UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Implicaciones ambientales de la extracción de cobre en el contexto de la transición energética en Colombia

Leidy Carolina Rodriguez Bravo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Económicas, Instituto de Estudios Ambientales (IDEA)
Bogotá D.C., Colombia
2024

Implicaciones ambientales de la extracción de cobre en el contexto de la transición energética en Colombia

Leidy Carolina Rodriguez Bravo

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Medio Ambiente y Desarrollo

Director (a):

Doctora Carmenza Castiblanco Rozo

Línea de Investigación:

Economía, ambiente y desarrollo

Grupo de Investigación:

Instituto de Estudios Ambientales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Económicas

Bogotá D.C., Colombia

2024

Habitar en armonía con la Tierra es reconocer que nuestra existencia está entrelazada con la del territorio y los ecosistemas que la sostienen. La verdadera sustentabilidad es un acto de respeto profundo, donde cada paso que damos asegura que las futuras generaciones encuentren un mundo digno, diverso y vivo. No somos dueños de la naturaleza, somos parte de ella; y solo habitando con conciencia, arraigo y cuidado por todas las formas de vida, podremos trascender el ciclo destructivo del extractivismo.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco profundamente a Dios por su presencia constante en mi vida, por su amor, bondad y por otorgarme la fortaleza y guía necesarias para enfrentar los retos que han surgido en este proceso. Este trabajo representa un logro a nivel académico, profesional y personal. A mi familia, mis más sinceros agradecimientos por su apoyo incondicional. Gracias por caminar conmigo en cada etapa, por enseñarme con sus valiosas lecciones y por ser mi motor en los momentos difíciles. Su amor, confianza y empuje me han permitido seguir adelante y superar cada obstáculo. También, a mi pareja quien ha creído en mí desde el principio, gracias por su compañía invaluable. Ha sido parte fundamental de este proceso, brindándome motivación, comprensión y aliento en cada paso de este camino.

Un agradecimiento especial a la profesora **Carmenza Castiblanco Rozo**, directora de este trabajo de grado, a quien admiro profundamente por su guía, paciencia y por compartir conmigo su conocimiento y experiencia. Sus enseñanzas han sido una fuente de inspiración constante en este recorrido. Finalmente, quiero expresar mi gratitud al **Instituto de Estudios Ambientales (IDEA)**, por su influencia decisiva en mi formación académica y personal. Mi paso por este instituto y por la maestría me ha permitido ampliar mi comprensión sobre el mundo, así como reflexionar sobre las alternativas hacia la construcción de sociedades sustentables. A través de sus enseñanzas, he adquirido una visión más interdisciplinaria del ambiente, y he aprendido a analizar y discutir las complejas dinámicas que configuran nuestro mundo en constante transformación.

Resumen

Implicaciones ambientales de la extracción de cobre en el contexto de la transición energética en Colombia.

La transición energética requiere el uso intensivo de minerales estratégicos como el cobre, cuyo proceso de extracción genera efectos ambientales significativos. El objetivo de esta investigación es determinar estas implicaciones ambientales en el contexto colombiano. A partir de diferentes análisis se contextualizó el rol del cobre en la transición energética a escala global, regional y nacional, con el fin de identificar potenciales conflictos sociales, económicos y ecológicos asociados con la extracción de este mineral estratégico. De igual manera, se analizaron las oportunidades del país en la explotación del cobre, haciendo énfasis en el marco legal, institucional, así como, la prospectividad geológica de este mineral. Finalmente, este diagnóstico evidencio la necesidad de proponer criterios propios de sustentabilidad para ser tenidos en cuenta ante la demanda creciente de cobre. Se identificaron 16 efectos críticos agrupados en 8 categorías de criterios de sustentabilidad fuerte, con base en indicadores ecológicos, sociales y económicos. Entre los principales hallazgos se destacan los potenciales efectos sobre la biodiversidad, la diversidad étnica, así como los riesgos derivados del ciclo de vida minero en las fases de exploración y explotación. Este estudio propone criterios e indicadores aplicables a la minería de cobre que promuevan una visión alineada con los principios de sustentabilidad fuerte, y concluye que si no se toman las medidas adecuadas, la explotación de cobre podría intensificar las dinámicas extractivistas, agravando sus consecuencias negativas para los ecosistemas y las comunidades locales en Colombia.

Palabras clave: Cobre, transición energética, sustentabilidad fuerte, minería, extractivismo

Abstract

Environmental implications of copper extraction in the context of the energy transition in Colombia.

The energy transition requires the intensive use of strategic minerals such as copper, whose extraction process generates significant environmental effects. The objective of this research is to determine these environmental implications in the Colombian context. Based on different analyses, the role of copper in the energy transition was contextualized on a global, regional and national scale, to identify potential social, economic and ecological conflicts associated with the extraction of this strategic mineral. Similarly, the country's opportunities for copper exploitation were analyzed, with emphasis on the legal and institutional framework, as well as the geological prospectivity of this mineral. Finally, this diagnosis highlighted the need to propose sustainability criteria to be considered in the face of the growing demand for copper. Sixteen critical effects were identified, grouped into eight categories of strong sustainability criteria, based on ecological, social and economic indicators. Among the main findings are the potential effects on biodiversity, ethnic diversity, as well as the risks derived from the mining life cycle in the exploration and exploitation phases. This study proposes criteria and indicators applicable to copper mining that promote a vision aligned with the principles of strong sustainability, and concludes that if adequate measures are not taken, copper exploitation could intensify extractivist dynamics, aggravating its negative consequences for ecosystems and local communities in Colombia.

Keywords: Copper, energy transition, strong sustainability, mining, extractivism, mining, extractivism

Contenido

Pág.

Resumen ..... **VII**

Lista de figuras ..... **XI**

Lista de ilustraciones ..... **XII**

Lista de tablas ..... **XIII**

Introducción **1**

1. Capítulo Introductorio: sustentabilidad y uso de minerales para la transición energética **5**
1.1 Marco teórico: lo ambiental, la sustentabilidad y el extractivismo 5
1.2 Antecedentes transición energética 12
1.2.1 Crisis petróleo, cambio climático, crisis social 12
1.2.2 Energías renovables, tecnologías y uso de minerales para alcanzar los objetivos de sustentabilidad 13
1.2.3 Minerales críticos para la transición energética 15
1.2.4 Extractivismo en el cobre 18
1.2.5 El rol del cobre en la transición energética: Cadena de producción en todo el ciclo de la mina 19

2. Enfoque metodológico **27**

3. Panorama general de la industria del cobre y su papel en la transición energética de Colombia **37**
3.1 Prospectividad del cobre en Colombia 46
3.1.1 Ubicación y delimitación de los principales depósitos de cobre 48
3.1.2 Apuestas institucionales y marco legal 56

4. Implicaciones ambientales de la extracción de cobre para la transición energética en Colombia **66**
4.1 Proyecto El Roble 68
4.2 Proyecto Mocoa 73
4.3 Proyecto Quebradona 79
4.4 Proyecto San Matías 83
4.5 Proyecto Soto Norte 87

5. Criterios de sustentabilidad para la explotación de cobre en el contexto de la transición energética en Colombia 91
5.1 Implicaciones ambientales del ciclo minero del cobre 91
5.1.1 Análisis del ciclo de vida de la minería de cobre en la fase de exploración ... 92
5.1.2 Análisis del ciclo de vida de la minería de cobre en la fase de explotación.... 96
5.2 Identificación de variables criticas para la evaluación de la sustentabilidad 101

6. Conclusiones y recomendaciones 107
6.1 Conclusiones 107
6.2 Recomendaciones 109

Bibliografía 111

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1. Reservas y consumo de cobre del año 2019 y 2100 17
Figura 1-2. Cantidad de cobre Producida en Millones de toneladas (Mt) 20
Figura 1-3. Demanda de cobre para el 2050 20
Figura 2-1. Criterios de sustentabilidad a tener en cuenta para la explotación del cobre en el contexto de la transición energética en Colombia. 35
Figura 3-1. Segmentos de la cadena de comercialización y uso del cobre 41
Figura 3-2. Producción de cobre en Chile 42
Figura 3-3. Producción de cobre Perú 44
Figura 3-4. Producción de cobre en Colombia 46
Figura 3-5. Lineamentos para la determinación de minerales de interés estratégico en Colombia 62
Figura 5-1. Etapas del ciclo de vida del cobre 92
Figura 5-2. Análisis del ciclo de vida de la minería de cobre en la etapa de exploración 92
Figura 5-3. Análisis del ciclo de vida de la minería de cobre en la etapa de explotación 96

Lista de ilustraciones

Pág.

Ilustración 1-1. Minería y procesamiento de cobre 23
Ilustración 3-1. Distribución de las reservas globales de cobre por país al 2020 (en porcentaje) 37
Ilustración 3-2. Área del Batolito de Mande 47
Ilustración 3-3. Mapa de ocurrencias y depósitos de Cu y Cu asociado. 49
Ilustración 3-4. Cinturones, distritos metalogénicos y depósitos de interés de cobre en Colombia 51
Ilustración 4-1. Análisis de los principales proyectos de cobre, comunidades étnicas y áreas ambientales excluibles de Colombia 67
Ilustración 4-2. Variables ambientales del proyecto minero de cobre El Roble 68
Ilustración 4-3. Variables ambientales del proyecto minero de cobre Mocoa 74
Ilustración 4-4. Variables ambientales del proyecto minero de cobre Quebradona 79
Ilustración 4-5. Variables ambientales del proyecto minero de cobre San Matías 83
Ilustración 4-6. Variables ambientales del proyecto minero de cobre Soto Norte 87

Lista de tablas

Pág.
Tabla 1-1. Definiciones de las corrientes de la sustentabilidad 7
Tabla 1-2. Resumen de las principales diferencias de las corrientes de la sustentabilidad 9
Tabla 1-3. Clasificación de la extracción de recursos naturales 10
Tabla 1-4. Clasificación de la extracción y el destino de los recursos naturales. 11
Tabla 1-5. Tecnologías de energías renovables y minerales..... 15
Tabla 2-1. Método y técnica del objetivo 1 27
Tabla 2-2. Ficha bibliográfica del objetivo 1 28
Tabla 2-3. Método y técnica del objetivo 2 29
Tabla 2-4. Ficha bibliográfica del objetivo 2 30
Tabla 2-5. Método y técnica del objetivo 3 32
Tabla 2-6. Ficha bibliográfica del objetivo 3 32
Tabla 2-7. Método y técnica del objetivo 4 33
Tabla 3-1 Producción mundial de cobre de mina en miles de toneladas entre los años 2018-2022. 38
Tabla 3-2. Consumo regional de cobre refinado, 2020. (En miles de tonelada y porcentajes) 40
Tabla 3-3. Listado de ocurrencias, prospectos y depósitos de cobre en Colombia..... 50
Tabla 3-4. Proyectos de interés estratégicos de cobre en Colombia 53
Tabla 4-1. Potenciales efectos ecológicos proyecto El Roble..... 69
Tabla 4-2. Potenciales efectos sociales proyecto El Roble 72
Tabla 4-3. Potenciales efectos ecológicos proyecto Mocoa 75
Tabla 4-4. Potenciales efectos sociales proyecto Mocoa 77
Tabla 4-5. Potenciales efectos ecológicos del proyecto Quebradona..... 80
Tabla 4-6. Potenciales efectos sociales del proyecto Quebradona..... 82
Tabla 4-7. Potenciales efectos ecológicos proyecto San Matías 84
Tabla 4-8. Potenciales efectos sociales del proyecto San Matías 85
Tabla 4-9. Potenciales efectos ecológicos proyecto Soto Norte 88
Tabla 5-1. Criterios de sustentabilidad a tener en cuenta para la explotación del cobre en el contexto de la transición energética en Colombia 103

Introducción

La transición energética ha emergido como una de las principales soluciones para enfrentar la crisis climática global. Esta transición requiere el uso intensivo de minerales estratégicos como el cobre, cuya demanda ha crecido exponencialmente debido a sus propiedades únicas. Con una conductividad superior a otros metales como el aluminio, es esencial para las tecnologías de generación y almacenamiento de energía renovable, como paneles solares, turbinas eólicas, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de baterías. Según Hund et al. (2020), el cobre es imprescindible en al menos ocho tecnologías de energías renovables, lo que lo posiciona como un mineral crítico en los esfuerzos globales para descarbonizar las economías.

Sin embargo, este panorama de creciente demanda presenta desafíos significativos, especialmente en su cadena de suministro. Se estima que la cantidad de cobre que se ha producido en los últimos cinco mil años tendrá que ser replicada en los próximos 25 años para satisfacer las demandas de las tecnologías de transición energética (Tabelin et al., 2021). Este escenario genera preocupaciones en torno a los impactos ecológicos, sociales y económicos que acompañan la extracción masiva de este mineral, particularmente en países como Colombia, con amplias reservas y una gran diversidad ecosistémica y étnica. Los retos más apremiantes incluyen la escasez de nuevos yacimientos, la intensificación de regulaciones ambientales en los países productores y los efectos negativos que la minería del cobre tiene sobre los ecosistemas locales, las dinámicas hídricas, la cobertura vegetal y la salud de las comunidades locales (Akchurin, 2023; Carranza et al., 2020).

El problema fundamental de esta investigación radica en la aparente contradicción entre la transición energética y los principios de sustentabilidad que persigue. A pesar de que la transición energética se presenta como una solución a la crisis climática, la minería de

cobre, que es crucial para su implementación, conlleva una serie de efectos negativos que podrían contradecir dichos principios. En este sentido, el presente estudio busca responder a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son los criterios de sustentabilidad que se deberían tener en cuenta para la explotación del cobre requerido para la transición energética en Colombia?

El enfoque metodológico utilizado para abordar esta investigación es mixto, ya que combina métodos cualitativos y cuantitativos con el fin de proporcionar un análisis completo de las implicaciones ambientales de la extracción de cobre en Colombia. Para tal fin, se realizarán cuatro análisis principales que constituyen los objetivos específicos de este trabajo: (1) contextualizar el rol del cobre en la transición energética a nivel global, regional y nacional; (2) identificar los conflictos sociales, económicos y ecológicos asociados a la extracción de este mineral en Colombia; (3) analizar las oportunidades y potencialidades de Colombia en la extracción de cobre y; (4) formular criterios de sustentabilidad que permitan mitigar los efectos ambientales de esta actividad en el marco de la transición energética.

En consecuencia, la presente investigación se estructura en cinco capítulos. En el Capítulo 1, se presenta un marco teórico sobre la sustentabilidad y el extractivismo, con un enfoque en la crisis climática y la transición energética. Este capítulo también introduce el papel del cobre en la transición energética, abordando su cadena de producción y la importancia del mineral en las tecnologías renovables. El Capítulo 2 describe el enfoque metodológico del estudio, detallando los métodos cualitativos y cuantitativos empleados. En el Capítulo 3, se ofrece un panorama general de la industria cuprífera en Colombia, analizando su prospectividad, los principales depósitos, las apuestas institucionales y legales del país. El Capítulo 4 se centra en las implicaciones ambientales de la extracción de cobre en el país, con un enfoque en cinco proyectos mineros: El Roble, Mocoa, Quebradona, San Matías y Soto Norte. Finalmente, el Capítulo 5 presenta los criterios de sustentabilidad propuestos para la explotación del cobre colombiano.

Los resultados y aportes de esta investigación destacan que, aunque el cobre es fundamental para la transición energética, su extracción en Colombia puede generar efectos ambientales significativos, particularmente en áreas donde los proyectos mineros se superponen, están cercanos o colindan con zonas de interés ambiental y territorios

étnicos. Asimismo, se concluye que la creciente demanda de este metal podría impulsar en Colombia la acentuación de modelos extractivistas que profundicen las tensiones entre los beneficios económicos y los elevados costos ecológicos y sociales, especialmente en ecosistemas sensibles y comunidades vulnerables. Para evitar ese escenario, se proponen criterios de sustentabilidad fuerte e indicadores que mitiguen las implicaciones ambientales derivadas de la extracción de cobre en los territorios.

1. Capítulo Introductorio: sustentabilidad y uso de minerales para la transición energética

1.1 Marco teórico: lo ambiental, la sustentabilidad y el extractivismo

La crisis ambiental nos enfrenta a un desafío fundamental en la comprensión del mundo contemporáneo, al marcar límites en diversas dimensiones como el crecimiento económico y demográfico, los desequilibrios ecológicos y nuestra capacidad para sostener la vida en el planeta (Leff, 2018). Esta crisis cuestiona los fundamentos que han contribuido a una percepción fragmentada y de dominio del entorno natural. Por lo tanto, nos insta a revisar profundamente cómo concebimos y nos relacionamos con el ambiente. En este sentido, resulta crucial precisar el enfoque teórico del presente estudio al explorar algunos conceptos sobre el ambiente.

Enfoques sobre el ambiente

El término "ambiente" ha sido comúnmente utilizado, en su primera acepción, para referirse a todo lo que nos rodea, haciendo alusión al entorno biofísico que facilita el desarrollo de actividades humanas. Esta concepción ha condicionado la percepción de la naturaleza y la sociedad como elementos independientes o fragmentados. Como señala González L. de G. (2006), el ambiente se considera un medio pasivo, sujeto a la disposición del ser humano. De esta forma, la problemática ambiental se aborda con soluciones tecnológicas, sectoriales y específicas, sin tener en cuenta la influencia del entorno social.

Desde una perspectiva más holística Leff (2004, p. 3) menciona que: “el ambiente no es la ecología, sino el campo de las relaciones entre la naturaleza y la cultura, de lo material y lo simbólico, de la complejidad del ser y del pensamiento; es un saber sobre las estrategias de apropiación del mundo y la naturaleza a través de las relaciones de poder que se han inscrito en las formas dominantes de conocimiento”. Así mismo, Ángel Maya (2009, p. 34) define al ambiente como un campo interdisciplinario que estudia las relaciones entre las formaciones sociales y los ecosistemas. Este enfoque considera el ambiente como la relación adaptativa entre el ser humano y la naturaleza a través de la cultura, implicando la interacción con el entorno natural y los seres humanos, a través de una red simbólica y social.

Por consiguiente, la complejidad ambiental redefine la comprensión del mundo al reconocer los límites del conocimiento, entendiendo que la incertidumbre, el caos y el riesgo son tanto el resultado de la aplicación del conocimiento como una condición inherente al ser humano y al saber. Así mismo, invita a reflexionar sobre la naturaleza del ser, del conocimiento y de la interacción entre disciplinas, así como sobre la incorporación de la subjetividad, los valores y los intereses en la toma de decisiones y en la relación con la naturaleza. Cuestiona cómo los valores influyen en la percepción del mundo, abriendo un espacio para la integración de aspectos racionales y morales en la comprensión de la realidad (Leff, 2018).

Sobre el desarrollo sostenible y la sustentabilidad

El término de sustentabilidad, su homólogo el “desarrollo sostenible” y sus equivalentes en los diferentes idiomas, son términos que han sido utilizados con tal frecuencia e intensidad que han terminado por convertirlos en conceptos abstractos, vagos, incongruentes, superficiales y en ocasiones perversos (Toledo, 2015). Sin embargo, esta corriente ha marcado un precedente en el horizonte del desarrollo y el crecimiento acelerado qué ha tenido nuestra sociedad en los últimos años. Leff (1998) menciona que: “el principio de sustentabilidad emerge en el contexto de la globalización como la marca de un límite y el signo que reorienta el proceso civilizatorio de la humanidad” (p.15). Por tanto, la crisis ambiental y el cambio climático han cambiado los paradigmas del crecimiento económico,

la visión mecanicista del progreso y la producción. Por lo que se ha generado una mayor preocupación por la naturaleza, producto del deterioro ambiental de las últimas décadas. Este daño ambiental, es una señal clara de la crisis civilizatoria causada por un modelo de desarrollo tecnológico y económico que ha excedido los límites naturales (Leff, 1998).

El desarrollo sostenible y la sustentabilidad es todavía un campo de discusión y confusión frente al concepto de sustentabilidad. El término "sostenible" se ha usado de manera indiscriminada, perdiendo su significado original y dificultando su análisis riguroso (Zarta Ávila, 2018). En ese sentido, más allá del desarrollo en los términos “sostenible” o “sustentable”, es crucial analizar cómo se abordan los aspectos clave como los límites ecológicos, las formas de valoración (ética), concepciones sobre la apropiación y uso de los recursos naturales (economía), el papel de la ciencia y la tecnología, así como los procesos de toma de decisiones (política) (Gudynas, 2010, p. 46). En consecuencia, se empleará el concepto de sustentabilidad y sus respectivas corrientes que generen un sustento teórico que cumpla con los objetivos propuestos para el desarrollo del presente trabajo.

Principales corrientes de la sustentabilidad

En la actualidad, algunos autores han establecido categorías para abordar la sustentabilidad en corrientes de estudio para una mejor comprensión y análisis. En ese sentido, Gudynas autor representativo de este movimiento teórico, propone tres grandes corrientes: sustentabilidad débil, sustentabilidad fuerte y sustentabilidad súper-fuerte. Dichas definiciones se presentan a continuación en la **Tabla 1-1**.

Tabla 1-1. Definiciones de las corrientes de la sustentabilidad

Tipo	Definición
Sustentabilidad débil	Modificación de los procesos productivos actuales para reducir el impacto ambiental. La conservación es necesaria para el crecimiento económico. Por lo tanto, esta corriente apuesta a la reforma técnica (mejores y más eficientes usos de la energía, mitigación de la

Tipo	Definición
	contaminación, etc.), otorgando un fuerte peso a los instrumentos económicos.
Sustentabilidad fuerte	No toda la naturaleza puede ser reducida a un capital natural, ni todas las valoraciones son económicas. Por lo tanto, se subraya la necesidad de asegurar la supervivencia de especies y la protección de ambientes críticos, más allá de su posible uso económico.
Sustentabilidad súper-fuerte	El ambiente es valorado de distintas maneras, además de la económica, también existen valores culturales, ecológicos, religiosos o estéticos, que son tanto o más importantes. Se defiende una pluralidad de valores, pero con la particularidad adicional que entre ellos se reconocen valores propios o intrínsecos en la naturaleza.

Fuente: elaboración propia con información de Gudynas (2010).

Las diversas corrientes de sustentabilidad, aunque conceptualmente distintas, exhiben interrelaciones, cada una integra aspectos de las otras. En primera instancia, la sustentabilidad débil, se configura a partir de la valoración económica, en la cual todo se evalúa en cuanto a es útil para el ser humano, manteniendo una orientación utilitarista que no desafía las narrativas antropocéntricas de los discursos de progreso y crecimiento económico. Por otro lado, la sustentabilidad fuerte da un paso adelante al introducir la dimensión ética, reconoce la importancia intrínseca de los elementos naturales más allá de su valor comercial, aunque gran parte de sus estimaciones continúan dentro de la lógica antropocéntrica por ser el hombre quien estima las consideraciones que determinan la responsabilidad hacia el entorno y las futuras generaciones. Finalmente, la sustentabilidad superfuerte presenta cambios más radicales al adoptar una perspectiva biocéntrica, de respeto y ética hacia los derechos intrínsecos de todas las formas de vida sin dejar de lado los aspectos económicos, ecológicos, culturales y éticos. Esta corriente no busca reemplazar, sino complementar y adaptar las propuestas anteriores, fomentando una transición hacia un enfoque de patrimonio natural que valore de manera integral los recursos ambientales y su conservación (Gudynas, 2003). A continuación, se resumen las principales diferencias entre los tipos de sustentabilidad (ver **Tabla 1-2**).

Tabla 1-2. Resumen de las principales diferencias de las corrientes de la sustentabilidad

Elemento	**Sustentabilidad Débil**	**Sustentabilidad Fuerte**	**Sustentabilidad Super-Fuerte**
Perspectiva	Antropocéntrica	Antropocéntrica	Biocéntrica
Desarrollo	Crecimiento material	Crecimiento material	Calidad de vida, calidad ecológica
Naturaleza	Capital Natural	Capital Natural	Patrimonio Natural
Valoración	Instrumental	Instrumental, ecológica	Múltiple, intrínseca
Conservación	Utilitarista	Utilitarista, ecológica	Ecológica, evolutiva
Actores	Consumidores	Consumidor, ciudadano	Ciudadano
Postura persona	Si mismo individual	Si. Mismo individual	Si- mismo expandido
Escenario	Mercado	Sociedad	Sociedad
Saber científico	Conocimiento privilegiado	Conocimiento privilegiado	Pluralidad de conocimientos
Otros saberes	Ignorados	Minimizados	Respetados, incorporados
Prácticas	Gestión técnica	Gestión técnica consultiva	Política ambiental
Escalas de tiempo	Años	Siglo	Milenio
Justicia Social	Improbable	Posible	Necesaria
Justicia ecológica	Imposible	Posible	Necesaria

Fuente: tomado de Gudynas (2003).

Es pertinente seleccionar el discurso de la sustentabilidad fuerte como enfoque teórico de la investigación, porque a través de él se pretende encontrar las variables que permitirán

analizar y construir los criterios de sustentabilidad que mitiguen las implicaciones ambientales derivadas de los procesos de extracción del cobre requerido en el contexto de la transición energética. Es importante resaltar, que pese a las diferencias en los estilos de desarrollo, los actuales son insustentables, por sus altos efectos ambientales y el creciente agotamiento de los recursos naturales. Lo anterior, se evidencia en que los precios actuales de las materias primas que exporta América Latina no reflejan el verdadero costo, es decir, las externalidades por daños ecosistémicos, salud humana y demás aspectos. Bajo esta perspectiva, muchos proyectos extractivistas de alto impacto ambiental ya no pasarían los análisis costo/beneficio (Gudynas, 2010).

Teorías sobre el extractivismo

Es necesario diferenciar el extractivismo de otros modos de apropiación de recursos naturales. Gudynas (2015) identifica dos tipos de interacción con el entorno: en el primer caso, las transformaciones al ambiente son limitadas, debido a que la estructura del entorno no es alterada de forma drástica; y en el segundo tipo, los recursos son extraídos por métodos que tienen graves implicaciones e impactos sobre el ambiente, en esta clasificación se puede encontrar actividades como la deforestación de territorios para uso de ganadería o la megaminería a cielo abierto.

Por su parte Acosta (2012) utiliza el término extractivismo para denominar aquellas actividades que remueven grandes volúmenes de recursos naturales que no son procesados, sobre todo para la exportación. Es importante resaltar que el extractivismo no necesariamente está acotado a los minerales o al petróleo, también, a la dimensión agraria, foresta y pesquera, entre otras. Para entender la dimensión de este sustento teórico es importante distinguir los distintos modos en los que se clasifica la extracción de recursos naturales (ver **Tabla 1-3**).

Tabla 1-3. Clasificación de la extracción de recursos naturales

Volumen	Intensidad ambiental	Destino
El volumen de recursos se debe evaluar por indicadores físicos parciales que miden la materia total extraída e incluya aquella que no es utilizada. Incluir la “mochila ecológica”	Todos aquellos impactos ambientales derivados del proceso de extracción, tales como la ecotoxicidad, generación de contaminantes, uso de sustancias tóxicas, empleo de explosivos, efectos negativos sobre especies en riesgo o endémicas, emisión de gases invernadero, etc.	Los destinos de los recursos extraídos deben ser igualmente precisados. Los pasos siguientes en procesarlos y en consumirlos son esencialmente locales, en otros casos, es nacional y una tercera opción, es la extracción de recursos que en su mayoría no son procesados localmente y son exportados como materias primas a otros países.

Fuente: elaboración propia a partir de (Gudynas, 2015).

A partir de los atributos mencionados el autor establece una matriz de relación entre los destinos de los recursos naturales para determinar qué actividades corresponden al extractivismo (**Tabla 1-4**).

Tabla 1-4. Clasificación de la extracción y el destino de los recursos naturales.

DESTINO	VOLUMEN / INTENSIDAD DE LA EXTRACCIÓN		
	BAJO	MEDIO	ALTO
Local	Cultivo campesino de alimentos para autoconsumo	Tala de bosque nativo para obtener leña	Captura de agua para riego o uso doméstico
Nacional	Fibras vegetales para cestería, techos, etc.	Frutas y verduras convencionales para mercados nacionales	Arenas y gravas para construcción

Exportación	Alimentos orgánicos	Flores de invernadero	**EXTRACTIVISMO Minerales, Hidrocarburos Monocultivos de exportación**

Fuente: tomado de (Gudynas, 2015).

Bajo el enfoque expuesto, el extractivismo es visto como la extracción de recursos naturales dada en gran volumen y en alta intensidad destinados a ser exportados como como materias primas sin procesar, o con un procesamiento ligero denominados por otros como “commodities”. Así mismo, Gudynas (2015) relaciona los extractivismos actuales con las variedades de desarrollo. Ciertamente, ambos aspectos se necesitan mutuamente, debido a que, los denominados emprendimientos extractivos se fortalecen con las concepciones del desarrollo que suscitan las condiciones necesarias para la legitimación y aplicación de los extractivismos. En consecuencia, en el siguiente apartado se presentará la transición energética y los desafíos que conlleva en cuanto a la extracción de minerales para la fabricación de tecnologías renovables destinadas a mitigar la crisis climática actual.

1.2 Antecedentes transición energética

1.2.1 Crisis petróleo, cambio climático, crisis social

La transición energética es un tema de gran relevancia en la actualidad, y su importancia radica en la necesidad de buscar alternativas energéticas sustentables con el ambiente. Sin embargo, para entender la importancia de esta transición, es necesario conocer los antecedentes históricos que la han motivado. Uno de los principales antecedentes se remite a la crisis del petróleo de los años 70, que tuvo lugar por el aumento del precio del petróleo y la dependencia excesiva en los combustibles fósiles. Esta crisis afectó la economía global y evidenció la necesidad de buscar alternativas energéticas más seguras y sostenibles (Acosta, 2017). Desde entonces, han surgido importantes avances tecnológicos en el ámbito de las energías renovables, haciendo que estas fuentes

alternativas sean cada vez más competitivas y accesibles. La energía solar, la eólica, la hidráulica, la geotérmica y otras fuentes renovables, son cada vez más viables para satisfacer la demanda energética mundial.

Otro factor determinante en la transición ha sido el creciente consenso científico sobre el calentamiento global y sus consecuencias ambientales, que ha llevado a la comunidad internacional a reconocer la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y adoptar energías renovables como una solución más sostenible. Esto ha funcionado como un catalizador para la transición energética, generando mayor conciencia social sobre la importancia de reducir la dependencia de los combustibles fósiles (Da Silva Almeida, 2022).

Así mismo, las desigualdades en el acceso a la energía, la pobreza energética y las preocupaciones sobre la seguridad energética han impulsado el debate sobre cómo garantizar un acceso equitativo a fuentes de energía sostenibles. De acuerdo con el informe del IPCC (2022), sobre impactos, adaptación y vulnerabilidad; estima que alrededor de 3.300 a 3.600 millones de personas en todo el mundo presentan una alta vulnerabilidad al cambio climático. Las áreas y comunidades con limitaciones en su desarrollo están expuestas de manera más significativa a los riesgos climáticos, siendo las regiones más afectadas África Occidental, Central y Oriental, Asia Meridional, Centroamérica y Sudamérica, los pequeños estados insulares en desarrollo y el Ártico.

1.2.2 Energías renovables, tecnologías y uso de minerales para alcanzar los objetivos de sustentabilidad

La necesidad inminente de abordar el cambio climático ha respaldado el apoyo financiero y político a las energías renovables. En este sector, las inversiones se han multiplicado por cinco entre 2004 ($40 – $60 billones) y el 2014 ($214 – $310 billones) respectivamente, respaldado por políticas de estímulo que se han implementado en por lo menos 138 países en todo el mundo (McCarthy, 2015). Entre las más relevantes se incluyen la energía hidráulica, la eólica, la geotérmica, la biomasa, la solar y la mareomotriz. Ya sea debido a acuerdos internacionales suscritos o al notorio agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, el mundo está actualmente transitando hacia un periodo que separa

las fuentes energéticas convencionales de las energías renovables (Cubillos Meza & Estenssoro Saavedra, 2011).

La Agencia Internacional de Energía, ha contribuido a la definición y caracterización de las diferentes fuentes de energía renovable (IEA, 2021). Entre las principales se incluyen:

- **El biogás:** es un recurso energético derivado de la descomposición de materia orgánica mediante la digestión anaeróbica, mayormente compuesto por metano (CH4) y CO2.
- **La biomasa:** resultante de material orgánico no fósil, puede usarse para crear calor o electricidad.
- **La energía eólica:** procede de la energía cinética del viento a través de aerogeneradores para la producción de electricidad.
- **La energía geotérmica:** generada por el calor de la corteza terrestre, se usa para generar electricidad o calor.
- **La energía hidráulica:** convierte el flujo del agua en electricidad en las plantas hidroeléctricas, aprovechando su flujo y potencial.
- **La energía oceánica:** se obtiene del movimiento de mareas y olas para producir electricidad.
- **La energía solar:** captura la radiación solar para generar electricidad y agua caliente sanitaria a través de colectores de placas, células fotovoltaicas y plantas solares termoeléctricas.

Estas diversas fuentes de energía renovable ampliamente reconocidas como alternativas sustentables para la producción de energía requieren más minerales que las tecnologías a base de combustibles fósiles. Esto se puede evidenciar en la fabricación de vehículos eléctricos, la creación de parques eólicos y solares demandaran una cantidad considerablemente mayor de minerales que los vehículos convencionales o las plantas de energía a base de combustibles fósiles. La “transición” ha generado un aumento del 50% en la demanda promedio de minerales por parte del sector energético desde 2010 (IEA, 2021). A continuación, se presenta en la **Tabla 1-5** tecnologías para generación y almacenamiento de energía eléctrica, los requerimientos en términos de minerales y su grado de importancia (A: alta, M: moderada y B: Baja).

Tabla 1-5. Tecnologías de energías renovables y minerales

	Cu	**Co**	**Ni**	**Li**	**Tierras raras**	**Cr**	**Zn**	**Al**
Solar fotovoltaica	A	B	B	B	B	B	B	A
Eólica	A	B	M	B	A	M	A	M
Hídrica	M	B	B	B	B	M	M	M
Solar por concentración	M	B	M	B	B	A	M	A
Bioenergía	A	B	B	B	B	B	M	M
Geotérmica	B	B	A	B	B	A	B	B
Nuclear	M	B	M	B	B	M	B	B
Redes eléctricas	A	B	B	B	B	B	B	A
Electromovilidad y baterías	A	A	A	A	A	B	B	A

Fuente: IEA, p. (2021, p. 45)

Lo cierto, es que la transformación hacia una energía más sostenible no se limita únicamente a la ampliación de las fuentes de energía disponibles, va más allá de ello, involucra nuevas demandas materiales y energéticas con fuertes implicaciones sociales. Lo que implica cambios significativos en la estructura social, permitiendo que la sociedad alcance su independencia en términos de energía. Es decir, esta evolución no se reduce a diversificar las fuentes de energía, especialmente cuando se persigue la sostenibilidad (Fornillo, 2016).

1.2.3 Minerales críticos para la transición energética

Como se mencionó anteriormente, la transición a las energías renovables significará el cambio de un sistema dependiente de combustibles fósiles a uno que usa una gran cantidad de minerales, en su mayoría críticos. Al hablar de minerales “críticos” se hace referencia a materias primas esenciales en sectores económicos específicos y cuyo suministro puede correr riesgo de interrupción. De este modo, un mineral se cataloga como

“crítico” cuando su escasez tiene el potencial de causar daños significativos a la economía de una nación (López & Mataix, 2021).

En un reciente análisis realizado por Capellán-Pérez et al. (2019) se presenta la proyección de tres escenarios de crecimiento de las energías renovables (50%, 75% y 100%) y su relación entre la extracción de minerales, las reservas y recursos actuales de minerales al año 2060. Este análisis evidencia que la demanda venidera de minerales podría exceder la cantidad actual prevista para ciertos recursos claves como el telurio, indio, plata y manganeso, según al menos uno de los escenarios proyectados. Asimismo, se predice que la demanda total de minerales sobrepasará las reservas estimadas para los minerales en mención en alguno de los escenarios contemplados.

Capellán-Pérez et al. (2019) evaluaron a través del indicador EROI (Energy Return on Energy Investment) la viabilidad de la transición hacia un sistema eléctrico 100% renovable a nivel global para el año 2060, y encontraron que los niveles de EROI obtenidos durante la transición podrían ser insuficientes para sostener sociedades industriales. Lo anterior, plantea un desafío para alcanzar un futuro completamente basado en energías renovables según los escenarios propuestos de crecimiento verde, especialmente para tecnologías como la energía solar fotovoltaica, la solar de concentración y en su mayoría, para la energía eólica y el almacenamiento de energía los cuales dependen de minerales críticos como la bauxita, el cobre, el grafito, el litio, el cobalto, el níquel y las tierras raras (Srivastava & Kumar, 2022).

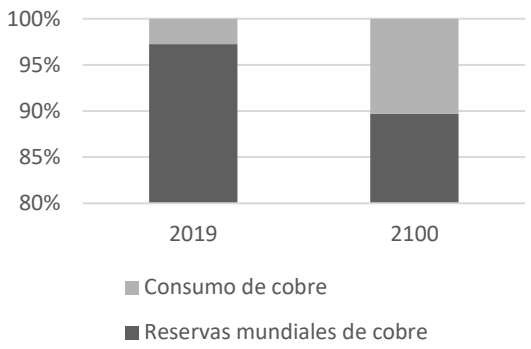
En cuanto a la concentración geográfica, el panorama de las industrias extractivas expuesto por el Banco Mundial muestra que los minerales estratégicos para la transición energética se concentran en 81 países, que en conjunto representan sólo la cuarta parte del PIB mundial, la mitad de la población mundial y concentran, además, el 70% de las personas en situación de pobreza extrema. Es el caso de países latinoamericanos como Chile, Argentina, Perú y Bolivia para los que se estima, podrían posicionarse como importantes proveedores en la transición energética global (The World Bank, 2017). En definitiva, la importancia de los minerales en la transición hacia una vía de bajas emisiones de carbono es evidente en múltiples aspectos, sin embargo, también es esencial abordar los desafíos asociados con la extracción y la gestión sostenible de estos recursos.

Los limites minerales de la transición energética

Los minerales demandados, al igual que los combustibles fósiles, son recursos finitos. Desde este punto de vista, ninguno de estos sistemas alternativos de generación de energía puede considerarse verdaderamente "renovable". Pues, aunque el sol y el viento son fuentes de energía renovable, las tecnologías requeridas para su aprovechamiento no lo son (López & Mataix, 2021). La energía solar y sus derivadas renovables como el viento siempre estarán disponibles en tanto exista la tecnología necesaria para su aprovechamiento y el suministro de una serie de minerales, en su mayoría, escasos en la corteza terrestre. La concentración de cobre, por ejemplo, pasó en 50 años del 25% en 1950 al 1% (la media mundial está actualmente en torno al 0,5%). Es decir, que, para extraer una tonelada de cobre, se necesita remover una media de 200 toneladas de roca (Valero, 2014).

En este sentido, el Servicio Geológico de Finlandia publicó un informe que plantea preocupaciones sobre la disponibilidad de minerales en el futuro. La extracción de minerales podría volverse excesivamente costosa debido a la disminución de las concentraciones de minerales en los yacimientos, colocando en duda la existencia de reservas suficientes para satisfacer la creciente demanda. Por ejemplo, en 2019, el consumo mundial de cobre metálico fue de 24.5 millones de toneladas, mientras que las reservas mundiales se estimaron en 870 millones de toneladas. De esta manera, se puede establecer que, las reservas actuales podrían cubrir 35.5 años de suministro según los niveles de extracción y reciclaje al año 2019. Sin embargo, se proyecta que la demanda de cobre aumentará a alrededor de 100 millones de toneladas para el año 2100 (Michaux, 2021). La
Figura 1-1 permite visualizar cómo las reservas se van agotando del año del estudio al año proyectado por el autor en relación con el consumo de cobre.

Figura 1-1. Reservas y consumo de cobre del año 2019 y 2100



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Michaux (2021).

El panorama sobre la demanda futura de cobre suscita un desafío evidente: la necesidad de implementar estrategias que permitan garantizar un suministro constante, considerando la limitada cantidad de reservas disponibles y el continuo crecimiento de la demanda de los minerales. En ese contexto, se debe comprender que la distribución de las materias primas extraídas no es uniforme en todo el mundo debido a la geología que determina las áreas donde se han acumulado diferentes elementos a lo largo del tiempo. Ejemplo de ello, puede verse en Australia donde se alberga depósitos rentables de casi todos los elementos, mientras que, en España, a pesar de contar con una variedad de depósitos minerales, solo se extraen algunos metales básicos como el cobre, el plomo o el zinc debido a razones netamente económicas (Valero Delgado et al., 2021).

1.2.4 Extractivismo en el cobre

Para contextualizar el fenómeno del extractivismo alrededor del cobre, se puede tomar como referencia a Chile, este país posee las minas a cielo abierto más grandes del mundo. En 2019, Chile contribuyó con alrededor del 33% de la producción global, con una extracción minera de 5,8 millones de toneladas de este mineral (ICSG, 2020). Por tal razón, estas dinámicas se relacionan en como el extractivismo cuprífero se ha desarrollado en su modelo económico y ha avanzado en un modo de apropiación intensivo que remueve grandes volúmenes de recursos naturales situados en territorios particulares de gran importancia ecológica, amenazando áreas de alto valor de conservación que mayormente se ubican en la región de Antofagasta al Norte de Chile en ciudades como Atacama, Arica y Parinacota, Tarapacá y Coquimbo afectando ecosistemas estratégicos costeros y marino

presentes en el área de influencia (Carranza et al., 2020). Así mismo, ecosistemas terrestres de gran fragilidad como los salares de Atacama y punta negra han sido expuestos a su degradación ecosistémica y de esta manera, el bienestar de las comunidades locales (Akchurin, 2023).

Por tal razón, la producción de cobre ha sido durante mucho tiempo el eje principal de las exportaciones de Chile, alcanzando aproximadamente el 53% del total, lo que crea una fuerte dependencia económica del Estado al no encontrar otras alternativas viables para expandir su economía y alejarse del modelo económico que profundiza el extractivismo (Weinberg, 2021). Es así como el extractivismo en la minería extrae materialidad y recursos naturales, plusvalía ambiental, valor de la tierra, salud de los trabajadores, generando graves conflictos sociales en los territorios. Tal como se muestra Chile según el Atlas de Justicia Ambiental al ser uno de los países con mayor número de conflictos ambientales per cápita por minería de cobre (Poveda Bonilla, 2019).

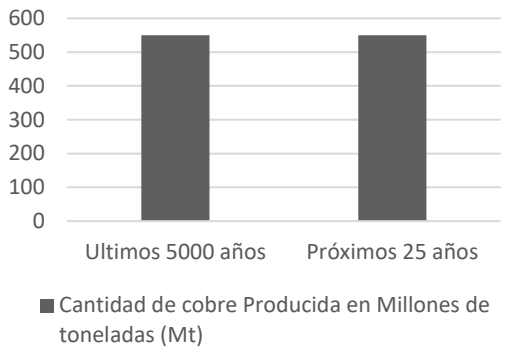
De esta manera, el problema de la extracción cuprífera cobra especial relevancia ahora, ya que los esfuerzos de la transición energética impulsados por los países del norte global están generando una competencia y gran demanda sobre los recursos naturales, específicamente, los minerales críticos, entre ellos el cobre y el litio, ambos presentes en abundancia en Chile. Sin embargo, esta carrera corre el riesgo de profundizar el modelo extractivista en los países del sur global.

1.2.5 El rol del cobre en la transición energética: Cadena de producción en todo el ciclo de la mina

El cobre juega un papel crucial en el sector energético debido a las propiedades eléctricas que posee. Ejemplo de ello, se relaciona con la conductividad volumétrica del aluminio la cual es aproximadamente un 62% inferior a la del cobre. Este mineral es demandado por todas las tecnologías de generación de energía, ya sean convencionales o renovables (Leañez, 2022). Asimismo, es clasificado como un elemento transversal entre los 17 metales/materiales críticos, ya que es imprescindible en al menos 8 tecnologías de energías y de almacenamiento renovables (Hund et al., 2020). Para comprender la presión sobre este mineral, se encuentra que se ha producido alrededor de 550 Mt en los últimos

5000 años, y se requerirá esa misma cantidad en los próximos 25 años para satisfacer las demandas generadas por las tecnologías renovables (Tabelin et al., 2021). Aspecto que se muestra a continuación en los gráficos **Figura 1-2** y **Figura 1-3**.

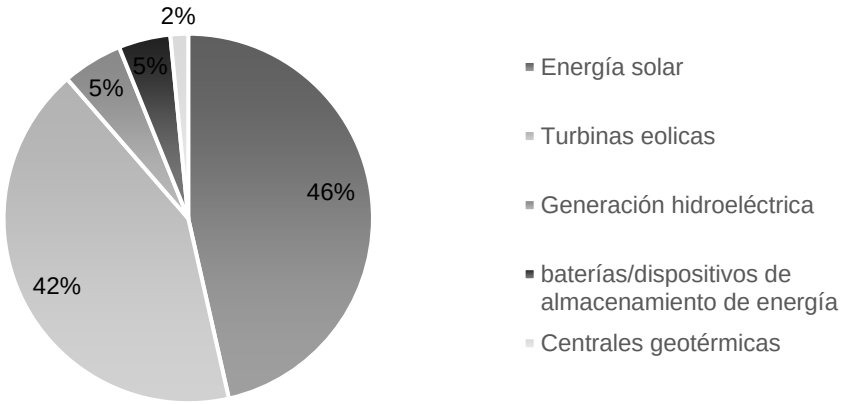
Figura 1-2. Cantidad de cobre Producida en Millones de toneladas (Mt)



Fuente: elaboración propia a partir de (Tabelin et al., 2021)

Asimismo, se estima que para 2050, la demanda aumentará a alrededor de 29 Mt, basado en un escenario de 2 grados Celsius , en el cual el 38,8% se destinará a la energía solar fotovoltaica, el 35,2% a las turbinas eólicas, el 4,4% a la generación hidroeléctrica, el 3,8% a las baterías/dispositivos de almacenamiento de energía y el 1,3% a las centrales geotérmicas (Hund et al., 2020).

Figura 1-3. Demanda de cobre para el 2050



Fuente: elaboración propia a partir de (Hund et al., 2020).

Esta alta demanda proyecta desafíos ambientales de tipo económico, social y ecológicos en toda la cadena de suministro. Uno de los retos son los escenarios de escasez futura, en donde las principales minas de cobre cerraran antes de 2050 debido al agotamiento de los yacimientos minerales (Tabelin et al., 2021). En segunda instancia, la concesión para el desarrollo de nuevos yacimientos tomara más tiempo dado a que a medida que se agoten los recursos por la inevitable carrera de las energías renovables para combatir el cambio climático hará que las regulaciones sean cada vez más estrictas en los países donde se encuentran los depósitos minerales, tanto en términos económicos, sociales como ecológicos. En tercer lugar, la escasez de nuevos yacimientos dificulta el procesamiento y la gestión de residuos generados durante la extracción y producción de cobre (Tabelin et al., 2021) que profundizan en impactos como la pérdida de flora y suelo, la contaminación de aguas superficiales y subterráneas y la contaminación tanto del agua como del suelo por la presencia de metales pesados y sustancias químicas tóxicas, como mercurio, zinc, arsénico y carbón (Carranza et al., 2020). Así mismo lo impactos en las comunidades locales amenazan su bienestar, salud, los modos de vida y economía de la población local (Akchurin, 2023).

El cobre es un elemento abundante en la corteza terrestre y parte esencial del magma interior de la tierra, emerge a la superficie terrestre mediante grietas y fisuras, dando origen a yacimientos. Su presencia se manifiesta en láminas delgadas de gran pureza o diseminado en extensos cuerpos mineralizados, principalmente en dos grupos: minerales oxidados y sulfurados. Los primeros, ricos en oxígeno como óxidos, carbonatos y silicatos

de cobre. Por otro lado, los sulfurados, compuestos por cobre, azufre y hierro, se hallan debajo de la capa oxidada. De esta manera, la obtención varía según estos tipos de minerales: mientras que los oxidados se disuelven con ácido sulfúrico, los sulfurados requieren procesos de concentración por flotación, fundición y refinación para su obtención (Moussa, 1999).

El ciclo comienza con la exploración, extracción de minerales de cobre en minas, seguido de su procesamiento y refinamiento. A pesar de ser poco común encontrarlo en su estado puro, hay más de 160 minerales que albergan este metal, incluyendo la Calcocita, Bornita, Calcopirita, Digenita, Covellina, Cuprita y Malaquita, entre otros. Es relevante notar la relación cercana entre los depósitos de cobre y los de plata, donde minerales como la bornita contienen aproximadamente un 15% de este metal. En Polonia, por ejemplo, la extracción de mineral de cobre en el año 2015 generó, además, importantes cantidades de plata, oro, plomo, níquel, selenio y concentrado (Instituto Geológico Polaco, 2020).

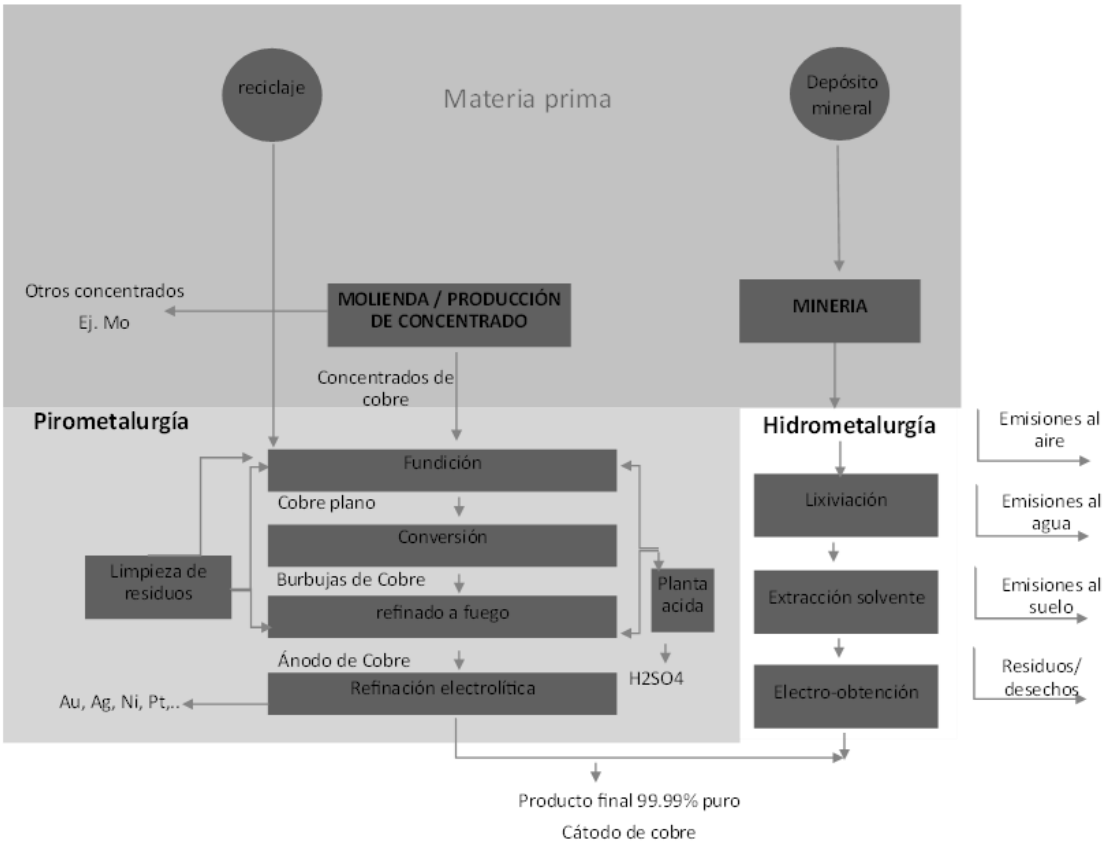
La minería constituye la principal fuente de obtención de cobre, empleando técnicas a cielo abierto o subterráneas. El método a cielo abierto, que representa aproximadamente el 90% de la producción, se utiliza para extraer minerales próximos a la superficie, mientras que la minería subterránea se emplea para yacimientos más profundos (Wincewicz-Bosy et al., 2021). Los depósitos de cobre se dividen principalmente en porfídicos y sedimentarios, cada uno con sus particularidades de formación y origen geológico. Los pórfidos se originan por la acción de fluidos hidrotermales provenientes de cámaras magmáticas situadas bajo el yacimiento y de otro lado, los depósitos sedimentarios de cobre se encuentran en rocas sedimentarias y se forman debido al enfriamiento de fluidos hidrotermales que contienen este metal (Wincewicz-Bosy et al., 2021). Los depósitos más relevantes son principalmente los pórfidos. Aproximadamente entre el 90% y el 95% del cobre se origina a partir de minerales sulfurosos para formar sulfato de cobre, que luego se recupera mediante refinación electrolítica y el 5% al 10% restante es denominada los minerales de óxido y son el resultado de la meteorización de minerales sulfurosos, especialmente malaquita, azurita, cuprita y crisacola (Ayres et al., 2002).

Para la obtención del producto final de cobre existen dos métodos. El método tradicional o pirometalúrgico usado desde finales del siglo XIX para obtener cobre primario se compone

de tres etapas esenciales: la extracción y el enriquecimiento del mineral, seguidos por la fundición y desulfuración, y finalmente, el refinado electrolítico. Es importante señalar que el proceso de extracción no es el mismo que el de producción (Wincewicz-Bosy et al., 2021). El cobre catódico comercializado presenta una pureza que oscila entre el 99,95% y el 99,97%. De otro lado, ha tomado fuerza el método Hidrometalúrgico, denominado así por la extracción por disolventes de electro-obtención, simplificando el proceso y eliminando las fases de beneficio y fundición, utilizando en su lugar una etapa de lixiviación y luego cementación o electro-obtención. Este método está experimentando un rápido crecimiento y está sustituyendo en parte al método tradicional (**Ilustración 1-1**). A diferencia del método pirometalúrgico que produce ácido sulfúrico, el nuevo proceso consume ácido (Ayres et al., 2002).

En el proceso pirometalúrgico, se inicia triturando y moliendo el mineral extraído. Posteriormente, se concentra mediante flotación, generando un concentrado con aproximadamente un 30% de cobre (a veces variando entre 20% y 40%) (ICSG, 2020). En el proceso de fundición, este concentrado se transforma en "eje", con un contenido que oscila entre el 50% y el 70%. El eje se convierte en cobre blíster, con un contenido de cobre de 98,5% a 99,5%, ya sea por fusión inmediata o por procesamiento en un convertidor. Luego, el blíster se refina a fuego, produciendo cátodos refinados con más del 99,99% de pureza (International Copper Association, 2017).

Ilustración 1-1. Minería y procesamiento de cobre



Fuente: tomado de International Copper Association (2017).

De otro lado, el método hidrometalúrgico extrae el cobre de minerales de baja ley, utilizando procesos como la lixiviación, la extracción por solventes y la electro-obtención (procesos SX-EW). A través de este método, se obtienen cátodos de cobre refinado, con la misma pureza que los obtenidos por el proceso pirometalúrgico (ICSG, 2020). Es importante resaltar, la producción secundaria de cobre implica el uso de chatarra de cobre proveniente de diversos materiales, incluyendo chatarra de productos descartados, electrónicos y otros elementos. Estos materiales se funden para obtener cobre negro, que luego se procesa para obtener ánodos (Ayres et al., 2002).

Tras el proceso de fundición, se produce un cátodo de cobre de 99,99% de pureza (véase en **Ilustración 1-1**). Estos cátodos se pueden enviar a molinos o fundiciones para ser

convertidos en alambrón, palanquillas, tortas o lingotes, que son empleados en la elaboración de diversos productos. En conclusión, la importancia del cobre plantea retos significativos en términos económicos, sociales y ecológicos a lo largo de toda su cadena de suministro. Sin embargo, es importante acotar que el alcance del presente trabajo de grado se limita al proceso de extracción de cobre dentro de la mina, dejando fuera de su ámbito de estudio la fase de transformación.

2. Enfoque metodológico

El presente trabajo se encamina desde un enfoque metodológico mixto, sustentado según Hernández & Mendoza (2008) “en un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación que requieren de la recolección y el análisis de datos cuantitativos como cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada (denominadas meta inferencias) y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio” (p.10). De modo que, se determinen implicaciones ambientales para la extracción de cobre qué permitan construir criterios de sustentabilidad para contribuir al contexto actual de la transición energética en Colombia. Para la implementación del enfoque previsto, se pretende especificar el método que responda a cada uno de los objetivos específicos de la investigación.

Objetivo 1. Para contextualizar el rol del cobre para la transición energética a escala global, de Latinoamérica y Colombia, se utilizará el método de revisión de literatura por medio del análisis de información secundaria cualitativa y cuantitativa de artículos, libros y productos resultantes de las investigaciones de bases de datos científicas tales como: Ebsco, Redalyc, Science Direct, Researchgate, Scopus y Scielo que permitan comprender su relevancia en las diferentes escalas mencionadas.

Tabla 2-1. Método y técnica del objetivo 1

Método	Técnica
Revisión de literatura	Ficha Bibliográfica para revisión sistemática de información cualitativa y cuantitativa.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta la ficha bibliográfica con las fuentes consultadas para cumplir con el presente objetivo:

Tabla 2-2. Ficha bibliográfica del objetivo 1

Objetivo	Temática	Autor	Año
Contexto del rol del cobre para la transición energética a escala global, de Latinoamérica y Colombia	**Oferta y producción mundial**	SERNAGEOMIN	(2019)
		USGS	(2023)
		Donoso Muñoz	(2013)
		Poveda Bonilla	(2021)
	Demanda y consumo mundial	Jones et al.	(2021)
		Göbel	(2015)
	Producción de cobre en Latinoamérica	Thorpe & Aguilar Ibarra	(2010)
		Lagos et al.	(2021)
		Barra et al.	(2021)
		SERNAGEOMIN	(2023)
		Romero Toledo	(2019)
		MINEM	(2023)
		MINEM	(2022)
		MINEM	(2020)
		Coayla et al.	(2024)
		López Ascarza	(2000)
	Producción de cobre en Colombia	Ávila Pinto	(2021)
		Guayara et al.	(2021)
		Ángel Amaya et al.	(2019)
		Poveda Forero et al.	(2023)
		Cáceres Gaitán	(2023)
		Auty & Warhurst	(1993)
		Granda Álvarez	(2021)

Fuente: elaboración propia.

Objetivo 2. la Identificación de los conflictos sociales, económicos y ecológicos de la extracción de cobre en el contexto de la transición energética en Colombia, se llevó a cabo

un proceso detallado de análisis geoespacial y revisión documental. A continuación, se resumen los métodos y técnica(s) utilizadas:

Tabla 2-3. Método y técnica del objetivo 2

Método	Técnica
El Método Cartográfico	Análisis cartográfico de datos temporales-espaciales existentes para determinar la ubicación de los depósitos del cobre en Colombia.
Revisión de estudio de caso	Ficha Bibliográfica para revisión sistemática de la información cualitativa y cuantitativa, información de primera mano de los observatorios de conflictos ambientales como el OCA, Atlas de justicia ambiental (EJ Atlas) entidades públicas y privadas, artículos de investigación y reportes de organizaciones sociales.

Fuente: elaboración propia.

El análisis cartográfico fue esencial para identificar visualmente los posibles conflictos que podrían emerger en los territorios donde se localizan los principales proyectos mineros de cobre en Colombia, a partir de su cercanía o superposición con áreas protegidas, territorios étnicos y zonas con significancia ecológica. El método permitió generar representaciones espaciales que facilitaron una comprensión integral de las implicaciones ambientales derivadas de la minería de cobre. La construcción de los mapas se realizó mediante el uso del software ArcGIS, al cual se integraron bases de datos de diversas entidades oficiales, como la Agencia Nacional de Minería (ANM), la Agencia Nacional de Tierras (ANT) y el Registro Único Nacional de Áreas Protegidas (RUNAP). Estas fuentes proporcionaron información espacial clave sobre la ubicación de los principales proyectos mineros de cobre y su relación con áreas de interés ambiental, étnico y social. El enfoque cartográfico permitió estructurar un mapa general de los cinco proyectos mineros de cobre seleccionados: El Roble, Mocoa, Quebradona, San Matías y Soto Norte. A partir de este mapa general, se generaron ventanas específicas para cada uno de los proyectos, lo que permitió hacer un zoom espacial y observar con mayor detalle las variables involucradas en cada área. Este enfoque permitió realizar un análisis profundo de cómo las variables

territoriales se relacionaban con los proyectos mineros, evaluando el grado de superposición o cercanía con áreas protegidas, territorios ancestrales, zonas de biodiversidad crítica y comunidades locales.

Una vez construidos los mapas, se procedió a la identificación de las variables ambientales asociadas a cada proyecto. Se analizaron las dinámicas espaciales, identificando tres tipos de relaciones geográficas que pudieran implicar potenciales afectaciones ambientales: cercanía, superposición y colindancia.

- **Cercanía:** se definió como la proximidad de los proyectos mineros a áreas protegidas o territorios indígenas, en la cual se midió la distancia en kilómetros entre el proyecto y la zona en cuestión.
- **Superposición:** en los casos donde los proyectos mineros se encontraban parcialmente sobrepuestos con territorios ambientalmente protegidos o áreas de significancia cultural y social, se calculó el área de traslape en hectáreas.
- **Colindancia:** se determinó cuando los proyectos se ubicaban en zonas adyacentes a áreas con características ambientales o sociales críticas, lo cual también fue evaluado espacialmente para observar su posible impacto.

La información espacial obtenida fue complementada con la revisión documental de fuentes secundarias. La revisión de información secundaria proveniente de documentos oficiales, entidades públicas y privadas, artículos de investigación y reportes de organizaciones sociales brindaron un marco referencial para complementar la información obtenida a través del método cartográfico. A continuación se presenta la ficha bibliográfica con las fuentes consultadas para cumplir con el presente objetivo:

Tabla 2-4. Ficha bibliográfica del objetivo 2

Objetivo	Temática	Autor	Año
Identificación de los conflictos sociales, económicos y ecológicos de la	Potenciales efectos ambientales de los proyectos el	ANM	(2024)
		ANM	(2021)
		Poveda Forero et al.	(2023)
		Sentencia T-622	(2016)

extracción de cobre en el contexto de la transición energética en Colombia	Roble, Mocoa, Quebradona, San Matias y Soto Norte	Corantioquía	(2018)
		ANT	(2024)
		Romero Lopez & Muñoz	(2019)
		Comisión Interétnica de la Verdad de la región Pacífico	(2021)
		Corpoamazonia	(2008)
		LCL	(2022)
		SINCHI	(2018)
		UNGRD	(2018)
		Carvajal	(2022)
		DNP	(2017)
		Palomo López	(2021)
		Jiménez & Martin	(2018)
		COMFAMA	(2020)
		Garcés Arboleda	(2023)
		Cordoba Minerals	(2019)
		Pérez Torres et al.	(2016)
		Medina Bernal et al.	(2019)
		Humboldt	(2014)
		Orihuela et al.	(2019)
		RUNAP	(2024)
		Parra Romero	(2022)

Fuente: elaboración propia.

Objetivo 3. Para analizar las potencialidades/oportunidades de Colombia en la extracción de cobre, se integró el análisis del mapa metalogénico de Colombia proporcionado por el Servicio Geológico Colombiano y presentando en el documento de la UPME (Poveda Forero et al., 2023). Este mapa representa a escala regional la distribución espacial y temporal de los depósitos de cobre más importantes, junto con las ocurrencias y manifestaciones minerales metálicas y no metálicas. La relevancia de este análisis

cartográfico radica en que permite identificar y georreferenciar los depósitos de cobre, lo que proporciona una visión clara de las áreas más prospectivas para la minería en Colombia. El análisis cartográfico se complementó con una revisión exhaustiva de literatura secundaria que incluyó normativas nacionales e informes institucionales de organismos como la Agencia Nacional de Minería (ANM), la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC). Esta revisión permitió robustecer la interpretación geográfica con información adicional sobre las apuestas institucionales y proyecciones para la extracción de cobre en Colombia. A continuación, se resumen los métodos y técnica(s) utilizadas:

Tabla 2-5. Método y técnica del objetivo 3

Método	Técnica
El Método Cartográfico	Análisis cartográfico de datos temporales-espaciales existentes para determinar la ubicación de los depósitos del cobre en Colombia.
Revisión de literatura	Revisión de las proyecciones y apuestas institucionales de los proyectos representativos de cobre (Agencia Nacional de Minería Y Servicio Geológico Colombiano).

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se presenta la ficha bibliográfica con las fuentes consultadas para cumplir con el presente objetivo:

Tabla 2-6. Ficha bibliográfica del objetivo 3

Objetivo	Temática	Autor	Año	Fuente
Potencialidades/		SGC	(2022)	Servicio Geológico Colombiano

oportunidades de Colombia en la extracción de cobre	**Prospectividad del cobre en Colombia**	ACM	(2023)	Asociación Colombiana de minería
		Ávila Pinto	(2021)	Libro Blanco de Cobre
		UPME	(2021)	Unidad de planeación Minero Energética
			(2022)	
			(2023)	

Fuente: Elaboración propia

Objetivo 4. Con el propósito de formular algunos criterios de sustentabilidad que se deban tener en cuenta para la extracción del cobre a partir de los efectos ambientales identificados en las etapas de exploración y explotación de la minería de cobre en Colombia. Se utilizó un enfoque metodológico mixto que combinó el análisis del ciclo de vida (ACV) y la teoría fundamentada. El uso de ambas herramientas metodológicas permitió la identificación de los efectos ambientales más críticos en el ciclo minero y la construcción de un conjunto de criterios de sustentabilidad aplicables al contexto colombiano. A continuación, se resumen los métodos y técnica(s) utilizadas:

Tabla 2-7. Método y técnica del objetivo 4

Método	**Técnica**
Teoría fundamentada	A partir de los datos y el enfoque teórico escogido, formular algunos criterios de sustentabilidad fuerte que contribuyan al análisis de las implicaciones ambientales.
Análisis del ciclo de vida	Inventario de entradas, proceso, salidas y efectos ambientales de la minería de cobre

Fuente: Elaboración propia.

El ACV fue el eje principal de la primera parte de este objetivo, ya que permite evaluar de manera integral las entradas, procesos, salidas y efectos ambientales generados en las diferentes fases del ciclo minero del cobre. Siguiendo las recomendaciones internacionales sobre ACV (ISO, 2006), esta herramienta fue clave para identificar los puntos críticos del

ciclo de vida, determinar las fases con mayor efecto ambiental, y proponer soluciones potenciales orientadas a mitigar dichos efectos. El ACV fue alimentado a partir de fuentes secundarias de información obtenidas de bases de datos, informes institucionales y literatura científica tanto de Colombia como de otros países de la región, como Chile.

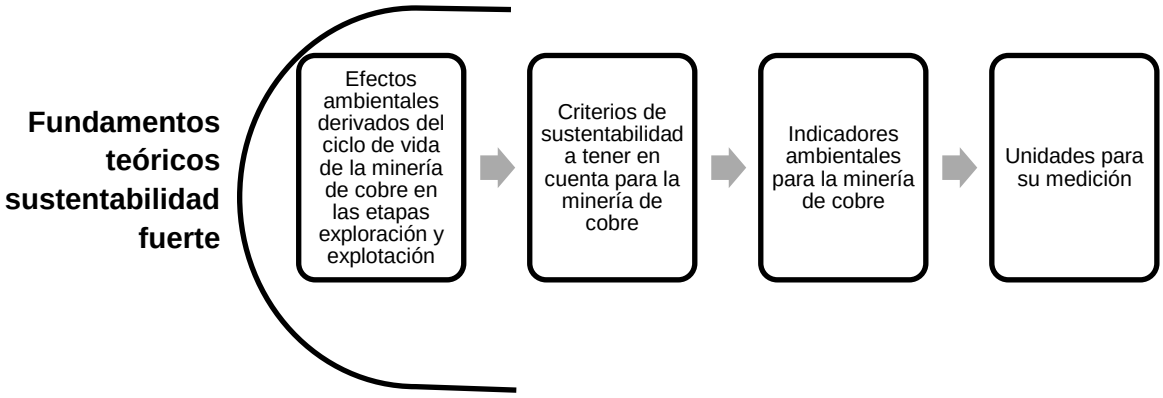
Para realizar el ACV, se elaboraron dos gráficos que abarcan las etapas de exploración y explotación. Estos gráficos identifican los insumos o entradas (agua, energía eléctrica, combustibles, sustancias químicas, entre otros), los procesos (fases, actividades generales y específicas), las salidas (emisiones atmosféricas, residuos, estériles, entre otros) y finalmente, los efectos ambientales derivados. Estas dos fases (exploración y explotación) fueron analizadas por separado, lo que permitió un estudio exhaustivo de cada una de ellas en función de sus características y particularidades. Los gráficos fueron construidos a partir de datos secundarios extraídos de fuentes de información oficiales, como la Agencia Nacional de Minería de Colombia, el Servicio Geológico Colombiano, y la Agencia Nacional de Tierras, así como estudios científicos realizados en países como Chile. A partir de estos análisis, se identificaron 16 efectos ambientales críticos, que sirvieron de base para la siguiente fase de formulación de los criterios de sustentabilidad.
La segunda parte de este objetivo se realizó bajo el enfoque metodológico de la teoría fundamentada, que permitió agrupar los efectos críticos derivados del análisis del ciclo de vida en ocho categorías temáticas de criterios de sustentabilidad: Gestión hídrica, Gestión de desechos, Acción climática y gestión de las emisiones, Gestión del ruido y vibraciones, Uso y rehabilitación del suelo, Biodiversidad, Desarrollo económico y Bienestar social. Cada una de estas categorías fue diseñada para abarcar los efectos ambientales y sociales más significativos, estructurando así una base sólida para la formulación de criterios de sustentabilidad que respondan al contexto colombiano y a las necesidades de la transición energética.

Los 16 efectos críticos agrupados en estas categorías incluyeron: cambios en la calidad físico-química del agua, afectación de la dinámica de aguas superficiales y subterráneas, generación de estériles y escombros, emisión de material particulado y gases, generación de ruidos, cambios en el uso del suelo, modificación del paisaje, remoción y pérdida de cobertura vegetal, afectación ecosistémica, incremento del uso de bienes y servicios, generación de expectativas, generación de empleo, modificación de las actividades

económicas de la zona, afectación del patrimonio cultural y valores culturales de las comunidades, afectación a la salud humana, y desplazamientos y conflictos de tierra. A partir de estos efectos, se seleccionaron indicadores de sustentabilidad específicos que permitieran medir y evaluar de manera adecuada los efectos identificados. Dichos indicadores fueron obtenidos de la revisión sistemática de artículos de investigación, informes institucionales y bases de datos científicas. Algunos de los indicadores provienen de fuentes reconocidas en la literatura internacional, como los trabajos de (Fuentes et al., 2021; Vela León & Lewinsohn, 2021), mientras que otros se adaptaron específicamente para el contexto colombiano, utilizando información de entidades como el DANE, Humboldt, DNP, UARIV y el IDEAM.

La identificación y agrupación de los efectos ambientales permitió la formulación de criterios de sustentabilidad, cada uno de los cuales fue vinculado a indicadores cuantitativos y cualitativos que permiten hacer seguimiento de los efectos ambientales de la minería de cobre. Estos indicadores abarcan dimensiones ecológicas, sociales y económicas alineados con la teoría de la sustentabilidad fuerte, la cual reconoce que la naturaleza no puede ser tratada únicamente como capital natural. De esta manera, los criterios propuestos buscan la mitigación de los efectos ambientales en la protección de las áreas críticas de los ecosistemas y comunidades locales frente a las presiones derivadas del extractivismo minero. Todo lo anterior, se resume en la **Figura 2-1**:

Figura 2-1. Criterios de sustentabilidad a tener en cuenta para la explotación del cobre en el contexto de la transición energética en Colombia.

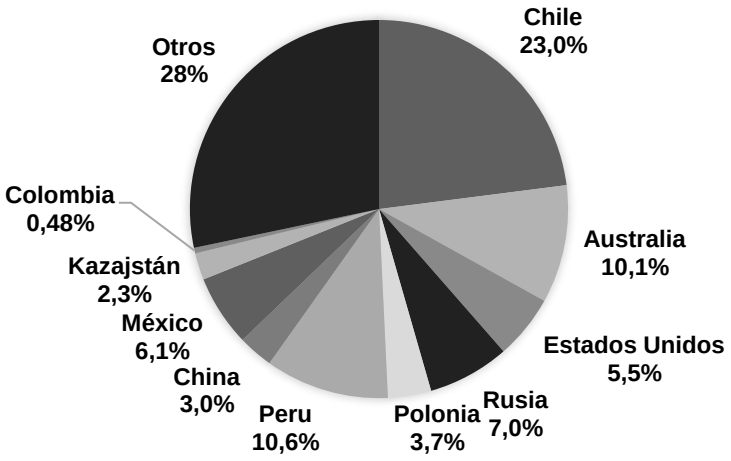


Fuente: elaboración propia.

3. Panorama general de la industria del cobre y su papel en la transición energética de Colombia

A lo largo de los años, las reservas mundiales de cobre se han incrementado en 2,6 veces, a pesar de la creciente demanda. Perú ha aumentado sus reservas en 4,6 veces, mientras que Chile lo ha hecho en 2,3 veces. Australia ha destacado por elevar sus reservas en casi 13 veces, colocándose como el tercer país con más reservas. Sin embargo, Estados Unidos y China, aunque han aumentado sus reservas en cifras absolutas, han reducido su participación en el total de reservas mundiales (Poveda Bonilla, 2021; USGS, 2021). Las reservas de cobre a nivel mundial se ubican en 870 millones de toneladas.

Ilustración 3-1. Distribución de las reservas globales de cobre por país al 2020 (en porcentaje)



Fuente: elaboración propia a partir de datos de (Ávila Pinto, 2021; Poveda Bonilla, 2021)

Oferta y producción mundial

A lo largo del tiempo, la producción de cobre ha aumentado de manera significativa, convirtiéndose en un reglón importante en la economía mundial. En 2022, Chile continúa liderando la producción de a nivel mundial, generando una producción de 5,37 millones de toneladas, representando aproximadamente el 24,9% de la producción global. Este país fue seguido por Perú con un 10,2%, y China con un 8,8%, sumando en conjunto un 43,9% de la producción mundial. Estos datos posicionaron a los países mencionados como los principales productores de cobre durante ese año (SERNAGEOMIN, 2019; USGS, 2023). A continuación, se presenta la **Tabla 3-1** con los datos de los principales países productores de cobre y su participación a nivel mundial durante los años 2018-2022:

Tabla 3-1 Producción mundial de cobre de mina en miles de toneladas entre los años 2018-2022.

País	Producción (Miles de toneladas)					Participación mundial (%)
	2018	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	
Chile	5.872	5.822	5.730	5.620	5.377	24,89
Perú	2.440	2.400	2.150	2.300	2.200	10,18
China	1.590	1.600	1.720	1.910	1.900	8,79
Estados Unidos	1.220	1.300	1.200	1.230	1.300	6,02
R.D. Congo	1.230	1.300	1.600	1.740	2.200	10,18
Australia	920	960	890	813	830	3,84
Indonesia	651	340	510	731	920	4,26
Kazajistán	603	700	500	510	580	2,68
México	751	770	730	734	740	3,42
Rusia	751	750	810	940	1.000	4,63
Zambia	854	790	850	842	770	3,56
Resto del mundo	3.540	3.800	3.870	3.241	3.790	17,54
Total mundial	**20.422**	**20.532**	**20.560**	**20.611**	**21.607**	-

Fuente: elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN (2019); USGS (2023).

Lo anterior, evidencia una tendencia al aumento en la oferta de cobre. Es importante tener en cuenta que el cobre es exportado en diferentes productos claves obtenidos durante el proceso de explotación como los concentrados y como producto terminado en cátodos de cobre refinados (Donoso Muñoz, 2013). De este modo, la oferta final se plasma en los datos de exportación que reflejan las necesidades de consumo de los países por este metal. En ese sentido, las exportaciones al 2018 destacaban a Chile (29,1%) y Perú (20,3%) como los principales exportadores de concentrados de cobre. Además, junto con Brasil (4,1%) y México (3,8%), América Latina y el Caribe se consolidan como regiones con superávit en la producción de cobre. Por otro lado, la región asiática es la principal importadora neta de concentrados, liderada por China (49,4%), seguida por Japón, la República de Corea, la India y Filipinas (Poveda Bonilla, 2021).

Demanda y consumo mundial

El cobre al ser un elemento esencial en diversas aplicaciones industriales y tecnológicas ha experimentado un notable aumento en su consumo a nivel mundial durante las últimas décadas. Factores como la urbanización, la electrificación, el desarrollo de energías renovables y la expansión de infraestructuras impulsan la demanda de este mineral, especialmente en países emergentes experimentando un rápido crecimiento económico (Jones et al., 2021).

Las tendencias actuales revelan disparidades regionales, donde las economías en desarrollo lideran el consumo per cápita, mientras que las naciones desarrolladas siguen siendo grandes consumidores debido a su infraestructura avanzada y demanda tecnológica. Este aumento significativo de la demanda será impulsado principalmente por economías en desarrollo como India y el sudeste asiático. A pesar de esto, se estima que China continuará siendo el principal consumidor de cobre refinado para el año 2030, representando aproximadamente el 44% de la demanda mundial (Jones et al., 2021). Aunque, el aumento en el consumo ha generado beneficios económicos, como la creación de empleo, también ha ampliado las brechas de desigualdades, debido a que algunos países dependen en gran medida de la exportación de cobre, lo que los expone a la volatilidad de los precios internacionales (Göbel, 2015). En el caso del cobre, el consumo regional se puede ver en la siguiente **Tabla 3-2**:

Tabla 3-2. Consumo regional de cobre refinado, 2020. (En miles de tonelada y porcentajes)

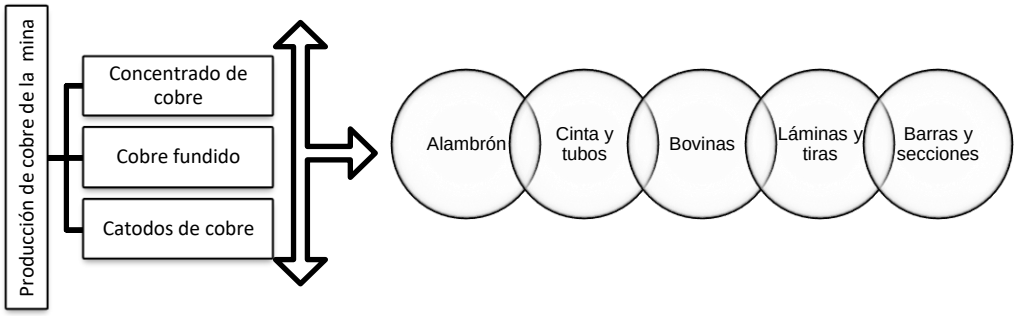
Región	**2020**	**%**
China	12.084	54%
Asia (Se excluye China)	4.826	21%
Europa	3.024	13%
América del Norte	2.058	9%
América del Sur y Central (Incluido México)	391	2%
África	153	1%
Oceanía	14	0%
Total	22.550	100%

Fuente: tomado de Jones et al. (2021; Pág. 10).

De acuerdo con la **Tabla 3-2**, China, Asía, Europa y Estados Unidos son los principales consumidores de cobre refinado. Se proyecta un aumento continuo en la demanda, especialmente con la transición global hacia energías renovables y la expansión de la movilidad eléctrica en una tasa de crecimiento del 3% anual. Se exploran alternativas, como la reciclabilidad del cobre y el desarrollo de tecnologías para reducir la dependencia de este metal.

La estructura comercial de la industria del cobre refinado se divide en dos principales: una que comprende la gestión completa, desde la extracción en la mina del concentrado hasta la producción de cátodos de cobre refinado; y otro modelo desvinculado que inicia en la extracción del mineral y culmina en la formación del concentrado. En este último, el concentrado es transportado desde las minas para ser vendido a las fundiciones y refinerías, encargadas del proceso restante hasta obtener los cátodos como producto para ser comercializado para los diferentes usos en varios productos semielaborados: alambrón, tubos, láminas, tiras, placas, láminas, varillas, barras y secciones, antes de ser utilizado en sectores de uso final como construcción, industria automotriz, manufactura, arquitectura y otros (Poveda Bonilla, 2021). Lo anterior, se presenta en la **Figura 3-1**.

Figura 3-1. Segmentos de la cadena de comercialización y uso del cobre



Fuente: elaboración propia a partir de Poveda Bonilla (2021).

Producción de cobre en Latinoamérica

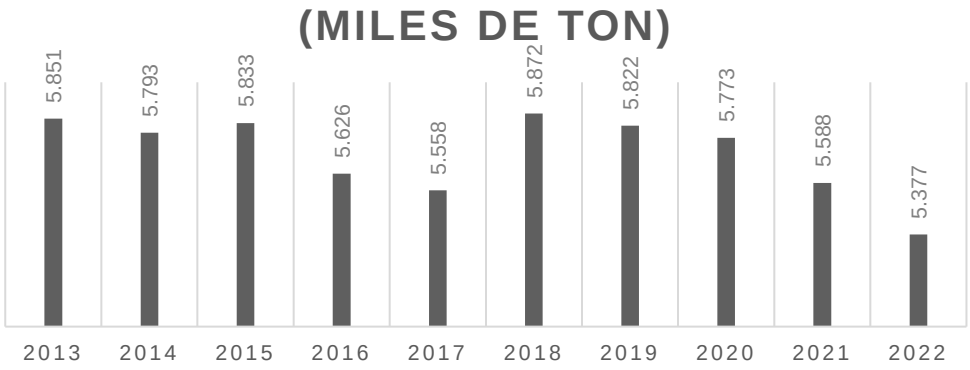
La región alberga algunos de los yacimientos más grandes y ricos del mundo, posicionándola como una de las principales contribuyentes a la producción global (Thorpe & Aguilar Ibarra, 2010). América Latina tiene un papel esencial en la producción de cobre de mina, siendo Chile, Perú, México, Brasil y Ecuador los principales contribuyentes en 2020, sumando un total del 43,8% de la producción mundial de cobre de mina, alcanzando los 9,21 millones de toneladas (Lagos et al., 2021). Según el Grupo Internacional de Estudio sobre el Cobre (ICSG) en América Latina se encuentra más del 30% a nivel mundial de las reservas de cobre concentradas en el cinturón de cobre circunpacifico ubicado en la cordillera de los Andes (Jones et al., 2021).

Los países latinoamericanos y las empresas mineras que exportan concentrados de cobre están reduciendo su influencia y poder de decisión en el mercado debido a la reducción gradual en sus capacidades científicas y tecnológicas para procesar sus propios concentrados. Aunque es cierto que China y otros países asiáticos tienen un fuerte dominio en la industria de fundiciones y refinerías, al mismo tiempo dependen en gran medida de la industria minera que produce los concentrados, Lo anterior, se evidencia en la notoria reducción en la capacidad de fundición del cobre de América Latina que disminuyo del 21,9% al 11,2% entre 2000 – 2020 (Lagos et al., 2021).

Chile

Chile se destaca como el principal productor de cobre en Latinoamérica y a nivel mundial. La minería cuprífera en este país ha experimentado un crecimiento significativo a lo largo de las décadas, convirtiéndose en un pilar fundamental de su economía. La riqueza de los yacimientos chilenos, como Chuquicamata y Escondida, ha posicionado a Chile como líder en la producción y exportación de este metal (Barra et al., 2021). En 2022, la minería en Chile continuó siendo un reglón importante en la economía, aportando significativamente al PIB con un 14,2%. La minería del cobre, específicamente, representó el 10,9% de esa contribución. La producción de este metal registró en el 2022 una caída debido a una reducción del 5,6% en el precio del cobre. Esto significo también, una baja en las exportaciones totales del país, pasando de un 56% a un 45% (SERNAGEOMIN, 2023). A continuación se ilustra en la **Figura 3-2** la producción de cobre de chile en los últimos años.

Figura 3-2. Producción de cobre en Chile



Fuente: elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN (2023).

La minería de cobre chilena se desarrolla principalmente en las regiones de Tarapacá, Antofagasta, Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana de Santiago y del Lib. Gral. B. O'Higgins, que albergan la mayor parte de las reservas conocidas del país, constituyendo alrededor del 21% de las reservas mundiales. Para el 2022, la producción de Chile se dividió entre cátodos y concentrados de cobre. La gran minería, liderada por

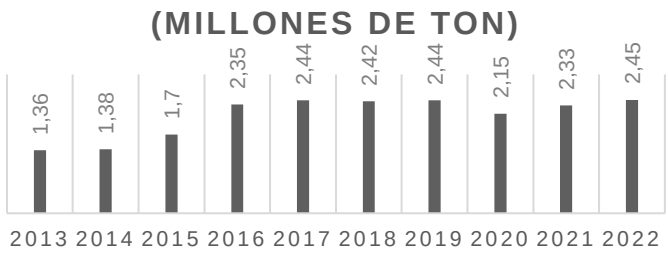
empresas privadas y estatales como Codelco, contribuyó con el 96%, la mediana minería nacional con el 3%, y la pequeña minería representó el restante 1% (SERNAGEOMIN, 2023).

La actividad minera en Chile se concentra principalmente en Norte Grande, una de las zonas desérticas más áridas del mundo en donde el desarrollo minero ha alterado el ciclo hidrológico y desafiado la resistencia de las comunidades locales. El uso del agua por parte de las mineras, tanto superficial como subterránea, así como del agua de mar, ha llevado a la sobreexplotación de acuíferos en la precordillera y el altiplano, afectando todo el territorio (Romero Toledo, 2019). La distribución política del agua asigna altos caudales a las actividades extractivas en un entorno de escasa disponibilidad hídrica. La actividad minera también afecta negativamente la calidad del aire, especialmente en los campamentos mineros, donde se han registrado altos niveles de material particulado por encima de los límites permitidos. Este proceso ha presionado los recursos hídricos en territorios habitados por comunidades indígenas, impulsando su autoidentificación y estrategias para enfrentar las transformaciones ambientales. Además, la dependencia económica de la minería en ciudades como Iquique y Antofagasta ha generado un crecimiento urbano desigual y una creciente desigualdad económica. Estas contradicciones son parte inherente del metabolismo de la minería en el norte de Chile (Romero Toledo, 2019).

Perú

La extracción de minerales, especialmente el cobre, ha tenido un efecto en la economía de Perú, generando ingresos significativos y contribuyendo al progreso económico del país. Actualmente, Perú ocupa el segundo lugar en la producción mundial de cobre, alcanzando las 2.4 millones de toneladas métricas en el último año. Se prevé un crecimiento constante, proyectando que para el 2026, la producción podría ascender a 2.8 millones de toneladas métricas, mostrando un desarrollo continuo en el sector minero peruano (MINEM, 2023). Así mismo, a nivel de Latinoamérica, Perú se consolidó como el segundo mayor productor de oro, cobre, plata, plomo y molibdeno. A continuación se presenta la evolución de la producción de cobre en Perú en millones de toneladas para los últimos años.

Figura 3-3. Producción de cobre Perú



Fuente: elaboración propia a partir de MINEM (2022).

El aumento en la producción de cobre en 2022 se atribuyó principalmente a las operaciones de las compañías más importantes de la industria minera peruana como la Minera Antamina, Sociedad Minera Cerro Verde, Minera Chinalco Perú, y Marcobre. En cuanto a reservas, de acuerdo con la USGS al cierre de 2022, Perú ocupo el segundo lugar en reservas de cobre y plomo a nivel latinoamericano (MINEM, 2022). En relación con las dinámicas de exportación, el cobre encabezó la lista con una participación del 56.9% en el volumen total enviado debido a condiciones favorables externas y mayor demanda en proyectos de descarbonización, los cuales requieren altos niveles de este metal. Las compras de China representaron el 69.3% del total de las exportaciones de cobre peruano, seguidas por Japón (6.9%) y Corea del Sur (6.5%).

En Perú, la minería se centra en la región montañosa y destaca por su tecnificación y preferencia por la minería a cielo abierto, según el Ministerio de Energía y Minas (Minem, 2020). En la subcuenca de Cunas, las autoridades informan sobre la contaminación del río Pucará por desechos mineros, afectando a la comunidad de Shicuy y generando niveles elevados de arsénico y cadmio. Desde 2009, Southern Copper Perú, del Grupo México, desarrolla un proyecto de extracción cuprífera a cielo abierto en La Tapada y Tía María, cerca de fuentes de agua cruciales para el Valle de Tambo. A pesar de la oposición comunitaria expresada en una consulta popular en 2009, las autoridades aprobaron el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), desencadenando protestas y levantamientos sociales en 2011 y 2014 (Coayla et al., 2024).

Lo anterior también ha generado el desplazamiento de la población en áreas como Cerro de Pasco y La Oroya, así como los intentos de reubicación en lugares como el Valle Tambo Grande en Piura. Estos desplazamientos suelen ser resultado de la presencia de yacimientos mineros o plantas de procesamiento y al impacto por el uso de las aguas que conlleva a cambios significativos en la cultura, la identidad y las tradiciones locales (López Ascarza, 2000). Los conflictos ambientales en Perú suelen ser causados por las operaciones mineras en territorios comunales y áreas cercanas a comunidades locales. Estas operaciones provocan contaminación del aire, agua y suelo, impactan la biodiversidad y afectan a los agricultores, ganaderos y otros usuarios de recursos hídricos.

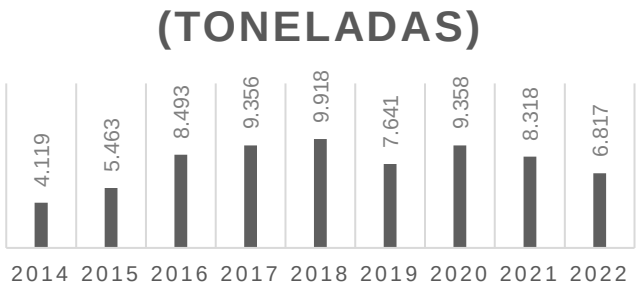
Además de Chile y Perú, otros países latinoamericanos, como México, Brasil y Ecuador, también desempeñan un papel relevante en la producción de cobre. México, por ejemplo, cuenta con importantes yacimientos en Sonora y Zacatecas aportando al 3,8% de la producción a nivel mundial , mientras que Brasil con el 4,1% se ha destacado en la producción de cobre a partir de minerales de hierro (Poveda Bonilla, 2021).

Producción de cobre en Colombia

Colombia cuenta con una ubicación estratégica, alberga considerables reservas de cobre que aún no han sido explotadas ni evaluadas en su totalidad . No obstante, la diferencia en las reservas de cobre colombiano en comparación con otros países es evidente. Los recursos inferidos sugieren un total de 4,210,556 toneladas, de las cuales 1.4 millones de toneladas son reservas probables y probadas (Ávila Pinto, 2021). Así mismo, es crucial destacar que existen extensas áreas en el país que aún no han sido exploradas, lo que podría resultar en una subestimación de la verdadera capacidad de producción de cobre en el país. En la región de Córdoba, específicamente en la Serranía de Ayapel, así como en los departamentos de Antioquia y Chocó, al norte de la Cordillera Occidental, se están desarrollando los proyectos más significativos en la búsqueda de este mineral. La perspectiva de estos proyectos mineros se alinea con la expansión de las energías renovables, evidenciado por el hecho de que el 11% de las solicitudes de títulos mineros en 2020 estuvieron vinculadas a la extracción de cobre (Ávila Pinto, 2021).

La producción de cobre ha cobrado gran relevancia en el país y se ha convertido en una oportunidad para el desarrollo. Actualmente, la actividad extractiva se focaliza exclusivamente en los depósitos de tipo sulfuros masivos volcánicos, siendo la mina subterránea El Roble, del municipio de Carmen de Atrato, Chocó la principal fuente de producción y que para el 2019 extrajo 7.600 toneladas, de la cual se obtienen concentrados de cobre, oro y plata (Ávila Pinto, 2021). La producción de cobre en Colombia y sus variaciones en los últimos años puede evidenciarse en la siguiente **Figura 3-4**.

Figura 3-4. Producción de cobre en Colombia



Fuente: elaboración propia a partir de indicadores económicos de la Asociación Colombiana de Minería (2023).

3.1 Prospectividad del cobre en Colombia

Desde los años 70 se realizaron estudios preliminares por INGEOMINAS (hoy Servicio Geológico Colombiano - SGC) en el cual se develó la existencia de un cinturón metalogénico a lo largo de los Andes colombianos. Esta área, vinculada a depósitos polimetálicos, ha dado lugar a grandes proyectos mineros en Latinoamérica (Guayara et al., 2021). En Colombia, se confirmó la extensión de este cinturón mediante el descubrimiento de múltiples prospectos de cobre, como Acandí, El Infierno, Río Chili, Piedrancha, Patascoy, El Pisno y Mocoa. En ese sentido, se identificó la ocurrencia de tres cinturones de depósitos tipo pórfidos cupríferos: Occidental con pórfidos como Pantanos-

Pegadorcito; Oriental que alberga pórfidos como Andes y El Infierno - Chili; y Central con pórfidos como El Tambo y Dominical. Además, se han detectado otros yacimientos de tipo Skarn y Sulfuros Masivos Vulcanogénicos (SMV).

Geográficamente, la región con mayor potencial para la producción de cobre se ubica en el Batolito de Mandé, un cinturón ubicado entre los límites de los departamentos de Chocó y Antioquia. Este sitio tiene el potencial de establecer a Colombia como un importante productor cuprífero a nivel mundial. Se compara con el sistema de fallas de la Cordillera de Domeyko en el norte de Chile, una zona reconocida por su abundancia de cobre y su relevancia a nivel global. A continuación se muestra el mapa del área potencial de mayor ocurrencia del cobre en Colombia en la **Ilustración 3-2** (Ávila Pinto, 2021).

Ilustración 3-2. Área del Batolito de Mande

Fuente: tomado de Ávila Pinto (2021).

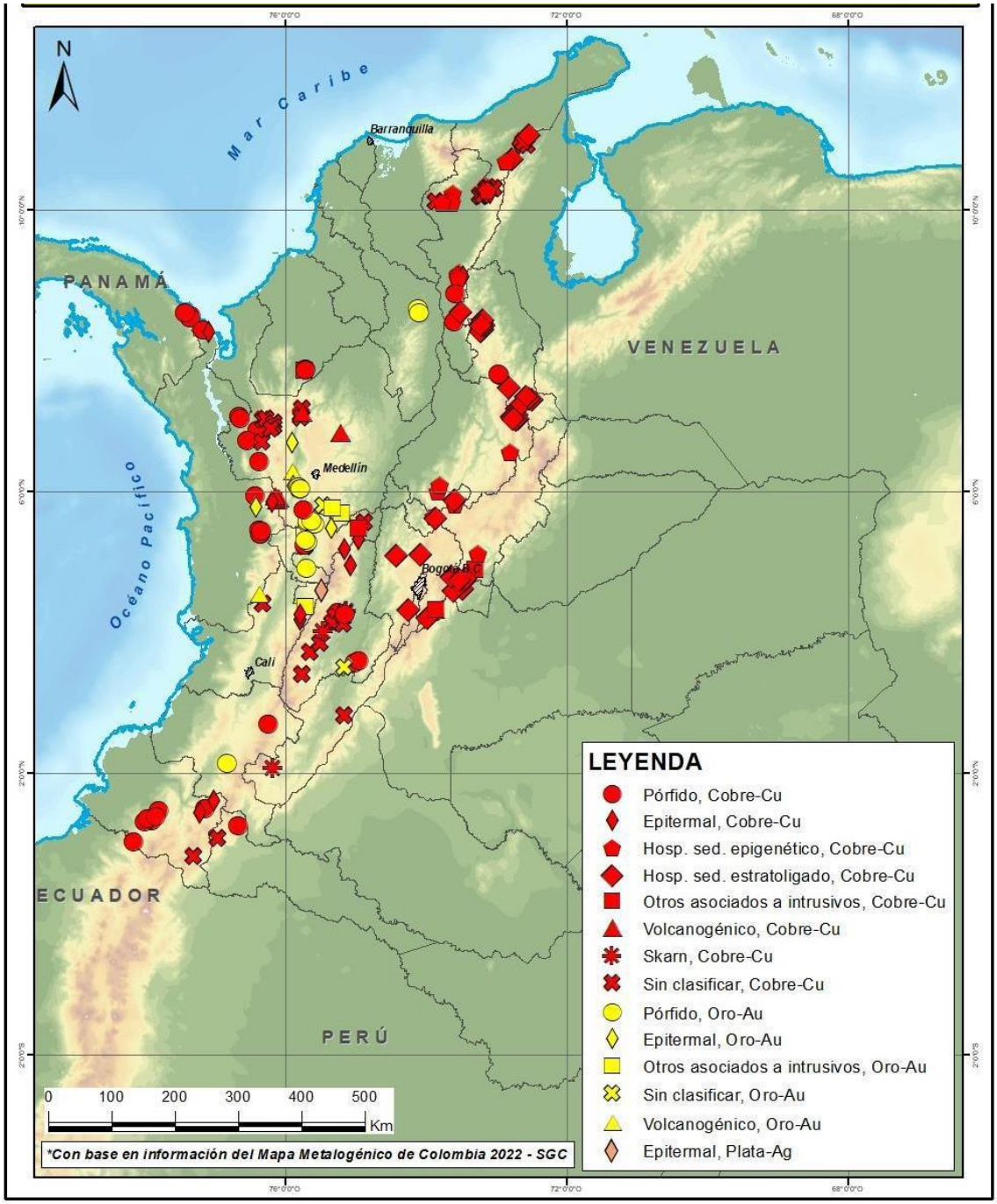
La extensa región del Batolito de Mandé, con una amplitud de alrededor de 200 kilómetros y un ancho promedio de 20 kilómetros, es un sitio de gran interés para la producción de cobre. Análisis preliminares indican hallazgos de muestras con hasta un 2,28% de

contenido de este mineral, superando significativamente la producción de las minas más productivas del mundo (Ávila Pinto, 2021). Este descubrimiento en el Batolito de Mandé podría posicionar a Colombia como un notorio productor de cobre a nivel mundial. Sin embargo, esta zona representa un área de especial interés ambiental por albergar una gran diversidad de bosques, incluyendo manglares, bosques húmedos y páramos. También, habitado por comunidades indígenas y afrocolombianas. Una parte significativa está protegida como territorios colectivos étnicos, mientras que algunas áreas no tienen titularidad étnica. Aproximadamente el 12,68% está bajo protección de reservas y parques nacionales (Ángel Amaya et al., 2019). Lo expuesto, cuestiona del verdadero desarrollo en los territorios en la medida que prevalezca el crecimiento económico y se dejen de lado las variables ecológicas y sociales que contribuyen a la sustentabilidad de los territorios en donde se pretenden desarrollar estas actividades mineras.

3.1.1 Ubicación y delimitación de los principales depósitos de cobre

Para mostrar la ubicación y delimitación de los principales depósitos de cobre se utilizará como base el mapa metalogénico de Colombia, el cual presenta a escala regional la distribución espacial y temporal de los depósitos, ocurrencias o manifestaciones minerales (metálicos, no metálicos y energéticos) más importantes del país, que para el presente estudio se enfatizará en el cobre y su distribución a lo largo del país. Colombia presenta condiciones geográficas y geológicas favorables para la formación de depósitos minerales, como cobre, oro, cobre-oro o zinc. La **Ilustración 3-3** muestra diversos tipos de depósitos asociados a las cordilleras del país. Sin embargo, es importante señalar que la existencia de estos depósitos no garantiza automáticamente su viabilidad económica. A continuación se adjunta a modo general el mapa de ocurrencias y depósitos de cobre y cobre asociado con base al mapa metalogénico de Colombia.

Ilustración 3-3. Mapa de ocurrencias y depósitos de Cu y Cu asociado.



Fuente: Tomado de Poveda Forero et al., (2023).

La **Ilustración 3-3** ofrece una visión de los diferentes tipos de depósitos asociados al elemento cobre y su distribución en Colombia. De esta manera, se listan a continuación las ocurrencias o prospectos identificados como un ejemplo de su ubicación en la **Tabla 3-3**. Es importante resaltar que las ocurrencias o prospectos identificados no asegura que se trate de depósitos consolidados.

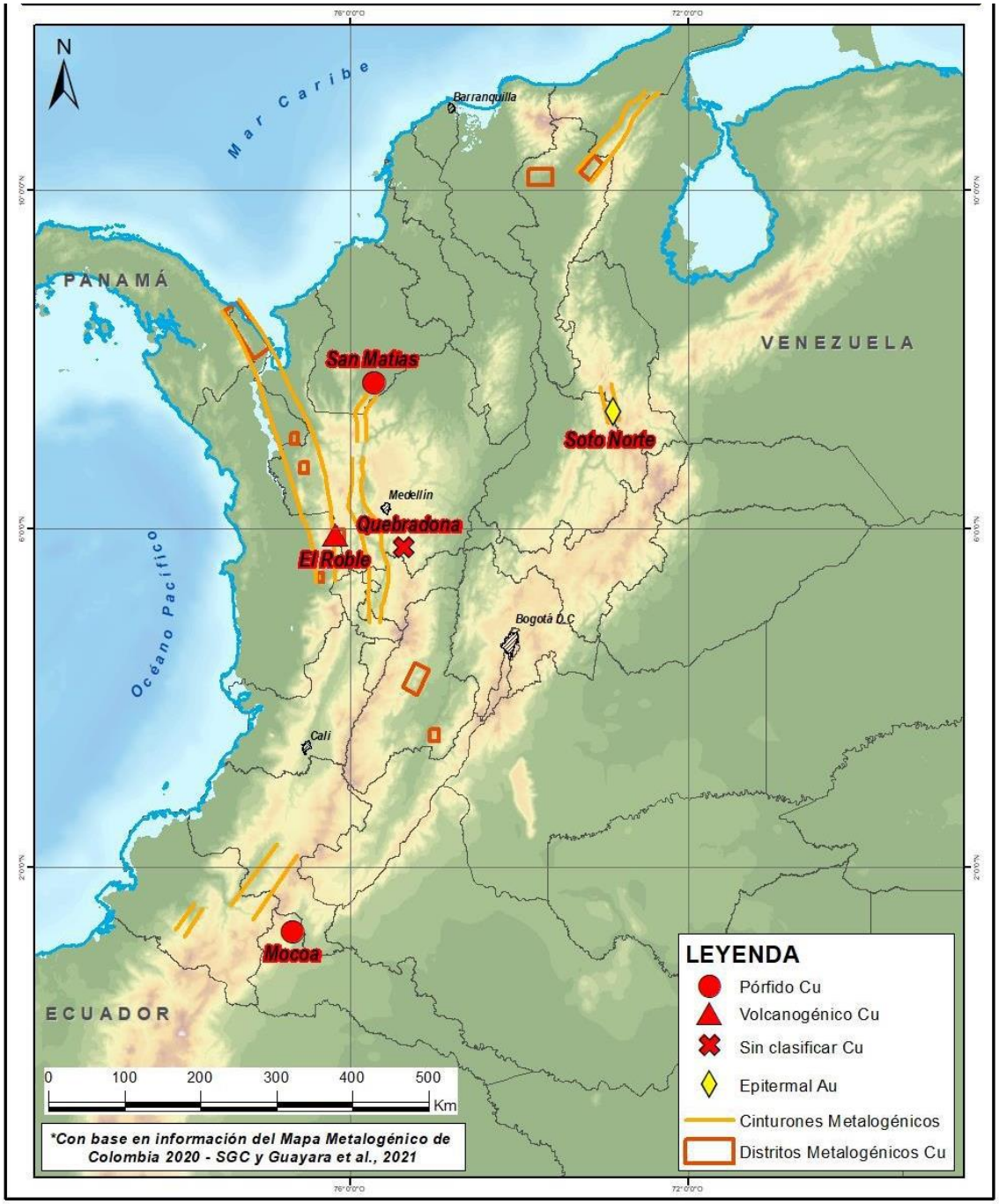
Tabla 3-3. Listado de ocurrencias, prospectos y depósitos de cobre en Colombia

Tipo de depósito	**Localización**
Pórfidos de cobre, Cu-Mo, Cu-Au, Cu Mo Au.	Mocoa [Cu-Mo] (Putumayo); Quebradona [CuAu], Pantanos Pegadorcito [Cu-Mo] (Antioquia).
Pórfidos de Au-Cu y pórfidos sin clasificar.	Titiribí, Proyecto La Mina y Yarumalito (Antioquia); El Poma (Risaralda).
Otros depósitos asociados a intrusivos: IOCG (Iron oxidecopper-gold).	El Alacrán-San Matías (Córdoba).
Otros depósitos asociados a intrusivos: sin clasificar.	El Carmen (Guajira); La Cabaña – San Martín de Loba (Bolívar).
Depósito epitermal oro-plata-cobre de alta sulfuración	Angostura - Soto Norte (Santander).
Otros depósitos epitermales (otros sin clasificar).	Buriticá (Antioquia); San Miguel (sur de Bolívar); La Palma Riosucio-Bagadó (Chocó).
Depósitos volcanogénicos de cobre.	El Roble (Chocó), El Dovio (Valle del Cauca), Anzá (Antioquia).
Skarn de cobre.	El Sapo y Mina Vieja Payandé (Tolima).
Hospedado en sedimentos epigenético.	Guavio-Gachalá (Cundinamarca); La Lucha, Camperucho y El Rincón-San Diego (Cesar).
Hospedado en sedimentos – estratoligado	Carmen de Carupa, Machetá, El Sapo (Cundinamarca).
Depósitos sin clasificar.	Depósitos en Tolima, Antioquia, Huila, Cesar y otros.

Fuente: elaboración propia a partir de Poveda Forero et al. (2023).

El mapa metalogénico de Colombia reveló diversos cinturones metalogénicos los cuales presentan potencial para la exploración y posible explotación de depósitos de cobre. Específicamente, se dimensiona el cinturón pórfido-epitermal de Cu-Au del Eoceno en Nariño, el cinturón pórfido-epitermal de Cu-Au entre Nariño y Cauca, el cinturón pórfido-epitermal de Au-Ag-(Cu) en Santander y Norte de Santander (donde se encuentra el proyecto Soto Norte), el cinturón pórfido-epitermal de Au-Cu (donde se ubica la mina Buriticá), el cinturón pórfido-epitermal de Cu-Au entre Antioquia y Córdoba (que incluye el proyecto San Matías), el cinturón pórfido-epitermal de Cu-Mo-(Au) entre Antioquia y Chocó (con los distritos metalogénicos de Andagueda, Pantanos Pegadorcito, Murindó, Acandí y El Roble), y el cinturón hospedado en sedimentos de Cu-Ag (con el distrito metalogénico de Serranía del Perijá). También se destacan los distritos metalogénicos de cobre de Rovira y Natagaima en Tolima, así como Camperucho en Cesar (Poveda Forero et al., 2023). La **Ilustración 3-4.** Cinturones, distritos metalogénicos y depósitos de interés de cobre en Colombia presenta visualmente los cinturones, distritos metalogénicos de cobre y los depósitos mencionados.

Ilustración 3-4. Cinturones, distritos metalogénicos y depósitos de interés de cobre en Colombia



Fuente: tomado de Poveda Forero et al. (2023); Guayara et al. (2021).

De esta manera, algunos de los proyectos más relevantes actualmente en Colombia respecto a la minería del cobre son los siguientes (Véase la **Tabla 3-4**).

Tabla 3-4. Proyectos de interés estratégicos de cobre en Colombia

Proyecto	**Empresa**	**Ubicación**	**Tipo de deposito**	**Elementos asociados**
El Roble	Ático Mining Corp	Carmen de Atrato, Choco, Cordillera Occidental	Volcánico de sulfuros masivos (VMS)	Cu, Au, Ag, Zn
Quebradona	AngloGold Ashanti	Jericó, Antioquia,	Pórfido Cu-Au calco-alcalino	Cu, Au, Ag, Mo
Soto Norte	Sociedad Minera de Santander-MINESA (Mubadala Investment Company)	California-Santander	Epitermal de alta sulfuración	Au, Cu, Ag, Mo, As, W
Mocoa	Libero Copper & Gold Corp.	Mocoa, Putumayo	Pórfido Cu-Mo	Cu, Mo
San Matías	Córdoba Minerals Corp.	Puerto Libertador, Córdoba	El Alacrán: híbrido entre IOCG y CRD8 que se asocia a una fuente porfirítica. Montiel y Costa Azul: pórfidos Cu-Au-Ag	Cu, Au, Ag (Mo, Zn)

Fuente: Tomado de Poveda Forero et al. (2023).

Lo anterior, destaca los principales proyectos mineros enfocados en el cobre, como El Roble, Quebradona, Soto Norte, Mocoa y San Matías, todos ellos fundamentales para posicionar a Colombia como un potencial productor global. Por ejemplo, el proyecto Quebradona, gestionado por la empresa Anglo Gold Ashanti, es un proyecto de minería

subterránea en Jericó, Antioquia, actualmente en la fase de análisis para un nuevo estudio de impacto ambiental (EIA), Soto Norte, a cargo de Aris Mining y un fondo árabe, es un megaproyecto actualmente detenido por la falta de licenciamiento ambiental. Otros en consideración incluyen Libero Cobre en Mocoa y El Alacrán cerca de Puerto Libertador, Córdoba, operado por Minerales Córdoba. La empresa está avanzando en el estudio de factibilidad y el desarrollo del estudio de impacto ambiental (EIA), la producción de cobre podría iniciar en 2026, sujeto a licenciamiento y construcción de la mina. De manera preliminar, se destaca que los puntos geográficos potenciales de explotación de cobre como los mencionados en los proyectos previamente, presentan dinámicas sociales, económicas y ecológicas propias que podrían ser afectadas por la actividad extractiva. En tal sentido, al analizar la ubicación geográfica de estos proyectos en relación con algunas disposiciones del ordenamiento ambiental y territorial nacional es evidente que la extracción de cobre da lugar a la aparición de considerables conflictos ambientales debido a que los títulos mineros se ubican en zonas habitadas por comunidades étnicamente diversas con dinámicas y vocación económica propias del territorio, así mismo, la presencia de zonas de protección ecológica y ecosistemas estratégicos. Esta situación aumenta significativamente el riesgo de generación de conflictos ambientales (Cáceres Gaitán, 2023).

En la actualidad, existen concesiones mineras designadas como Proyectos de Interés Nacional (PIN) que contribuyen a la extracción de cobre en Colombia, como es el caso del Roble y Buriticá. El Roble es particularmente notable al contar con informes de recursos y reservas bajo estándares internacionales relacionados con el cobre (Poveda Forero et al., 2023). En el caso de la minera del Roble ubicada en el departamento del Choco, específicamente, el municipio de Carmen de Atrato, se observa una mayor proporción de personas con necesidades básicas insatisfechas (NBI) en los centros poblados y áreas rurales dispersas en comparación con las cabeceras municipales. Sin embargo, el sector económico con mayor contribución al PIB nacional en el departamento de Chocó durante 2022 fue el de explotación de minas y canteras (Poveda Forero et al., 2023), lo cual no significa que las condiciones de vida de las personas mejoren, al contrario como se plantea en el debate sobre la teoría de la "Maldición de los Recursos Naturales". Según Auty & Warhurst (1993), en países con un bajo nivel de desarrollo, la abundancia de recursos

naturales puede desencadenar un círculo vicioso que impide el desarrollo económico, resultando en una maldición que frena el crecimiento. En los aspectos ecológicos, se han presentado denuncias por los impactos de la actividad minera en la contaminación del río Atrato, como también, la falta de aplicación de estándares técnicos o de seguridad en la gestión de los relaves situada cerca del río, omitiendo el riesgo de inundación o colapso en caso de fallo de los depósitos (Cáceres Gaitán, 2023).

Los títulos mineros del proyecto Libero cobre de Mocoa se superponen con la Reserva Forestal Protectora Nacional de la Cuenca Alta del río Mocoa y territorios ancestrales de los pueblos Kamëntsá e Inga. En respuesta al anuncio de exploración por parte de Libero Cobre Ltda., en abril de 2022, Corpoamazonía y el Juzgado Segundo Penal del Circuito de Mocoa suspendieron todas las actividades mineras en el área. Esta decisión se tomó debido a la posible intervención en reservas forestales no susceptibles a minería y la falta de consulta previa a las comunidades indígenas, requisito incluso en la fase de prospección en zonas con presencia étnica (Cáceres Gaitán, 2023). Por su parte, el proyecto Quebradona destaca por tener una proyección de minería a gran escala, sin embargo, la información presentada en sus estudios de impacto ambiental ha dejado entrever los graves impactos que un proyecto de esa magnitud tendría en una región que destaca por sus variadas formaciones terrestres, valles interandinos, vertientes protegidas, páramos, lagunas, farallones, formaciones kársticas, cerros y bosques. Además, alberga el Parque Nacional Natural Las Orquídeas y ocho áreas protegidas, que presentan diversos paisajes, vegetación y fauna. La población, de alrededor de 377.482 personas, se conoce culturalmente como paisas, siendo mayormente mestiza, aunque también incluye comunidades indígenas (Embera Chamí y Embera Katío) y afrocolombianas con tradiciones y culturas propias de su ámbito de desarrollo (Granda Álvarez, 2021). Así mismo, la empresa Aris Mining con su proyecto Soto Norte presenta conflictos debido a que el título de extracción de cobre se encuentra a 1,5 km de los Parques Naturales Regionales de Páramo de Santurbán y Sisavita (Poveda Forero et al., 2023). Aun cuando no significa una superposición geográfica directa, es evidente que la puesta en marcha del proyecto traerá implicaciones al área de influencia incluida las personas y las áreas protegidas.

Lo anterior mencionado, es una referencia de las problemáticas ambientales documentadas de las empresas y proyectos extractivos de cobre en Colombia. No

obstante, en el siguiente capitulo, se ampliará las implicaciones ambientales de la extracción de cobre en Colombia con el fin de construir la propuesta de criterios de sustentabilidad fuerte que aborden tales implicaciones presentadas en los proyectos mineros de cobre.

3.1.2 Apuestas institucionales y marco legal

En Colombia, la minería de cobre y las actividades vinculadas a minerales están sujetas a diversas leyes y reglamentos aplicables al sector minero y ambiental.

El Decreto 2811 de 1974, por el cual se dicta el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, también, señala las zonas en las cuales no se pueden desarrollar actividades mineras. Estas zonas hacen referencia a las áreas de uso exclusivo para la agricultura y ganadería, las reservas ecológicas y las que presenten incompatibilidad para el desarrollo de la actividad.

> El **Artículo 39** establece medidas para prevenir y controlar los impactos ambientales derivados del uso y explotación de recursos naturales no renovables. Estas medidas abarcan aspectos como el manejo del agua en la minería, la gestión de residuos mineros, la prevención de la contaminación en la exploración petrolera, y la regulación del transporte de sustancias peligrosas.

La Constitución Política de 1991, brinda un panorama claro sobre el sector minero en varios de sus artículos:

> El **Artículo 80** establece que: "*El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados*".

El **Artículo 332** establece que: "*El Estado es propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables, sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes*".

Por último, el **Artículo 360** establece que "*la explotación de un recurso natural no renovable causará, a favor del Estado, una contraprestación económica a título de regalía, sin perjuicio de cualquier otro derecho o compensación que se pacte. La ley determinará las condiciones para la explotación de los recursos naturales no renovables".*

La Ley 685 de 2001 es el Código de Minas vigente, el cual engloba el marco legal para el sector minero y regula las relaciones entre los organismos y entidades del Estado y de los particulares entre sí, tanto en lo que respecta a la exploración, extracción, procesamiento, transporte, aprovechamiento y venta de los recursos no renovables presentes en el suelo o subsuelo, independientemente de si son de propiedad estatal o privada. Con la expedición del presente Código de Minas se unifico la figura de titulación minera a la figura jurídica denominada contrato de concesión minera para la exploración y explotación minera.

Artículo 34. Zonas excluibles de la minería. No podrán ejecutarse trabajos y obras de exploración y explotación mineras en zonas declaradas y delimitadas conforme a la normatividad vigente como de protección y desarrollo de los recursos naturales renovables o del ambiente y que, de acuerdo con las disposiciones legales sobre la materia, expresamente excluyan dichos trabajos y obras. Las zonas de exclusión mencionadas serán las que se constituyan conforme a las disposiciones vigentes, como áreas que integran el sistema de parques nacionales naturales, parques naturales de carácter regional y zonas de reserva forestales. Estas zonas para producir estos efectos deberán ser delimitadas geográficamente por la autoridad ambiental con base en estudios técnicos, sociales y ambientales con la colaboración de la autoridad minera, en aquellas áreas de interés minero.

Para que puedan excluirse o restringirse trabajos y obras de exploración y explotación mineras en las zonas de protección y desarrollo de los recursos naturales renovables o del ambiente, el acto que las declare deberá estar

> expresamente motivado en estudios que determinen la incompatibilidad o restricción en relación con las actividades mineras. No obstante, la autoridad minera previo acto administrativo fundamentado de la autoridad ambiental que decrete la sustracción del área requerida, podrá autorizar que en las zonas mencionadas en el presente artículo, con excepción de los parques, puedan adelantarse actividades mineras en forma restringida o sólo por determinados métodos y sistemas de extracción que no afecten los objetivos de la zona de exclusión. Para tal efecto, el interesado en el Contrato de Concesión deberá presentar los estudios que demuestren la compatibilidad de las actividades mineras con tales objetivos.

La Ley 141 de 1994, Por la cual se crean el Fondo Nacional de Regalías, la Comisión Nacional de Regalías, se regula el derecho del Estado a percibir regalías por la explotación de recursos naturales no renovables, se establecen las reglas para su liquidación y distribución y se dictan otras disposiciones.

El Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014, reglamentado por la Ley 1450 de 2011, identificó al sector minero-energético como uno de los motores principales para impulsar el crecimiento económico de Colombia. Dentro de este marco, se establecieron diversas iniciativas destinadas a consolidar la posición del país a nivel global como un país con un importante potencial minero (MME, 2016).

> En el **Artículo 108** establece que "*la autoridad minera determinará los minerales de interés estratégico para el país, respecto de los cuales se podrá delimitar áreas especiales en áreas que se encuentre libres, sobre las cuales no se recibirán nuevas propuestas ni se suscribirán contratos de concesión minera. Lo anterior con el fin de que estas áreas sean otorgadas en contrato de concesión especial a través de un proceso de selección objetiva, en el cual la autoridad minera establecerá en los términos de referencia, las contraprestaciones económicas mínimas distintas de las regalías, que los interesados deben ofrecer".*
>
> El **Artículo 112** establece que: "*para los fines de control de la comercialización de minerales, el Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS, o quien*

haga sus veces, deberá publicar la lista de los titulares mineros que se encuentren en etapa de explotación y que cuentan con las autorizaciones o licencias ambientales requeridas. Esta lista también debe incluir la información de los agentes que se encuentran autorizados para comercializar minerales". Aplicando la legalidad en la extracción de minerales según lo establecido en el artículo 30 de la Ley 685 de 2001.

También, en el artículo 204, parágrafo 1, se prohíbe cualquier actividad minera en áreas de reserva forestal protectora y se establece claramente que estas reservas no pueden ser utilizadas para la minería ni sustraídas para tal fin.

El **Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026,** fomenta la reactivación industrial y el cambio en la matriz energética priorizando el reconocimiento de los servicios ecosistémicos, los recursos naturales y el trabajo como los elementos fundamentales de la producción. En ese sentido, Se busca reducir la dependencia de los hidrocarburos y la minería, mientras se garantiza que las comunidades se beneficien de las energías alternativas. El sector minero-energético, representa una parte significativa del PIB nacional, aportando considerablemente a la inversión extranjera, las exportaciones y la generación de empleo. Además, contribuye con una suma considerable en regalías, provenientes tanto de la minería como de los hidrocarburos. La política minera será actualizada, enfocándose en aspectos como la gestión ambiental minera, la creación de mecanismos para la aprobación de instrumentos técnicos, el reconocimiento de derechos mineros ancestrales, y el uso de tecnologías para la fiscalización y promoción de la extracción de minerales estratégicos. Se implementarán acciones para generar nuevos recursos económicos a partir del aprovechamiento sostenible de los recursos minero-energéticos, y se promoverá la integración energética regional, centrada en la armonización regulatoria, la diversificación de la matriz energética hacia fuentes renovables, y el fortalecimiento tecnológico. Para aumentar el conocimiento sobre nuestros recursos y reservas, se llevará a cabo el Plan Nacional de Conocimiento Geocientífico, con el objetivo de mejorar la información y la investigación asociada a nuestros recursos energéticos y mineros, para una planificación más efectiva del uso del suelo y el subsuelo.

De esta manera, en su **Artículo 229 de** la Ley 2294 de 2023 que lo reglamenta, hace hincapié en:

> "*El Ministerio de Minas y Energía junto con el Servicio Geológico Colombiano estructurarán el Plan Nacional de Conocimiento Geocientífico, con el objeto de proveer conocimiento e información geocientífica a escalas adecuadas para la planificación y uso del suelo y el subsuelo, el cuidado y la gestión del agua, la evaluación y monitoreo de amenazas de origen geológico, la investigación y prospección de los recursos minerales estratégicos para la transición energética, la industrialización, la seguridad alimentaria y la infraestructura pública".*
>
> *"En desarrollo del Plan Nacional de Conocimiento Geocientífico, la autoridad minera nacional podrá delimitar y otorgar a pequeños y medianos mineros organizados bajo las figuras asociativas previstas en la ley, áreas de reserva estratégica minera con alto potencial para minerales estratégicos necesarios para la transición energética, la industrialización, la seguridad alimentaria y la infraestructura pública, de conformidad con lo previsto en el artículo 20 de la Ley 1753 de 2015".*

La Ley 2099 de 2021 por medio de esta ley se establecen disposiciones para la transición energética, la revitalización del mercado energético, la reactivación económica del país y otras disposiciones adicionales.

> **Artículo 23. Parágrafo** "*El Gobierno nacional establecerá instrumentos para fomentar e incentivar los trabajos de investigación y explotación de minerales utilizados en la fabricación de equipos para la producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución y reelectrificación de hidrógeno como medida orientada a diversificar la canasta minero-energética".*
>
> ***Artículo 24.*** *"El Ministerio de Minas y Energía promoverá la reconversión de proyectos de minera e hidrocarburos que contribuyan a la transición energética Para este propósito, la Agencia Nacional de Hidrocarburos y la Agencia Nacional*

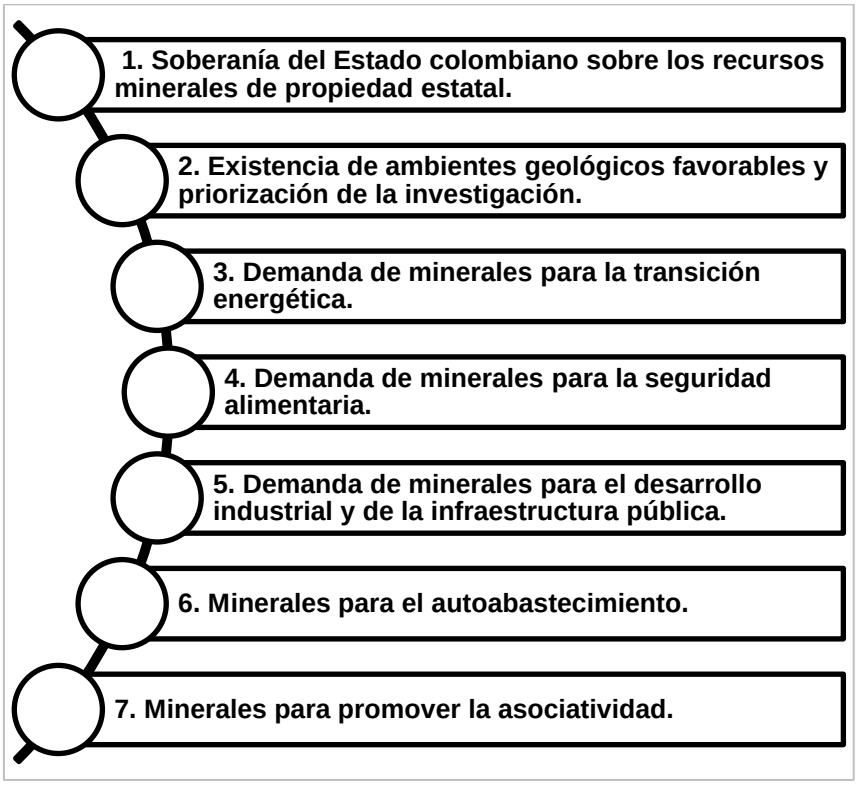
de Minería podrán diseñar mecanismos y acordar condiciones en contratos vigentes y futuros que incluyan e incentiven la generación de energía a través de Fuentes no Convencionales de Energía -FNCE, el uso de energéticos alternativos, y la captura, almacenamiento y utilización de carbono".

El CONPES 4075 del 2022 se configura como la política de la transición energética. Los datos presentados en este documento muestran que para el período 2012 y 2019, la inversión en la exploración minera en Colombia experimentó una reducción del 75 %. Es relevante subrayar que más de la mitad de los títulos mineros en fase de exploración se enfocan en metales preciosos, seguidos de cerca por los materiales de construcción, el carbón y otros minerales como el cobre y el níquel. Esta baja inversión en exploración minera resulta en un conocimiento limitado del potencial geológico del país, imprescindible para minerales estratégicos en la transición energética global, como el cobre, el níquel, el platino y el oro. Esta situación conlleva a retrasos en el desarrollo de proyectos mineros y a la disminución de oportunidades para atraer inversiones, tanto nacionales como extranjeras, que puedan contribuir al crecimiento económico y social de las regiones mineras del país.

Como parte de las líneas de acción del CONPES, se establece que la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) elaborará una estrategia dirigida a la producción de cobre, oro y otros minerales esenciales para respaldar la transición energética, basada en el potencial geológico de Colombia. Se desarrollará un plan subsectorial con el fin de establecer estrategias que impulsen la utilización de los recursos minerales disponibles en el país, especialmente el cobre, el oro y otros minerales estratégicos. Este enfoque busca atraer inversiones tanto nacionales como extranjeras para la exploración y la implementación de proyectos mineros. Estas acciones se llevarán a cabo en el período comprendido entre 2022 y 2027.

La Resolución Número 1006 Del 2023, por medio de la cual se determinan los lineamientos para actualizar el listado de los minerales de interés estratégico para el País, por parte de la Agencia Nacional de Minería haciendo uso de sus facultades otorgadas en el artículo 108 de la Ley 1450 de 2011. Por lo anterior, los lineamentos para la determinación de minerales de interés estratégico para el país se presentan a continuación en la **Figura 3-5**:

Figura 3-5. Lineamentos para la determinación de minerales de interés estratégico en Colombia



Fuente: Elaboración propia a partir de ANM (2023).

La identificación de minerales estratégicos para Colombia se basa en la política gubernamental hacia la transición de una economía extractiva a una productiva. Se busca maximizar el uso de materias primas minerales mediante procesos de beneficio y transformación, añadiendo valor a través de la producción industrial. Esto apoya la transición energética, la seguridad alimentaria y el desarrollo agrícola, garantizando a mediano plazo el autoabastecimiento de materias primas minerales. Además, se promueve la asociatividad de mineros para operaciones más competitivas o la formalización de actividades. De esta manera la presente resolución establece como minerales estratégicos para Colombia:

- Cobre (Cu) y sus minerales asociados, derivados o concentrados
- Níquel (Ni) y sus minerales asociados, derivados o concentrados

- Zinc (Zn) y sus minerales asociados, derivados o concentrados
- Metales del Grupo del Platino [Platino (Pt), Paladio (Pd), Rutenio (Ru), Rodio (Rh), Osmio (Os) e Iridio (Ir)] y sus minerales asociados, derivados o concentrados
- Hierro (Fe) y sus minerales asociados, derivados o concentrados
- Manganeso (Mn) y sus minerales asociados, derivados o concentrados
- Carbón metalúrgico
- Fosfatos [fosforita o roca fosfórica (P2O5 > 20 %) y roca fosfática (P2O5 < 20 %)] y sus minerales asociados, derivados o concentrados
- Minerales de Magnesio (Mg) y sus minerales asociados, derivados o concentrados
- Bauxita y demás minerales de Aluminio, y sus minerales asociados, derivados o concentrados
- Oro (Au) y sus minerales asociados o concentrados
- Esmeraldas y sus minerales asociados
- Materiales de construcción, limitados únicamente a arenas, gravas y arcillas
- Arenas silíceas, Silicio (Si) y sus minerales asociados, derivados o concentrados
- Caliza y sus minerales asociados, derivados o concentrados
- Yeso y sus minerales asociados, derivados o concentrados
- Cromo y sus minerales asociados, derivados o concentrados

Proyecto de ley 344 del 2023 por medio de la cual se busca la creación de la empresa colombiana de minerales **ECOMINERALES** y que según **Articulo 4** tendrá por objeto:

> *"Realizar en Colombia o en el exterior, actividades de exploración, construcción y montaje, explotación, cierre minero, transformación, beneficio, aprovechamiento y/o comercialización de minerales estratégicos y otros minerales, sus derivados y productos, principalmente orientados a la industrialización del país, transición energética, desarrollo agrícola e infraestructura pública, y cualquier actividad relacionada con las cadenas productivas y el apoyo a la promoción y la formalización del sector minero, para lo cual podrá realizar las actividades industriales y comerciales correspondientes, actividades de investigación, desarrollo e innovación, en toda la cadena productiva, directamente o por medio de contratos de diferente naturaleza, celebrados con personas naturales o jurídicas; públicas o privadas, nacionales o extranjeras".*

La exposición de motivos de este proyecto de ley afirma que el marco legal minero vigente concebido en la Ley 685 de 2001, no garantiza que los minerales estén disponibles para los planes económicos del gobierno. Bajo estas normativas, los concesionarios tienen la capacidad de decidir si los minerales se destinan al mercado local o internacional. Esto significa que minerales estratégicos como el ferroníquel de Cerromatoso en Córdoba o el cobre de la mina El Roble en Chocó se extraen y exportan sin que la industria local se beneficie. Por tanto, es esencial desarrollar una nueva perspectiva en la industria minera que planifique la extracción de minerales estratégicos y se coloque a disposición para impulsar el desarrollo económico y mejorar las condiciones sociales. En este contexto, la Empresa Colombiana de Minería **Ecominerales** juega un rol crucial en esta iniciativa.

En conclusión, la regulación minera Colombiana del actual Gobierno se estructura mediante una serie de leyes y decretos que establecen áreas de exclusión para la actividad minera y promueven la gestión sostenible de los recursos naturales. Estas disposiciones legales, como la Nueva Ley Minera y la Constitución Política, confieren al Estado la propiedad de los recursos no renovables y requieren contraprestaciones económicas por su explotación. Se enfatiza la necesidad de planificar el manejo de los recursos naturales para asegurar su conservación y el desarrollo sostenible del país. Se reconoce la importancia de los minerales estratégicos, como el cobre y el níquel, y se fomenta su exploración y explotación en consonancia con los objetivos de diversificación económica y transición energética. Sin embargo, este entramado normativo, que incluye la Ley 685 de 2001 (Código de Minas), la Ley 99 de 1993 y diversas disposiciones constitucionales, ha demostrado ser insuficiente para mitigar las tensiones de tipo social y ecosistémico que genera la minería del cobre. A pesar de que las leyes establecen principios como el desarrollo sostenible y la protección de los recursos naturales, su implementación práctica revela múltiples limitaciones y contradicciones que impactan tanto la resolución de conflictos ambientales como la capacidad de aplicar indicadores de sustentabilidad.

Por un lado, el Código de Minas prioriza la actividad extractiva como motor de desarrollo económico, mientras que la Ley 99 de 1993 enfatiza la necesidad de garantizar un ambiente sano y la preservación de los recursos naturales. Esta falta de articulación entre las normativas crea vacíos legales que perpetúan conflictos en territorios con alto potencial

minero, donde los derechos de las comunidades locales y la protección ambiental suelen verse relegados frente a intereses extractivos. Un ejemplo de ello es la limitada regulación sobre el cierre y poscierre de minas, una carencia crítica que contrasta con legislaciones más avanzadas, como la chilena, que establece lineamientos claros para esta etapa clave del ciclo de vida de la minería.

Asimismo, el marco legal actual no contempla con suficiente detalle la adaptación de los indicadores de sustentabilidad a las realidades territoriales. Esto es especialmente relevante en regiones como Colombia, donde las dinámicas sociales, económicas y ecológicas son altamente diversas. Aunque disposiciones como la Ley 2099 de 2021 y el CONPES 4075 de 2022 proponen estrategias para la transición energética y la diversificación de la matriz minera, carecen de mecanismos efectivos para garantizar que estos planes sean implementados con enfoque territorial y participativo. Esto dificulta la evaluación de variables críticas como el bienestar social, el manejo hídrico y la preservación de los ecosistemas, esenciales para la sostenibilidad fuerte.

En este contexto, el marco legal habilita parcialmente la implementación de indicadores de sustentabilidad, pero lo hace de manera fragmentada y poco consistente. Las tensiones derivadas de una consulta previa insuficiente, los vacíos en la legislación ambiental y minera, y la falta de armonización normativa limitan la capacidad de evaluar de manera integral los efectos de la minería en los ecosistemas y las comunidades. Además, la débil supervisión institucional y la escasa participación comunitaria dificultan la creación de una minería sostenible que priorice tanto la justicia ambiental como el desarrollo local.

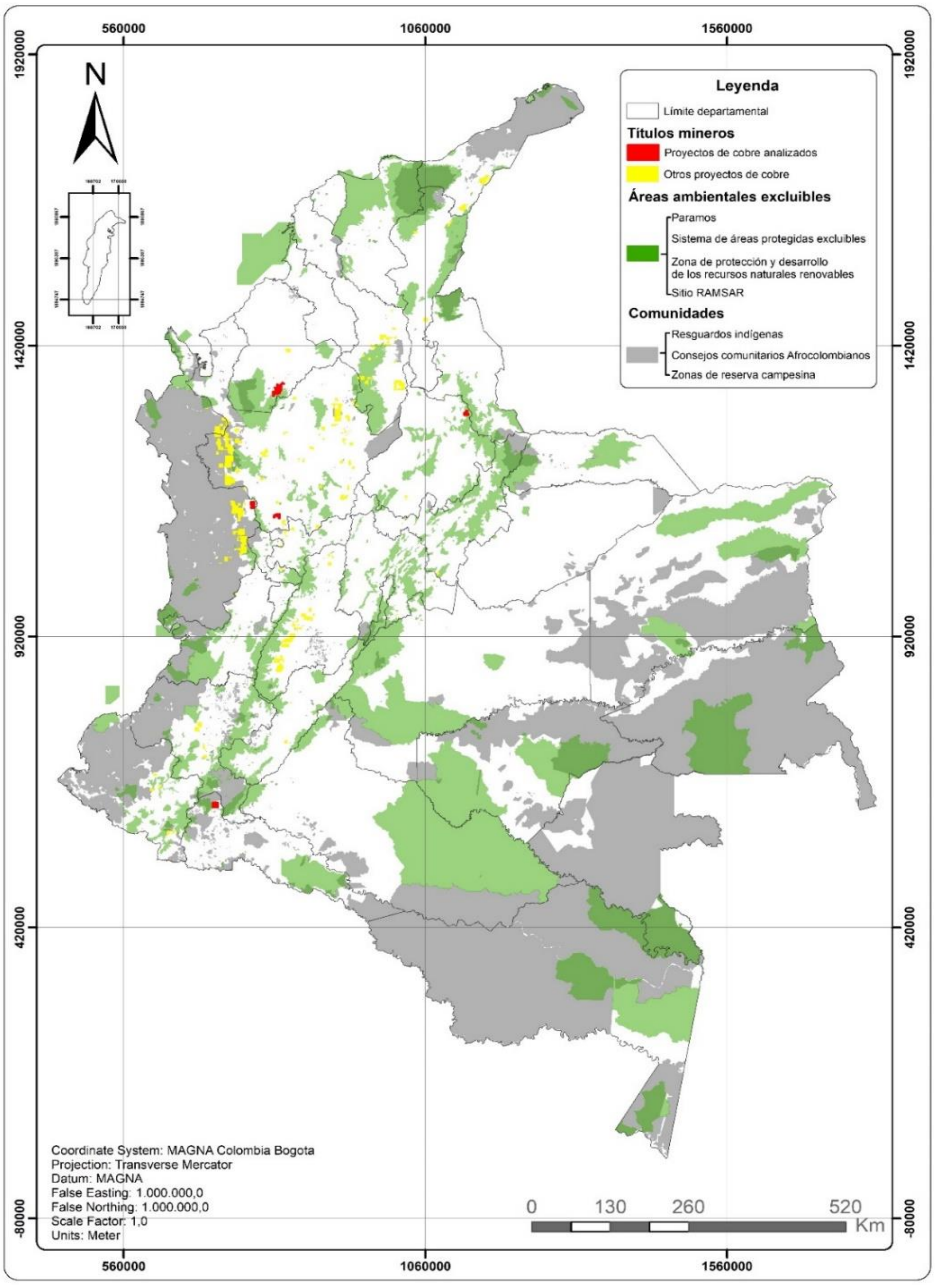
4. Implicaciones ambientales de la extracción de cobre para la transición energética en Colombia

La industria minera ha sido históricamente fuente de conflictos ambientales dado sus complejos impactos contaminantes en las zonas donde se desarrollan sus actividades, la evidencia internacional muestra que la extracción de minerales genera efectos negativos en áreas sociales y ecológicamente cercanas, impactando tanto la salud humana como la actividad agrícola (Orihuela et al., 2019). Países latinoamericanos como Chile y Perú han basado gran parte de sus economías en la explotación minera del cobre dando lugar a implicaciones ambientales complejas en términos sociales, económicos y ecológicos.

En Colombia, los depósitos de cobre se concentran geográficamente en la región occidental del país, destacándose los departamentos de Antioquia, Chocó y Tolima (ver **Ilustración 4-1**). Desde las etapas iniciales de los proyectos de minería cuprífera, como en los casos de Quebradona, Libero Cobre y El Roble, han surgido conflictos que reflejan la complejidad de la actividad extractiva en estos territorios. Al contrastar la ubicación de estos proyectos en un mapa con las áreas de importancia ecológica y las principales comunidades étnicas, se revela una preocupante superposición o, en algunos casos, una proximidad entre las zonas de minería de cobre, áreas protegidas y territorios habitados por comunidades étnicas. Esta realidad evidencia la necesidad de abordar la actividad minera desde una perspectiva que incluya las implicaciones ambientales en cuanto a los potenciales efectos de la minería en el área de su desarrollo.

De esta manera , se presenta a continuación la **Ilustración 4-1** que sintetiza la interrelación espacial entre los proyectos mineros, las áreas de protección ambiental y las comunidades étnicas en Colombia ofreciendo una representación visual de las dinámicas territoriales y los efectos que pueden dar lugar a potenciales conflictos ambientales.

Ilustración 4-1. Análisis de los principales proyectos de cobre, comunidades étnicas y áreas ambientales excluibles de Colombia

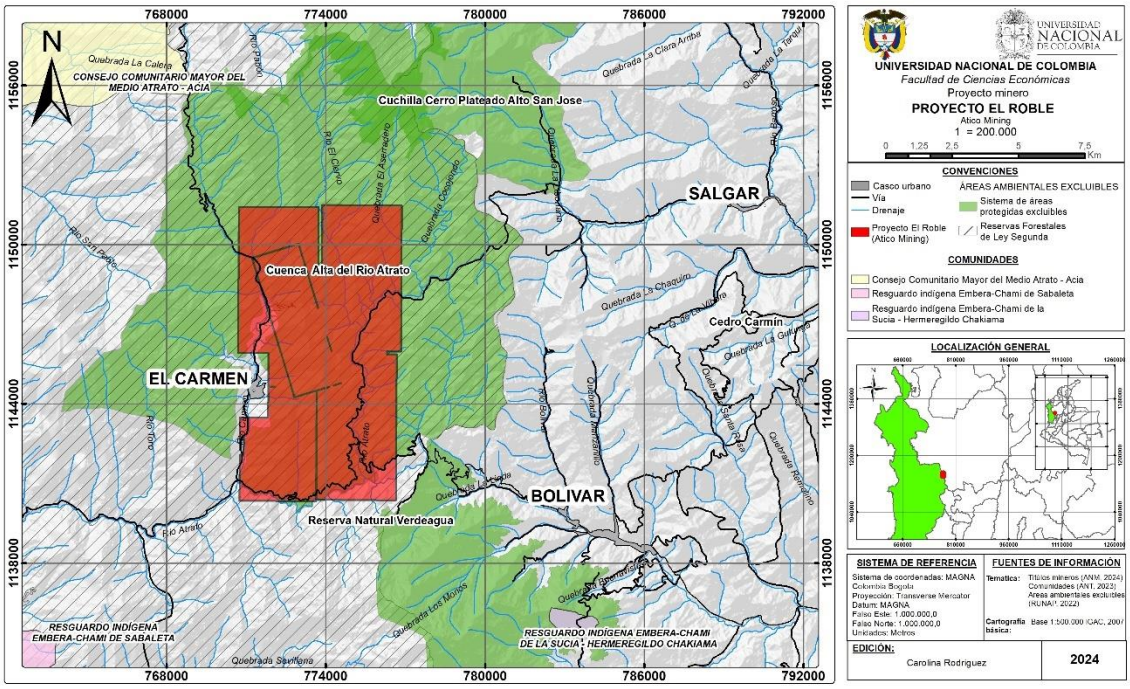


Fuente: elaboración propia a partir de datos de (ANM, 2024; ANT, 2024; RUNAP, 2024).

4.1 Proyecto El Roble

El proyecto de Minera El Roble S.A, se encuentra ubicado en el sector central de la cordillera occidental, en el departamento del Chocó, en el límite con el departamento de Antioquia, a tres kilómetros al norte del municipio de El Carmen de Atrato; más específicamente en la vereda el Roble. Los títulos de Minera El Roble S.A. están identificados bajo el Contrato de Concesión D2655 con código 9319 (explotación), los Contratos de Concesión L685 con códigos FJT-15R y FJT-15A (explotación), GK3-091 (construcción y montaje), y las Licencias de Exploración 00175-27, 00173-27 y 00172-27 de la Agencia Nacional de Minería (ANM). Estos títulos abarcan un área total de 6.362,4137 hectáreas (ANM, 2024). A continuación, se presenta en la **Ilustración 4-2** la ubicación del proyecto el Roble y las variables ambientales circundantes, cercanas y/o superpuestas al área de desarrollo.

Ilustración 4-2. Variables ambientales del proyecto minero de cobre El Roble



Fuente: elaboración propia a partir de datos de ANM (2024); ANT (2024); RUNAP (2024).

Potenciales efectos ecológicos

De acuerdo con los datos contrastados y la información presente en el visor Anna Minería (2024) se presentan cercanos al área de proyecto, distritos regionales de Manejo integrado, reservas forestales y ecosistemas de paramo relacionados a continuación en la siguiente **Tabla 4-1**:

Tabla 4-1. Potenciales efectos ecológicos proyecto El Roble

Zonas de riesgo ambiental	**Relación geográfica**	**Área/ Distancia**
Distrito Regional de Manejo Integrado Cuenca alta del Rio Atrato	Superposición	5922 ha
Río Atrato	Superposición	6 Km
Reserva forestal del pacifico	Superposición	6343 ha
Paramo delimitado Frontino – Urrao 'Del Sol Las Alegrías'	Cercanía	2,4 km
Reserva forestal protectora regional farallones de citara	Cercanía	0,366 km
Distrito Regional de Manejo Integrado Cuchilla Cerro Plateado Alto San José	Cercanía	3,05 km

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del visor ANNA Minería.

El Carmen de Atrato, ubicado en la región del Chocó biogeográfico, se destaca por su alta biodiversidad y recursos naturales. Este municipio es uno de los signatarios del Acuerdo Cero Extinción en Colombia, impulsado por organizaciones conservacionistas globales, y apoya la Reserva de la Sociedad Civil Reserva Natural Las Tangaras, que protege dos especies de aves en peligro de extinción: la Tángara de Tatamá y la Tángara Aurinegra. La Reserva también actúa como amortiguador para la cuenca del río Atrato, vital para la economía de miles de familias en el Chocó. En la Reserva predominan bosques húmedos premontanos, muy húmedos y pluviales montanos bajos, con neblinas frecuentes,

temperaturas entre 8° y 23°C, y una precipitación anual superior a los 4000 mm (Poveda Forero et al., 2023).

El Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) de la Cuenca Alta del río Atrato, establecido en 2017 tiene como objetivo restaurar y proteger los ecosistemas de páramo, subpáramo, bosque altoandino y andino del Pacífico, promoviendo la sostenibilidad de los recursos naturales. Este DRMI abarca aproximadamente 18,000 hectáreas, incluyendo parte de los páramos del Sol y Las Alegrías sector Cerro Plateado donde nace el río Atrato. (Poveda Forero et al., 2023). Este DRMI alberga ecosistemas estratégicos de relevancia tanto regional como nacional, destinados a proteger el nacimiento del río Atrato y sus numerosos arroyos, quebradas y ríos. Posee una notable diversidad de fauna, con más de 360 especies distribuidas en 102 familias y 280 géneros, y una rica variedad de flora con más de 300 especies en 102 familias y 183 géneros identificados hasta ahora (Jiménez Ortega et al., 2020). También, alberga especies como el oso de anteojos catalogadas como vulnerables.

El Río Atrato, el más caudaloso de Colombia y el tercero más navegable después del Magdalena y el Cauca, nace en el Cerro Plateado, al oeste de la cordillera de los Andes, a 3.900 metros sobre el nivel del mar. Su curso de 750 kilómetros, de los cuales 500 son navegables, finaliza en el golfo de Urabá, en el mar Caribe. Las riberas del Atrato han sido habitadas ancestralmente por numerosas comunidades afrocolombianas e indígenas. También se encuentran comunidades mestizas, descendientes de migrantes de diversas partes del país . La Sentencia T-622 de 2016, emitida por la Corte Constitucional, declara al río Atrato, su cuenca y sus afluentes como sujetos de derechos para garantizar su protección, conservación y mantenimiento. Este fallo reconoce al río como un eje vital, conductor de relaciones, relatos y memorias de los pueblos étnicos y las comunidades que habitan sus ecosistemas naturales.

La Reserva Natural Farallones del Citará, ubicada en los municipios de Carmen de Atrato y Bagadó en el Chocó, y los Andes, Ciudad Bolívar y Betania en Antioquia, es un área de aproximadamente 46,625 Ha con una alta relevancia ecológica a nivel nacional por su diversidad en fauna, entomofauna, avifauna y flora, y por su papel en varios corredores ecológicos y su riqueza hídrica. Por otro lado, El Páramo Frontino Urrao, también conocido como 'Del Sol Las Alegrías,' es uno de los complejos de paramo más grande de la cordillera

occidental, situado en la esquina norte del proyecto. Esta zona es de especial importancia ecológica debido a su alto valor en la provisión de servicios ecosistémicos, particularmente relacionados con el ciclo hidrológico y la disponibilidad de recursos hídricos. Además, el bosque alto andino presente en esta área protegida es crucial para la conservación de las fuentes de agua que abastecen a las comunidades circundantes. Este territorio también funciona como un importante corredor biológico para especies como el oso andino, que actualmente se encuentra en la categoría vulnerable (VU) según la lista roja de la UICN (Corantioquia, 2018).

El proyecto minero de cobre ha suscitado serias preocupaciones debido a la falta de monitoreo ambiental adecuado, sumado a denuncias sobre vertimientos no autorizados y perforaciones exploratorias en la bocatoma de agua del municipio. Estas acciones han provocado la presencia de sulfatos y concentraciones elevadas de metales y metaloides tóxicos en las aguas que fluyen río abajo de la mina. En consecuencia, la mina El Roble está teniendo un impacto significativo en el río Atrato, que atraviesa de norte a sur el municipio de Carmen de Atrato y es vital para el abastecimiento de ciudades capitales y centros urbanos, dado que allí se encuentra su nacimiento (Poveda Forero et al., 2023). Esta situación subraya la necesidad de fortalecer la regulación y el control ambiental en regiones donde las actividades extractivas generan impactos sobre los recursos naturales esenciales, como el agua. La falta de monitoreo adecuado y las infracciones ambientales ponen en peligro la integridad de los ecosistemas del territorio, generando tensiones sociales al afectar fuentes hídricas fundamentales para las comunidades, a pesar de que el río Atrato, su cuenca y sus afluentes fueron designados como sujetos de derechos para su protección, conservación, mantenimiento y restauración, bajo la responsabilidad del Estado y las comunidades étnicas según la Sentencia T-622/16 (2016) .

Potenciales efectos sociales

El análisis de los datos contrastados y la información presente en el visor Anna Minería (2024) se constata que en el área de desarrollo del proyecto no se encuentran zonas de reserva campesina, sin embargo, si se presentan cercanos al área de proyecto, resguardos indígenas y consejos comunitarios relacionados a continuación en la **Tabla 4-2**:

Tabla 4-2. Potenciales efectos sociales proyecto El Roble

Zonas de riesgo ambiental	**Relación geográfica**	**Área/ distancia**
Resguardo Indígena Emberá-Chami De Sabaleta	Cercanía	8,5 km
Resguardo Indígena Emberá Katío De El Fiera	cercanía	10 km
Resguardo Indígena Emberá - Chami De La Sucia - Hermeregildo Chakiama	cercanía	7,2 km
Consejo Comunitario Mayor Del Medio Atrato - Acia	cercanía	4,6 km

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del visor ANNA Minería.

En la región se encuentran resguardos indígenas en los municipios de Ciudad Bolívar y El Carmen de Atrato, habitados por los pueblos Emberá Chami, Emberá De Lanas y Emberá Katío. Estos resguardos incluyen Hermeregildo Chakiama (La Sucia), la Puria, el Doce Quebrada Borbollón, Abejero, el Dieciocho, Río La Playa, el Fiera y Sabaleta, según la (ANT, 2024). Los Emberá eran conocidos como indígenas “chocó” o “chocoes” durante la época prehispánica. En el departamento del Chocó, la mayoría del pueblo Emberá Katío reside en las zonas selváticas del Pacífico, donde son conocidos culturalmente como Katío y referidos localmente como Dóbida y Pusábida. Su asentamiento se encuentra principalmente en las cercanías de los ríos, debido a que es ahí donde culturalmente desarrollan todas sus actividades económicas, políticas, religiosas y culturales (Romero López & Muñoz, 2019). La comunidad Emberá en Carmen de Atrato ha sido inevitablemente afectada por la operación de la Empresa Minera El Roble. Aunque la mina no se encuentra dentro de sus territorios, estas comunidades enfrentan las consecuencias, especialmente por la contaminación de las fuentes hídricas de las que dependen para su vida y subsistencia. Además, muchos de estos territorios en el Atrato han sido golpeados por el conflicto armado, lo que agrava el deterioro de las condiciones básicas, el bienestar y la seguridad de los pueblos indígenas dejando a su paso desplazamientos, amenazas y

violaciones de sus derechos colectivos (Comisión Interétnica de la Verdad de la región Pacífico, 2021).

Así mismo, el Consejo Comunitario Mayor del Medio Atrato – ACIA, que tiene bajo su adjudicación cerca de 695,245 hectáreas desde 1997, se encuentra a unos 5 km del proyecto minero El Roble. El consejo comunitario ha librado importantes batallas para lograr el reconocimiento de la propiedad colectiva de sus territorios, que han habitado durante generaciones. Para estas comunidades, el concepto de territorio trasciende un simple espacio físico para vivir o cultivar. El territorio abarca todos los recursos naturales, renovables y no renovables, así como las aguas, la fauna, la flora, los minerales y las fuerzas sobrenaturales que rigen y habitan en la naturaleza para el desarrollo y bienestar de sus habitantes. (Comisión Interétnica de la Verdad de la región Pacífico, 2021). No obstante, la contaminación del Rio Atrato su cuenca alta y media amenaza a las comunidades asentadas en las riberas del rio, siendo este el eje a partir del cual gira la vida y el sustento de las comunidades de generación tras generación.

La minería de cobre en la región ha afectado profundamente a las comunidades indígenas y afrodescendientes cercanas, como los pueblos Emberá y los miembros del Consejo Comunitario Mayor del Medio Atrato. La contaminación de las fuentes hídricas, especialmente del río Atrato, amenaza su subsistencia y el bienestar integral de sus territorios, que son esenciales para su vida cotidiana y para su identidad cultural y espiritual. Además, el contexto de conflicto armado en la zona ha exacerbado la vulnerabilidad de estas comunidades, aumentando el riesgo de desplazamientos y la violación de sus derechos colectivos.

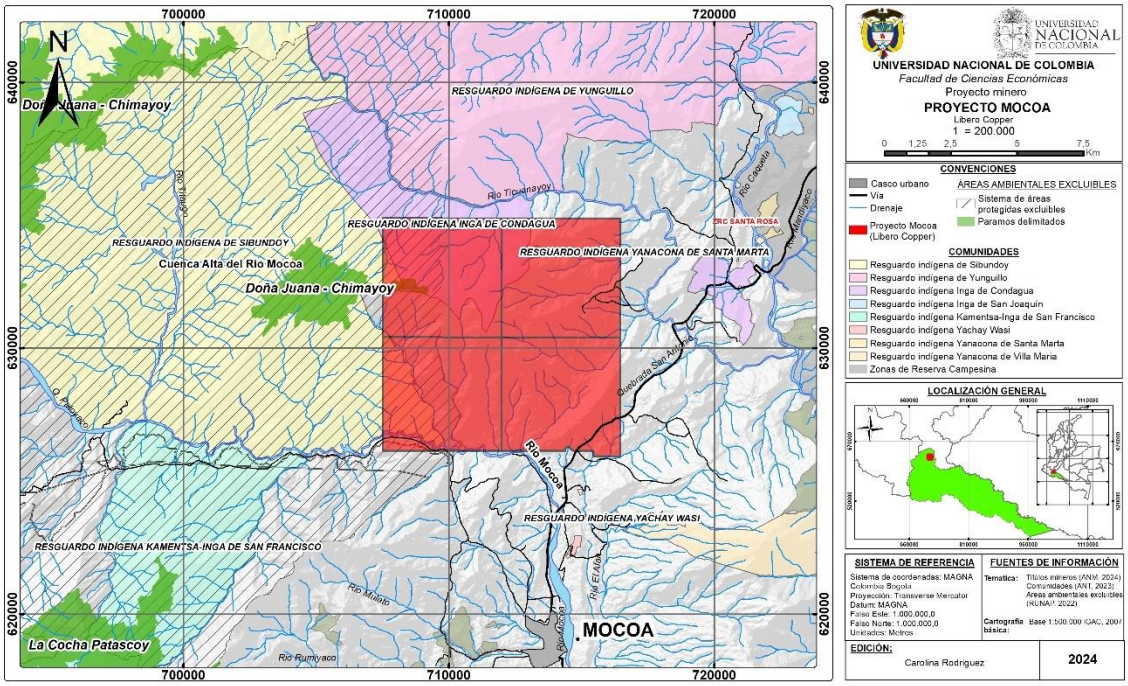
4.2 Proyecto Mocoa

El proyecto Mocoa de Libero Cobre Ltda., ubicado en el municipio de Mocoa, capital del Departamento del Putumayo, constituye una zona continua de mineralización de cobre y molibdeno, con recursos inferidos de 4,600 millones de libras de cobre y 510.5 millones de libras de molibdeno. Sin embargo, estos cálculos podrían variar dependiendo de la autorización del Ministerio de Ambiente para la sustracción de un área de Reserva Forestal (Poveda Forero et al., 2023). Mocoa se extiende sobre un área aproximada de 1.246 km^2,

de los cuales alrededor de 162 km² están designados como Reserva Forestal Protectora de la Cuenca Alta del río Mocoa y 137,5 km² corresponden a resguardos indígenas de las etnias Inga, Inga Kamentza, Kamentza y Nasa, incluyendo comunidades como Inga Camentza (Belén del Palmar), Condagua, Kamsá-Biyá, Puerto Limón, Yunguillo, Inga de Mocoa y La Florida. Además, cuenta con unos 91,7 km² que conforman el área forestal protectora productora Mecaya-Sencella. Mocoa limita al norte con el departamento del Cauca, al oriente con el municipio de Puerto Guzmán, al sur con Puerto Caicedo, y al occidente con Villagarzón y San Francisco. (Corpoamazonia, 2008).

El proyecto está identificado con el contrato único de concesión minera No L 685, el cual abarca cuatro títulos mineros que suman un total de 7,849.9175 hectáreas. Estos títulos, identificados con los códigos FJT-142, FJT-141, FJT-132 y FJT-131, cubren áreas de 1,930.4214 ha, 1,913.4829 ha, 2,002.9059 ha y 2,003.1073 ha, respectivamente, y están a cargo de Libero Cobre Ltda. Además, existen numerosas solicitudes mineras adicionales en la misma región (ANM, 2021; LCL, 2022, p. 21). Cabe mencionar que estos títulos se encuentran suspendidos, según los datos disponibles en la plataforma de gestión de la Agencia Nacional de Minería, ANNA Minería. A continuación se presenta la **Ilustración 4-3** del proyecto en mención con las variables ambientales circundantes, cercanas y/o superpuestas al área de desarrollo.

Ilustración 4-3. Variables ambientales del proyecto minero de cobre Mocoa



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de ANM (2024); ANT (2024); RUNAP (2024).

Potenciales efectos ecológicos

De acuerdo con los datos contrastados y la información presente en el visor Anna Minería (2024) se presentan cercanos al área de proyecto, reservas forestales, ecosistemas de paramo y el cauce del rio Mocoa relacionados a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 4-3. Potenciales efectos ecológicos proyecto Mocoa

Zonas de riesgo ambiental	**Relación geográfica**	**Área/ distancia**
Reserva forestal protectora de la Cuenca alta del rio Mocoa	Superposición	2065 ha
Paramo Doña Juana-Chimayoy	Superposición	55 ha
Cauce del Rio Mocoa	Superposición	5 Km

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del visor ANNA Minería.

La región donde se localiza el proyecto Mocoa se ubica en el Macizo Colombiano, una región de gran riqueza hídrica, bosques subandinos y complejos paramunos. Esta área alberga los nacimientos de los ríos que alimentan las cuencas del Caribe, el Pacífico y el Amazonas. Además, es parte de la Amazonía como biorregión, según el Instituto de Estudios Amazónicos (SINCHI, 2018). Sin embargo, la preocupación de las comunidades radica en la ubicación del proyecto en la cuenca alta del río Mocoa, área afectada por la "avalancha de Mocoa" de 2017, uno de los eventos fluviotorrenciales más nefastos en la historia del país (UNGRD, 2018). Según Corpoamazonia, la inestabilidad geológica de la cuenca alta del río Mocoa podría extender la amenaza de movimientos en masa y avenidas fluviotorrenciales debido a la exploración minera del proyecto minero, poniendo en riesgo a las comunidades aguas abajo. Del mismo modo, si se prosigue con el proyecto minero, se interrumpirá la conectividad de los ecosistemas en esta región estratégica que une varios parques y reservas naturales. Parte de los títulos mineros se superpone con la Reserva Forestal Protectora de la Cuenca Alta del Río Mocoa (RFPCARM) con parte de los títulos mineros (FJT-141 y FJT-131) del proyecto, esta reserva, que cubre un área de 30,917.22 hectáreas, está situada en la parte occidental de la propiedad de Mocoa, al oeste del depósito de Mocoa y del arroyo Chapulina, abarcando la cuenca alta del río Mocoa. Este ecosistema conecta con los Parques Nacionales Naturales (PNN) como Serranía de los Churumbelos, Alto Fragua Indi Wasi, Puracé, Complejo Volcánico Doña Juana – Cascabel, Cueva de los Guacharos, Laguna de la Cocha, el Santuario de Flora y Fauna Galeras, el Santuario de Flora Isla de la Corota, y el Santuario de Flora Plantas Medicinales Orito Ingi-Ande. Asimismo, se destaca la presencia de humedales, bosques naturales remanentes, bosques en riesgo de deforestación, el complejo de páramos Doña Juana - Chimayoy, el Área Forestal Protectora, las Rondas Hídricas y Áreas de Importancia Estratégica (Auto DTP No. 202, 2022).

El páramo de Doña Juana Chimayoy abarca un área total de 60.186 hectáreas, de las cuales 8.281,9 hectáreas se encuentran bajo la jurisdicción de Mocoa, representando el 6,3% del área total del municipio. Declarado y delimitado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible a través de la Resolución 0324 de 2018, su propósito es proteger la vasta biodiversidad y la oferta hídrica de la región, que es crucial para el suministro de agua a los municipios vecinos y el sustento de diversas especies de fauna y flora, incluyendo vegetación emblemática como los frailejones, chusques y encenillos (Poveda

Forero et al., 2023). También, en el área concesionada del proyecto está en las inmediaciones del bosque húmedo tropical, un ecosistema clave que origina importantes fuentes hídricas como los ríos Caquetá, Putumayo, Blanco, Pepino, Mulato y Mocoa. En 1985, el Inderena declaró la Reserva Forestal Protectora de la Cuenca Alta del Río Mocoa (RFPCARM) para salvaguardar esta cuenca, que alimenta el 42% de los acueductos del departamento. El río Mocoa, que atraviesa la ciudad, es nutrido por 23 microcuencas provenientes de ocho ríos y trece quebradas, todos convergiendo en el río Caquetá. Esto significa que una posible contaminación afectaría a 16 municipios, cuatro departamentos y tres países, impactando directamente el ecosistema de la cuenca del río Amazonas (Carvajal, 2022).

El proyecto minero Mocoa pone de manifiesto una problemática crítica al coincidir con zonas de ordenamiento territorial y ambiental, acentuando los riesgos graves asociados a la disposición de relaves en una cuenca altamente vulnerable a deslizamientos, especialmente considerando la inestabilidad geológica de la región. Esta situación se ve exacerbada por el historial de desastres, como la avalancha de 2017, que subraya la fragilidad del entorno y la necesidad de una evaluación ambiental rigurosa. Además, la potencial contaminación de las fuentes hídricas, que extiende su impacto a varias cuencas interconectadas, amenaza a las comunidades locales donde podría tener repercusiones a nivel regional y transfronterizo, afectando a poblaciones y ecosistemas dependientes de la cuenca.

Potenciales efectos sociales

De acuerdo con los datos contrastados y la información presente en el visor Anna Minería (2024) se presentan cercanos y/o superpuestos al área de proyecto, zonas de reserva campesina y resguardos indígenas relacionados a continuación en la **Tabla 4-4**:

Tabla 4-4. Potenciales efectos sociales proyecto Mocoa

Zonas de riesgo ambiental	**Relación geográfica**	**Área/ Distancia**
Resguardo indígena Inga de Condagua	Superposición	1578 ha
Zona de reserva campesina Santa rosa	Cercanía	4,3 km

Resguardo indígena de Yunguillo	Cercanía	0,495 km
Resguardo Indígena Sibundoy (Kamëntsa Biya De Sibundoy)	Superposición	560 ha
Resguardo Indígena Inga San Joaquin	Cercanía	4,5 km
Resguardo Indígena Kamentsa - Inga De San Francisco	Cercanía	2,9 km
Resguardo Indígena Camentza Biya	Cercanía	6,3 km
Resguardo Indígena Yanacona De Villa Maria De Anamu	Cercanía	1,4 km
Resguardo Indígena Yanacona De Santa Marta	Cercanía	5,1 km
Resguardo Indígena Yachay Wasi	Cercanía	1,9 km
Resguardo Indígena Inga Suma Iuiai	Cercanía	5,8 km
Resguardo Indígena Inga De Mandiyaco	Cercanía	6,7 km

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del visor ANNA Minería.

La tabla anterior, evidencia la riqueza en términos étnicos del área de influencia y muestra en muchos de los casos superposición o cercanía de los títulos mineros con territorios étnicos legalizados, como también se evidencio con las zonas de protección ambiental. Estas dinámicas han suscitado los constantes conflictos ambientales, así como la violación de las disposiciones legales como la del (Acuerdo 020 de 2018 Del Concejo Municipal de Mocoa, 2018), que prohíbe la minería a mediana y gran escala. Mocoa comprende diez resguardos indígenas (11 % de la población) y un Consejo Comunitario, localizados por lo general en zonas de alto riesgo (DNP, 2017; Palomo López, 2021). Sin embargo, el conflicto se acentúa por la vulneración en su derecho a la Consulta Previa , como es el caso del Resguardo de Alto Condagua.

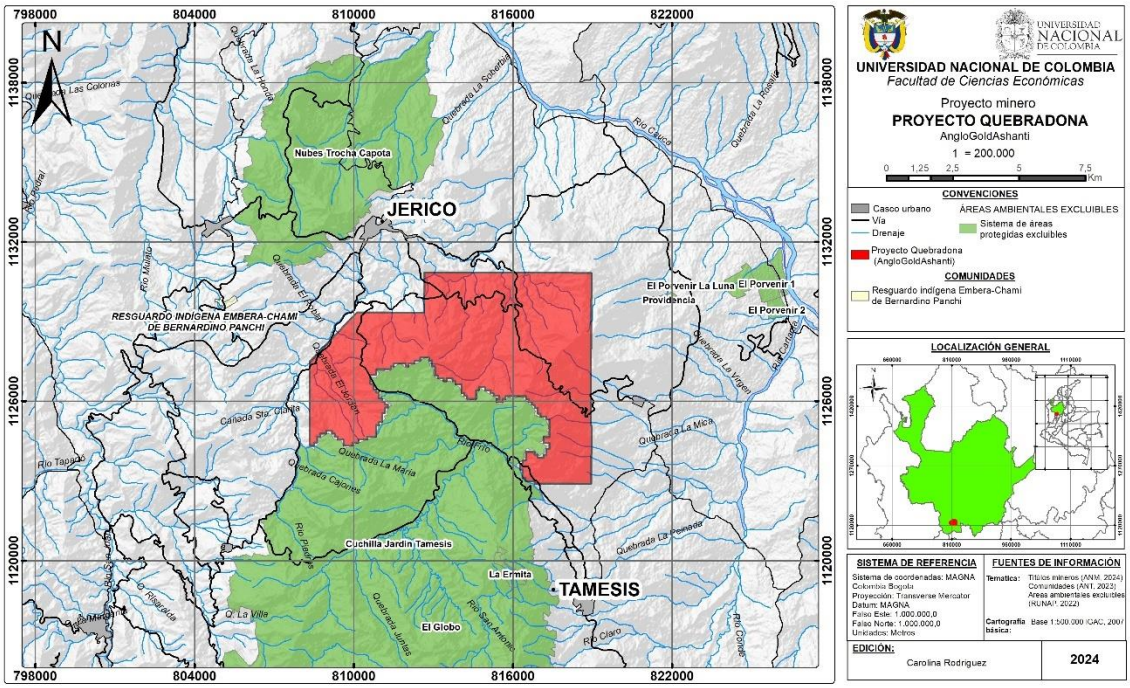
El Resguardo Indígena Inga de Condagua fue creado en 1993 y su área fue ampliada en 2006. Actualmente, parte de esta extensión se ubica dentro del área de los títulos FJT-131 y FJT-132. Su cultura es de gran arraigo al territorio, reflejada en su sólida organización política, social y económica. Son especialmente conocidos por sus conocimientos

ancestrales en medicina tradicional, ejercidos por los curanderos. Una práctica central en sus creencias y ritos. Para esta comunidad, el territorio no es solo un espacio físico, sino el fundamento de su existencia, su hogar y su vida, en un sentido que contrasta profundamente con el pensamiento occidental. Su territorio se define dentro de un contexto natural y armónico, donde llevan a cabo prácticas tradicionales como la pesca y la caza, y fortalecen un profundo sentido de identidad y conexión con la naturaleza (Jiménez & Martin, 2018). Este resguardo indígena ha logrado, a través de constantes luchas, detener el avance de la minería de cobre, debido a las numerosas amenazas que implicaría el desarrollo de estos proyectos en las montañas de la cuenca alta del río Mocoa, una zona que también es una reserva forestal protectora nacional. Estas victorias reflejan el profundo respeto sagrado que estas comunidades sienten por su territorio y han habitado de forma sustentable al pasar de los años.

4.3 Proyecto Quebradona

El Proyecto Minero de Cobre Quebradona se localiza en los municipios de Jericó y Támesis, a 104 km al suroeste de Medellín, Antioquia, y cubre un área de 4.881 hectáreas (ANM, 2024). Este proyecto, que busca la extracción subterránea de minerales en el yacimiento pórfido cuproaurífero llamado "Nuevo Chaquiro," incluye instalaciones de procesamiento y transformación en la superficie. Se estima que la producción alcanzará las 6,2 toneladas anuales, lo que lo clasifica como un proyecto de minería a gran escala según la ANM. Conforme al Decreto 1076 de 2015, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) es la encargada de otorgar o denegar la Licencia Ambiental para proyectos de explotación de minerales metálicos que impliquen la remoción de más de 2.000.000 toneladas al año. Actualmente, la licencia ambiental de Quebradona está archivada debido a que el estudio de impacto ambiental no proporcionó la evidencia suficiente para su respectiva aprobación. A continuación se presenta la **Ilustración 4-4** del proyecto en mención con las variables ambientales circundantes, cercanas y/o superpuestas al área de desarrollo.

Ilustración 4-4. Variables ambientales del proyecto minero de cobre Quebradona



Fuente: elaboración propia a partir de datos de ANM (2024); ANT (2024); RUNAP (2024).

Potenciales efectos ecológicos

De acuerdo con los datos contrastados y la información presente en el visor Anna Minería (2024) se presentan distritos regionales de manejo integrado cercanos y/o colindantes al área de proyecto relacionados a continuación:

Tabla 4-5. Potenciales efectos ecológicos del proyecto Quebradona

Zonas de riesgo ambiental	**Relación geográfica**	**Área / distancia**
Distrito Regional de Manejo Integrado Nubes Trocha Capota	Cercanía	3 km
Distrito Regional de Manejo Integrado Cuchilla Jardín Támesis	Colindante	24km

Fuente: elaboración propia a partir de datos del visor ANNA Minería.

El proyecto está situado en la cuenca hidrográfica del río Frío, fuente de abastecimiento para las poblaciones de Jericó y Támesis. En la región, más del 80% de las especies son altamente susceptibles a los cambios en la disponibilidad de agua. En cuanto a los mamíferos, la pérdida de diversidad debido a la disminución del recurso hídrico sería similar en ambas cuencas, con una reducción del 36% en un escenario moderado y un promedio del 74,6% en un escenario combinado de cambio climático y actividad minera. Los anfibios y reptiles se verían aún más afectados, especialmente en la zona de Quebradona, con una pérdida de diversidad del 50% en un escenario moderado y del 87,5% en un escenario de severa reducción de agua. Este impacto es particularmente significativo para anfibios endémicos como el Pristimantis zophus (casi amenazado), el Leucostethus sp. y el Pristimantis cf. Permixtus, especies clave para la conservación (COMFAMA, 2020).

En cuanto a áreas protegidas, se encuentra cercanía del título de extracción de mineral de cobre a 3.091 metros al norte con el Distrito Nubes Trocha Capota y al sur, colinda con el Distrito Cuchilla Jardín de Támesis. Para el caso de este último, se trata de un sistema montañoso que funciona como una estrella hidrográfica, esencial para los municipios de Andes, Jardín, Támesis, Jericó y Caramanta, por su contribución al suministro de agua potable para los acueductos y su importancia en la generación de energía hidroeléctrica a través de los ríos Frío y Piedras en Támesis y Jericó. Este Distrito de Manejo Integrado (DMI) contiene ecosistemas de bosque húmedo y muy húmedo, tanto premontano como montano, que están interconectados con otros ecosistemas a nivel regional. En estos entornos, habitan especies de flora y fauna que requieren especial protección, como el oso de anteojos, el oro orejiamarillo, el gallito de roca, la palma macana, diversas orquídeas y bromelias, entre otras, que son de particular relevancia para la conservación ambiental del territorio (Garcés Arboleda, 2023).

A partir del acuerdo 352 de 2010, se declara y delimita como Distrito de Manejo Integrado (DMI) de Recursos Naturales Renovables Nubes Trocha Capota con una extensión de 4.183,9 hectáreas, distribuidas en los municipios de Jericó (3.020,6 ha), Tarso (627,7 ha) y Pueblorrico (535,7 ha). Este DMI es crucial en términos ecológicos, debido a que facilita

el mantenimiento de procesos ecológicos locales al conectar con un corredor biológico hasta el Río Cauca. Además, fortalece la viabilidad social y ecosistémica de otras áreas protegidas propuestas por diferentes autoridades ambientales y que forman parte de los Sistemas Regionales y Nacionales de Áreas Protegidas. Cabe destacar que en esta zona nacen varias fuentes hídricas que abastecen los acueductos veredales de los municipios de Tarso, Jericó y Pueblorrico.

La extracción de cobre en la cuenca del río Frío plantea una amenaza significativa para la biodiversidad y los bienes comunes que son fundamentales para la región. La alta sensibilidad de las especies locales a la disponibilidad de agua indica que cualquier reducción en este recurso podría tener efectos devastadores sobre la fauna, especialmente en áreas que ya enfrentan presiones por el cambio climático. La proximidad del proyecto minero a zonas protegidas y su potencial impacto sobre ecosistemas cruciales como los bosques montanos y húmedos, sugiere que la minería podría comprometer la integridad de los hábitats naturales, el abastecimiento de agua y la generación de energía en los municipios circundantes.

Potenciales efectos sociales

De acuerdo con los datos contrastados y la información presente en el visor Anna Minería (2024) se presentan resguardos indígenas cercanos y/o superpuestos al área de proyecto relacionados a continuación:

Tabla 4-6. Potenciales efectos sociales del proyecto Quebradona

Zonas de riesgo ambiental	**Relación geográfica**	**Área / distancia**
Resguardo Indígena Emberá Chami De Bernardino Panchi	Cercanía	3,5 km
Resguardo Indígena Emberá Chami De La Mirla	Cercanía	7,5 km

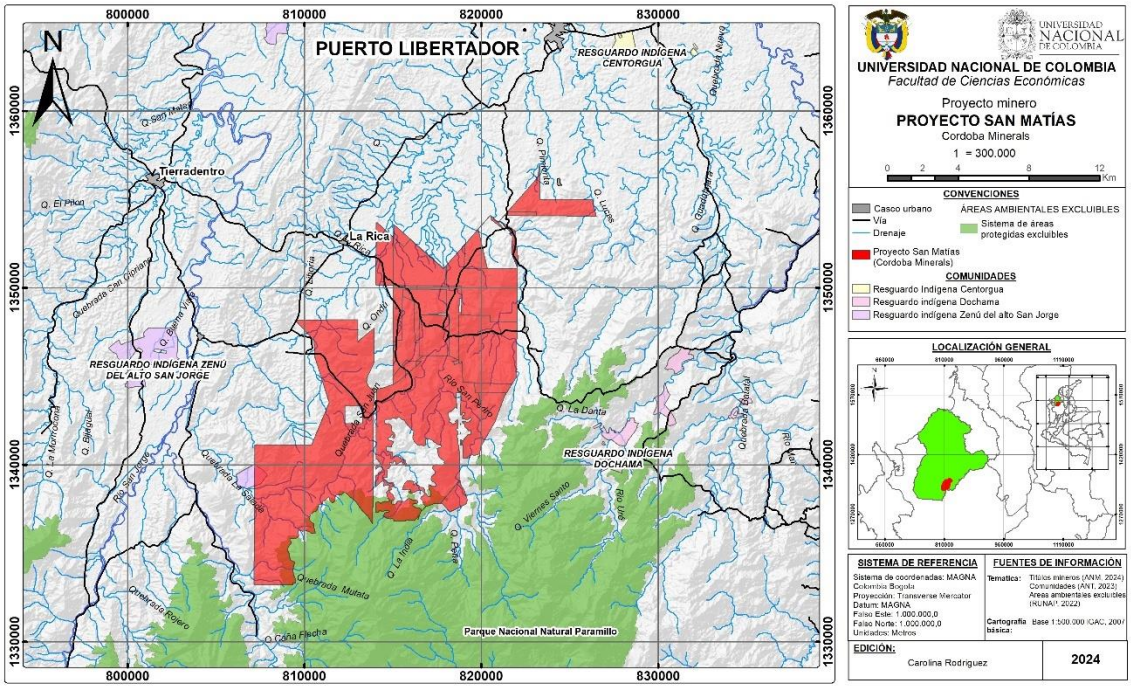
Fuente: elaboración propia a partir de datos del visor ANNA Minería.

La población indígena se concentra principalmente en áreas rurales y centros poblados de los municipios de Támesis y Pueblorrico. En estos municipios se encuentran los resguardos La Mirla y Bernardo Panchi, que forman parte del pueblo Emberá Chami. En cuanto a las comunidades negras, en el área de análisis no están organizadas como Consejo Comunitario. No obstante, hay presencia en municipios, especialmente en las cabeceras municipales, como Fredonia y Támesis, representando el 0,83% y el 0,53% del total de la población respectivamente. Las comunidades negras cercanas al área de análisis se encuentran en los municipios de Urrao, Quibdó, Bagadó y Lloró (ANT, 2024; Poveda Forero et al., 2023). Pese a que los resguardos mencionados se encuentran a cercanías del proyecto se hace importante considerar los efectos que tendría la minería en este pueblo indigna que ancestralmente se han caracterizado por la dispersión de sus asentamientos sobre las cuencas de los ríos, se han adaptado y desarrollado su cultura a los ecosistemas de selva húmeda tropical.

4.4 Proyecto San Matías

El Proyecto Minero de cobre de San Matías, ubicado en el municipio de Puerto Libertador, Córdoba, se extiende también a las áreas de influencia de San José de Uré, Montelíbano, Buenavista y Planeta Rica, a 112 km al sur de Montería. Identificado con el contrato de concesión minera No. L685 de la Agencia Nacional de Minería (ANM), abarca un área total de 390,9572 hectáreas, siendo su titular COBRE MINERALS S.A.S. Según ANM (2023), este proyecto está clasificado como Mediana, por lo tanto, la actividad minera está bajo la supervisión y licencia ambiental de la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y de San Jorge – CVS. Para el proyecto San Matías, se planea un proceso intensivo de extracción mediante métodos tradicionales de minería a cielo abierto, como perforación, voladura y uso de pala/camión, hasta el año 17 de explotación, momento en que se espera una disminución en la actividad minera (Cordoba Minerals, 2019, p. 4). A continuación se presenta la **Ilustración 4-5** del proyecto en mención con las variables ambientales circundantes, cercanas y/o superpuestas al área de desarrollo.

Ilustración 4-5. Variables ambientales del proyecto minero de cobre San Matías



Fuente: elaboración propia a partir de datos de ANM (2024); ANT (2024); RUNAP (2024).

Potenciales efectos ecológicos

De acuerdo con los datos contrastados y la información presente en el visor Anna Minería (2024) se presentan cercanos al área de proyecto la presencia de Parques Nacionales Naturales, y el cauce del rio San Jorge relacionados a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 4-7. Potenciales efectos ecológicos proyecto San Matías

Zonas de riesgo ambiental	**Relación geográfica**	**Área/ Distancia**
Parque Nacional Natural Paramillo	Superposición	601 ha
Rio San Jorge	Cercanía	0 Km

Fuente: elaboración propia a partir de datos del visor ANNA Minería

El Parque Nacional Natural Paramillo, área de gran importancia, forma parte de la estrella fluvial más importante del noroccidente colombiano, donde nacen los ríos Sinú y San Jorge, y alberga diversos ecosistemas: páramo, bosque andino, bosque húmedo tropical, planos inundables y ciénagas (Pérez Torres et al., 2016). En el departamento de Córdoba, el parque se solapa con los municipios de Tierralta, Puerto Libertador y Montelíbano, mientras que en Antioquia se conecta con el municipio de Ituango, donde se encuentra el ecosistema de páramo que da nombre a esta área protegida. El PNN Paramillo es un reservorio clave para especies en riesgo de extinción y desempeña un rol crucial en la preservación de la biodiversidad en Colombia. Prueba de ello, se evidencio en un muestreo realizado en el sector Sinú-Manso-Tigre, el cual registró 580 especies de plantas, 45 de peces y 344 de vertebrados terrestres en solo 10 hectáreas. Lo anterior, constató la importancia de esta área protegida como un refugio vital para especies que han desaparecido localmente en Córdoba, como jaguares, pumas, osos andinos, dantas, venados y cerdos de monte. Además, es un hábitat clave para aves migratorias del norte del continente y funciona como una unidad de conservación que facilita la conectividad biológica entre el norte del Caribe, Centroamérica, el Chocó biogeográfico y los Valle del Magdalena (Pérez Torres et al., 2016).

Potenciales efectos sociales

De acuerdo con los datos contrastados y la información presente en el visor Anna Minería ((2024) se presentan resguardos indígenas cercanos y/o superpuestos al área de proyecto relacionados a continuación:

Tabla 4-8. Potenciales efectos sociales del proyecto San Matías

Zonas de riesgo ambiental	**Relación geográfica**	**Área/ distancia**
Resguardo Indígena Zenú Del Alto San Jorge	Superposición	
Resguardo Indígena Dochama	Cercanía	5,5 km
Resguardo Indígena Centorgua	Cercanía	7,8 km

Fuente: elaboración propia a partir de datos del visor ANNA Minería.

En el área cercana al proyecto, se pueden observar algunos resguardos indígenas ubicados en los municipios de Montelíbano, Puerto Libertador y San José de Uré. A pesar de que el documento de la UPME menciona que el resguardo Alto San Jorge del pueblo Zenú, se encuentra a 13.561,71 metros al occidente del título minero, se constata al contrastar los títulos mineros con las variables de análisis que se presenta traslape con la comunidad mencionada. También, El resguardo Dochama - Alto Uré del pueblo Emberá Katío, a 9.098,71 metros al oriente, según datos de la (ANT, 2024).

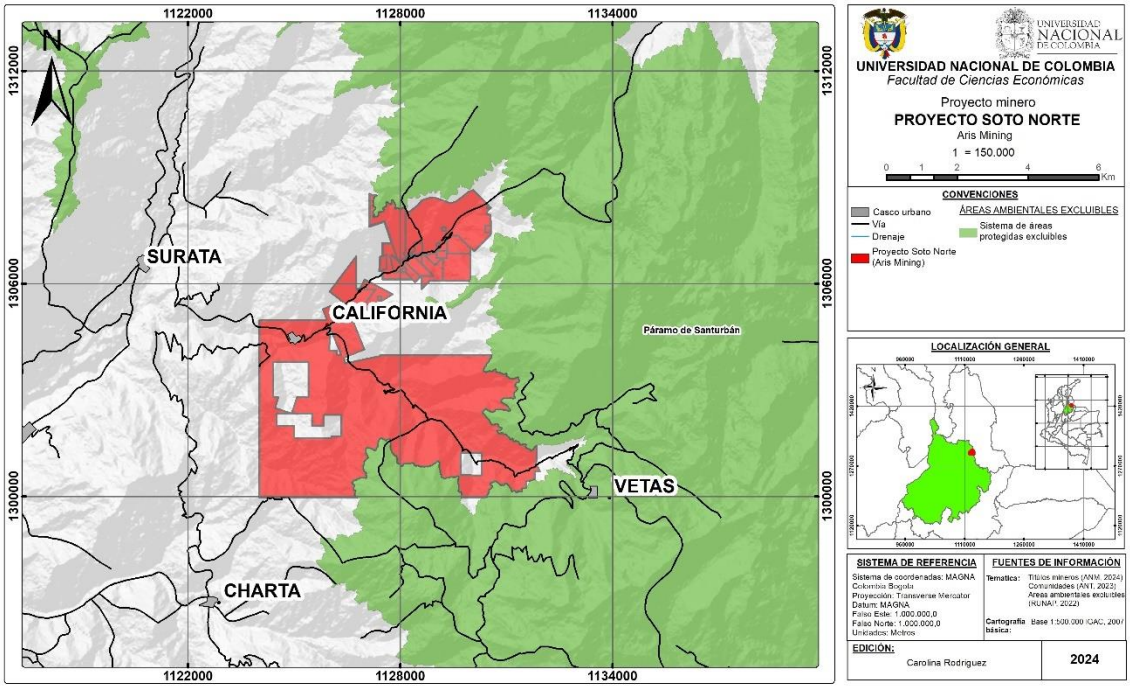
El pueblo indígena Zenú del Alto San Jorge, principalmente asentado en Puerto Libertador y con presencia en Montelíbano, San José de Uré, y La Apartada, cuenta con una historia y estructura de gobierno que les otorga una identidad diferenciada como Zenú del sur de Córdoba. En 2014, el pueblo estaba compuesto por 17,047 personas organizadas en 56 cabildos del Resguardo Mayor del Alto San Jorge. Su situación social es precaria, ya que según un censo realizado con el apoyo del PNUD, el 72% de las personas son víctimas del conflicto armado, y el 93% de los hogares no tiene ingresos suficientes para cubrir sus necesidades básicas. A pesar de que en 2014 se les reconocieron 905 hectáreas en la zona rural de Puerto Libertador para albergar a 300 familias, este espacio es insuficiente y la ampliación del resguardo parece lejana. En 2017, la comunidad logró la garantía de sus derechos a la Consulta Previa y a la reparación por los daños causados por la explotación de níquel por parte de Cerro Matoso y la no consulta frente a la ampliación del contrato de concesión (Medina Bernal et al., 2019).

En la subregión, persisten conflictos históricos no resueltos por el acceso a tierras, afectando a comunidades indígenas Zenú, Emberá Katío, afrodescendientes y campesinas, quienes han desarrollado estrategias de resistencia, incluyendo la minería tradicional y de pequeña escala. El Alto San Jorge, rico en recursos mineros, ha sido declarado Distrito Minero Especial, pero la extracción, tanto legal como ilegal, ha exacerbado conflictos ambientales (Medina Bernal et al., 2019). De este modo, uno de los principales conflictos que surgen en el desarrollo del proyecto minero está relacionado con los derechos de las comunidades que han habitado ancestralmente el territorio y su lucha por mantener la tenencia de la tierra, la cual es fundamental para la organización de sus medios de vida.

4.5 Proyecto Soto Norte

El Proyecto de Explotación Subterránea de Minerales Auroargentíferos "Soto Norte" se localiza entre los municipios de Suratá y California, a 60 km al noreste de Bucaramanga, en la región oriental del Macizo de Santander, en la Cordillera de los Andes. Este proyecto, con una extensión de 379,0498 hectáreas, está amparado bajo el contrato de concesión minera No. L685 y código de expediente 0095-68, otorgado por la Agencia Nacional de Minería (ANM). La concesión pertenece a la Sociedad Minera de Santander S.A.S. (ANM, 2024). El Proyecto Soto Norte, clasificado como de mediana minería, está bajo la supervisión y control de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). A continuación se presenta la **Ilustración 4-6** del proyecto en mención con las variables ambientales circundantes, cercanas y/o superpuestas al área de desarrollo.

Ilustración 4-6. Variables ambientales del proyecto minero de cobre Soto Norte



Fuente: elaboración propia a partir de datos de (ANM (2024); ANT (2024);RUNAP (2024).

Potenciales efectos ecológicos

De acuerdo con los datos contrastados y la información presente en el visor Anna Minería (2024) se presentan cercanos al área de proyecto, la presencia de Parques Naturales Regionales y así mismos ecosistemas de paramo y el cauce del rio Suratá, relacionados a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 4-9. Potenciales efectos ecológicos proyecto Soto Norte

Zonas de riesgo ambiental	**Relación geográfica**	**Área/ distancia**
Parque Natural Regional Páramo De Santurbán	Colindante	19 Km
Paramo en delimitación Santurbán-Berlín	Colindante	21km

Fuente: elaboración propia a partir de datos del visor ANNA Minería

El Parque Regional Santurbán fue declarado zona de conservación por la Corporación para el Desarrollo de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) en 2013, y en 2014, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través de la Resolución 2090, definió la delimitación del Páramo de Santurbán- Berlín para su respectivo manejo como área protegida que posteriormente fue derogada sin a la fecha una nueva resolución para su delimitación. El Páramo en delimitación de Santurbán- Berlín es un ecosistema de alta montaña que se extiende entre los departamentos de Santander y Norte de Santander. Este páramo es fundamental para la regulación del ciclo hidrológico en la región, ya que captura y almacena agua, alimentando a importantes fuentes hídricas como los ríos Suratá y Lebrija, que abastecen a más de dos millones de personas en Bucaramanga y otras ciudades (Humboldt, 2014). Además de su importancia hídrica, el páramo alberga una rica biodiversidad, con especies endémicas. Es un ecosistema extremadamente sensible, donde cualquier alteración puede tener efectos devastadores, para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que proporciona.

Potenciales efectos sociales

En el territorio de análisis del proyecto Soto Norte, de acuerdo con los datos obtenidos de la (ANT, 2024), no se cuenta con zonas de reserva campesina, zonas mineras étnicas, área indígena restringida. Sin embargo, una de las problemáticas se da en cuanto a la superposición del municipio de vetas en un 80% dentro del polígono delimitado como paramo y la declaratoria como Parque Natural Regional. Ambas figuras ambientales tuvieron implicaciones ambientales para la comunidad que históricamente ha tenido una vocación hacia la agricultura, ganadería y la minería. La identidad de los habitantes del municipio de Vetas está estrechamente ligada al agua, al oro y a la relación con el páramo que durante décadas, han delimitado las zonas aptas para la intervención y aquellas que deben ser preservadas (Parra Romero, 2022).

En conclusión, la superposición geográfica entre los proyectos mineros, las áreas protegidas y los territorios habitados por comunidades étnicas plantea un desafío significativo para la conservación de la biodiversidad. Las áreas protegidas, al albergar una rica diversidad biológica y servir como refugio para especies en peligro, son fundamentales para la preservación de los ecosistemas. Sin embargo, la presión que ejerce la minería de cobre sobre estos espacios pone en riesgo su integridad ecológica. La actividad minera, al alterar los suelos, la cobertura vegetal y los cursos de agua, puede provocar la fragmentación de los hábitats naturales, lo que afecta directamente a la flora y fauna de la región, así como a la estabilidad de los ecosistemas. En ese mismo sentido, la presencia de comunidades étnicas en estos territorios agrega una dimensión cultural y social al conflicto. Las comunidades indígenas y afrodescendientes, que han habitado estos territorios durante generaciones, poseen un profundo vínculo con la tierra y los recursos naturales, los cuales son fundamentales para su identidad cultural, sus prácticas tradicionales y su subsistencia. La minería de cobre, al modificar el entorno natural, amenaza los recursos de los cuales dependen estas comunidades, al debilitar su autonomía y su capacidad para preservar sus tradiciones y modos de vida.

5. Criterios de sustentabilidad para la explotación de cobre en el contexto de la transición energética en Colombia

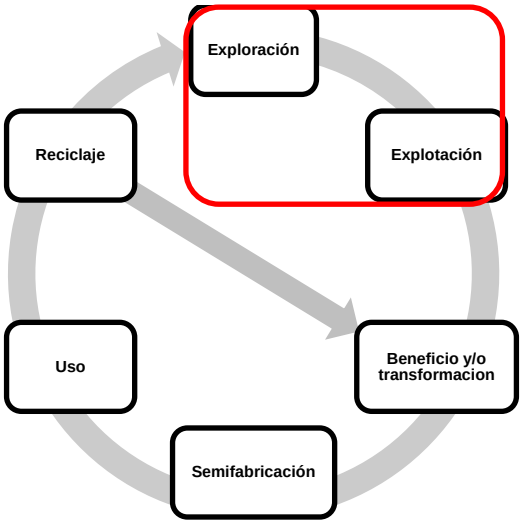
Después de analizar las principales implicaciones ambientales relacionadas con proyectos mineros de cobre clave en Colombia, como Mocoa, El Roble, Quebradona, San Matías y Soto Norte, es esencial profundizar en el proceso subyacente que generan dichas presiones ambientales por medio del análisis del ciclo de vida del cobre. Los efectos observados en las comunidades y ecosistemas circundantes no pueden ser comprendidos de manera integral sin antes desglosar las etapas que componen el ciclo de vida del cobre. El presente capítulo abordará específicamente dos etapas del ciclo de vida del cobre: la exploración y explotación, enfocándose principalmente, en las entradas, salidas y efectos ambientales que acompañan el desarrollo de la actividad minera durante las etapas mencionadas. De esta forma, se establecerá una conexión clara entre los procesos técnicos de la minería y las implicaciones territoriales que emergen en torno a estos proyectos en el contexto de la transición energética de Colombia.

5.1 Implicaciones ambientales del ciclo minero del cobre

Como se explicó anteriormente, el cobre se encuentra en la naturaleza tanto en su forma nativa como principalmente en compuestos de sulfuros. La obtención de cobre puro requiere de varias etapas que comienzan con la extracción y concentración de minerales de bajo grado que contienen sulfuros de cobre. Posteriormente, estos minerales son sometidos a procesos de fundición y refinación electrolítica, lo que permite obtener cobre en su forma más pura. Este cobre refinado es fundamental para su aplicación en diversas industrias, especialmente en tecnologías eléctricas, electrónicas y, más recientemente, en

energías renovables, debido a sus excelentes propiedades. En la **Figura 5-1** se detallan las etapas mencionadas a lo largo del procesamiento del cobre:

Figura 5-1. Etapas del ciclo de vida del cobre



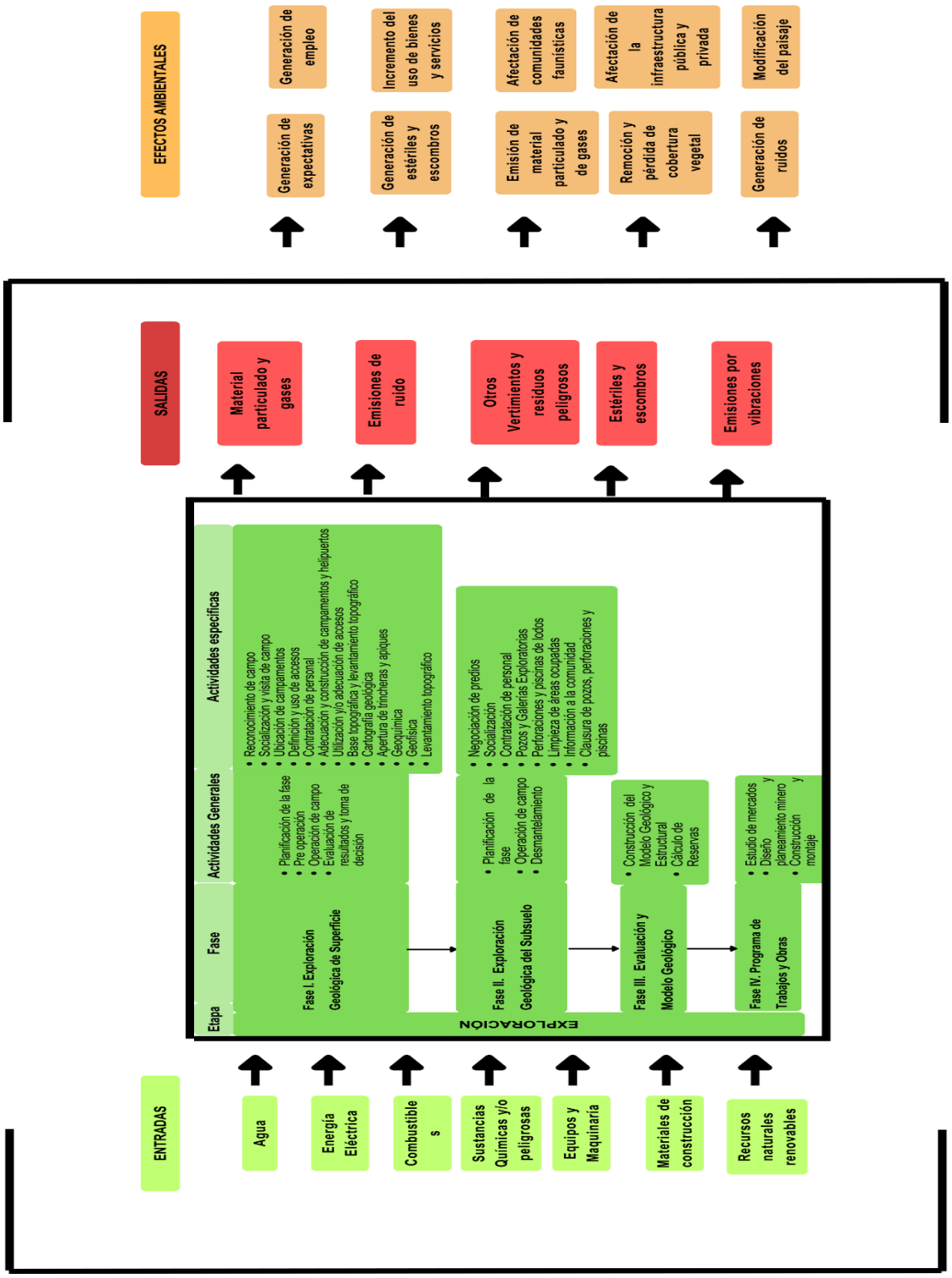
Fuente: elaboración propia a partir de International Copper Association (2017)

La figura anterior ilustra el ciclo de vida del cobre en cada una de sus etapas, desde el inicio hasta su finalización. No obstante, esta investigación se centrará específicamente en el análisis del ciclo de vida de las etapas de exploración y explotación.

5.1.1 Análisis del ciclo de vida de la minería de cobre en la fase de exploración

El ciclo de vida de un proyecto minero comienza con la exploración, etapa en la cual se delimita el yacimiento y se obtienen datos geológicos esenciales para evaluar la viabilidad de avanzar a la siguiente etapa. Esta etapa se realiza principalmente mediante sondajes, que implican la perforación del suelo para extraer muestras, y en ocasiones a través de la construcción de túneles que permiten inspeccionar visualmente el macizo rocoso y obtener muestras directamente de él (SEA, 2017). A continuación, en la **Figura 5-2** se describen a detalle las entradas, salidas y efectos ambientales de la etapa de exploración:

Figura 5-2. Análisis del ciclo de vida de la minería de cobre en la etapa de exploración



Fuente: elaboración propia a partir de Castro Amado et al. (2021); Duarte et al. (2015); Meza Chevecich (2024); Min. Minas & Min. Ambiente (2002b) (2002ª); SEA (2017)

La etapa de exploración dentro del ciclo de vida del cobre representa un conjunto de fases y actividades cuya ejecución, desde las entradas hasta las salidas, genera una serie de efectos ambientales que deben ser analizados. Las entradas o insumos clave en esta etapa incluyen agua, energía eléctrica, combustibles, sustancias químicas, equipos y maquinaria, entre otros recursos esenciales. Estos insumos posibilitan la realización de diversas actividades, tanto generales como específicas, en cada una de las fases de la exploración.

En la Fase I de Exploración Geológica de Superficie, las actividades se centran en la planificación, la operación de campo y la evaluación de resultados. Entre las actividades específicas de esta fase se encuentran el levantamiento topográfico, la cartografía geológica, la apertura de trincheras, así como estudios geoquímicos y geofísicos. Estas acciones se continúan en la Fase II de Exploración Geológica del Subsuelo, donde se construye el modelo geológico y estructural, y se calculan las reservas del mineral. Posteriormente, la Fase III de Evaluación y Modelo Geológico y la Fase IV del Programa de Trabajos y Obras profundizan en la operación de campo y el diseño de los futuros planes mineros, abarcando actividades como la negociación de predios, perforaciones, limpieza de áreas ocupadas y el diseño de infraestructura.

El desarrollo de estas actividades genera una serie de salidas que tienen una serie de efectos ambientales en el área de influencia de los proyectos mineros. Entre estos efectos destaca el aumento de emisiones de material particulado y gases, el uso de maquinaria pesada requiere grandes cantidades de combustibles fósiles, libera óxidos de carbono, nitrógeno y azufre, compuestos que agravan la calidad del aire en las zonas circundantes. Además, la circulación continua de vehículos sobre caminos no pavimentados contribuye al levantamiento de partículas que se diseminan en el aire, afectando tanto a la fauna como a las comunidades aledañas. La magnitud de estos efectos varía en función de la cantidad de emisiones generadas, las condiciones de ventilación en el área y la cercanía de receptores sensibles, lo que destaca la necesidad de un monitoreo y gestión adecuada de estos efectos. De igual forma, durante el proceso de desmantelamiento, las operaciones de desmonte de equipo electromecánico y demolición de obras civiles intensifican la generación de residuos y escombros, agravando los efectos sobre la calidad del aire y el entorno natural. (Min. Minas & Min. Ambiente, 2002a). Así mismo, las emisiones de ruido

y vibraciones resultantes de actividades como perforaciones, la apertura de accesos, el montaje de campamentos, y el uso de maquinaria pesada generan efectos significativos en las comunidades humanas y fauna cercana. En los ecosistemas naturales, estos factores acústicos interfieren en los patrones de comportamiento de la fauna, afectando negativamente procesos críticos como la reproducción, la alimentación y la migración, y en algunos casos, forzando el desplazamiento de especies y la alteración de sus hábitats naturales (Duarte et al., 2015). Para las comunidades cercanas, los niveles elevados de ruido y las vibraciones prolongadas son fuentes de estrés, alteraciones del sueño y otros problemas de salud, además de representar una amenaza para la infraestructura local y la calidad de vida. (Min. Minas & Min. Ambiente, 2002b; Vinayagam et al., 2024).

Es importante recalcar que los volúmenes de material removido durante esta etapa no son comparables a los generados en la etapa de explotación. Sin embargo, si se producen residuos sólidos y escombros producto de actividades como la perforación, la apertura de trincheras y apiques, y la adecuación de accesos y campamentos que requieren la remoción de suelo en donde se altera la topografía original y se exponen las áreas sensibles a procesos erosivos. Aunque estas intervenciones se consideran temporales, pueden generar efectos ambientales relevantes, como la generación de escombros, emisión de gases y material particulado y la pérdida de cobertura vegetal (Mwitwa et al., 2012; Wahyono et al., 2024). Aunque estos efectos son menos intensos que los generados durante la fase de explotación, no dejan de ser significativos debido a la presión que ejercen sobre el entorno. Las alteraciones en los hábitats naturales provocadas por la remoción de suelos y la intervención en áreas sensibles incrementan el riesgo de pérdida de biodiversidad, afectando el equilibrio ecológico y la resiliencia de los ecosistemas locales (Islam et al., 2020; Wahyono et al., 2024). En el caso de las perforaciones, se generan subproductos como lodos, cuyo manejo en piscinas puede representar un desafío, si no se dispone de medidas adecuadas de contención y tratamiento. Igualmente, el uso de productos químicos en esta etapa genera residuos peligrosos, que requieren una disposición responsable para evitar su infiltración en el suelo y las aguas subterráneas. Al final de la etapa de exploración, durante el desmantelamiento, se generan más residuos derivados de la limpieza de áreas ocupadas y la clausura de pozos y perforaciones.

En el ámbito social, la etapa de exploración genera expectativas entre las comunidades locales, quienes pueden visualizar en el proyecto minero una fuente potencial de empleo

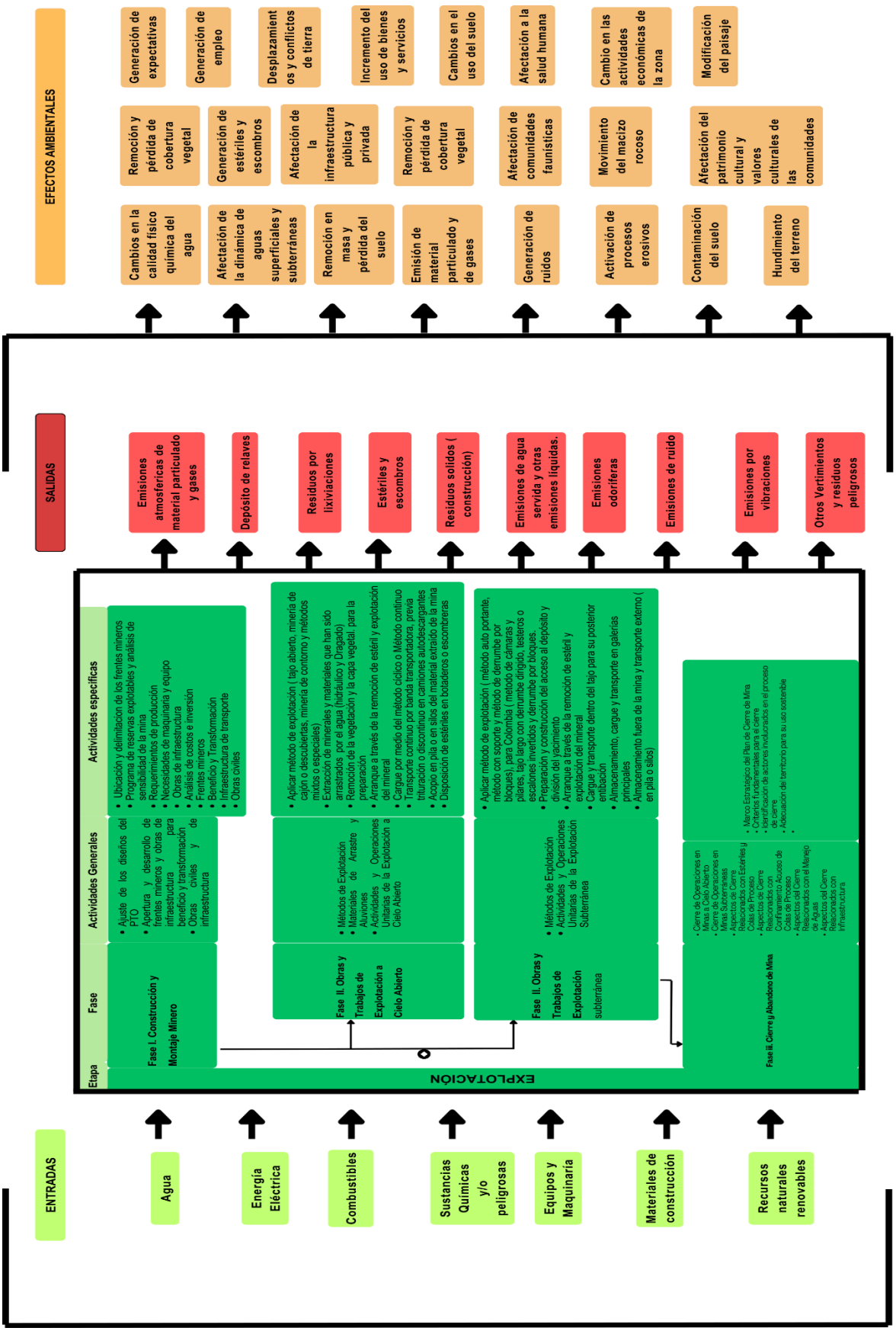
y dinamización económica, debido al incremento en el uso de bienes y servicios. Sin embargo, también pueden surgir tensiones relacionadas con los cambios en el uso del suelo y el efecto sobre la infraestructura pública y privada. La construcción de campamentos temporales y accesos puede interferir con las actividades tradicionales de las comunidades locales y alterar sus dinámicas económicas y culturales. Otro efecto de la etapa de exploración es la modificación del paisaje, especialmente debido a la apertura de trincheras y perforaciones. Este cambio en la configuración visual del entorno puede tener efectos negativos en términos de percepción estética, afectando áreas que podrían tener valor de tipo cultural, turístico o ecológico.

Estos efectos ambientales subrayan que, aunque la fase de exploración es preliminar en comparación con la explotación, ya involucra efectos que deben ser abordados de manera oportuna. Las actividades en esta etapa tienen generalmente un efecto localizado y reversible. En este sentido, es crucial la adopción de criterios de sustentabilidad que permitan valorar dichos efectos para continuar a la siguiente etapa de explotación en cada una de sus fases y actividades.

5.1.2 Análisis del ciclo de vida de la minería de cobre en la fase de explotación

Después de la exploración, se pasa a la explotación, donde se procede a la extracción del mineral del yacimiento. Este proceso inicia con la fragmentación de la roca, generalmente mediante tronaduras, lo que facilita su remoción y transporte hacia el exterior de la mina, ya sea a un sitio de acopio o a una planta de procesamiento. Finalmente, al concluir el periodo operativo del proyecto, se lleva a cabo el cierre de la mina, el cual incluye todas las actividades necesarias para clausurar el proyecto (SEA, 2017). A continuación, en la **Figura 5-3** se describen a detalle las entradas, salidas y efectos ambientales de la etapa de explotación:

Figura 5-3. Análisis del ciclo de vida de la minería de cobre en la etapa de explotación


ENTRADAS
Agua
Energía Eléctrica
Combustibles
Sustancias Químicas y/o peligrosas
Equipos y Maquinaria
Materiales de construcción
Recursos naturales renovables
EXPLOTACIÓN
Etapa
Fase
Actividades Generales
Actividades específicas
Fase I. Construcción y Montaje Minero
• Ajuste de los diseños del PTO
• Apertura y desarrollo de frentes mineros y obras de infraestructura para beneficio y transformación
• Obras civiles y de infraestructura
• Ubicación y delimitacion de los frentes mineros
• Programa de reservas explotables y análisis de sensibilidad de la mina
• Requerimientos de producción
• Necesidades de maquinaria y equipo
• Obras de infraestructura
• Análisis de costos e inversión
• Frentes mineros
• Beneficio y Transformación
• Infraestructura de transporte
• Obras civiles
Fase II. Obras y Trabajos de Explotación a Cielo Abierto
• Métodos de Explotación
• Materiales de Arrastre y Aluviones
• Actividades y Operaciones Unitarias de la Explotación a Cielo Abierto
• Aplicar método de explotación (tajo abierto, minería de cajón o descubiertas, minería de contorno y métodos mixtos o especiales)
• Extracción de minerales y materiales que han sido arrastrados por el agua (hidráulico y Dragado)
• Remoción de la vegetación y la capa vegetal para la preparación
• Arranque a través de la remoción de estéril y explotación del mineral
• Cargue por medio del método cíclico o Método continuo
• Transporte continuo por banda transportadora, previa trituración o discontinuo en camiones autodescargantes
• Acopio en pila o en silos del material extraído de la mina
• Disposición de estériles en botaderos o escombreras
Fase II. Obras y Trabajos de Explotación subterránea
• Métodos de Explotación
• Actividades y Operaciones Unitarias de la Explotación Subterránea
• Aplicar método de explotación (método auto portante, método con soporte y método de derrumbe por bloques), para Colombia (metodo de cámaras y pilares, bajo largo con derrumbe dirigido, testeros o escalones invertidos y derrumbe por bloques.
• Preparación y construcción del acceso al depósito y división del yacimiento
• Arranque a través de la remoción de estéril y explotación del mineral
• Cargue y transporte dentro del tajo para su posterior entibación
• Almacenamiento, cargue y transporte en galerías principales
• Almacenamiento fuera de la mina y transporte externo (en pila o silos)
Fase III. Cierre y Abandono de Mina
• Cierre de Operaciones en Minas a Cielo Abierto
• Cierre de Operaciones en Minas Subterráneas
• Aspectos del Cierre Relacionados con Estériles y Colas de Proceso
• Aspectos de Cierre Relacionados con Confinamiento Acuoso de Colas de Proceso
• Aspectos del Cierre Relacionados con el Manejo de Aguas
• Aspectos del Cierre Relacionados con Infraestructura
• Marco Estratégico del Plan de Cierre de Mina
• Criterios funcionales para el cierre
• Identificación de actores involucrados en el proceso de cierre
• Adecuación del territorio para su uso sostenible
SALIDAS
Emisiones atmosfericas de material particulado y gases
Depósito de relaves
Residuos por lixiviaciones
Estériles y escombros
Residuos solidos (construcción)
Emisiones de agua servida y otras emisiones liquidas.
Emisiones odoríferas
Emisiones de ruido
Emisiones por vibraciones
Otros Vertimientos y residuos peligrosos
EFECTOS AMBIENTALES
Cambios en la calidad físico química del agua
Remoción y pérdida de cobertura vegetal
Generación de expectativas
Afectación de la dinámica de aguas superficiales y subterráneas
Generación de estériles y escombros
Generación de empleo
Remoción en masa y pérdida del suelo
Afectación de la infraestructura pública y privada
Desplazamientos y conflictos de tierra
Emisión de material particulado y de gases
Remoción y pérdida de cobertura vegetal
Incremento del uso de bienes y servicios
Generación de ruidos
Afectación de comunidades faunísticas
Cambios en el uso del suelo
Activación de procesos erosivos
Movimiento del macizo rocoso
Afectación a la salud humana
Contaminación del suelo
Afectación del patrimonio cultural y valores culturales de las comunidades
Cambio en las actividades económicas de la zona
Hundimiento del terreno
Modificación del paisaje

Fuente: Elaboración propia a partir de Meza Chevecich (2024); Min. Minas & Min. Ambiente (2002b) (2002ª); SEA (2017).

La etapa de explotación del ciclo minero del cobre constituye una fase crucial en la cual se materializa la extracción del mineral. En este punto del proceso, los efectos ambientales adquieren una dimensión significativa debido a la magnitud de las actividades involucradas, las cuales abarcan desde la construcción y montaje de la infraestructura hasta el cierre y abandono de la mina. Dichos efectos varían según el tipo de explotación utilizado, ya sea a cielo abierto o subterráneo. A continuación, se expone el análisis detallado de las implicaciones ambientales asociadas a esta etapa.

Para llevar a cabo las actividades de explotación, se requieren recursos importantes como agua, energía eléctrica, combustibles, sustancias químicas peligrosas, maquinaria y equipos especializados, materiales de construcción, y recursos naturales renovables. Estos insumos son esenciales para garantizar el funcionamiento adecuado de la mina, pero también generan presiones considerables sobre el entorno natural. El uso del agua es uno de los aspectos más críticos, ya que es indispensable para procesos como la remoción del mineral y el tratamiento de los materiales. Sin embargo, su consumo intensivo puede comprometer la disponibilidad de agua para las comunidades locales y, al mismo tiempo, existe el riesgo de contaminación de fuentes hídricas debido a la infiltración de químicos utilizados en la explotación subterránea y a cielo abierto (Wahyono et al., 2024). Así, el consumo excesivo de agua en las operaciones mineras a menudo deriva en la reducción en la calidad y la cantidad de agua subterránea, lo que supone un riesgo para la supervivencia de las comunidades locales y los ecosistemas naturales.

De igual forma, el uso de energía y combustibles tiene un efecto crítico, dado que las operaciones mineras demandan una cantidad significativa de energía para la operación de maquinaria pesada, promovido principalmente del uso de electricidad, representando entre el 38% y el 74% del total. Le sigue el consumo de diésel, empleado principalmente en la operación de los camiones que transportan los materiales extraídos, cuya participación oscila entre un 8% y un 24%. Finalmente, los explosivos utilizados en las voladuras de los depósitos minerales también contribuyen al consumo energético, con una proporción que

varía entre el 4% y el 22% (Lu et al., 2023). Esto resulta en emisiones de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NOx), y otros contaminantes que contribuyen al cambio climático global (Islam et al., 2020; Wahyono et al., 2024).

La explotación del cobre puede dividirse en diversas fases operacionales, cada una de las cuales conlleva un conjunto de actividades con implicaciones ambientales específicas. Durante la construcción y montaje minero, por ejemplo, se desarrollan infraestructuras y frentes mineros necesarios para iniciar la explotación. En esta fase, se produce una significativa remoción de vegetación y de la capa superficial del suelo, lo que genera la pérdida de biodiversidad y alteraciones en los ecosistemas locales (Islam et al., 2020).

En el caso de la explotación a cielo abierto, las actividades asociadas como la remoción de estériles, arranque del mineral, y transporte generan importantes emisiones de material particulado y gases a la atmósfera. Estas emisiones afectan la calidad del aire, lo que puede tener consecuencias tanto para la salud humana, la vegetación y la fauna (Islam et al., 2020). Asimismo, el material no mineralizado extraído, conocido como estériles, es depositado en escombreras, que si no se gestionan de manera correcta, pueden generar problemas de erosión y lixiviación de metales pesados, contaminando tanto suelos como cuerpos de agua. Tales actividades, desestabilizan la estructura original del terreno, generando un cambio en las condiciones físicas del suelo que, en muchos casos, lo vuelven inadecuado para su posterior uso. Estos cambios afectan el entorno inmediato, las actividades económicas y las formas de sustento de las comunidades que dependen de los recursos naturales, propiciando un desplazamiento hacia otros usos del suelo que podrían no ser sostenibles o adecuados para la regeneración ambiental a largo plazo (Islam et al., 2020; Wahyono et al., 2024).

Por otro lado, la explotación subterránea también presenta desafíos ambientales específicos. La extracción del mineral mediante este método puede provocar el movimiento del macizo rocoso, lo que conlleva riesgos de derrumbes dentro de la mina y, en la superficie, puede ocasionar hundimientos que afecten la infraestructura y el paisaje (Min. Minas & Min. Ambiente, 2002b). Asimismo, las operaciones subterráneas presentan un alto riesgo de contaminación de suelos y agua subterránea debido a posibles filtraciones

de aceites, combustibles u otras sustancias peligrosas empleadas en las actividades mineras .

Una vez que se han agotado los recursos del yacimiento, la mina entra en la fase de cierre y abandono. Esta etapa incluye la clausura de pozos y la estabilización de estériles, actividades esenciales para mitigar los efectos ambientales a largo plazo. Aunque el presente trabajo no aborde específicamente la fase de beneficio y transformación, es relevante incluir una mención sobre los relaves, que son residuos generados después de la concentración del mineral y cuya gestión es abordada en la fase de cierre y abandono. En esta fase, los relaves deben ser manejados de manera adecuada para evitar la contaminación a largo plazo del suelo, los cuerpos de agua y los daños a la biodiversidad. De ahí, la importancia de una correcta rehabilitación del terreno (Islam et al., 2020). Sin embargo, la modificación del paisaje es una consecuencia inevitable y realmente notoria en esta fase de cierre de la etapa de explotación con graves consecuencias en las dinámicas ecológicas, sociales y económicas de los territorios.

A pesar de que la minería puede generar empleo y dinamizar ciertos sectores económicos, estos beneficios suelen ser temporales y limitados en comparación con los efectos negativos a largo plazo sobre los ecosistemas y las comunidades. En particular, durante la fase de explotación, las actividades mineras pueden causar desplazamientos forzados, conflictos por la tierra y la pérdida de formas tradicionales de sustento debido al cambio en el uso del suelo. Las comunidades étnicas que habitan las áreas intervenidas, además, ven comprometidos sus valores culturales y patrimoniales debido a la presencia de grandes proyectos extractivos. En términos de salud pública, la exposición a material particulado, gases tóxicos, ruido y vibraciones, sumada a la contaminación del agua y del suelo, contribuye a un aumento en la prevalencia de enfermedades respiratorias, cutáneas y otros problemas de salud (Zanetta-Colombo et al., 2024). Estas situaciones incrementan la vulnerabilidad social y económica acentuando las tensiones y conflictos entre las empresas mineras y las comunidades locales, a menudo causadas por expectativas insatisfechas de desarrollo económico, desintegración social y cultural en los territorios cercanos a los proyectos mineros.

En conclusión, los efectos generados en las etapas de exploración y explotación del ciclo minero del cobre son notorios y han sido ampliamente tratados a lo largo del presente trabajo. Por su parte, la fase de exploración, aunque preliminar, ocasiona efectos localizados y temporales; mientras que la fase de explotación representa un proceso de mayor escala, cuyos efectos son prolongados y mucho más difíciles de revertir. Para el caso de Colombia, como se observó en el capítulo anterior, se identificó que los efectos críticos de la explotación de cobre incluyen: **la alteración de los ecosistemas y recursos hídricos, la pérdida de biodiversidad, la transformación del paisaje y la degradación de la calidad del aire y del suelo. Asimismo, en el ámbito social, estos proyectos pueden generar desplazamientos forzados y conflictos relacionados con el uso de la tierra. La afectación a la salud pública, junto con los cambios en las formas tradicionales de sustento y la pérdida del patrimonio cultural** aumentando la vulnerabilidad de las comunidades locales frente a la expansión de la minería a gran escala. Estos efectos fueron seleccionados por su relevancia ambiental, en coherencia con los principios de la sustentabilidad fuerte, que priorizan la protección de los bienes naturales y la integridad de las comunidades por encima de los intereses económicos. De esta manera, es necesario que la minería adopte criterios de sustentabilidad fuerte en sus operaciones que evalúen por medio de indicadores las dimensiones ecológicas, sociales y económicas de los territorios de su desarrollo.

5.2 Identificación de variables criticas para la evaluación de la sustentabilidad

En el contexto de la transición energética, y considerando los efectos críticos mencionados en el ciclo de vida de las etapas de exploración y explotación de la minería de cobre, se han formulado criterios de sustentabilidad fuerte propuestos en el marco teórico de este trabajo, los cuales se agrupan en las siguientes ocho categorías: **gestión hídrica, gestión de desechos, acción climática y gestión de las emisiones, gestión del ruido y vibraciones, uso y rehabilitación del suelo, biodiversidad, desarrollo económico y bienestar social**. Estos criterios permiten organizar de manera estructurada los 16 efectos críticos y 78 indicadores clave, que buscan mitigar las implicaciones ambientales asociadas a la extracción de cobre en el contexto de la transición energética.

Los indicadores relacionados abarcan dimensiones ecológicas, sociales y económicas, las cuales se encuentran vinculadas a las categorías antes mencionadas. Entre ellos, destacan indicadores latinoamericanos, propuestos por Vela León & Lewinsohn (2021) en el documento de la CEPAL, que sirven como referencia para la minería metálica en la región. Algunos de estos indicadores clave incluyen el consumo de agua y eficiencia en el uso, cambio en el uso de los recursos hídricos, emisiones de gases de efecto invernadero, ruido y vibraciones, así como la superficie deforestada por actividades mineras y la protección del patrimonio cultural y natural los cuales presentan en su unidad de medidas otras formas de valoración descriptivas y que no solo se reduce a un dato o unidad numérica. Asimismo, Fuentes et al. (2021) recopilan diversos autores que proponen indicadores específicos para la minería del cobre, con unidades de medida y cálculos detallados, particularmente en las áreas de gestión hídrica y salud poblacional.

Por otro lado, se han integrado indicadores específicos para Colombia, que permiten abordar las condiciones particulares de la riqueza ecosistémica del país. Ejemplos de estos son el indice de presión sonora, acidez del suelo (ph), proporción del paisaje por coberturas naturales, secundarias y transformadas, tasa de cambio en densidad humana, variación de la superficie de las coberturas de la tierra, proporción del paisaje por coberturas naturales, secundarias y transformadas, densidad de parches de coberturas naturales, indice de tendencia en deforestación, índice de fragmentación de coberturas naturales, variación de la superficie de las coberturas de la tierra, índice de conectividad estructural de coberturas naturales, tasa de cambio en densidad human, propuestos por el Instituto Humboldt. Estos indicadores no solo son útiles para evaluar la dimensión ecosistémica en el contexto colombiano, sino que también son aplicables a un ejercicio análogo en la minería del cobre.

Del mismo modo, se enfatiza en que las condiciones sociales características del territorio colombiano exigen una profundización en esta dimensión, dado que un tratamiento superficial no captaría la complejidad de los efectos mineros en las comunidades. Por ello, esta investigación se enmarca en la sustentabilidad fuerte, integrando indicadores como las necesidades básicas insatisfechas (NBI), los indicadores de goce efectivo de derechos (IGED) y el índice de vulnerabilidad territorial, que proporcionan una visión más amplia de los efectos de la minería en los territorios. Estos indicadores también permiten identificar

cómo, en muchos casos, el crecimiento económico no se traduce necesariamente en la mejora de las condiciones de vida de las poblaciones afectadas, lo que representa uno de los principales paradigmas en torno a la minería como supuesta puerta al desarrollo.

En este escenario, y bajo el marco teórico de la sustentabilidad fuerte, se presenta la siguiente **Tabla 5-1** que relaciona los efectos críticos agrupados en ocho (8) criterios de sustentabilidad asociados a indicadores de sustentabilidad correspondientes al análisis planteado, con el fin construir una propuesta que responda a los retos de la explotación de la minería de cobre en el contexto de la transición energética en Colombia.

Tabla 5-1. Criterios de sustentabilidad a tener en cuenta para la explotación del cobre en el contexto de la transición energética en Colombia

Efecto	Criterio	Indicador	Unidad	Autor
Cambios en la calidad físico química del agua	Gestión hídrica	Acidificación	kg SO2eq	(Giurco & Petrie, 2007)
		Eutrofización acuática	kg PO 4 P-límite	(Farjana et al., 2019)
		Ecotoxicidad acuática	kg de agua TEG	(Farjana et al., 2019)
		Niveles de metales disueltos en el agua	µg/L	(Fischer et al., 2020)
		Índice de calidad del agua (ICA)	0-1	(IDEAM, 2022)
Afectación de la dinámica de aguas superficiales y subterráneas		Índice de agotamiento del agua (IDH)	%	(S. A. Northey et al., 2017)
		Vulnerabilidad a las restricciones de suministro (VSR)	%	(S. A. Northey et al., 2017)
		Huella del consumo de agua	m3 / tCu	(Lagos et al., 2018)
		Índice de estrés hídrico (WSI)	%	(S. A. Northey et al., 2017)
		Consumo de agua y eficiencia en el uso	m3/t metal/año	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Cambio en el uso de los recursos hídricos	agua minería/total uso de agua/año	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Grado de gestión integrada de los recursos hídricos	Descripción	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
Generación de estériles, escombros y demás residuos	Gestión de desechos	Huella de residuos sólidos	a	(Gorman & Dzombak, 2019)
		Tasa de recuperación de minería	%	(Yu et al., 2005)
		Eficiencia de utilización del metal principal	%	(Rönnlund et al., 2016)
		Intensidad del uso de sustancias químicas peligrosas para el medio ambiente	%	(Rönnlund et al., 2016)
		Eficiencia en la extracción	t roca/t metal/año	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Riesgo de propagación de contaminación (drenaje ácido)	Descripción	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
Emisión de material particulado y de gases	Acción climática y gestión de las emisiones	Huella de carbono	CO2-eq/kg Cu	(Nilsson, 2017)
		Emisión de partículas en suspensión (PM)	Mg/MgCu - Mg/MWh	(Woźniak & Pactwa, 2017)
		Emisión de dióxido de carbono (CO2)	Mg/MgCu - Mg/MWh	(Woźniak & Pactwa, 2017)
		Emisión de óxidos de azufre (SOx)	Mg/MgCu - Mg/MWh	(Woźniak & Pactwa, 2017)
		Emisión de nitrógeno (NOx)	Mg/MgCu - Mg/MWh	(Woźniak & Pactwa, 2017)
		Emisiones de gases de efecto invernadero	t/año	(Vela León & Lewinsohn, 2021)

Efecto	Criterio	Indicador	Unidad	Autor
		Emisiones de GEI	tCO2 / tCu	(Lagos et al., 2018)
Generación de ruidos	Gestión del ruido y vibraciones	Quejas externas relacionadas con el ruido y vibraciones	#/año	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Índice de presión sonora	Área	(Humboldt, n.d.)
Cambios en el uso del suelo	Uso y rehabilitación del suelo	Uso del suelo	m2a	(Kuipers et al., 2018)
		Acidez del suelo (pH)	pH	(Humboldt, n.d.)
		Ecotoxicidad terrestre	kg de suelo TEG	(Farjana et al., 2019)
		Ocupación de tierras	M2org.arable	(Farjana et al., 2019)
		Superficie concesión	Ha Concesionados/ Ha totales	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Proporción del paisaje por coberturas naturales, secundarias y transformadas	%	(Humboldt, n.d.)
		Tasa de cambio en densidad humana	Área	(Humboldt, n.d.)
		Variación de la superficie de las coberturas de la tierra	Área o %	(Humboldt, n.d.)
Modificación del paisaje		Impacto del uso del suelo y mitigación de riesgos de las minas		(Rönnlund et al., 2016)
		Sinergias en el uso del suelo a través de los servicios ecosistémicos		(Rönnlund et al., 2016)
		Cierre de minas y rehabilitación de tierra	Descripción	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Variación en la estructura del paisaje - IEP	%	(Hansen et al., 2013)
		Proporción del paisaje por coberturas naturales, secundarias y transformadas	%	(Humboldt, n.d.)
		Densidad de parches de coberturas naturales	Área	(Humboldt, n.d.)
Remoción y pérdida de cobertura vegetal	Biodiversidad	MiBID biodiversidad	MiBiD/kg	(Kobayashi et al., 2014)
		Impacto del uso del suelo		(Rönnlund et al., 2016)
		Agotamiento de recursos abióticos: elementos	kg antimonio-Eq	(Kuipers et al., 2018)
		Superficie deforestada por las actividades mineras	Ha deforestadas/año	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Índice de tendencia en deforestación	%	(Humboldt, n.d.)
		Índice de fragmentación de coberturas naturales	Área	(Humboldt, n.d.)
		Variación de la superficie de las coberturas de la tierra	Área o %	(Humboldt, n.d.)
Afectación ecosistémica		MiBID biodiversidad		(Kobayashi et al., 2014)
		Ecotoxicidad terrestre	kg de suelo TEG	(Farjana et al., 2019)
		Ecotoxicidad acuática en agua dulce	kg 1,4-DCB-Eq	(Kuipers et al., 2018)
		Especies en el índice de lista roja	#	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Superficie concesionada dentro de áreas protegidas o tierras ancestrales	Ha concesionadas/ Ha protegidas	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Proyectos mineros localizados en áreas protegidas	#/año	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Índice de conectividad estructural de coberturas naturales	Área o %	(Humboldt, n.d.)
Incremento del uso de bienes y servicios	Desarrollo económico	Consumo de energía	J/ Tonelada Cu	(Lagos et al., 2018)
		Intensidad energética	J/t Cu	(S. Northey et al., 2013)
		Consumo de agua y eficiencia en el uso	m3/t metal/año	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Compras locales	%	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
Generación de expectativas		Contribución al PIB	PIB per cápita	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Distribución de las rentas mineras	%	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
Generación de empleo		Empleo	empleo minero/ empleo total	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Impacto del uso del suelo		(Rönnlund et al., 2016)

Efecto	Criterio	Indicador	Unidad	Autor
Modificación de las actividades económicas de la zona		Sustituibilidad de minerales	Índice	(Rönnlund et al., 2016)
		Disponibilidad de minerales	Índice	(Rönnlund et al., 2016)
		Contribución al PIB	PIB per cápita	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	%	(DANE, n.d.)
Afectación del patrimonio y valores culturales de las comunidades	Bienestar social	Protección del patrimonio cultural y natural	Descripción	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Derechos colectivos y comunitarios	Descripción	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
		Participación de los actores	Descripción	(Vela León & Lewinsohn, 2021)
Afectación a la salud humana		Toxicidad humana	kg 1,4-DCB-Eq	(Kuipers et al., 2018)
		Carcinógenos	kg C2H3CL equivalente	(Farjana et al., 2019)
		Inorgánicos respiratorios	kg de PM2,5 equivalentes	(Farjana et al., 2019)
		Salud humana	AVANCE	(Farjana et al., 2019)
		Niveles de metales pesados en el polvo de la calle	mg/kg	(Moya et al., 2019)
		Intensidad del uso de sustancias químicas peligrosas para la salud	%	(Rönnlund et al., 2016)
Desplazamientos y conflictos de tierra		Indicadores de Goce Efectivo de Derechos (IGED)	%	(UARIV, 2021)
		Ocupación de tierras	M2org.arable	(Farjana et al., 2019)
		Uso del suelo	m2a	(Kuipers et al., 2018)
		Tasa de cambio en densidad humana	Área	(Humboldt, n.d.)
		Índice de Vulnerabilidad Territorial	%	(DNP, 2015)

Fuente: elaboración propia a partir de DANE (n.d.); DNP (2015); Fuentes et al. (2021); Humboldt (n.d.); IDEAM, (2022); UARIV (2021); Vela León & Lewinsohn (2021).

Finalmente, los criterios e indicadores agrupados en este trabajo tienen como objetivo central ser una herramienta de sustentabilidad fuerte para hacerle frente a las implicaciones ambientales. La transición energética, impulsada por la creciente demanda de tecnologías renovables, como las que utilizan minerales estratégicos como el cobre, ha aumentado la presión sobre los ecosistemas y las comunidades locales, evidenciando las tensiones entre los objetivos de desarrollo y la preservación ambiental. El enfoque teórico basado en la sustentabilidad fuerte y los principios del extractivismo, propuestos por autores como Gudynas (2015) y Acosta (2012), destaca cómo la extracción de recursos en gran volumen y con alta intensidad tiene graves implicaciones ambientales y sociales, especialmente cuando los recursos no son procesados localmente y se exportan como materias primas. En este contexto, los proyectos analizados en el capítulo 4, tanto en Colombia como en otras partes del mundo, ejemplifican cómo los supuestos de la transición energética pueden, paradójicamente, intensificar las dinámicas extractivistas, con todas sus consecuencias negativas para los ecosistemas y las comunidades.

Por lo tanto, los indicadores vinculados en la **Tabla 5-1**, no solo permiten medir los efectos económicos, ecológicos y sociales de la minería, sino también ofrecer un marco para replantear cómo los proyectos de extracción pueden alinearse a principios de sustentabilidad que incluyan los derechos y las necesidades de las generaciones presentes y futuras. Esto es particularmente relevante en un país como Colombia, donde las condiciones ecosistémicas y sociales hacen necesaria una reflexión profunda sobre los modelos de desarrollo que se implementan y su efecto real en el bienestar de las comunidades y en la preservación de la biodiversidad.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

La transición energética, impulsada por la necesidad de mitigar el cambio climático, ha generado una creciente demanda de minerales estratégicos como el cobre. Este recurso es esencial para el desarrollo de tecnologías de energías renovables como los paneles solares, las turbinas eólicas, las baterías de almacenamiento y los vehículos eléctricos. Sin embargo, la extracción de cobre, especialmente en países como Colombia, trae consigo una serie de implicaciones ambientales, sociales y económicas que deben ser abordadas bajo un enfoque de sustentabilidad fuerte. Este enfoque, en contraposición a la sustentabilidad débil, enfatiza que no toda la Naturaleza puede ser reducida a un capital natural y que hay elementos no sustituibles que deben ser preservados en su estado natural.

En el marco de la transición energética, el desafío radica en equilibrar las oportunidades económicas que presenta la explotación de cobre con la necesidad de mitigar los efectos ambientales de esta actividad. Los análisis realizados en esta investigación revelaron que la minería del cobre en Colombia tiene el potencial de acentuar conflictos de tipo social y ecológico recayendo en las dinámicas históricas de extractivismo, donde los recursos naturales son extraídos en grandes volúmenes y con alta intensidad, muchas veces para exportación sin agregar valor en el país. Este modelo extractivista, como bien describe Gudynas (2015), implica una alta degradación de los ecosistemas y genera tensiones en las comunidades locales.

El análisis geográfico realizado en el capítulo 4 puso en evidencia que la distribución de los depósitos de cobre en Colombia no es homogénea, y que los territorios con mayor potencial mineral son también áreas de gran riqueza ecológica y diversidad étnica. La superposición de zonas mineras con áreas protegidas y territorios ancestrales incrementa la complejidad de gestionar estas actividades bajo un enfoque de sustentabilidad. Los estudios de casos analizados en proyectos como Quebradona, Soto Norte y Mocoa revelan la importancia de contar con evaluaciones más integrales, tanto en la dimensión ecológica como en la social, para entender los efectos de largo plazo sobre los ecosistemas y las comunidades.

Uno de los aspectos más relevantes de esta investigación es que, a pesar de los beneficios económicos que podría traer la minería del cobre en Colombia, es imperativo que estos no se traduzcan en un deterioro de la calidad de vida de las poblaciones locales ni en una pérdida irreversible de biodiversidad. La minería a gran escala conlleva, entre otros efectos, la alteración de la calidad físico-química del agua, la afectación de la dinámica de las aguas subterráneas, la remoción de cobertura vegetal, la generación de residuos peligrosos y estériles, la fragmentación de los paisajes y la emisión de gases de efecto invernadero. Todo ello configura un panorama complejo que demanda una gestión integral y sustentable de los efectos de la minería en los territorios.

Por otro lado, es esencial destacar que la sustentabilidad fuerte en la que se enmarca este estudio va más allá de los indicadores económicos. Este enfoque reconoce que las dinámicas de la minería no pueden limitarse a un balance entre costos y beneficios financieros, sino que deben considerar de manera central los efectos sobre los ecosistemas y las comunidades. La importancia de los criterios de sustentabilidad propuestos en esta investigación radica en que estos buscan sugerir que los modelos de medición de los efectos de la minería de cobre deben gestionar dichos efectos de manera holística, y no se reduzcan simplemente a indicadores de eficiencia económica. La minería de cobre, si bien es esencial para la transición energética, no debe replicar las lógicas del extractivismo tradicional, sino avanzar hacia un modelo donde los derechos de las comunidades y la protección de los ecosistemas sean pilares fundamentales.

Finalmente, La demanda mundial de nuevos metales en el marco de la transición energética presenta un riesgo latente de que las áreas mineras se conviertan en escenarios de degradación y deterioro ambientales si no se implementan mecanismos de monitoreo y evaluación adecuados a las características de los territorios intervenidos.

6.2 Recomendaciones

Dado los hallazgos de esta investigación, es crucial que el análisis del ciclo de vida de los proyectos mineros no se limite únicamente a las fases de exploración y explotación, como se realizó en este estudio, sino que abarque todo el ciclo de vida de la mina, incluidas las fases de beneficio y transformación y su posterior uso. Esta ampliación brindará un panorama amplio y detallado de los efectos ambientales del análisis del ciclo de vida del cobre.

Es también recomendable que se vinculen otros indicadores locales en las valoraciones de los efectos ambientales. Los criterios e indicadores propuestos en esta investigación proporcionan un primer acercamiento, pero es necesario nutrir la herramienta con otros indicadores que abarquen en su mayoría la complejidad de las realidades territoriales de Colombia y así considerar muchos más aspectos de la riqueza ecosistémica y la diversidad étnica que no se tomaron en cuenta en la presente investigación. Esto permitirá realizar valoraciones integrales, precisas y enfocadas a las particularidades de los territorios.

Desde el punto de vista normativo, es imperativo que Colombia refuerce sus marcos legales e institucionales, exigiendo evaluaciones de impacto ambiental más exhaustivas, y garantizando que las concesiones mineras no se otorguen en áreas de alto valor ecológico o cultural para garantizar su coherencia con los principios de sostenibilidad. Esto implica reformar el Código de Minas para alinearlo con enfoques holísticos de gestión ambiental, fortalecer las capacidades institucionales para monitorear y aplicar los indicadores de sustentabilidad, y promover una mayor participación de las comunidades en la gestión de los recursos. Asimismo, sería valioso considerar referentes internacionales, como la legislación chilena, que regula aspectos esenciales como el cierre y poscierre de minas,

con miras a construir un modelo de minería del cobre que se aleje de las lógicas extractivistas y se oriente hacia la protección de los ecosistemas y los territorios.

Por último, es necesario promover una diversificación de la economía colombiana que no dependa exclusivamente del extractivismo minero y así, garantizar que la minería del cobre en Colombia se alinee con principios de la sustentabilidad fuerte, promoviendo un desarrollo equilibrado y justo tanto para las generaciones presentes como futura

Bibliografía

Acosta, A. (2012). *EXTRACTIVISMO Y NEOEXTRACTIVISMO: DOS CARAS DE LA MISMA MALDICIÓN*.

Acuerdo 020 de 2018 Del Concejo Municipal de Mocoa, Pub. L. No. Acuerdo No. 020 del 06 de Dic/2018 (2018).

Akchurin, M. (2023). Environmental justice at the environmental courts? Mining, socioenvironmental conflicts, and environmental litigation in northern Chile. *Extractive Industries and Society*, *15*. https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101279

Ángel Amaya, J., Ordoñez Potes, M. C., Olivero Verbel, J., Echavarria Usher, C., Ayala, H., & Cabrera Leal, M. (2019). *Consideraciones sobre la minería en el departamento del Chocó y recomendaciones para mejorar la gestión* (Universidad de Cartagena, IIAP, & WWF, Eds.).

Ángel Maya, A. (2009). *EL RETO DE LA VIDA- UNA INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DEL MEDIO AMBIENTE*. www.augustoangelmaya.com

ANM. (2021). *Proyecto Mocoa. Putumayo. Libero Cooper & Gold Corporation.* www.liberocopper.com

ANM. (2023). *DETERMINACIÓN DE MINERALES DE INTERÉS ESTRATÉGICO PARA COLOMBIA*.

ANM. (2024). *Plataforma ANNA Minería*. Visor Geográfico.

ANT. (2024). *Colombia en Mapas: Territorios de Comunidades Negras de Colombia, Zonas de reserva campesina y Resguardos Indígenas Legalizados de Colombia.* https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-84.11326282226575,-18.04901120600335,64.381817509771,27.345162549644805,4686&b=igac&u=0&t=1&servicio=106

Asociación Colombiana de Minería. (2023). *Producción de cobre (Toneladas)* .

Auto DTP No. 202 (2022).

Auty, R., & Warhurst, A. (1993). Sustainable development in mineral exporting economies. *Resources Policy*, *19*(1), 14–29. https://doi.org/10.1016/0301-4207(93)90049-S

Ávila Pinto, R. (2021). *Libro Blanco del cobre en Colombia*.

Ayres, R. U., Ayres, L. W., & Råde, I. (2002). *The Life Cycle of Copper, its Co-Products and By-Products*.

Barra, F., Otero, S., & Reich, M. (2021). *La Riqueza mineral de Chile*. Núcleo Milenio Trazadores de Metales en Zonas de Subducción (NMTM).

Cáceres Gaitán, M. Á. (2023). *MINERALES DE TRANSICIÓN EN COLOMBIA*. https://annamineria.anm.gov.co/Html5Viewer/index.html?viewer=SIGMExt&locale=es-CO&appAcronym=sigm

Capellán-Pérez, I., de Castro, C., & Miguel González, L. J. (2019). Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews*, *26*. https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399

Carranza, D. M., Varas-Belemmi, K., De Veer, D., Iglesias-Müller, C., Coral-Santacruz, D., Méndez, F. A., Torres-Lagos, E., Squeo, F. A., & Gaymer, C. F. (2020). Socio-environmental conflicts: An underestimated threat to biodiversity conservation in Chile. *Environmental Science and Policy*, *110*, 46–59. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.04.006

Carvajal, C. (2022). *Conflicto socio-ambiental con la empresa Libero Copper, casa matriz Canadá*.

Castro Amado, D., Moreno, M. del P., & Apoyo de revisión de expedientes ANLA. (2021). *Estandarización y Jerarquización de Impactos Ambientales de Proyectos Licenciados por ANLA.*

Coayla, E., Romero Carrion, V. L., & Bedón Soria, Y. T. (2024). Economic regulation and environmental impact of large copper mining in the development of Peru. *Economia, Sociedad y Territorio*, *24*(74). https://doi.org/10.22136/est20242032

COMFAMA. (2020). *Resumen ejecutivo: Análisis de efectos del proyecto minero Quebradona (Basados en el EIA radicado ante la ANLA)*.

Comisión Interétnica de la Verdad de la región Pacífico. (2021). *ETNOCIDIO, DAÑO AL TERRITORIO Y PERSPECTIVAS DE ARMONIZACIÓN Atrato-Chocó* (Centro de Estudios Étnicos, Ed.). https://estudiosetnicos.org

CONPES 4075: POLÍTICA DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA (2022).

Constitución Política de 1991, Pub. L. No. Constitución Política 1 de 1991 Asamblea Nacional Constituyente (1991).

Corantioquía. (2018). *PLAN DE MANEJO PARQUE NATURAL REGIONAL CORREDOR DE LAS ALEGRÍAS 2018-2022*.

Cordoba Minerals. (2019). *Cordoba Announces Positive Preliminary Economic Assessment for the San Matias Copper-Gold-Silver Project*.

Corpoamazonia. (2008). *AGENDA AMBIENTAL DEPARTAMENTO DE PUTUMAYO*.

Cubillos Meza, A. Ivonne., & Estenssoro Saavedra, Fernando. (2011). *Energía y medio ambiente, una ecuación difícil para América Latina : los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático*. Instituto de Estudios Avanzado, Universidad Santiago de Chile.

Da Silva Almeida, L. (2022). *El cambio climático como factor impulsor de la transición energética*. https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/74586/80834%281%29.pdf?sequence=4&isAllowed=y

DANE. (n.d.). *Necesidades básicas insatisfechas (NBI)*. Retrieved October 9, 2024, from https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi

Decreto 2811 de 1974 (1974).

DNP. (2015). *Índice de Vulnerabilidad Territorial: Resultados 2008-2012*.

DNP. (2017). *Documento CONPES 3904*.

Donoso Muñoz, M. J. (2013). El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras The copper market worldwide: trends, risks, characteristics and potential future growth. In *Revista chilena de ingeniería* (Vol. 21, Issue 2).

Duarte, M. H. L., Sousa-Lima, R. S., Young, R. J., Farina, A., Vasconcelos, M., Rodrigues, M., & Pieretti, N. (2015). The impact of noise from open-cast mining on Atlantic forest biophony. *Biological Conservation*, *191*, 623–631. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.08.006

Farjana, S. H., Huda, N., Mahmud, M. A. P., & Lang, C. (2019). Life-cycle assessment of solar integrated mining processes: A sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, *236*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117610

Fischer, S., Rosqvist, G., Chalov, S. R., & Jarsjö, J. (2020). Disproportionate water quality impacts from the century-old nautanen copper mines, Northern Sweden. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(4). https://doi.org/10.3390/su12041394

Fornillo, B. (2016). *Sudamérica Futuro China global, transición energética y posdesarrollo*.

Fuentes, M., Negrete, M., Herrera-León, S., & Kraslawski, A. (2021). Classification of indicators measuring environmental sustainability of mining and processing of copper. In *Minerals Engineering* (Vol. 170). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107033

Garcés Arboleda, Y. (2023). *Habitar la conservación: Tensiones, resistencias y desafíos en Áreas Naturales Protegidas*. Universidad Nacional de Colombia.

Giurco, D., & Petrie, J. G. (2007). Strategies for reducing the carbon footprint of copper: New technologies, more recycling or demand management? *Minerals Engineering*, *20*(9 SPEC. ISS.), 842–853. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.04.014

Göbel, B. (2015). *Extractivismo y desigualdades sociales*. 161–165.

González L. de G., F. (2006). *En busca de caminos para la comprensión de la problematica ambiental* (Instituto de Estudios Ambientales para el Desarrollo, Ed.). Ambiente y desarrollo Ensayos V.

Gorman, M. R., & Dzombak, D. A. (2019). An assessment of the environmental sustainability and circularity of future scenarios of the copper life cycle in the U.S. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(20). https://doi.org/10.3390/su11205624

Granda Álvarez, A. (2021). *IMPACTOS DE LOS MEGAPROYECTOS MINEROS EN LAS COMUNIDADES DE JERICÓ, SEGOVIA Y REMEDIOS* [FACULTAD DE DERECHO]. UNIVERSIDAD EXTERNADO DE COLOMBIA.

Guayara, H., Gonzalez, J., Rojas, F. W., Gómez Usuga, C., Galvez, A., & Medina, C. Y. (2021). *Análisis de técnicas de aprovechamiento de mineral de Cobre y posibles incidencias económicas por su aprovechamiento en Colombia*.

Gudynas, E. (2003). *Ecología, Economía y Etica del Desarrollo Sostenible*.

Gudynas, E. (2010). Desarrollo sostenible: una guía básica de conceptos y tendencias hacia otra economía. *Revista Latinoamericana de Economía Social y Solidaria*, *IV*(6), 43–66. www.riless.org/otraeconomia

Gudynas, E. (2015). *EXTRACTIVISMOS Ecología, economía y política de un modo de entender el desarrollo y la Naturaleza*.

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, *342*(6160), 850–853. https://doi.org/10.1126/science.1244693

Humboldt. (n.d.). *BioTablero Indicadores*. Retrieved October 9, 2024, from https://biotablero.humboldt.org.co/Indicadores

Humboldt. (2014). *Aportes a la delimitación del páramo mediante la identificación de los límites inferiores del ecosistema a escala 1:25.000 y análisis del sistema social asociado al territorio: Complejo de Páramos Jurisdicciones – Santurbán – Berlín Departamentos de Santander y Norte de Santander.*

Hund, K., Porta, D. La, Fabregas, T. P., Laing, T., & Drexhage, J. (2020). *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. www.worldbank.org

ICSG. (2020). *The World Copper Factbook 2020*. www.icsg.org

IDEAM. (2022). *ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA 2022*.

IEA. (2021). *The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions*. www.iea.org/t&c/

Instituto Geológico Polaco. (2020). *Información básica sobre el cobre*. https://www.pgi.gov.pl/psg-1/psg-2/informacja-i-szkolenia/wiadomosci-surowcowe/9795-miedz-i-srebro.html

International Copper Association. (2017). *Perfil medioambiental del cobre*.

IPCC. (2022). Technical Summary. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. *Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* . https://doi.org/10.1017/9781009157926.002

Islam, K., Vilaysouk, X., & Murakami, S. (2020). Integrating remote sensing and life cycle assessment to quantify the environmental impacts of copper-silver-gold mining: A case study from Laos. *Resources, Conservation and Recycling*, *154*, 104630. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.104630

ISO. (2006). *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.ISO 14040: 2006*.

Jiménez, G., & Martin, M. (2018). *Refugio para la preservación cultural de la comunidad Inga de Mocoa*.

Jiménez Ortega, A. M., Ríos Medina, O., Cuesta Borja, T., Obando Mosquera, N., Echavarría Rentería, J. D., Moreno Amud, A., Palacios Mosquera, L., & Mantilla Meluk, H. (2020). *Distritos Regionales de Manejo Integrado: Una apuesta por el desarrollo sostenible*.

Jones, B., Acuña, F., & Rodríguez, V. (2021). *Cambios en la demanda de minerales: análisis de los mercados del cobre y el litio, y sus implicaciones para los países de la región andina*. www.cepal.org/apps

Kobayashi, H., Watando, H., & Kakimoto, M. (2014). A global extent site-level analysis of land cover and protected area overlap with mining activities as an indicator of biodiversity pressure. *Journal of Cleaner Production*, *84*(1), 459–468. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.049

Kuipers, K. J. J., van Oers, L. F. C. M., Verboon, M., & van der Voet, E. (2018). Assessing environmental implications associated with global copper demand and supply scenarios from 2010 to 2050. *Global Environmental Change*, *49*, 106–115. https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2018.02.008

Lagos, G., Peters, D., Salas, J. C., Parra, R., & Pérez, V. (2021). *Análisis económico de las cadenas globales de valor y suministro del cobre refinado en países de América Latina*. www.cepal.org/apps

Lagos, G., Peters, D., Videla, A., & Jara, J. J. (2018). The effect of mine aging on the evolution of environmental footprint indicators in the Chilean copper mining industry 2001–2015. *Journal of Cleaner Production*, *174*, 389–400. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.290

LCL. (2022). *MOCOA COPPER-MOLYBDENUM PROJECT, COLOMBIA NI 43-101 Technical Report*.

Leañez, F. (2022). *Intensidad de materiales en la transición energética de América Latina: estimaciones sobre la base de un escenario de integración energética de América del Sur*. www.cepal.org/apps

Leff, E. (1998). *Saber Ambiental: Sustentabilidad, Racionalidad, Complejidad, Poder* (Siglo XXI editores, UNAM, & PNUMA, Eds.).

Leff, E. (2004). Más allá de la interdisciplinariedad. Racionalidad ambiental y diálogo de saberes. *Polis, Revista de La Universidad Bolivariana, 2*(7). http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30500705

Leff, E. (2018). *PENSAR LA COMPLEJIDAD AMBIENTAL*. https://www.researchgate.net/publication/328653293

Ley 141 de 1994 (1994).

Ley 685 de 2001 (2001).

Ley 1450 de 2011 (2011).

Ley 2099 de 2021 (2021).

Ley 2294 de 2023 (2023).

López Ascarza, F. (2000). Impacto ambiental de la minería en el desarrollo rural de las comunidades afectadas en el Perú. *Pontificia Universidad Javeriana*.

López, C., & Mataix, C. (2021). *Las materias primas minerales y la transición energética*.

Lu, T., Chen, W. Q., Ma, Y., Qian, Q., & Jia, J. (2023). Environmental impacts and improvement potentials for copper mining and mineral processing operations in China. *Journal of Environmental Management*, *342*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118178

McCarthy, J. (2015). A socioecological fix to capitalist crisis and climate change? The possibilities and limits of renewable energy. *Environment and Planning A*, *47*(12), 2485–2502. https://doi.org/10.1177/0308518X15602491

Medina Bernal, J., Cuenca Castelblanco, T., Serrano Perez, C., & Carillo Gonzalez, L. (2019). *Minería de oro y comunidades locales del Sur de Córdoba en Colombia, el caso de la mina El Alacrán*.

Meza Chevecich, C. A. (2024). *ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL COBRE EN UNA OPERACIÓN MINERA DE HIDROMETALURGIA EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE ESCUELA DE INGENIERIA.

Michaux, S. (2021). *The Mining of Minerals and the Limits to Growth*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10175.84640

Min. Minas, & Min. Ambiente. (2002a). *GUIA MINERO AMBIENTAL EXPLORACIÓN*.

Min. Minas, & Min. Ambiente. (2002b). *GUIA MINERO AMBIENTAL EXPLOTACIÓN*.

Minem. (2020). *Anuario Minero 2019*. www.gob.pe/minem

MINEM. (2022). *Anuario minero 2022*. www.gob.pe/minem

MINEM. (2023). *Boletín estadístico minero*.

MME. (2016). *POLÍTICA MINERA DE COLOMBIA Bases para la minería del futuro*.

Moussa, N. (1999). *El desarrollo de la minería del cobre en la segunda mitad del siglo XX*. Naciones Unidas.

Moya, P. M., Arce, G. J., Leiva, C., Vega, A. S., Gutiérrez, S., Adaros, H., Muñoz, L., Pastén, P. A., & Cortés, S. (2019). An integrated study of health, environmental and socioeconomic indicators in a mining-impacted community exposed to metal enrichment. *Environmental Geochemistry and Health*, *41*(6), 2505–2519. https://doi.org/10.1007/s10653-019-00308-4

Mwitwa, J., German, L., Muimba-Kankolongo, A., & Puntodewo, A. (2012). Governance and sustainability challenges in landscapes shaped by mining: Mining-forestry linkages and impacts in the Copper Belt of Zambia and the DR Congo. *Forest Policy and Economics*, *25*, 19–30. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.08.001

Nilsson, A. (2017). Structure-Borne Noise Transmission in Ships. In *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering* (pp. 1–14). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118476406.emoe058

Northey, S. A., Mudd, G. M., Werner, T. T., Jowitt, S. M., Haque, N., Yellishetty, M., & Weng, Z. (2017). The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. *Global Environmental Change*, *44*, 109–124. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.04.004

Northey, S., Haque, N., & Mudd, G. (2013). Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining. *Journal of Cleaner Production*, *40*, 118–128. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2012.09.027

Orihuela, J. C., Hinojosa, L., Huaroto, C., & Pérez, C. A. (2019). *Los Costos de la Contaminación Minera: Género, Bienestar e Instituciones*.

Palomo López, Y. P. (2021). *Ordenamiento territorial en Mocoa. Una nueva configuración territorial posdesastre*.

Parra Romero, A. (2022). ¿De quién es el páramo de Santurbán? Ancestralidad minera como narrativa de defensa del territorio en el municipio de Vetas, Santander. *Revista CS*, *36*, 147–177. https://doi.org/10.18046/recs.i36.4742

Pérez Torres, J., Vidal Pastrana, C., & Racero Casarrubia, J. (2016). *Biodiversidad Asociada a Los Sectores Manso y Tigre del Parque Nacional Natural Paramillo*.

Poveda Bonilla, R. (2019). *Estudio de caso sobre la gobernanza del cobre en Chile*. www.cepal.org/apps

Poveda Bonilla, R. (2021). *Estudio comparativo de las políticas públicas de encadenamientos productivos del cobre en Chile, el Ecuador y el Perú*. www.cepal.org/apps

Poveda Forero, G. A., Carrasco Rincón, E., Herrera Ospina, F. A., Sánchez Delgado, S. F., & Cuadrado Castañeda, S. (2023). *Análisis social, ambiental y económico de los principales proyectos de minería de cobre en Colombia*.

Resolución Número 1006 Del 2023 (2023).

Romero Lopez, A., & Muñoz, A. P. (2019). *CARACTERIZACIÓN PUEBLO INDÍGENA EMBERA KATIO*.

Romero Toledo, H. (2019). Extractivism in Chile: The Production of the Mining Territory and the Struggles of the del Aymara People in Norte Grande. *Colombia Internacional*, *98*, 3–30. https://doi.org/10.7440.colombiaint98.2019.01

Rönnlund, I., Reuter, M., Horn, S., Aho, J., Aho, M., Päällysaho, M., Ylimäki, L., & Pursula, T. (2016). Eco-efficiency indicator framework implemented in the metallurgical industry: part 2—a case study from the copper industry. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(12), 1719–1748. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1123-8

RUNAP. (2024). *Visor de áreas protegidas pertenecientes al RUNAP*.

SEA. (2017). *GUÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE PROYECTOS DE DESARROLLO MINERO DE COBRE Y ORO-PLATA EN EL SEIA*.

Sentencia T-622/16, Pub. L. No. T-622/16 (2016). https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2016/t-622-16.htm

SERNAGEOMIN. (2019). *Anuario de la minería de Chile*. www.sernageomin.cl

SERNAGEOMIN. (2023). *Anuario de la Minería de Chile 2022*.

SINCHI. (2018). *Habitar la Amazonia : ciudades y asentamientos*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI.

Srivastava, N., & Kumar, A. (2022). Minerals and energy interface in energy transition pathways: A systematic and comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, *376*, 134354. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.134354

Tabelin, C. B., Park, I., Phengsaart, T., Jeon, S., Villacorte-Tabelin, M., Alonzo, D., Yoo, K., Ito, M., & Hiroyoshi, N. (2021). Copper and critical metals production from porphyry ores and E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental aspects, and sustainability issues. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 170). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105610

The World Bank. (2017). *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*.

Thorpe, A., & Aguilar Ibarra, A. (2010). *Los modelos económicos de utilización de recursos naturales en Latinoamérica **.

Toledo, V. M. (2015). ¿De qué hablamos cuando hablamos de sustentabilidad? Una propuesta ecológico política. *INTER DISCIPLINA*, *3*(7). https://doi.org/10.22201/CEIICH.24485705E.2015.7.52383

UARIV. (2021). *Metodologia para calcular los indicadores de goce efectivo de derechos IGED*.

UNGRD. (2018). *AVANCE OPERACIÓN MOCOA*.

UPME. (2022). *Aprovechamiento minerales en Colombia*.

USGS. (2021). *MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2021*.

USGS. (2023). *MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2023*.

Valero, A. (2014). *Límites a la disponibilidad de minerales*. https://www.researchgate.net/publication/271828672

Valero Delgado, A., Valero Capilla, A., & Calvo, G. (2021). *Thanatia : límites materiales de la transición energética*.

Vela León, M., & Lewinsohn, J. L. (2021). *Indicadores de sostenibilidad en la minería metálica*.

Vinayagam, S., Sathishkumar, K., Ayyamperumal, R., Natarajan, P. M., Ahmad, I., Saeed, M., Alabdallah, N. M., & Sundaram, T. (2024). Distribution and transport of contaminants in soil through mining processes and its environmental impact and health hazard assessment: A review of the prospective solutions. *Environmental Research*, *240*, 117473. https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.117473

Wahyono, Y., Sasongko, N. A., Trench, A., Anda, M., Hadiyanto, H., Aisyah, N., Anisah, A., Ariyanto, N., Kumalasari, I., Putri, V. Z. E., Lestari, M. C., Panggabean, L. P., Ridlo, R., Sundari, S., Suryaningtyas, A. D., Novianti, E. D., Hakim, M. R. F., Prihatin, A. L., & Matin, H. H. A. (2024). Evaluating the impacts of environmental and human health of the critical minerals mining and processing industries in Indonesia using life cycle assessment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *10*. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100944

Weinberg, M. (2021). Cuerpos de cobre: Extractivismo en Chuquicamata, Chile. *Journal of Latin American and Caribbean Anthropology*, *26*(2), 200–218. https://doi.org/10.1111/jlca.12545

Wincewicz-Bosy, M., Dymyt, M., & Wąsowska, K. (2021). The Supply Chain of the Mining Industry: The Case of Copper Mining. In *European Research Studies Journal: Vol. XXIV* (Issue 1). https://www.researchgate.net/publication/349385618_The_Supply_Chain_of_the_Mining_Industry_The_Case_of_Copper_Mining

Woźniak, J., & Pactwa, K. (2017). Environmental activity of mining industry leaders in poland in line with the principles of sustainable development. *Sustainability (Switzerland)*, *9*(11). https://doi.org/10.3390/su9111903

Yu, J., Yao, S., Chen, R., Zhu, K., & Yu, L. (2005). A quantitative integrated evaluation of sustainable development of mineral resources of a mining city: A case study of Huangshi, Eastern China. *Resources Policy*, *30*(1), 7–19. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2004.08.006

Zanetta-Colombo, N. C., Scharnweber, T., Christie, D. A., Manzano, C. A., Blersch, M., Gayo, E. M., Muñoz, A. A., Fleming, Z. L., & Nüsser, M. (2024). When another one bites the dust: Environmental impact of global copper demand on local communities in the Atacama mining hotspot as registered by tree rings. *Science of the Total Environment*, *920*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170954

Zarta Ávila, P. (2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa*, *28*, 409–423. https://doi.org/10.25058/20112742.n28.18