos normativos y sociales que implica lograr una minería responsable y con el menor impacto ambiental posible, teniendo esto en cuenta que la regulación ambiental desempeña un papel clave, aunque su aplicación y nivel de exigencia varían considerablemente entre ambos países.

Este trabajo se fundamenta en la experiencia académica que tuve durante un intercambio estudiantil realizado en 2023 en la Escuela de Ingeniería de Minas y Energía de la Universidad de Vigo, esta oportunidad me permitió conocer de cerca la normativa aplicable, así como profundizar en los contenidos vistos en las asignaturas, participar activamente en los laboratorios especializados y en una salida a campo, a partir de esta vivencia, el presente estudio busca proponer un análisis de normatividad sostenible y alineada con los principios de la ingeniería responsable aplicadas a la construcción de minas subterráneas entre España y Colombia.

**Palabras clave:** *Minería subterránea, Normativa ambiental, Ingeniería civil, Sostenibilidad, Colombia – España, Regulación*

## II. Introducción

La minería subterránea es una de las actividades industriales más complejas, tanto desde el punto de vista técnico como ambiental y su desarrollo exige una planificación rigurosa que abarque desde el diseño geotécnico hasta la gestión integral del entorno. En este contexto, la Ingeniería Civil desempeña un papel fundamental desde sus diferentes especialidades, ya que interviene en todas las etapas del ciclo de vida del proyecto minero, desde la excavación de túneles y galerías, el diseño y aplicación de sistemas de sostenimiento, la implementación de soluciones de ventilación y drenaje, hasta la modelación técnica, la planificación de obras y la ejecución de planes de cierre y restauración ambiental. Por ende su aporte es esencial para asegurar que la minería subterránea se lleve a cabo de manera segura, eficiente y con criterios de sostenibilidad.

La minería subterránea, a diferencia de otras formas de explotación minera, requiere perforaciones profundas, ventilación constante, sostenimiento estructural continuo y un control riguroso de variables críticas como la humedad, la presión y la acumulación de gases, ya que en este contexto, el monitoreo de gases acumulados no solo es una medida preventiva, sino una acción vital para garantizar la seguridad de los trabajadores debido a fuertes intoxicaciones por gases tóxicos que pueden ser emitidos.

En ambientes confinados como los túneles, y en este caso en particular, las minas subterráneas pueden generarse y acumularse gases peligrosos como metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), entre otros. Estos gases pueden originarse tanto por procesos geológicos naturales como por las propias actividades operativas de la minería, y su presencia sin control

representa un riesgo alto de explosión, intoxicación, asfixia o incluso la muerte por sofocación, al impedir el transporte de oxígeno en la sangre. Por ello prima la detección temprana y la gestión continua de estos compuestos, ya que es un aspecto crítico dentro de cualquier protocolo de seguridad minera subterránea.

Entonces, la regulación ambiental aplicable a la construcción de minas subterráneas, en materia de seguridad en cuanto a la construcción e implementación de proyectos de minería subterránea, juega un papel crucial. Ya que las normativas no solo establecen las condiciones mínimas para el inicio de actividades, sino que también determinan los estándares de seguridad, sostenibilidad y restauración ambiental durante todo el ciclo de vida de un proyecto minero. No obstante, estas normativas no son homogéneas entre países porque varían en su enfoque, en las exigencias técnicas, los mecanismos de fiscalización y así mismo la articulación con otros sectores, es por esto, que un análisis comparativo entre dos jurisdicciones como lo es entre Colombia y España permite identificar vacíos, fortalezas y buenas prácticas que pueden trasladarse y adaptarse a otros contextos.

Frente a este panorama, este trabajo de grado propone un análisis comparativo de las normativas ambientales que regulan la minería subterránea en España y Colombia, con el fin de identificar mejoras aplicables al contexto colombiano. Esta comparación busca resaltar diferencias, similitudes y buenas prácticas adaptables, orientadas a una minería más segura, sostenible y alineada con los principios de la ingeniería responsable.

### III. Planteamiento del problema

La minería subterránea es una actividad que presenta desafíos importantes, tanto a niveles técnicos, como a niveles ambientales y sociales, debido a su complejidad y al impacto que puede generar en los ecosistemas y las comunidades cercanas, por ende para mitigar estos impactos, tanto en Colombia como España se han establecido regulaciones ambientales específicas que buscan garantizar la sostenibilidad y la seguridad en la operación minera, sin embargo, a pesar de la existencia de estos marcos normativos, persisten interrogantes sobre la actualización, la articulación institucional y la aplicación efectiva de dichas normativas, especialmente en el contexto colombiano.

Las entidades responsables de la supervisión minera en Colombia, como la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), la Agencia Nacional de Minería (ANM), las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) y el Ministerio de Minas y Energía (MME), enfrentan limitaciones técnicas, humanas, presupuestales y tecnológicas que dificultan el seguimiento riguroso de los proyectos mineros subterráneos. La falta de tecnología avanzada, como sistemas de monitoreo remoto, sensores especializados y drones, junto con el difícil acceso a regiones apartadas, limita la capacidad para realizar inspecciones frecuentes y efectivas.

En estas zonas, la minería informal suele operar al margen de la ley, sin cumplir normativas ambientales ni sociales, lo que genera impactos negativos en el ambiente y conflictos con comunidades locales. A pesar de los esfuerzos de las entidades, la combinación de recursos insuficientes, la complejidad del contexto y la falta de herramientas tecnológicas adecuadas reduce su capacidad para controlar, regular y promover la formalización minera en territorios vulnerables.

En contraste, la normativa ambiental que regula la minería subterránea en España se basa principalmente en la Ley 22/1973 de Minas y el Real Decreto 975/2009, que establecen condiciones para proteger el ambiente y gestionar los residuos mineros. Además, se incorporan principios como “quien contamina paga”, y la evaluación de impacto ambiental y la participación pública, siguiendo directrices europeas.

No obstante, estos mecanismos no pueden aplicarse de manera automática al contexto colombiano debido a las diferencias políticas, técnicas, sociales y territoriales entre ambos países. Por ello, resulta fundamental abordarlos desde una perspectiva académica y profesional, evaluando e identificando posibles soluciones y metodologías que puedan adaptarse mediante la comparación con su implementación en otros países, como suele ocurrir con este tipo de normativas.

Por lo tanto, este trabajo de grado se plantea con la intención de identificar y comparar con rigurosidad técnica y jurídica las similitudes y diferencias entre las normativas ambientales que regulan la construcción de minas subterráneas en Colombia y España, para así generar aportes relevantes a la discusión sobre sostenibilidad, ingeniería y política pública.

Entonces, este trabajo de grado tiene como propósito identificar y comparar las similitudes y diferencias entre las normativas ambientales que regulan la construcción de minas subterráneas en Colombia y España. Para así poder generar aportes significativos a la discusión sobre sostenibilidad Ingenieril y la política pública en el ámbito minero, a partir de este análisis, se busca responder a las siguientes preguntas problema: ¿Cuáles son las principales diferencias y similitudes entre las normativas ambientales que regulan la minería subterránea en Colombia y España?, ¿Qué buenas prácticas en regulación y gestión ambiental aplicadas en España podrían adaptarse al contexto colombiano?

#### IV. Marco Referencial

##### Glosario

A continuación, se presentan algunos de los conceptos técnicos fundamentales en minería subterránea que se emplearán en el desarrollo del presente trabajo de grado, cuyo objetivo es analizar y comparar las normas ambientales aplicadas a la minería subterránea en los contextos de España y Colombia, identificando diferencias, vacíos y buenas prácticas que puedan ser adaptadas y aplicadas al contexto colombiano.

- **Minería subterránea:** Técnica de explotación minera que se realiza por debajo de la superficie terrestre, mediante túneles, rampas y galerías, con el objetivo de extraer minerales localizados a profundidades considerables.
- **Geotecnia aplicada a minería:** Rama de la ingeniería que estudia el comportamiento del suelo y las rocas, esencial para el diseño de excavaciones subterráneas seguras, sostenimiento de túneles y prevención de colapsos en infraestructura subterránea.
- **Sostenimiento de túneles y galerías:** Conjunto de sistemas estructurales utilizados para mantener la estabilidad de las excavaciones subterráneas, como pernos de anclaje, cerchas metálicas.
- **Ventilación minera:** Sistema diseñado para renovar el aire en las minas subterráneas, controlar la temperatura, eliminar gases contaminantes y garantizar condiciones seguras para los trabajadores.
- **Monitoreo de gases en minas:** Técnicas y tecnologías utilizadas para detectar y controlar la acumulación de gases peligrosos como metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S).

- **Gestión de residuos mineros:** Proceso de manejo adecuado de los materiales residuales generados en la actividad minera, como estériles y relaves, de acuerdo con estándares ambientales y de seguridad.
- **Normativa ambiental minera:** Conjunto de leyes, decretos y reglamentos que regulan la operación de actividades mineras en relación con la protección del medio ambiente y la salud pública.
- **Sostenibilidad en minería:** Principio que busca equilibrar el desarrollo económico de la minería con la protección del ambiente y el bienestar de las comunidades locales a lo largo del ciclo de vida del proyecto.
- **Seguridad minera:** Conjunto de medidas técnicas y organizativas dirigidas a prevenir accidentes, enfermedades laborales y pérdidas humanas dentro de las operaciones subterráneas.
- **Modelado geotécnico:** Simulación computacional del comportamiento de suelos y rocas bajo condiciones específicas, utilizada para prever riesgos y optimizar diseños en proyectos subterráneos.
- **Fiscalización ambiental minera:** Actividad de control y seguimiento realizada por autoridades competentes para verificar el cumplimiento de las obligaciones ambientales durante la operación minera.
- **Formalización minera:** Proceso mediante el cual operaciones mineras informales o ilegales se integran a la legalidad mediante el cumplimiento de requisitos técnicos, legales y ambientales.
- **Principio de "quien contamina paga":** Principio del derecho ambiental que establece que quien cause un daño al ambiente debe asumir los costos de su reparación o compensación.

### **Antecedentes investigativos**

Para el desarrollo de este trabajo, se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas, repositorios institucionales y documentos normativos oficiales de Colombia, España y la Unión Europea, siempre teniendo el objetivo claro de establecer el estado del arte respecto a la aplicación, evolución y comparación de las normas ambientales en proyectos de minería subterránea, con el fin de identificar vacíos de investigación, marcos regulatorios vigentes y propuestas de mejora en contextos similares.

Entre los principales antecedentes se encuentra el estudio de González (2021), quien realiza una comparación entre modelos regulatorios en América Latina y Europa, destacando cómo las directrices de la Unión Europea han promovido una armonización normativa en los países miembros, especialmente en lo referente a residuos mineros y restauración post explotación. Este autor señala que en América Latina, y particularmente en Colombia, persisten dificultades en la articulación interinstitucional, así como una débil integración de la sostenibilidad ambiental en los procesos de licenciamiento.

Otro referente importante es el trabajo de Martínez y López (2020), quienes analizaron la eficacia de las medidas de compensación ambiental implementadas en varios proyectos mineros colombianos, en donde sus conclusiones evidenciaban que muchas de estas acciones, como la reforestación, fracasan por falta de seguimiento, uso de especies no nativas o ausencia de criterios ecológicos sólidos, este estudio resulta clave para comprender una de las principales falencias en el modelo colombiano, la cual es la débil implementación técnica de las medidas ambientales.

Asimismo, Muñoz y Torres (2020) exploran la relación entre modelación geomecánica y la sostenibilidad ambiental en minería subterránea, proponiendo que la incorporación de herramientas avanzadas de simulación estructural no solo mejora la seguridad estructural de los proyectos, sino que permite prever impactos ambientales sobre el entorno y establecer estrategias de prevención, este enfoque es más común en el contexto europeo en donde el monitoreo y la simulación son obligatorios en etapas de diseño y operación.

En el contexto europeo, diversos documentos técnicos y normativos, como los informes de la Comisión Europea sobre la implementación del Reglamento de Materias Primas Críticas (CRMA), resaltan la necesidad de alinear los proyectos extractivos con principios de economía circular, eficiencia energética y restauración ecológica obligatoria, principios que aún no se han aplicado en el contexto colombiano (Comisión Europea, 2023).

Finalmente, cabe destacar que, si bien existen múltiples estudios sobre minería a cielo abierto, pocos trabajos se enfocan específicamente en la comparación de marcos regulatorios ambientales en minería subterránea entre países, lo que refuerza la pertinencia de este estudio como una contribución original al análisis técnico y normativo de esta modalidad extractiva.

## **V. Marco normativo**

La construcción de proyectos relacionados con la minería subterránea involucra una amplia variedad de actividades técnicas y especializadas. La minería subterránea requiere actividades especializadas como la excavación, el sostenimiento, la ventilación y la restauración ambiental, todas orientadas a garantizar seguridad, eficiencia y sostenibilidad. A diferencia de otras formas de explotación, demanda control constante de variables críticas como gases, presión y humedad, siendo el monitoreo de estos elementos vital para proteger a los trabajadores y la infraestructura. Dado el nivel de complejidad técnica y los riesgos asociados, estos proyectos deben desarrollarse bajo el cumplimiento riguroso de la normativa ambiental y de seguridad. A continuación, se mencionan algunas de las principales normativas que deben tenerse en cuenta para este tipo de intervenciones, tanto en Colombia como en España, países seleccionados como casos de estudio en el presente trabajo.

### **Marco normativo aplicable en Colombia**

El marco legal colombiano en materia ambiental, seguridad y sostenibilidad para proyectos mineros subterráneos, está conformado por un conjunto de leyes, decretos y resoluciones que establecen los requisitos, procedimientos y criterios técnicos obligatorios para garantizar la protección del medio ambiente, la integridad estructural y la seguridad de las operaciones y de las personas involucradas.

Aunque Colombia ha avanzado en consolidar una arquitectura institucional robusta, como el Sistema Nacional Ambiental (SINA), y mecanismos clave como el licenciamiento ambiental, en la práctica aún persisten desafíos relacionados con la articulación normativa, la capacidad de fiscalización y la implementación técnica en terreno.

A continuación, se presentan las principales normas que regulan el componente ambiental, la seguridad y la sostenibilidad en la minería subterránea en Colombia:

- **Ley 99 de 1993:** Esta ley establece el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y crea el Ministerio del Medio Ambiente. Su artículo 1 define los principios rectores de la política ambiental colombiana, entre ellos el desarrollo sostenible y la participación ciudadana en la gestión ambiental (Congreso de Colombia, 1993). También fija la competencia de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) como autoridades ambientales regionales.
- **Ley 685 de 2001 – Código de Minas:** Regula toda la actividad minera en el país. En su artículo 5 se establece que la actividad minera debe realizarse respetando la normativa ambiental vigente. El artículo 248 exige licenciamiento ambiental previo a la explotación minera (Congreso de Colombia, 2001).
- **Decreto 1076 de 2015:** Este decreto unifica y compila la normativa ambiental sectorial. En su Libro 2, Parte 2, Título 2, se reglamenta el procedimiento de licenciamiento ambiental, incluyendo los Estudios de Impacto Ambiental (EIA), Planes de Manejo Ambiental (PMA) y su seguimiento (Presidencia de la República de Colombia, 2015).
- **Resolución 1402 de 2018:** Emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, esta resolución establece los lineamientos técnicos para la gestión ambiental de relaves generados en actividades mineras. Entre sus aspectos clave está la obligación de diseñar depósitos con criterios geotécnicos, realizar monitoreos periódicos y prevenir la contaminación de cuerpos de agua (Minambiente, 2018).
- **Decreto 1886 de 2015:** Es el reglamento de seguridad en minas subterráneas. Si bien su enfoque es técnico-operativo, tiene implicaciones ambientales importantes, como la obligación de contar con ventilación adecuada, control de gases, sostenimiento estructural y planes de evacuación. En

conjunto con la Resolución 1402 de 2018 y el Decreto 1076, constituye un paquete técnico-ambiental base para la minería subterránea en el país (Minminas, 2015).

- **Decreto 1666 de 2016:** Reglamenta aspectos técnicos de seguridad minera subterránea. Exige sistemas de ventilación, estructuras de soporte, planes de evacuación y protocolos de monitoreo de gases. También establece que las labores subterráneas deben contar con estudios técnicos previos y con planes de contingencia para minimizar riesgos (Ministerio de Minas y Energía, 2016).

### **Marco normativo aplicable en España y la Unión Europea**

El marco normativo español en materia ambiental para minería subterránea se encuentra ampliamente influenciado por la legislación comunitaria de la Unión Europea (UE). A diferencia del caso colombiano, el modelo europeo se caracteriza por una estructura jerárquica y articulada, en la que las directivas de la UE definen criterios mínimos obligatorios para todos los Estados miembros, y posteriormente son transpuestas al derecho nacional mediante leyes y decretos internos.

Este sistema garantiza una mayor uniformidad en la aplicación de principios como la prevención del daño ambiental, la evaluación estratégica, la restauración post explotación y el uso de tecnologías limpias. Además, establece la obligatoriedad de planes de cierre detallados, monitoreo geotécnico e hidrológico permanente, así como mecanismos de participación ciudadana vinculante en todas las fases del proyecto.

A continuación, se presentan las normas más relevantes que regulan los aspectos ambientales de la minería subterránea en España:

- **Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental:** Es la norma principal que regula los procedimientos de evaluación de impacto ambiental (EIA) en España. Establece que todos los proyectos de minería subterránea están sujetos a evaluación ambiental ordinaria. Entre sus exigencias se encuentran:
  - ★ La presentación de alternativas viables desde el punto de vista ambiental.
  - ★ Medidas de prevención, corrección, compensación y seguimiento.
  - ★ Evaluación del impacto acumulativo y sinérgico.
  - ★ Participación ciudadana efectiva durante todo el proceso.

Esta ley responde directamente a las obligaciones impuestas por la Directiva 2011/92/UE, y su cumplimiento es supervisado por las comunidades autónomas, lo cual refuerza la descentralización del control ambiental (Boletín Oficial del Estado , 2013).

- **Real Decreto 975/2009:** Regula la gestión de residuos procedentes de industrias extractivas, incluidos los generados por la minería subterránea. Es la principal norma española de transposición de la Directiva 2006/21/CE, y exige:
  - ★ Elaboración de un plan de gestión de residuos.
  - ★ Diseño geotécnico de depósitos de relaves con garantía estructural.
  - ★ Evaluaciones de estabilidad, escorrentía y riesgo hidrológico.
  - ★ Monitoreo permanente e informes de seguridad.

También establece categorías de riesgo para las instalaciones de residuos, incluyendo las presas de relaves tipo A, que requieren planes de emergencia, auditoría técnica y seguros de responsabilidad civil (Boletín Oficial del Estado, 2009).

- **Directiva 2006/21/CE sobre residuos de industrias extractivas:** Emitida por el Parlamento Europeo y el Consejo, esta norma busca prevenir los efectos negativos de los residuos mineros sobre el medio ambiente y la salud humana. Establece:
  - ★ La obligación de planes de gestión de residuos para cada instalación extractiva.

- ★ Requisitos específicos para presas de relaves y escombreras.
- ★ Control de lixiviados, monitoreo continuo y medidas correctivas.
- ★ Garantías financieras para asegurar la ejecución de los planes de cierre.

Esta directiva es clave para armonizar los estándares ambientales entre todos los Estados miembros de la UE y ha transformado la forma en que se gestionan los residuos mineros en Europa (Parlamento Europeo y Consejo, 2006).

- **Ley de Minas 22/1973**: Aunque fue promulgada antes de la adhesión de España a la UE, esta ley sigue siendo la base del régimen jurídico minero en el país. Reconoce el carácter público de los recursos minerales y establece obligaciones ambientales, como:

- ★ La presentación de planes de restauración.
- ★ La compatibilidad entre la actividad minera y el uso del suelo definido en los planes urbanísticos.
- ★ El cumplimiento obligatorio de toda la normativa ambiental como condición para la concesión minera.

Ha sido modificada en varias ocasiones para armonizarse con los criterios ambientales europeos (Boletín Oficial del Estado, 1973).

- **Reglamento sobre las Materias Primas Fundamentales (UE) 2023/1609 - Critical Raw Materials Act (CRMA)**: Adoptado por la Comisión Europea, este reglamento busca garantizar el suministro seguro, sostenible y ético de materias primas estratégicas para la transición digital y energética de Europa. Establece:

- ★ Procedimientos acelerados de licenciamiento para proyectos de interés estratégico.
- ★ Fomento a la minería sostenible y tecnologías limpias.
- ★ Trazabilidad, transparencia e integración de la economía circular.
- ★ Obligaciones de restauración ecológica y uso eficiente del suelo.

Este reglamento redefine las prioridades mineras en Europa, exigiendo altos estándares ambientales desde la exploración hasta el cierre del proyecto (Comisión Europea, 2023).

## VI. Aspectos Metodológicos

### Enfoque metodológico aplicado

Este trabajo se ubica dentro de una investigación de tipo cualitativa, documental y comparativa, ya que su objetivo principal es analizar y contrastar el marco normativo que regula los aspectos ambientales, de seguridad y sostenibilidad de la minería subterránea en Colombia y España, identificando vacíos, diferencias y buenas prácticas que puedan ser adaptadas al contexto colombiano. Esta metodología se divide en cinco etapas, como se muestra en el diagrama.

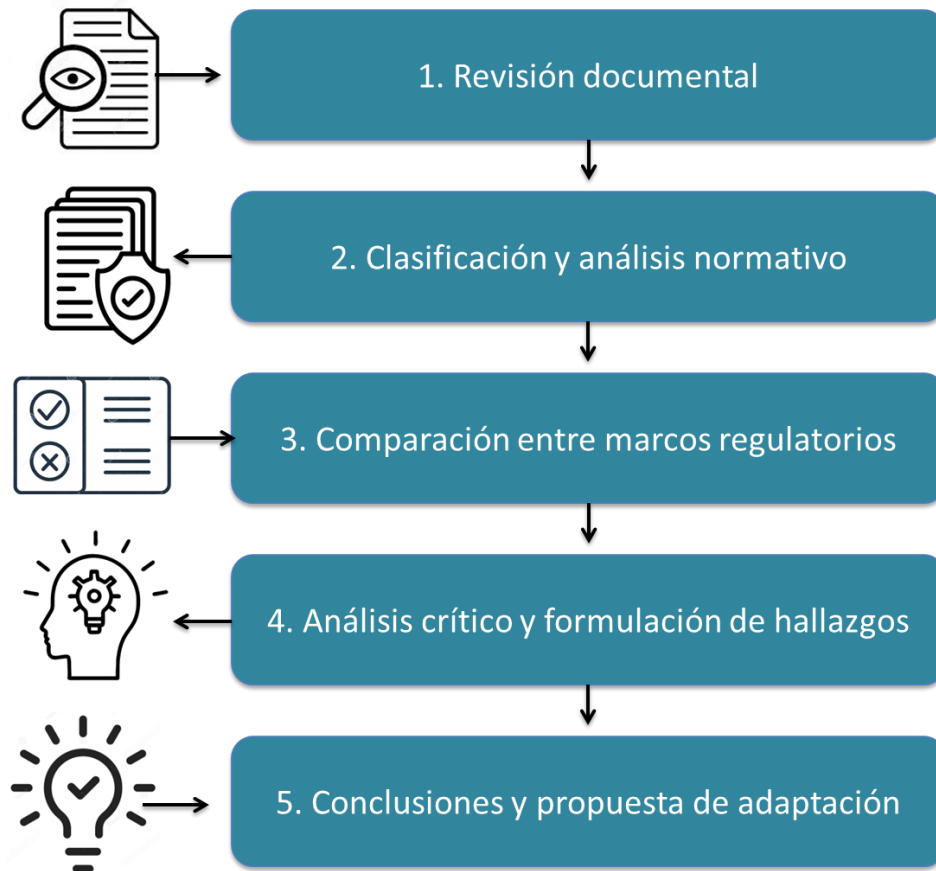


Ilustración 1 Diagrama metodología aplicada

**1. Revisión documental:** Se realiza una búsqueda en repositorios nacionales, departamentales y locales, así como en fuentes oficiales y bases normativas de Colombia, España y la Unión Europea. Esta etapa permite recopilar leyes, decretos, resoluciones y directivas relacionadas con la minería subterránea, enfocándose en licenciamiento ambiental, medidas de seguridad para los trabajadores, sostenimiento estructural, monitoreo de gases y planes de cierre.

**2. Clasificación y análisis normativo:** Se organizaron las normativas por país y temática (ambiental, seguridad, sostenibilidad) para facilitar su análisis. Luego, se evaluaron sus alcances, requisitos técnicos y nivel de exigencia frente a la operación minera subterránea.

**3. Comparación entre marcos regulatorios:** A partir de los criterios identificados, se desarrolló una matriz comparativa entre Colombia y España. Esto permitió identificar similitudes, diferencias, vacíos normativos y buenas prácticas destacadas.

**4. Análisis crítico y formulación de hallazgos:** Se realizó una lectura analítica del marco normativo contrastado, identificando fortalezas, vacíos y oportunidades de mejora para el caso colombiano. Este análisis se complementó con bibliografía reciente y casos reales, lo que permitió contextualizar la normativa desde una perspectiva práctica. El proceso se apoyó en la experiencia profesional del autor, aportando una visión directa de los desafíos del sector minero en cumplimiento ambiental, fiscalización técnica y coordinación institucional.

**5. Conclusiones y propuesta de adaptación:** Finalmente, se elaboró una síntesis con los hallazgos principales, destacando recomendaciones que podrían ser útiles para fortalecer el marco normativo colombiano, promoviendo una minería subterránea más segura, eficiente y sostenible.

### Criterios de comparación normativa

La selección de los criterios de comparación se fundamentó en la revisión de literatura especializada y en la identificación de aquellos factores con mayor incidencia en la planificación, operación y fiscalización de proyectos mineros subterráneos, particularmente desde una perspectiva ambiental. Los cinco criterios definidos para este análisis comparativo son los siguientes:

**1. Estructura normativa:** Este criterio se refiere a la forma en que se organiza y jerarquiza la legislación en cada país. Incluye aspectos como:

- ★ El nivel de integración entre las normas técnicas, ambientales y territoriales.
- ★ La existencia de leyes marco, decretos específicos y resoluciones complementarias.
- ★ La relación entre autoridades nacionales, regionales y locales en la aplicación de la normativa.

La comparación permite observar si el país cuenta con una normativa unificada, coherente y articulada, o si por el contrario existen dispersión normativa, superposición de competencias o contradicciones regulatorias.

**2. Enfoque ambiental:** Este criterio analiza la filosofía subyacente al régimen normativo, evaluando si se privilegia la prevención, la mitigación, la compensación, o una combinación equilibrada de estas estrategias. Asimismo, se examina si las normas incorporan y promueven principios fundamentales como:

- ★ Desarrollo sostenible.
- ★ Economía circular.
- ★ Justicia ambiental.
- ★ Precaución y participación ciudadana.

El enfoque europeo, por ejemplo, se ha orientado hacia un modelo preventivo y ecosistémico, mientras que en Colombia predomina un modelo reactivo y compensatorio, aunque con esfuerzos recientes hacia la sostenibilidad.

3. **Requisitos técnicos:** Este criterio considera el nivel de exigencia técnica que imponen las normas para:

- ★ El diseño geotécnico y estructural de la mina.
- ★ El control de aguas subterráneas, emisiones y residuos.
- ★ La seguridad del personal y del entorno.
- ★ La modelación numérica, monitoreo instrumental y gestión de riesgos.

Se evalúa si las normas incorporan estándares internacionales, exigencias detalladas, herramientas de modelación predictiva y criterios de ingeniería avanzada.

4. **Mecanismos de control y seguimiento:** Este apartado examina cómo se lleva a cabo el seguimiento de los proyectos durante su ejecución y operación, así como:

- ★ La periodicidad de los informes técnicos y ambientales.
- ★ La participación de las autoridades competentes.
- ★ El uso de herramientas de monitoreo en tiempo real.
- ★ La existencia de sanciones, auditorías y correctivos obligatorios.

También se observa la capacidad institucional de las entidades fiscalizadoras para ejercer sus funciones con independencia, rigor técnico y cobertura territorial suficiente.

5. **Nivel de integración con estándares internacionales:** Finalmente, se compara qué tanto las normas nacionales se alinean con instrumentos globales como:

- ★ Directivas de la Unión Europea.
- ★ Códigos de práctica del ICMM, GRI, IRMA o IFC.

- ★ Convenios multilaterales en materia ambiental, derechos humanos y cambio climático.

Este criterio permite identificar si el país se encuentra actualizado frente a los avances globales en regulación minera sostenible, o si mantiene un enfoque normativo local y desarticulado del contexto internacional.

La definición y el desarrollo de estos elementos permiten establecer similitudes, diferencias y oportunidades de mejora entre las normativas ambientales aplicadas a la minería subterránea en Colombia y en España/Unión Europea.

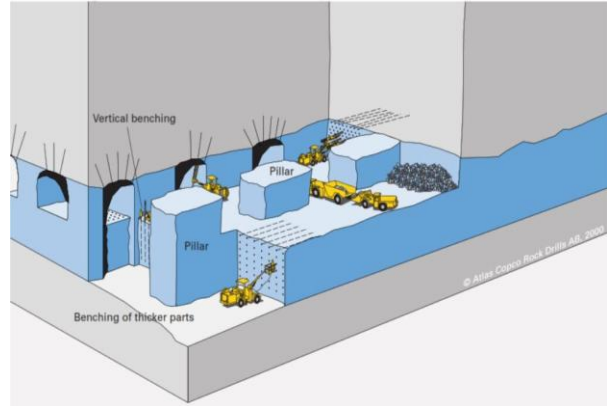
## VII. Resultados

A partir del análisis comparativo del marco normativo entre Colombia y España, se obtuvieron diversos hallazgos que evidencian similitudes, diferencias y oportunidades de mejora en la regulación de la minería subterránea. A continuación, se presentan los resultados organizados según los cinco criterios definidos.

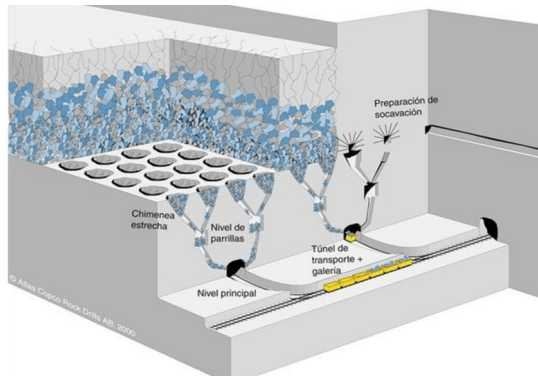
### Métodos de explotación subterránea más comunes

En el marco del criterio de requisitos técnicos, se identificaron los métodos de explotación subterránea más utilizados en ambos países, los cuales están directamente relacionados con exigencias normativas en materia de diseño geotécnico, estabilidad estructural y control operativo. Estos métodos son:

**Cámaras y pilares (Room and Pillar):** Consiste en la excavación de cámaras donde se extrae el mineral, dejando pilares de material sin explotar que funcionan como soporte estructural para mantener la estabilidad del techo. Es común en yacimientos horizontales o subhorizontales con buena competencia geomecánica.



*Ilustración 2-Método de Cámaras y Pilares*  
Ingeniería de Minas, 2025 (Tomado de  
<https://ingenieriademinas.info/wp-content/uploads/Metodo-Camaras-y-Pilares-Room-and-Pillars-1024x628.jpg>)

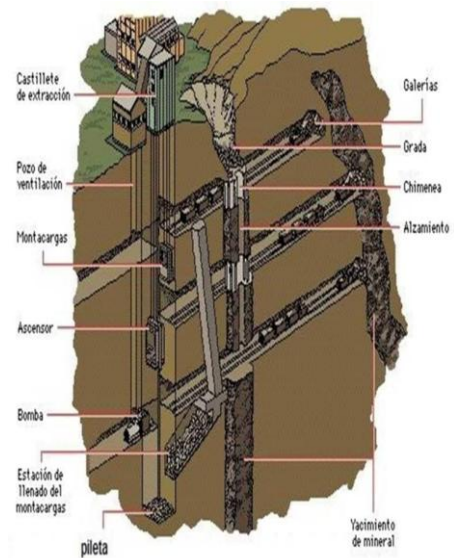


*Ilustración 3-Hundimiento por bloques (Block Caving)*  
 Ingeniería de Minas, 2025 (Tomado de  
[https://www.researchgate.net/figure/Figura-31-Modelo-isometrico-que-ejemplifica-el-metodo-Block-Caving-Munoz-2002\\_fig4\\_322020120](https://www.researchgate.net/figure/Figura-31-Modelo-isometrico-que-ejemplifica-el-metodo-Block-Caving-Munoz-2002_fig4_322020120))

**Hundimiento por bloques (Block Caving):** Se emplea en depósitos masivos de baja ley. El método implica fracturar el cuerpo mineralizado en su base, permitiendo que colapse por gravedad. Es un sistema altamente mecanizado que requiere una planificación geotécnica rigurosa, monitoreo continuo y control de subsidencia.

### Corte y relleno

**(Cut and Fill):** Involucra la extracción de secciones del mineral que luego son rellenadas con material estéril, relaves espesados o pasta cementada. Este método es adecuado para cuerpos mineralizados inclinados o con condiciones geotécnicas inestables, ya que permite mantener el soporte del macizo rocoso a medida que avanza la extracción.



*Ilustración 4-Corte y relleno (Cut and Fill)*  
 Ingeniería de Minas, 2025 (Tomado de  
<https://www.gestiopolis.com/corte-y-relleno-camaras-y-pilares-metodos-de-mineria-subterranea/>)

### Principales retos técnicos asociados a la minería subterránea

Como resultado del proceso de investigación y revisión documental sobre las operaciones subterráneas en minería, se identificaron una serie de desafíos clave que impactan tanto la viabilidad técnica como la sostenibilidad ambiental de este tipo de explotación, a continuación, se describen los principales retos asociados a la minería subterránea:

- ★ El sostenimiento estructural de las excavaciones mediante pernos, marcos metálicos, concreto lanzado o sistemas de soporte activo el cual permiten una simulación a una estructura que trate de regular el sostenimiento y la estructura de la mina
- ★ La ventilación forzada que garantice condiciones atmosféricas seguras, el control de gases nocivos como lo es el metano y el dióxido de azufre (o monóxido de carbono), así como la regulación de la temperatura al interior de la mina.
- ★ El manejo de aguas subterráneas, el cual implica elaborar el diseño de sistemas de drenaje, el bombeo y el tratamiento de aguas contaminadas por interacción con minerales sulfurados o metales pesados.
- ★ La planificación de rutas de evacuación, sistemas de monitoreo sísmico y protocolos de emergencia ante cualquier eventualidad que se pueda presentar al interior de la mina.

#### **Principales retos asociados a la minería subterránea a nivel ambiental**

A continuación, se presentan los principales retos asociados a esta modalidad extractiva a nivel ambiental:

- ★ La contaminación hídrica, producto del drenaje ácido de mina (DAM) y lixiviación de metales.
- ★ La subsidencia del terreno, es decir, el hundimiento de la superficie terrestre por colapso progresivo de las cavidades subterráneas.
- ★ La emisión de partículas y gases dentro de las labores, que afectan la salud de los trabajadores y pueden liberar contaminantes al ambiente exterior, las cuales deben ser filtradas y dirigidas con total eficiencia al exterior de la mina.
- ★ La alteración de ecosistemas subterráneos, como acuíferos, cavernas o hábitats endémicos sensibles, los cuales se tratan de preservar al momento de hacer la simulación de la excavación.

Estas complejidades técnicas y ambientales hacen imprescindible la existencia de un marco normativo sólido, específico y técnicamente actualizado que garantice no solo la seguridad operativa, sino también la sostenibilidad de los recursos y la protección de los ecosistemas afectados directa o indirectamente por el proyecto.

En este contexto, la ingeniería civil y ambiental desempeña un papel central en el diseño de sistemas estructurales, modelos geo mecánicos, planes de gestión de residuos y estrategias de rehabilitación del entorno posterior al cierre minero (Ramírez et al., 2020).

#### **Comparativo de Normativas Ambientales en Minería Subterránea: Colombia vs. España/UE**

A continuación, se presenta un cuadro comparativo entre las normativas ambientales de Colombia y España/Unión Europea, aplicables a la minería subterránea, organizadas según los cinco criterios definidos previamente: estructura normativa, enfoque ambiental, requisitos técnicos, mecanismos de control y seguimiento, e integración con estándares internacionales. Este cuadro permite visualizar las similitudes y diferencias de manera clara y estructurada.

Tabla 1 - Comparativo de Normativas Ambientales en Minería Subterránea: Colombia vs. España/UE

Criterio	Colombia	España / Unión Europea
<b>Estructura normativa</b>	Fragmentada. Varias leyes, decretos y resoluciones no siempre articuladas. Funciones compartidas entre La Agencia Nacional de Minería (ANM), la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR).	Integrada. Directivas europeas transpuestas en decretos nacionales. Competencias claras entre administración central y autonómica.
<b>Enfoque ambiental</b>	Compensatorio y mitigador. Basado en Estudios de Impacto Ambiental con medidas correctivas.	Preventivo y ecosistémico. Evaluación ambiental estratégica y planificación territorial obligatoria.
<b>Requisitos técnicos</b>	Básicos. Se exige sostenimiento, ventilación, drenaje y estudios previos, pero no modelación avanzada ni monitoreo continuo.	Altos. Se exige modelado geotécnico, monitoreo instrumental permanente y criterios de estabilidad predictiva.
<b>Mecanismos de control y seguimiento</b>	Limitados. Seguimiento a través de PMA y visitas de campo ocasionales. Débil capacidad técnica institucional.	Rigurosos. Auditorías técnicas, informes periódicos y monitoreo automatizado. Participación de múltiples niveles de gobierno.
<b>Integración con estándares internacionales</b>	Parcial. Algunas normas hacen referencia a convenios internacionales, pero sin obligatoriedad ni trazabilidad.	Alta. Directivas europeas obligatorias. Alineación con políticas climáticas, economía circular y trazabilidad ambiental.

El cuadro comparativo muestra las principales diferencias entre las normas de minería subterránea en Colombia y España/Europa. En Europa, las leyes están bien conectadas y se enfocan en prevenir problemas, proteger el medio ambiente y planificar con anticipación, en Colombia, las reglas están más separadas y las acciones ambientales suelen tomarse después de que comienzan las actividades mineras. Además, en España las normas técnicas son más estrictas para evitar riesgos, mientras que en Colombia

son más flexibles, pero menos detalladas. Europa sigue más de cerca las reglas internacionales, mientras que en Colombia estas se usan de forma parcial y no son obligatorias.

Este análisis comparativo establece las bases para los hallazgos detallados que se exponen en el apartado de los Hallazgos clave, donde se profundiza en las implicaciones prácticas de estas diferencias normativas.

### **VIII. Hallazgos clave**

A partir del análisis comparativo realizado entre las normativas ambientales de Colombia y España/Unión Europea en relación con la minería subterránea, se identificaron varios puntos clave que permiten entender las diferencias más importantes en términos técnicos, administrativos y ambientales.

Estos hallazgos ayudan a reconocer tanto las fortalezas como las limitaciones de cada sistema normativo.

- ★ Ambos países exigen licenciamiento ambiental para la minería subterránea.

Tanto en Colombia como en España, las actividades mineras subterráneas están sujetas a un proceso de licenciamiento ambiental previo a su ejecución. Este instrumento busca asegurar que los impactos potenciales sobre el entorno sean evaluados, mitigados y, en lo posible, compensados antes del inicio de las operaciones.

En Colombia, este requisito está reglamentado principalmente por el Decreto 1076 de 2015 y la Ley 99 de 1993, mientras que en España se aplica la Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental, alineada con las directrices de la Unión Europea.

No obstante, la diferencia radica en el nivel de profundidad y seguimiento posterior al licenciamiento, siendo más sistemático y riguroso en el contexto europeo.

★ España exige mayor precisión técnica en relaves, monitoreo y cierre.

En España, la normativa ambiental incluye reglas claras sobre cómo se deben diseñar los depósitos de relaves, los sistemas de monitoreo y los planes de cierre de minas. Normas como el Real Decreto 975/2009 y la Directiva 2006/21/CE exigen estudios técnicos específicos, mediciones constantes y soluciones a largo plazo para evitar impactos negativos.

En Colombia, aunque existen regulaciones como la Resolución 1402 de 2018, en muchos casos su aplicación es limitada o depende del tipo de proyecto. En las minas grandes, se cumplen estándares internacionales, pero en muchas operaciones más pequeñas, esto no se exige ni se controla de manera efectiva.

★ Colombia ha avanzado en normas, pero con problemas en su implementación.

En la última década, Colombia ha aprobado normas que buscan mejorar la seguridad y el control ambiental en minería subterránea, como el Decreto 1886 de 2015 y la ya mencionada Resolución 1402. Sin embargo, en la práctica hay dificultades para aplicarlas:

- ✓ Las entidades regionales no siempre tienen personal técnico suficiente.
- ✓ Hay varias instituciones que intervienen, pero no se coordinan bien entre sí.
- ✓ Muchas veces no hay seguimiento real ni sanciones efectivas cuando se incumplen las normas.

Esto hace que, aunque las reglas existen, no siempre se cumplan ni se controlen en el campo. El enfoque europeo se articula más claramente con metas de sostenibilidad y economía circular (Comisión Europea, 2023).

- ★ En Colombia, la falta de coordinación entre entidades genera muchas dificultades.

A diferencia de España, donde las funciones están mejor distribuidas entre niveles nacionales y autonómicos, en Colombia existen conflictos entre entidades como la ANLA, la ANM, las CAR y los gobiernos locales. Estas entidades a veces se contradicen, no comparten información y actúan de forma independiente, lo que:

- ✓ Retrasa decisiones.
- ✓ Confunde a las empresas.
- ✓ Dificulta el control y seguimiento de los proyectos.

Esta desarticulación institucional es uno de los principales obstáculos para mejorar la gestión ambiental en el sector minero colombiano.

- ★ El modelo europeo está mejor conectado con sostenibilidad y economía circular.

En Europa, la legislación ambiental está pensada para evitar impactos desde el comienzo y aprovechar los recursos de forma eficiente. Normas como el CRMA (2023) promueven el uso de tecnologías limpias, el reciclaje de materiales y la planificación del uso futuro del suelo después del cierre de la mina.

En Colombia, aunque se mencionan conceptos como sostenibilidad y compensación ambiental, la mayoría de los proyectos se enfocan más en reparar el daño después que en evitarlo desde el diseño inicial. Esto representa una diferencia de enfoque muy importante.

### **Observaciones técnicas y ambientales**

La comparación entre las normativas ambientales aplicables a la minería subterránea en Colombia y España revela diferencias importantes no solo en el diseño de las normas, sino también en su aplicación práctica. Estas diferencias tienen consecuencias técnicas y ambientales directas sobre los proyectos mineros y sus zonas de influencia.

En el plano técnico, la normativa europea exige mayores niveles de precisión. Por ejemplo, en España es obligatorio presentar estudios geotécnicos detallados con modelación numérica tridimensional del macizo rocoso, análisis de estabilidad de taludes internos y externos, y monitoreo estructural constante. Se utilizan tecnologías como estaciones totales automatizadas, sensores de presión y piezómetros que permiten detectar cambios en tiempo real. Esto no solo mejora la seguridad de la mina, sino que permite tomar decisiones preventivas.

En Colombia, aunque existen normas que exigen sostenimiento, ventilación y planes de manejo ambiental, el nivel técnico exigido depende en gran medida de la calidad del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) presentado por el operador, así como de la capacidad técnica de la autoridad que lo revisa. Esto genera una variabilidad significativa entre proyectos, incluso dentro del mismo país. En muchos casos, los estudios no incluyen modelación avanzada ni monitoreo continuo, lo que limita la capacidad de anticiparse a fallas estructurales o movimientos de terreno.

Desde el punto de vista ambiental, España privilegia un enfoque preventivo. Esto significa que los proyectos deben demostrar, desde su fase de diseño, cómo evitarán impactos negativos. Por ejemplo, los planes de cierre deben presentarse al inicio del proyecto, y es obligatorio restaurar ecológicamente el terreno con criterios de funcionalidad del ecosistema. Además, la normativa obliga a evaluar la huella hídrica y energética del proyecto, integrando principios de eficiencia y economía circular.

En contraste, en Colombia el enfoque sigue siendo mayoritariamente compensatorio. Es decir, se permite causar un impacto ambiental siempre que se plantee una medida para "reponer" lo afectado. Un ejemplo claro es la siembra de árboles como compensación por pérdida de cobertura vegetal, sin evaluar si esas especies son nativas, funcionales, o si se garantiza su supervivencia a largo plazo.

Un caso que ilustra estas diferencias es el del proyecto del Túnel de La Línea, ubicado entre los departamentos de Quindío y Tolima en Colombia, ya que, a pesar de su envergadura, se presentaron críticas por la debilidad de los planes de compensación ambiental y el impacto en ecosistemas de alta

montaña, los Informes presentados por la Contraloría General (2016) señalaron deficiencias en la reforestación, incluyendo la siembra de especies no adaptadas y la ausencia de seguimiento técnico.

Igualmente, en Boyacá, el proyecto minero Carbones del Cerrejón del Alto Chicamocha, aprobado con estudios ambientales muy limitados, evidenció altas tasas de mortalidad en los árboles que fueron sembrados como una medida compensatoria debido a la falta de mantenimiento y al uso de especies no nativas, según reportes de la CAR (2021), estos ejemplos demuestran que la acción compensatoria, cuando no está respaldada por estudios ecológicos rigurosos y un monitoreo continuo, no garantiza por sí sola la recuperación del ecosistema afectado.

En conclusión, la normativa técnica y ambiental en España está pensada para anticiparse al impacto, reducir el riesgo desde el diseño del proyecto, y asegurar un cierre ordenado y responsable, en Colombia, por otro lado, aunque hay avances normativos, persiste una brecha entre la intención de la norma y su implementación real, lo que afecta la sostenibilidad de los proyectos de minería subterránea.

En materia técnica, la normativa europea exige mayores niveles de precisión en estudios geotécnicos, controles de estabilidad de taludes y manejo de aguas, en cuanto las normas colombianas, si bien abordan estos aspectos, dependen en gran medida de la calidad de los Estudios de Impacto Ambiental y de la capacidad institucional de seguimiento, ahora, en cuanto a términos ambientales hablamos, el sistema europeo privilegia la prevención, mientras que en Colombia predomina una lógica de compensación y mitigación (Martínez & López, 2020).

### **Implicaciones para la ingeniería civil y la sostenibilidad**

El análisis comparativo de las normativas ambientales aplicables a la minería subterránea en Colombia y España/Unión Europea permite identificar implicaciones directas para la ingeniería civil, especialmente en lo relacionado con el diseño estructural, la seguridad geotécnica, la gestión del riesgo y la sostenibilidad ambiental de los proyectos.

Una de las principales conclusiones es que los marcos normativos con mayor nivel de exigencia técnica y control ambiental generan proyectos mineros más seguros, eficientes y sostenibles, lo que requiere que los ingenieros civiles participen desde las etapas más tempranas del ciclo de vida del proyecto.

En España, por ejemplo, la normativa exige que los diseños de excavaciones subterráneas estén basados en modelación geotécnica, análisis estructural detallado y estudios de impacto ambiental que consideren la huella hídrica, energética y paisajística. Esto obliga al ingeniero a incorporar criterios de estabilidad de túneles, control de subsidencia, manejo de presiones internas del macizo rocoso, y diseño de sistemas de sostenimiento activos como pernos, marcos metálicos y concreto proyectado.

Por su parte, en Colombia, si bien existen regulaciones que mencionan aspectos técnicos, no siempre se exige el uso de herramientas avanzadas. Esto implica que muchos diseños se basan en métodos empíricos o tradicionales, sin considerar escenarios complejos, como vibraciones inducidas, filtraciones progresivas o colapsos diferidos, lo que aumenta el riesgo de fallos estructurales.

Una de las herramientas más relevantes en este contexto es el monitoreo técnico, entendido como el conjunto de técnicas e instrumentos usados para medir y controlar variables clave durante la construcción y operación del túnel. Entre estas variables se encuentran:

- ★ Desplazamientos estructurales (detectados con estaciones topográficas o sensores LVDT).
- ★ Presión de poros y nivel freático (controlado con piezómetros).
- ★ Concentración de gases peligrosos como metano o monóxido (medido con sensores multi-gas).
- ★ Vibraciones producto de voladuras o frentes de avance (controladas con geófonos y acelerómetros).

El monitoreo permite ajustar el diseño en tiempo real, activar planes de emergencia y tomar decisiones informadas, lo cual reduce la incertidumbre técnica y protege tanto a los trabajadores como al ecosistema.

Desde la perspectiva de la sostenibilidad, las normativas más avanzadas exigen no solo controlar el impacto durante la operación, sino también planear el cierre desde el diseño.

Esto implica que el ingeniero civil debe pensar en:

- ★ El uso futuro del terreno post-cierre.
- ★ La rehabilitación ecológica funcional, no solo paisajística.
- ★ La durabilidad de las estructuras de contención, drenaje o ventilación en el largo plazo.

En conclusión, la forma en que están diseñadas e implementadas las normas ambientales en cada país condiciona directamente la labor de los ingenieros civiles. En contextos donde la normativa es

exigente, el ingeniero debe actuar como planificador, evaluador de riesgos, gestor ambiental y diseñador estructural con enfoque sostenible. En cambio, en contextos más flexibles, su participación tiende a limitarse a la parte operativa, dejando de lado su potencial como actor clave en la sostenibilidad de la minería subterránea.

## **IX. Análisis y Discusión de Resultados**

### **Síntesis de diferencias regulatorias**

La evaluación comparativa entre los marcos normativos de Colombia y España/Unión Europea en materia ambiental para la minería subterránea permitió identificar diferencias notables en la forma en que cada país aborda la regulación, el control y el diseño técnico de los proyectos. Estas diferencias no solo se reflejan en los textos normativos, sino también en su aplicación práctica, fiscalización institucional y alineación con estándares internacionales.

En Colombia, el marco normativo está compuesto por una combinación de leyes generales, decretos sectoriales y resoluciones específicas que deben interpretarse de manera conjunta. Si bien estas normas han evolucionado y se han fortalecido en los últimos años, aún presentan vacíos técnicos, superposición de competencias y debilidades en su aplicación territorial. Un ejemplo claro es la existencia de regulaciones como la Resolución 1402 de 2018 para la gestión de relaves, cuyo cumplimiento depende en gran medida de la escala del proyecto y la capacidad de fiscalización de las autoridades regionales.

En contraste, la normativa española presenta una estructura más sistematizada y alineada con las directivas europeas. Estas directivas establecen requisitos técnicos y ambientales mínimos que deben cumplirse de forma obligatoria por todos los Estados miembros, lo que genera una mayor coherencia en la implementación y seguimiento de los proyectos. Además, se exige que los planes de manejo ambiental, monitoreo, cierre y restauración estén claramente definidos desde la fase de diseño del proyecto.

La diferencia más notoria entre ambos sistemas radica en el nivel de detalle técnico exigido y el grado de integración entre los diferentes instrumentos normativos. Mientras en España es obligatorio presentar modelación geotécnica avanzada, planes de monitoreo estructural y estrategias de economía circular, en Colombia muchos de estos elementos son opcionales o quedan a discreción del titular del proyecto y la autoridad ambiental competente.

Otro punto importante es la participación ciudadana. En España, esta es una parte obligatoria del proceso de evaluación ambiental, mientras que en Colombia, aunque está contemplada, su impacto real en la toma de decisiones es limitado.

En resumen, aunque ambos países cuentan con marcos regulatorios que reconocen la importancia de proteger el medio ambiente en contextos mineros, España muestra un enfoque más técnico, preventivo e integrado, mientras que Colombia sigue avanzando en la formulación de normas, pero enfrenta desafíos en su implementación, seguimiento y articulación institucional.

La evaluación comparativa entre los marcos normativos de Colombia y España/UE evidenció diferencias sustanciales en cuanto a la estructura legal, el enfoque ambiental y la exigencia técnica. En

Colombia, el marco normativo está compuesto por una serie de leyes, decretos y resoluciones que requieren interpretación conjunta, mientras que en España la normativa se encuentra más sistematizada e integrada con las directivas europeas (González, 2021). La normativa europea impone obligaciones más estrictas en temas como la gestión de relaves, monitoreo geotécnico y planes de cierre.

### **Fortalezas y debilidades por país**

Se presentan a continuación las fortalezas y debilidades más relevantes del marco normativo ambiental aplicable a la minería subterránea en España y la Unión Europea, explicadas en detalle con ejemplos y referencias específicas para facilitar su comprensión técnica.

#### ***Fortalezas del marco normativo español/europeo***

- ★ Normativa unificada bajo directivas europeas: directivas como la 2006/21/CE (residuos mineros) y 2011/92/UE (evaluación ambiental) son obligatorias y se transponen a las leyes nacionales como el Real Decreto 975/2009 o la Ley 21/2013.
- ★ Enfoque preventivo y predictivo: la legislación obliga a prever impactos desde el diseño del proyecto, con requisitos como modelación geotécnica, evaluación de huella hídrica y energética, y análisis de riesgo ambiental.
- ★ Sostenibilidad en todo el ciclo minero: se exige planificación para todas las fases del proyecto, desde exploración, explotación, monitoreo, hasta cierre y restauración. En la mina de hierro de Alquife (Granada), se exigió plan de cierre desde el inicio, con control de vibraciones, recuperación vegetal y monitoreo de aguas subterráneas.

- ★ Mayor nivel técnico: los estudios ambientales deben incluir simulaciones 3D del macizo rocoso, control automatizado de gases, estaciones de monitoreo estructural y análisis de subsidencia. Esto no es obligatorio en Colombia, donde muchos EIA se basan en informes sin instrumentación.

### ***Debilidades del marco normativo español/europeo***

- ★ Complejidad administrativa por la tramitación multinivel: los permisos ambientales deben ser evaluados a nivel estatal, autonómico y local, lo que puede generar duplicidades, demoras y contradicciones en requisitos.
- ★ Dificultades de supervisión en territorios remotos: en regiones como Asturias o León, las minas subterráneas en zonas de difícil acceso presentan problemas de inspección continua por limitaciones logísticas y climáticas (Comisión Europea, 2023).
- ★ Conflictos entre normativas: en algunos casos, como en la minería de estaño en Galicia, se han presentado tensiones significativas entre las competencias autonómicas en materia de protección paisajística y los intereses estratégicos de la Unión Europea. Un caso relevante se dio con el proyecto minero en Santa Comba (A Coruña), donde se planeaba reactivar la extracción de estaño y wolframio en una antigua explotación subterránea. Las autoridades gallegas, amparadas en sus regulaciones sobre protección del paisaje y la biodiversidad, expresaron oposición al desarrollo del proyecto por su posible afectación a corredores ecológicos y espacios naturales protegidos.
- ★ Este caso evidenció la falta de mecanismos efectivos de armonización entre normativas europeas y autonómicas. A pesar de ser considerado un proyecto de interés estratégico por su

vinculación con materias primas críticas para la transición energética, el proyecto fue paralizado temporalmente por la falta de consenso entre los niveles de gobierno. Este tipo de situaciones genera inseguridad jurídica, desaceleración en la implementación de proyectos clave y demuestra que incluso en sistemas normativos avanzados, la falta de articulación institucional puede limitar la efectividad de los marcos regulatorios.

### ***Fortalezas del marco normativo colombiano***

- ★ Avances recientes en regulación específica para relaves: la Resolución 1402 de 2018 exige que los depósitos de relaves cuenten con diseño geotécnico, monitoreo periódico y prevención de contaminación hídrica. Establece criterios mínimos técnicos obligatorios que antes no existían con claridad.
- ★ Institucionalidad ambiental consolidada: el Sistema Nacional Ambiental (SINA) permite la articulación de entidades como ANLA, CAR y Minambiente, aunque requiere fortalecimiento técnico en regiones.
- ★ Reconocimiento legal del licenciamiento ambiental: según la Ley 99 de 1993 y el Decreto 1076 de 2015, ningún proyecto minero puede ejecutarse sin contar con licencia ambiental previa, que debe incluir un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), Plan de Manejo Ambiental (PMA) y medidas de seguimiento y control.

### ***Debilidades del marco normativo colombiano***

- ★ Dispersión normativa: existen múltiples leyes, decretos y resoluciones sin articulación clara, lo que genera duplicidades de funciones y vacíos en campo.

- ★ Deficiencia en capacidades técnicas regionales: muchas CAR carecen de personal capacitado, equipos de monitoreo y herramientas para fiscalizar de forma técnica los proyectos mineros subterráneos.
- ★ Falta de integración entre planificación minera e infraestructura territorial: los proyectos mineros suelen desarrollarse sin considerar los POT municipales ni el desarrollo urbano y vial del entorno, lo que genera conflictos funcionales y sociales.

### **Relevancia para la gestión minera subterránea**

El análisis comparativo entre las normativas ambientales de Colombia y España/Unión Europea revela una estrecha relación entre el marco legal vigente y la forma en que se planifican, diseñan y ejecutan los proyectos de minería subterránea. La gestión minera depende no solo de los recursos técnicos y financieros disponibles, sino también del grado de exigencia, articulación y fiscalización de las normativas ambientales.

En este contexto, se evidencia que la ingeniería civil tiene un papel central en garantizar que los proyectos cumplan con los estándares de seguridad estructural, sostenibilidad y eficiencia operativa. Los requerimientos normativos afectan directamente aspectos como el diseño de galerías, la elección del método de explotación, el sostenimiento del terreno y la estabilidad de taludes internos.

En España, el marco legal exige estudios técnicos detallados para la estabilidad de taludes y techos en túneles subterráneos. Se utilizan métodos como el análisis de equilibrio límite, modelación numérica con software como FLAC3D o RS2, y simulación de cargas dinámicas. Además, es común el uso de sostenimiento con concreto lanzado (shotcrete), pernos de anclaje, marcos metálicos y mallas de

acero. Estas medidas permiten prevenir fallos estructurales como desplomes, deformaciones por presión lateral o subsidencia progresiva.

Una de las herramientas más importantes para la gestión minera moderna es el monitoreo de vibraciones geotécnicas. Este sistema permite detectar con precisión los niveles de vibración generados por voladuras, equipos pesados o desplazamientos del terreno. Las características principales del monitoreo incluyen:

- ★ Uso de sensores geofónicos triaxiales y acelerómetros piezoeléctricos, ubicados en puntos críticos como frentes de trabajo, galerías principales y zonas de falla estructural.
- ★ Registro continuo con dataloggers integrados, conectados a unidades de adquisición remota (DAQ) con respaldo satelital o por fibra óptica.
- ★ Alarmas automáticas vinculadas a umbrales de aceleración establecidos en el diseño geomecánico, activando protocolos de evacuación o suspensión temporal del frente de explotación.
- ★ Integración con software especializado como BlastMetrix3D, VibraTek o GEO5, que permite simular la propagación de ondas sísmicas y evaluar posibles zonas de resonancia.

Estas lecturas permiten realizar análisis en tiempo real para prevenir la fatiga de materiales, proteger al personal y anticipar fallas estructurales antes de que representen un riesgo operativo.

Ejemplo concreto en España: en las minas de cobre de Atalaya Riotinto (Huelva) se utiliza una red de sensores de vibración con conexión directa a un centro de control, donde los datos son analizados mediante modelado predictivo en RS2 y FLAC3D. Esto ha permitido optimizar las secuencias

de voladura, reducir el riesgo de microfracturas y aumentar la vida útil del sostenimiento sin necesidad de sobredimensionamiento.

Aplicación específica en Colombia: este tipo de tecnología aún no se ha implementado de forma sistemática, en minas como Buriticá (Antioquia) o El Roble (Chocó), que poseen condiciones geológicas complejas y alta carga estructural, la instrumentación se limita a monitoreo manual o visual. En el caso de Buriticá, se han reportado eventos de subsidencia menor que podrían haberse previsto mediante una red de sensores acelerométricos —dispositivos que miden la aceleración del terreno en respuesta a vibraciones causadas por voladuras o desplazamientos estructurales—. Estos sensores, también llamados acelerómetros, se instalan en puntos estratégicos como techos de galerías o zonas de falla, y permiten registrar movimientos en tiempo real para anticipar colapsos o deformaciones críticas. Al integrarlos con software de interpretación como Slide3 o Settle3D, es posible modelar el comportamiento del macizo rocoso y generar alertas tempranas de riesgo estructural.

Propuesta para adaptación progresiva: se recomienda comenzar la transferencia tecnológica en minas con alta inversión de capital, implementando estaciones base modulares conectadas a piezómetros y geófonos. Estas podrían ser administradas por consorcios técnicos entre el Estado, universidades como la UIS y la UPB, y empresas como Zijin Mining. La implementación debe ir acompañada de formación técnica en modelación geoestadística y mantenimiento de sensores, fortaleciendo la capacidad nacional para el monitoreo predictivo.

En conclusión, la gestión minera subterránea eficiente requiere un marco normativo exigente, pero también tecnologías de monitoreo, herramientas de simulación geotécnica y profesionales formados en la interpretación de estos sistemas. La experiencia europea, y en especial la española,

ofrece un camino viable para que Colombia fortalezca su gestión técnica y ambiental de forma gradual, contextualizada y sostenible.

### **Comparación de normativas sobre el diseño técnico y la seguridad estructural de minas subterráneas en Colombia y España**

Uno de los aspectos más determinantes en la sostenibilidad y viabilidad ambiental de una mina subterránea es su diseño estructural. Tanto Colombia como España contemplan lineamientos normativos que buscan mitigar riesgos geotécnicos, preservar el entorno y garantizar la seguridad de los trabajadores, aunque existen diferencias sustanciales en los enfoques adoptados.

En Colombia, el Decreto 1886 de 2015 establece los parámetros técnicos para la seguridad en labores subterráneas, regulando elementos como sostenimiento, ventilación, control de aguas subterráneas y monitoreo sísmico. Sin embargo, aunque contempla criterios para el diseño geotécnico, la exigencia de instrumentación y monitoreo continuo es menos estricta que en el contexto europeo.

La normativa colombiana se apoya en metodologías convencionales, con énfasis en la estabilidad inmediata de los frentes de trabajo, dejando en segundo plano la evaluación del comportamiento a largo plazo de la masa rocosa, especialmente en condiciones de saturación o anisotropía litológica, una condición de anisotropía litológica, es una condición en la que se refiere a las rocas en una variación de sus propiedades físicas en función de la dirección en la que se midan. Por ejemplo, una roca puede tener una resistencia distinta cuando se aplica esfuerzo vertical que cuando se somete a carga horizontal, lo cual es esencial al diseñar túneles que atraviesan macizos rocosos heterogéneos.

En contraste, España, bajo el Real Decreto 863/1985 y sus actualizaciones autonómicas, exige el uso de herramientas avanzadas de modelado geo mecánico (se refiere a todo lo relacionado con la mecánica de los suelos y de las rocas. Es decir, estudia cómo se comportan los materiales geológicos como tierra, roca, relaves, etc.) para el diseño estructural de túneles.

Se promueve el uso de softwares como FLAC3D, Phase2 o RS2 para simular el comportamiento del terreno en condiciones de presión, humedad, tiempo y carga variable.

Además, se requiere instrumentación in situ, como extensómetros, piezómetros y estaciones topográficas totales automatizadas. Los piezómetros son sensores que miden la presión del agua en los poros de la roca, lo cual es crucial para anticipar posibles filtraciones o inestabilidad del terreno. Las estaciones topográficas automatizadas, muy comunes en túneles, escanean múltiples puntos de referencia en las paredes del túnel y miden con alta precisión cualquier cambio en su posición, lo que permite detectar desplazamientos milimétricos y activar alertas en caso de riesgo de colapso.

Esta combinación de modelación numérica e instrumentación activa permite a los proyectos mineros en España desarrollar modelos predictivos del comportamiento del macizo rocoso. Esto se traduce en un mayor nivel de previsibilidad, optimización de recursos y reducción de accidentes durante la fase de explotación.

Cabe resaltar que España, como Estado miembro de la Unión Europea, debe cumplir con la Directiva 92/91/CEE, que regula las exigencias mínimas en materia de salud y seguridad para los trabajadores en actividades de extracción subterránea. Esta directiva ha impulsado que los diseños se

basen en parámetros técnicos exigentes y procedimientos de control más rigurosos que los actualmente adoptados en Colombia.

### **Integración ambiental en el diseño: paisaje, biodiversidad y reutilización post-explotación**

El diseño ambiental de un proyecto minero subterráneo debe ir más allá de la presentación formal de un Estudio de Impacto Ambiental. La normativa vigente debería asegurar que desde las primeras etapas del diseño se incorpore un enfoque integral del territorio, que considere no solo la técnica de explotación, sino también la ecología del entorno, los servicios ecosistémicos y la planificación de uso del suelo posterior al cierre definitivo de la mina (Boletín Oficial del Estado [BOE], 2013).

En este sentido, la normativa europea, particularmente en la española, se destaca el exigir una integración ambiental profunda desde la concepción del proyecto. La Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental establece que el estudio de impacto debe incluir análisis de biodiversidad, corredores ecológicos, conectividad del paisaje, servicios ecosistémicos y medidas de restauración compatibles con la estructura ecológica del entorno. Estas exigencias se aplican de forma obligatoria en zonas de alta sensibilidad a impactos acumulativos y fragmentación del hábitat, como bosques mediterráneos, humedales protegidos o áreas montañosas con especies vulnerables.

Un caso ejemplar de conectividad ecológica aplicada es el proyecto de restauración de las minas de carbón en Asturias, España. Tras el cierre de los frentes de explotación, se diseñaron corredores ecológicos que unieron bosques fragmentados y permitieron la reintroducción de especies clave, entre

las cuales se destacan el oso pardo y el urogallo cantábrico, cuya recuperación fue posible gracias a que el diseño ambiental se contempló desde la etapa inicial del proyecto, y no como una acción correctiva posterior (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], 2019).

En contraste, en Colombia el enfoque aún se mantiene mayoritariamente en la compensación posterior al impacto. Aunque el Decreto 1076 de 2015 y el licenciamiento ambiental exigen presentar medidas de manejo ambiental, estas se centran en evitar impactos inmediatos y no siempre integran una visión territorial amplia. Es común que se acepten medidas como la siembra de árboles sin considerar si las especies son compatibles con el ecosistema local, si hay conectividad ecológica o si existe un plan de mantenimiento a largo plazo.

Casos como el del proyecto minero en el municipio de Tasco, Boyacá, muestran que las acciones compensatorias implementadas en zonas sensibles no han sido suficientes para recuperar la conectividad ecológica del territorio. Allí se sembraron más de 50.000 árboles como medida de compensación, pero informes posteriores demostraron que gran parte de estos no sobrevivieron más de dos años por falta de mantenimiento, uso de especies inadecuadas y ausencia de monitoreo técnico (Martínez & López, 2020).

Esta diferencia normativa refleja también una diferencia conceptual: en España, la integración ambiental se basa en una visión ecosistémica, mientras que en Colombia predomina un enfoque administrativo centrado en cumplir con requisitos de forma más que de fondo. Esta debilidad no solo reduce la efectividad ambiental de las medidas, sino que también deteriora la confianza de las comunidades y la legitimidad del modelo de licenciamiento.

La experiencia española demuestra que para lograr una integración ambiental real, es necesario que la normativa exija no solo medidas de compensación, sino también planes ecológicos funcionales con indicadores de conectividad, biodiversidad y seguimiento a largo plazo. En Colombia, esta lección puede ser aplicada mediante la actualización de los requisitos del EIA y el fortalecimiento de las competencias técnicas de las autoridades ambientales regionales.

En conclusión, la integración ambiental en el diseño no puede limitarse a plantar árboles o presentar mapas. Debe implicar un enfoque estructural desde el diseño técnico, con metas claras de restauración ecológica, conectividad paisajística y sostenibilidad post minera.

### **Normativas sobre relaves, drenajes ácidos y gestión de residuos mineros**

La gestión de relaves mineros y drenajes ácidos representa uno de los mayores retos ambientales de la minería subterránea, es en estos tipos de residuos donde se contienen los metales más pesados, partículas finas y compuestos sulfurosos, puede generar impactos duraderos en el suelo, el agua y la biodiversidad si no se controla adecuadamente, esto se da tanto en Colombia como en España y existen normativas para su manejo, pero con diferencias notables en cuanto al detalle técnico, el enfoque preventivo y los mecanismos de seguimiento.

En España, la normativa sobre residuos mineros está regulada principalmente por el Real Decreto 975/2009 y por la Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, que obliga a que todo proyecto minero presente un Plan de Gestión de Residuos Mineros (PGRM), en donde se debe incluir información detallada sobre el tipo de residuos generados, los sistemas de almacenamiento, los

criterios de estabilidad geotécnica, las medidas para prevenir la generación de drenajes ácidos, y así mismo los mecanismos de monitoreo continuo a corto, mediano y largo plazo, además de esto, se exige que los planes contemplen la fase de cierre, la instalación de dispositivos de seguridad y la restauración progresiva del área intervenida, siempre contando con garantías financieras exigidas desde la fase inicial del proyecto (Boletín Oficial del Estado [BOE], 2009; Parlamento Europeo, 2006).

Un ejemplo destacado es el caso de la mina de cobre en Huelva, donde se diseñaron celdas de confinamiento impermeabilizadas con geomembranas, sensores de presión, canales de escorrentía controlada y estaciones de monitoreo de aguas subterráneas, así mismo, se implementó un sistema de drenaje pasivo con filtros de piedra caliza para neutralizar el agua ácida antes de su vertimiento (MITECO, 2019).

En contraste, Colombia cuenta con normativas más generales. La Resolución 1402 de 2018 establece lineamientos para el diseño de relaves y exige que se presenten estudios de estabilidad geotécnica, análisis de drenaje y sistemas de manejo de aguas, sin embargo, su alcance se ha visto limitado por la falta de especificidad técnica, de reglamentación complementaria y de capacidades institucionales para su fiscalización (Ministerio de Minas y Energía, 2018).

En muchos casos, las relaveras en Colombia se construyen sin sistemas de impermeabilización adecuados ni monitoreo permanente, como por ejemplo en departamentos como Caldas, por ejemplo, informes técnicos han documentado filtraciones desde depósitos de relaves hacia quebradas cercanas, lo que ha generado conflictos con comunidades rurales y afectaciones a cultivos (Contraloría General de la República, 2020).

Además, Colombia no cuenta con una normativa específica sobre drenajes ácidos de mina. Aunque el Decreto 1076 de 2015 menciona medidas generales para el control de vertimientos, no se exige un tratamiento diferenciado para aguas ácidas ni se establece un estándar de calidad química para descargas provenientes de galerías o relaves (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente], 2015).

Esta situación contrasta con el enfoque europeo, donde la presencia de sulfatos, hierro, cadmio o zinc en concentraciones elevadas activa automáticamente medidas de tratamiento y seguimiento, en donde las empresas deben reportar semestralmente los niveles de pH, conductividad eléctrica y concentración de metales pesados, adicional a ello están obligadas a implementar acciones correctivas si se supera cualquier parámetro establecido (Parlamento Europeo, 2006).

En conclusión, la gestión de relaves y drenajes ácidos en Colombia requiere una actualización normativa urgente, en donde es necesario establecer estándares específicos, exigir planes técnicos más rigurosos, implementar tecnologías de prevención y tratamiento, y así mismo implementar un sistema nacional de monitoreo, para ello, la experiencia española ofrece una hoja de ruta clara sobre cómo prevenir pasivos ambientales, bajo una planificación estructurada, con rigor técnico y transparencia.

### **Conectividad normativa y transversalidad entre el ordenamiento territorial y los proyectos mineros**

El ordenamiento territorial es un instrumento fundamental para que todo tipo de desarrollo económico este de la mano con la conservación ambiental, en el contexto de la minería subterránea, su adecuada articulación con la planificación minera permite evitar conflictos de uso del suelo, reducir

impactos sobre zonas urbanas o sensibles y garantizar la coherencia entre proyectos extractivos y políticas de desarrollo sostenible.

En España, los proyectos mineros deben ser compatibles con los Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU) y con las Directrices de Ordenación Territorial de cada comunidad autónoma. Esto implica que, antes de iniciar la explotación, el operador debe demostrar que el proyecto no interfiere con zonas residenciales, áreas naturales protegidas o corredores ecológicos. En regiones como Castilla y León, proyectos de minería subterránea han sido rechazados por contradecir los lineamientos de los planes territoriales.

Además, la planificación minera en España está conectada con las estrategias regionales de transición ecológica y recuperación económica, lo cual obliga a que cualquier iniciativa minera justifique su aporte al desarrollo local y a la sostenibilidad a largo plazo. Esto ha fomentado la creación de clústeres de minería responsable y la recuperación de zonas afectadas mediante nuevos usos del suelo, como parques tecnológicos o zonas agroforestales.

En Colombia, el ordenamiento territorial está regulado por la Ley 388 de 1997 y los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) municipales. Sin embargo, existen graves problemas de articulación entre estos planes y las decisiones del sector minero. De acuerdo con la Sentencia C-035 de 2016 de la Corte Constitucional, los títulos mineros no prevalecen automáticamente sobre las disposiciones de los POT. La Corte reconoció que los concejos municipales y alcaldías tienen competencia para regular o prohibir la actividad minera en su jurisdicción, siempre que se fundamente en razones ambientales, sociales o de desarrollo territorial sostenible (Corte Constitucional de Colombia, 2016).

Este pronunciamiento ha sido clave en los debates sobre minería y planificación territorial, al reconocer la autonomía de los municipios frente a decisiones extractivas que podrían poner en riesgo ecosistemas estratégicos, fuentes hídricas o vocaciones económicas locales.

Un ejemplo de este conflicto se dio en el municipio de Cajamarca, Tolima, donde la comunidad, mediante consulta popular, rechazó la minería en su territorio por considerarla incompatible con su vocación agrícola y turística. A pesar de ello, el marco normativo nacional no garantiza la aplicación efectiva del resultado de estas consultas, lo cual evidencia una desconexión entre la planificación minera y la voluntad territorial (Procuraduría General de la Nación [PGN], 2020).

Además, los proyectos mineros en Colombia no siempre requieren una certificación de compatibilidad territorial antes de obtener la licencia ambiental, lo que provoca superposición de competencias y desconfianza institucional. La Agencia Nacional de Minería (ANM) puede otorgar títulos en zonas donde los POT prohíben actividades extractivas, lo cual genera inseguridad jurídica tanto para los operadores como para las comunidades.

## X. Conclusiones

- Las diferencias normativas entre Colombia y España en materia de minería subterránea reflejan enfoques regulatorios, técnicos e institucionales contrastantes, mientras que, en España como hace parte de la Unión Europea, ha adoptado un modelo preventivo, articulado y sustentado en criterios de sostenibilidad, Colombia avanza en un marco más reciente, pero aún presenta vacíos estructurales, debilidades institucionales y una implementación fragmentada e irregular.
- Una de las conclusiones más relevantes es que el éxito de un modelo normativo no radica únicamente en la existencia de regulaciones, sino en su aplicabilidad efectiva, del nivel de exigencia técnica en su implementación, y de la coordinación interinstitucional real. España ha logrado integrar de manera coherente el diseño técnico, el licenciamiento ambiental y el monitoreo estructural, mientras que en Colombia persiste la aprobación de proyectos sin modelación geotécnica, sin monitoreo automatizado y con escasa proyección de sostenibilidad a largo plazo.
- Se evidenció también que en Colombia predomina un enfoque ambiental de carácter compensatorio, enfocado en mitigar impactos una vez ocurren, mientras que en España el diseño ambiental es parte integral del proyecto desde sus fases iniciales. Esta diferencia se traduce en prácticas divergentes en la gestión de relaves, el tratamiento de aguas ácidas, el uso racional del recurso hídrico y la integración temprana con el ordenamiento territorial.
- La falta de articulación en Colombia entre el ordenamiento territorial y la planificación minera sigue siendo uno de los mayores desafíos, aunque la Corte Constitucional Colombiana ha ratificado la autonomía municipal mediante la Sentencia C-035 de 2016 —que reconoce el derecho de los municipios a decidir sobre el uso del suelo, incluso frente a proyectos mineros—, en la práctica persisten conflictos entre entidades como La Agencia Nacional de Minería (ANM), la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), las Corporaciones Autónomas Regionales

(CAR) y los gobiernos locales. Casos como los de Cajamarca y Santurbán evidencian la necesidad urgente de garantizar el respeto a los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y a las decisiones comunitarias sobre el manejo de su territorio.

- En síntesis, Colombia tiene la oportunidad de fortalecer su marco normativo minero-ambiental a partir de las lecciones aprendidas del modelo europeo, adaptando sus herramientas tecnológicas a las condiciones locales y promoviendo una minería responsable, articulada con el desarrollo territorial, la conservación de ecosistemas estratégicos y el bienestar de las comunidades.
- Finalmente, se concluye que, tanto en Colombia como en España, enfrentan el reto de adaptar sus marcos regulatorios a un contexto de cambio climático, presión social por la sostenibilidad y la presión por las transformaciones tecnológicas aceleradas, la minería subterránea del futuro requerirá no solo regulaciones más estrictas, sino también una gobernanza participativa, un uso intensivo de tecnologías digitales de monitoreo y una visión a largo plazo que incorpore principios de justicia ambiental, equidad territorial y transición energética justa para todos los contextos en donde se pueda aplicar y prevenir al máximo cada detalle para una mejor optimización y conservación, e integración del ambiente que se vaya a explotar,

## XI. Recomendaciones

A partir del análisis comparativo entre los marcos normativos de Colombia y España en minería subterránea, se identificaron áreas estratégicas en las que el modelo colombiano puede fortalecerse. Las siguientes recomendaciones están orientadas a mejorar la seguridad técnica, la sostenibilidad ambiental y la coherencia institucional de los proyectos mineros, promoviendo una articulación efectiva con el ordenamiento territorial:

- ★ Fortalecer la implementación de la Resolución 1402 de 2018, mediante la elaboración de guías técnicas obligatorias que establezcan la necesidad del uso de herramientas de modelación geotécnica avanzada (como RS2, FLAC3D o Slide3), sistemas de monitoreo estructural en tiempo real y análisis de riesgo geotécnico integral. Estas guías deben contar con revisión de pares académicos y ser exigidas como requisito para la aprobación de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA).
  
- ★ Incluir el cálculo de la huella hídrica como componente obligatorio en los EIA, con el fin de cuantificar con precisión el consumo de agua, definir metas de reducción, y fomentar el uso de tecnologías de recirculación, tratamiento y reaprovechamiento de aguas ácidas o contaminadas. Esta medida permitirá una gestión hídrica responsable y trazable, especialmente en ecosistemas de alta fragilidad.
  
- ★ Establecer un plan de gestión integral de relaves en todos los proyectos subterráneos, bajo criterios técnicos que aseguren la estabilidad geotécnica de las presas, el monitoreo hidroquímico constante y la prevención de drenajes ácidos. Como referencia normativa, se

recomienda adoptar estándares del Real Decreto 975/2009 y la Directiva 2006/21/CE sobre gestión de residuos de industrias extractivas.

- ★ Actualizar el marco del licenciamiento ambiental en Colombia para incorporar principios de conectividad ecológica, restauración funcional del ecosistema y monitoreo postcierre a largo plazo. Estos elementos deben ser evaluados mediante indicadores verificables como biodiversidad, salud del suelo, calidad del agua y cobertura vegetal, asegurando la sostenibilidad más allá de la vida útil del proyecto.
- ★ Reformar la normativa que regula la relación entre minería y ordenamiento territorial, exigiendo como condición previa para la obtención de títulos o licencias mineras la certificación de compatibilidad con los Planes de Ordenamiento Territorial (POT). Además, se deben crear mecanismos normativos que garanticen el respeto a los resultados de consultas populares y a las decisiones adoptadas por los gobiernos locales en materia de uso del suelo.
- ★ Desarrollar programas de formación técnica y fortalecimiento institucional para las autoridades regionales (CAR), enfocados en análisis de estabilidad estructural subterránea, monitoreo instrumental y criterios de sostenibilidad ambiental aplicados a minería. Estos programas deben ser acompañados de recursos tecnológicos y soporte técnico permanente para asegurar su implementación efectiva.
- ★ Fomentar alianzas estratégicas entre el Estado, universidades, centros de investigación y firmas consultoras, con el objetivo de generar soluciones adaptadas al contexto geotécnico y social colombiano. Estas alianzas deben priorizar áreas como geomecánica avanzada, control de aguas

subterráneas, planificación del cierre minero y mecanismos participativos de gobernanza ambiental.

Estas recomendaciones ofrecen un camino concreto para mejorar la regulación y gestión de la minería subterránea en Colombia, alineando los proyectos extractivos con estándares internacionales de sostenibilidad, seguridad técnica y articulación territorial.

## XII. Lista de Referencia o Bibliografía

### Normas y legislación – Colombia

- ★ Congreso de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993*.  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=306>
- ★ Congreso de Colombia. (2001). *Ley 685 de 2001 – Código de Minas*.  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4328>
- ★ Corte Constitucional de Colombia. (2016). *Sentencia C-035 de 2016*.  
<https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2016/C-035-16.htm>
- ★ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Resolución 1402 de 2018*.  
<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/09/resolucion-1402-de-2018.pdf>
- ★ Ministerio de Minas y Energía. (2015). *Decreto 1886 de 2015*.  
[https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/222711/Decreto1886\\_2015.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/222711/Decreto1886_2015.pdf)
- ★ Ministerio de Minas y Energía. (2016). *Decreto 1666 de 2016*.  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=76373>
- ★ Presidencia de la República de Colombia. (2015). *Decreto 1076 de 2015*.  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=76686>

### Normas y legislación – Unión Europea y España

- ★ Boletín Oficial del Estado. (1973). *Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas*.  
<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1973-1014>
- ★ Boletín Oficial del Estado. (2009). *Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de residuos de las industrias extractivas*. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2009/06/12/975>
- ★ Boletín Oficial del Estado. (2013). *Ley 21/2013, de Evaluación Ambiental*.  
<https://www.boe.es/eli/es/l/2013/12/09/21>

- ★ Parlamento Europeo y Consejo. (2006). *Directiva 2006/21/CE sobre la gestión de residuos de industrias extractivas*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex:32006L0021>
- ★ Parlamento Europeo y Consejo. (2011). *Directiva 2011/92/UE sobre la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32011L0092>
- ★ Comisión Europea. (2023). *Critical Raw Materials Act (CRMA)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52023PC0160>
- ★ Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021–2030*. <https://energia.gob.es>
- ★ Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *Estrategia de Minería Sostenible de España*. <https://www.miteco.gob.es>
- ★ Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). *Estrategia Española de Economía Circular – España Circular 2030*. <https://www.miteco.gob.es>

#### **Fuentes académicas y artículos especializados**

- ★ González, P. (2021). Comparación de modelos regulatorios ambientales aplicables a minería en Europa y América Latina. *Revista de Derecho Ambiental*, 34(1), 89–112. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/deramb/article/view/94723>
- ★ Martínez, J., & López, C. (2020). Impactos de la compensación ambiental en proyectos mineros en Colombia: análisis de casos. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 24(3), 73–95. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ambi/article/view/86690>
- ★ Ramírez, J., Muñoz, L., & Torres, D. (2020). Modelación geomecánica y gestión ambiental en minería subterránea. *Revista Ingeniería y Región*, 38(2), 55–72. <https://doi.org/10.21897/ingenieria.v38i2.1939>

### XIII. Anexos

#### **Compendio normativo de referencia – Colombia**

Este anexo incluye los principales documentos legales del marco colombiano citados y analizados en el cuerpo del trabajo. Su consulta directa es fundamental para comprender los fundamentos jurídicos del ordenamiento territorial, el licenciamiento ambiental, la autonomía municipal y los requisitos técnicos aplicables a la minería subterránea en el país.

Ley 388 de 1997 – Ordenamiento Territorial.

Ley 1450 de 2011 – Plan Nacional de Desarrollo.

Resolución 1402 de 2018 – Términos de referencia para minería subterránea.

Sentencia C-035 de 2016 – Corte Constitucional sobre autonomía territorial.

Informe ANM 2022 – Superposición de títulos mineros y POT.

Informe PGN 2020 – Consultas populares en minería.

**Compendio normativo de referencia – Unión Europea y España**

Este anexo agrupa la normativa europea y española más relevante para el análisis comparativo del presente trabajo. Incluye leyes, decretos, directivas y estrategias de política pública utilizadas como referencia técnica y jurídica para formular recomendaciones adaptadas al contexto colombiano.

Ley 22/1973 de Minas – BOE.

Real Decreto 975/2009 – Gestión de residuos mineros.

Directiva 2006/21/CE – Gestión de residuos en industrias extractivas.

Real Decreto Legislativo 2/2008 – Ley del Suelo.

Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030.

Estrategia Española de Minería Sostenible – MITERD.

Informe técnico del IGME 2020 – Castilla y León.

Estrategia Española de Economía Circular 2030.