



Unidad de Planeación
Minero Energética



Plan Nacional de **Desarrollo Minero** 2024-2035 **Fase II**

Escenarios Mineros **Planificando el Futuro**



Unidad de Planeación Minero Energética

Carlos Adrián Correa Flórez
Director General

Olga Tatiana Araque Mendoza
Subdirectora de Minería

Luz Mireya Gómez
Supervisora de Convenio

José Mauricio González Acosta
Supervisor financiero

Subdirección de Minería

Autores:

María Carolina Obando Vargas
Elisa Carrasco Rincón
Germán Andrés Poveda Forero
Sergio Fernando Sánchez Delgado

Linda Cárdenas Ramírez
Asesora de Comunicaciones

Diego Peñaranda Juyó
Diseño y Diagramación

Universidad Nacional de Colombia

Santiago Arango Aramburu
Director de proyecto

Autores:

Ricardo Smith Quintero
Yris Olaya Morales
Gloria Patricia Jaramillo Álvarez
Carlos Adrián Saldarriaga Isaza
Oscar Jaime Restrepo Baena
Clara Inés Villegas Palacio
Linda Ivette Berrio Giraldo
Juan Felipe Parra Rodas
Sergio Andrés Ospino Ricardo
Daniela Congote Osorio
Laura Flechas Mejía
María Paulina Vásquez Patiño
Valentina Betancur Jaramillo
Miguel Younes Velosa
José David Ogia Sofan
Sara Calderón Anaconda
Diana Mejía Durango

Asesor Internacional: Erik Larsen
Aarhus University - Dinamarca

Plan Nacional de Desarrollo Minero Fase II: Escenarios Mineros – Planificando el futuro

2024

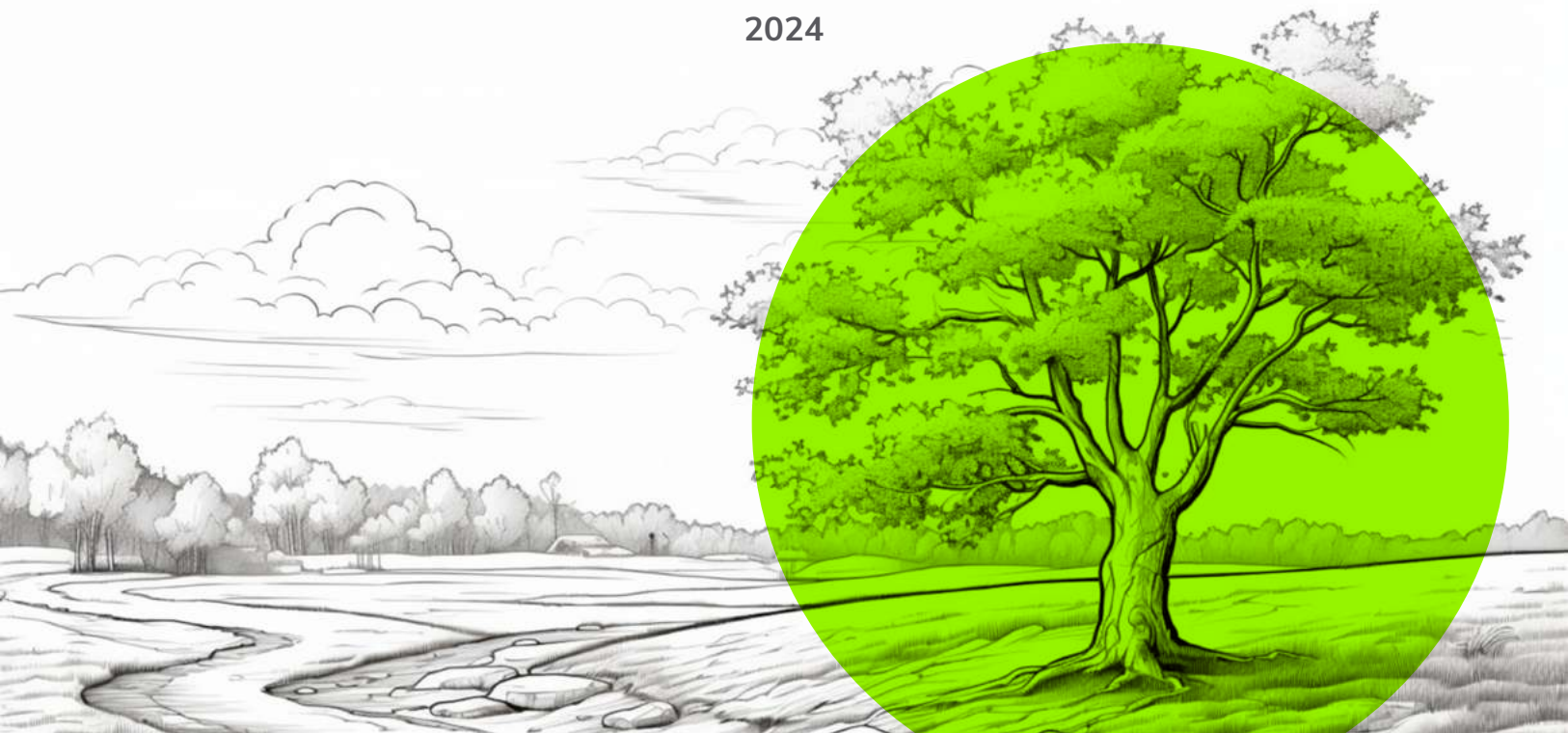


TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	6
2	Aspectos metodológicos para la construcción de la modelación y los escenarios mineros	7
2.1	Uso de la dinámica de sistemas en la modelación del sector minero	7
2.2	Metodología para el desarrollo del modelo de simulación y escenarios mineros	8
2.2.1	Fase I: Conceptualización del modelo	9
2.2.2	Fase 2: Inclusión de minerales y ajustes en módulos de simulación	9
2.3	La actividad minera en Colombia	10
2.4	Revisión y análisis de los planes nacionales de desarrollo minero 1997 – 2022	11
3	Hallazgos de temas actuales, tendencias globales y temas emergentes del sector minero	13
3.1	Contexto global	13
3.2	Contexto latinoamericano	18
3.3	Contexto colombiano	20
3.4	Retos y oportunidades del sector minero en Colombia	22
3.5	Contexto de los minerales estratégicos para Colombia	25
4	Modelo de simulación para minerales	26
4.1	Objetivo y alcance del modelo	26
4.2	Desafíos y alcance de la información	27
4.3	Estructura del modelo	28
4.3.1	Módulo de ciclo minero	30
4.3.2	Módulo ambiental	33
4.3.3	Módulo social	34
4.3.4	Módulo de atraktividad	37
4.3.5	Módulo financiero	38
4.4	Verificación y validación del modelo	40
4.4.1	Validación de estructura	41
4.4.2	Validación de comportamiento	41
5	Escenarios y resultados de simulación	43
5.1	Escenarios para el sector minero en el mundo	43
5.2	Escenarios mineros para Colombia 2023 - 2040	45
5.2.1	Escenario uno: Minería transformada	46
5.2.2	Escenario dos: Minería se estanca	48
5.2.3	Escenario tres: Minería local	49
5.2.4	Escenario cuatro: Minería en competencia	51
5.3	Resultados de simulación de variables en los escenarios	53
5.3.1	Inversión Social	53
5.3.2	Conflicto social	54
5.3.3	Regalías pagadas a nivel nacional	54
5.3.4	Uso de agua	55
5.3.5	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	56
5.4	Resultados de simulación de minerales estratégicos y carbón térmico	57
5.4.1	Carbón térmico	57
5.4.2	Carbón metalúrgico	58

5.4.3	Níquel.....	58
5.4.4	Oro	59
5.4.5	Arenas y gravas	60
5.4.6	Arcillas.....	61
5.4.7	Calizas	61
5.4.8	Fosfatos	62
5.4.9	Esmeraldas.....	63
6	Principales conclusiones del modelo de simulación para el sector minero colombiano.....	64
7	Referencias	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Síntesis de las líneas estratégicas reportadas en los planes nacionales de desarrollo minero	12
Tabla 2.	Objetivos de Desarrollo Sostenible y su relación con el sector minero	23
Tabla 3.	Validación de estructura del modelo, mediante la revisión de producción histórica vs simulada para caliza, carbón metalúrgico, fosfatos y magnesio.	41
Tabla 4.	Prioridades e insumos para determinar estrategias identificadas en la fase II del PNDM para el sector minero colombiano	66
Tabla 5.	Cisnes Negros en la construcción del Plan Nacional de Desarrollo Minero.	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama de flujo del ciclo minero.....	10
Figura 2.	Necesidades del sector minero según los planes nacionales de desarrollo minero.....	11
Figura 3.	Pilares de la planeación minera según los planes de desarrollo minero.....	11
Figura 4.	Capitalización bursátil en miles de millones de dólares del top de empresas mineras.....	14
Figura 5.	Extracción de minerales de 1970 a 2020	14
Figura 6.	Producción minera por continente en el año 2022.....	15
Figura 7.	Variaciones en la producción de minerales en el período 2000-2022....	15
Figura 8.	Producción de materiales empleados en baterías por continente, año 2021.....	16
Figura 9.	Transición energética y energía limpia.....	16
Figura 10.	Presupuestos globales de exploración de metales no ferrosos.....	17
Figura 11.	Aportes al PIB del sector Minero	21
Figura 12.	Diagrama de bloques del modelo del sector minero.....	28
Figura 13.	Diagrama causal general del sector minero en Colombia.....	29
Figura 14.	Resultado fase de exploración minera.....	31
Figura 15.	Diagrama causal del módulo ciclo minero.....	31

Figura 16. Variables dinámicas en el módulo “Ciclo Minero”	32
Figura 17. Diagrama de niveles y flujos para los minerales que fueron considerados con informalidad	32
Figura 18. Diagrama causal del módulo ambiental	33
Figura 19. Diagrama de flujos y niveles para el módulo ambiental	35
Figura 20. Diagrama causal del módulo social	35
Figura 21. Diagrama de flujos y niveles para el módulo social	36
Figura 22. Diagrama causal del módulo de atractividad	37
Figura 23. Diagrama de flujos y niveles para el módulo de atractividad	38
Figura 24. Diagrama causal del módulo financiero	39
Figura 25. Diagrama de flujos y niveles para el módulo financiero	40
Figura 26. Escenarios propuestos para el sector minero de Suecia por el SEI en 2019.	44
Figura 27. Escenarios propuestos por el sector minero de Chile en 2021.	44
Figura 28. Escenarios mineros propuestos por Leveraging Transparency to Reduce Corruption en 2022.	45
Figura 29. Escenarios mineros de largo plazo para el sector minero colombiano 2023.	46
Figura 30. Variaciones de parámetros (variables exógenas) del modelo que representa cada uno de los cuatros escenarios consolidados.	52
Figura 31. Inversión social a nivel nacional en los escenarios propuestos	53
Figura 32. Conflicto social a nivel nacional en los escenarios propuestos	54
Figura 33. Regalías pagadas a nivel nacional en los escenarios propuestos	55
Figura 34. Uso de agua en etapa de producción a nivel nacional en los escenarios propuestos	56
Figura 35. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en etapa de producción minera a nivel nacional en los escenarios propuestos	56
Figura 36. Escenarios de simulación para producción de carbón térmico en Colombia	57
Figura 37. Escenarios de simulación para producción de carbón metalúrgico en Colombia	58
Figura 38. Escenarios de simulación para producción de níquel en Colombia	59
Figura 39. Escenarios de simulación para producción de oro en Colombia	59
Figura 40. Producción de oro por minería no titulada en el escenario tendencial (BAU).	60
Figura 41. Escenarios de simulación para producción de arenas y gravas en Colombia	60
Figura 42. Escenarios de simulación para producción de arcillas en Colombia	61
Figura 43. Escenarios de simulación para producción de calizas en Colombia	62
Figura 44. Escenarios de simulación para producción de fosfatos en Colombia	62
Figura 45. Escenarios de simulación para producción de esmeraldas en Colombia	63
Figura 46. Relatoría Grafica del Taller “Definición de los escenarios y estrategias para el sector minero colombiano” UNAL – UPME.	64
Figura 47. Propuesta inicial de prioridades - Insumos proceso talleres 2023.	65

1. INTRODUCCIÓN

El Plan Nacional de Desarrollo Minero (PNDM) se configura como una hoja de ruta de carácter indicativo que busca orientar la minería en el país, con fundamento en los postulados del Plan Nacional de Desarrollo “Colombia Potencia Mundial de la Vida 2022-2026”, los lineamientos de la Transición Energética Justa, los ideales de desarrollo sostenible, la protección de los derechos humanos, y la equidad social, entre otros. Además, se busca vincular la planeación estratégica de las entidades relacionadas con la actividad, a través de la coordinación y concurrencia entre actores e instituciones de diferentes órdenes.

La planeación de largo plazo del sector minero es fundamental para responder a los desafíos de la transición energética, la reindustrialización, el desarrollo agrícola y de la infraestructura pública, en los cuales la minería juega un papel fundamental que debe ser implementada a través de acciones que permitirán avanzar bajo el principio de una *minería para la vida*, de manera que se promuevan la sostenibilidad, la equidad y la responsabilidad en la industria minera.

El actual PNDM se estructura en tres fases: Fase 1. Diagnóstico sectorial – desde los territorios, el cual analiza las particularidades geográficas, sociales, económicas y ambientales de cada región con el fin de comprender la situación actual de la industria minera en Colombia. Fase 2. Escenarios mineros – Planificando el futuro, el cual detalla posibles escenarios a futuro para el sector minero en Colombia, los cuales, junto con otras herramientas de simulación desarrolladas, permiten considerar las incertidumbres de largo plazo en la planificación del sector minero; y Fase 3. PNDM: estrategias y acciones, fase que definirá las estrategias y acciones necesarias para cumplir con la visión y los objetivos del PNDM. Esta última fase es la materialización de la visión y la senda hacia un futuro minero próspero y responsable.

Este documento abarca exclusivamente la **Fase 2. Escenarios mineros - Planificando el Futuro**, la cual se basa en los aportes del Convenio entre la Universidad Nacional de Colombia y la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME en el año 2023, el cual permitió la generación de escenarios de planificación y un modelo de simulación dinámica actualizado con los minerales estratégicos definidos por la Agencia Nacional de Minería -ANM- (Agencia Nacional de Minería, 2023), a fin de servir como insumo para los planes de desarrollo del sector, el diseño y evaluación de estrategias a largo plazo en el sector minero colombiano.

Este documento contiene, en primer lugar, los aspectos metodológicos para la construcción de los escenarios mineros. En segundo lugar, los hallazgos de temas actuales, tendencias globales y temas emergentes del sector minero. En tercer lugar, la explicación del modelo de simulación para minerales estratégicos, incluidos los módulos de ciclo minero, ambiental, social, atractividad y financiero. En cuarto lugar, los resultados de los escenarios y, finalmente, se encuentran las políticas y estrategias para el sector minero colombiano, de acuerdo con el modelo y resultados de la simulación.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MODELACIÓN Y LOS ESCENARIOS MINEROS

La elaboración de los escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos y carbón térmico¹ en Colombia se llevó a cabo mediante la metodología de Dinámica de Sistemas, la cual es una de las herramientas que se han usado para estudiar problemáticas del sector minero y el efecto de políticas ambientales en la exploración y explotación de un mineral. A continuación, se presentan los antecedentes del uso de la dinámica de sistemas en modelación del sector minero, la metodología desarrollada para el modelo de simulación y algunos conceptos del ciclo minero que se han tenido en cuenta para la construcción de los escenarios mineros.

2.1 Uso de la dinámica de sistemas en la modelación del sector minero

El uso de la dinámica de sistemas inició a mediados del siglo XX; sin embargo, sus aplicaciones en minería datan de la década de los setenta. Esta época fue de importantes desarrollos en las operaciones de las empresas, por lo cual los primeros artículos se aproximaron desde la dinámica de sistemas para entender los problemas con el fin de mejorar la productividad de la minería, especialmente con el carbón como foco de investigación. Comenzando los años ochenta, se evidencia un incremento en las temáticas abordadas como es el caso de aplicaciones en la ingeniería y procesos productivos (Wolstenholme & Holmes, 1985) o asuntos relevantes de impactos económicos y productividad (Zdravkovic, 1983). En estas investigaciones se identificaron variables como la mano de obra necesaria para los procesos productivos o la demanda de minerales, las cuales permiten modelar escenarios futuros más adecuados. Lo anterior es insumo para el continuo desarrollo de políticas públicas para impactar positivamente la minería.

En la década de los noventa se comienzan a abordar otros temas importantes como es el caso del impacto del desarrollo de la tecnología en la productividad minera, planteando problemas de control y producción por medio de modelos (Corke, Winstanley, & Roberts, 1997). De igual forma, aparecen nuevos conceptos de variables relacionadas con las personas y habilidades blandas en relación con la productividad (Campbell, 1998). Estos modelos muestran importantes relaciones entre múltiples disciplinas y variables, dando un paso adelante en el desarrollo de la dinámica de sistemas más allá de la productividad. Ejemplo de esto son los primeros modelos que involucran aspectos ambientales o intereses sociales en las investigaciones. Estos modelos ambientales y sociales estaban relacionados directamente con la generación de políticas de estado para la gestión y control.

Casi todos los modelos de dinámica de sistemas en minería desarrollados en el siglo XXI incluyen módulos ambientales; los retardos en los modelos empiezan a tomar fuerza dado el importante impacto en el desarrollo de los modelos, escenarios y resultados evidenciados en las operaciones. En el 2010 se desarrollaron investigaciones en Asia, principalmente en China donde se comienzan a evaluar los impactos de la minería artesanal, la relación de productividad e impactos ambientales, sociales y en la salud. Paralelamente, en Japón se modeló el suministro sostenible de minerales estratégicos como cobre, zinc o plomo usando dinámica de sistemas (Universidad Nacional de Colombia, 2023).

1 Además de los minerales estratégicos establecidos en la Resolución 1006 de 2023 se ha tenido en cuenta el carbón térmico dada su importancia económica y sus amplios antecedentes de explotación en el país

Por otra parte, Xiu et al. (Xiu, Liu, Li, Hu, & Hou, 2019) incluyen en sus modelos el conocimiento geológico directamente relacionado con las reservas probables y probadas, reforzando así la importancia de desarrollar esta variable para lograr mejores resultados en las operaciones mineras, sin olvidarse de la necesidad de considerar la sostenibilidad en los procesos. Esto permite modelar el sistema a pesar de la dificultad dadas variables exógenas inciertas, como los precios de commodities como el oro.

En la década actual se han profundizado las investigaciones en el campo ambiental, donde se propone incluir estos costos dentro de los costos de operación. Estas investigaciones reafirman que los gerentes deben implementar *eco-friendly mining* y *green mining*, no solo por los beneficios y las multas evitadas, sino porque minimizan los costos correctivos de las operaciones (Universidad Nacional de Colombia, 2023).

Al igual que las preocupaciones ambientales, las preocupaciones sociales y culturales que impactan a la minería crecen con esta década; la minería debe crecer, pero sin olvidar que en la actualidad deben superar exitosamente el escrutinio del público y las comunidades relacionadas con la actividad. Esta problemática es abordada utilizando dinámica de sistemas y pensamiento sistémico por los investigadores Verrier et al. (Verrier, y otros, 2022) quienes logran modelar importantes variables relacionadas con estas restricciones sociales. Los análisis de este sistema no lineal llevan a concluir que la participación de las partes interesadas como lo son las comunidades y los inversores en la toma de decisiones y su conocimiento de las condiciones mineras son fundamentales para el éxito de la minería.

En Colombia la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, definieron estrategias para el desarrollo minero colombiano (Arango, y otros, 2017); para estas investigaciones los módulos ambientales, sociales y económicos fueron necesarios para los modelos, en búsqueda de plantear directrices para la elaboración de políticas públicas necesarias para la minería del país.

2.2. Metodología para el desarrollo del modelo de simulación y escenarios mineros

Para el desarrollo de un modelo de simulación con dinámica de sistemas y su aplicación para el análisis de posibles comportamientos futuros del sistema planteado, se siguieron los lineamientos metodológicos establecidos por Sterman (2000). Estos pasos incluyen:

- a) **Articulación del problema:** se identifican las variables claves, se definen los objetivos, aplicaciones y alcances del modelo y se identifican comportamientos problemáticos que presentan variaciones en el tiempo.
- b) **Formulación de la hipótesis dinámica:** se identifican las variables endógenas y exógenas que intervienen en el problema de interés, así como las relaciones causales que existen entre ellas. La hipótesis dinámica se construye al enlazar las variables relacionadas mediante la construcción de un Diagrama Causal².
- c) **Formulación de un modelo de simulación:** la hipótesis dinámica es expresada como un diagrama de procesos de realimentación, a partir del cual se formulan las expresiones matemáticas coherentes con las relaciones causales planteadas en la etapa anterior. Para esto, es necesario definir valores iniciales para los estados y definir los parámetros del modelo.
- d) **Validación del modelo:** se evalúa que, tanto la estructura como el comportamiento, representen fielmente el sistema real. Este es un proceso iterativo que puede requerir modificaciones en el modelo, para lo que se realizarán numerosas simulaciones tendientes a la detección de eventuales errores y, en caso de resultar necesario, se ajustarán las hipótesis formuladas previamente que pudieran apartarse del comportamiento real del sistema.

2 Estos diagramas permiten observar ciclos de realimentación que se forman a partir de las relaciones causa-efecto; que puedan explicar el comportamiento de los sistemas dinámicos.

- e) **Diseño y evaluación de políticas:** formulación de políticas que permitan mejorar la situación problemática en los diferentes escenarios planteados. En esta fase es posible la elaboración de escenarios donde se visualice el comportamiento bajo estos cambios de estructura y analizar cuáles serían los efectos de dichas políticas.
- f) **Retroalimentación del modelo:** con los resultados de la evaluación de políticas se retroalimenta el modelo planteado, proponiendo cambios en su formulación, si es necesario.

Teniendo como base el modelo realizado en 2014 (UPME – Universidad Nacional de Colombia) se realizó una actualización de cada uno de los lineamientos metodológicos de la herramienta, con el fin de ir verificando cada uno de los pasos de acuerdo con las condiciones, necesidades y requerimientos actuales del sector para cada uno de los minerales establecidos. El modelo de simulación resultante permite identificar el comportamiento de variables claves del sector (i.e., renta minera, producción, entre otros) bajo los diferentes escenarios del sector minero actualizados. Los lineamientos metodológicos se consolidaron en dos fases, las cuales se detallan a continuación:

2.2.1. Fase I: Conceptualización del modelo

Se realizó una verificación de la conceptualización del modelo existente. Esto implica la revisión de la definición del propósito y los límites del modelo de acuerdo con las condiciones, requerimientos y necesidades actuales del sector minero. La representación del modelo se realizó a través de la elaboración de un mapa el cual permite plasmar las relaciones de las variables que controlan la evolución de las situaciones problemáticas del sistema y, por lo tanto, de la(s) estructura(s) dominante(s) del modelo para los minerales estratégicos establecidos por la ANM a nivel nacional y el carbón térmico.

A partir de esto, se identificó la información relevante requerida para el modelo, la información disponible, y la información que debía ser estimada. Esta etapa del trabajo implicó un importante esfuerzo de recolección de datos, e información disponible sobre las variables claves en las diversas entidades involucradas en el sector minero. Para la conceptualización del modelo, se realizó un taller para la construcción del nuevo diagrama causal que capture la dinámica actual del sector minero colombiano, teniendo en cuenta un alcance y límites establecidos.

2.2.2. Fase 2: Inclusión de minerales y ajustes en los módulos de simulación

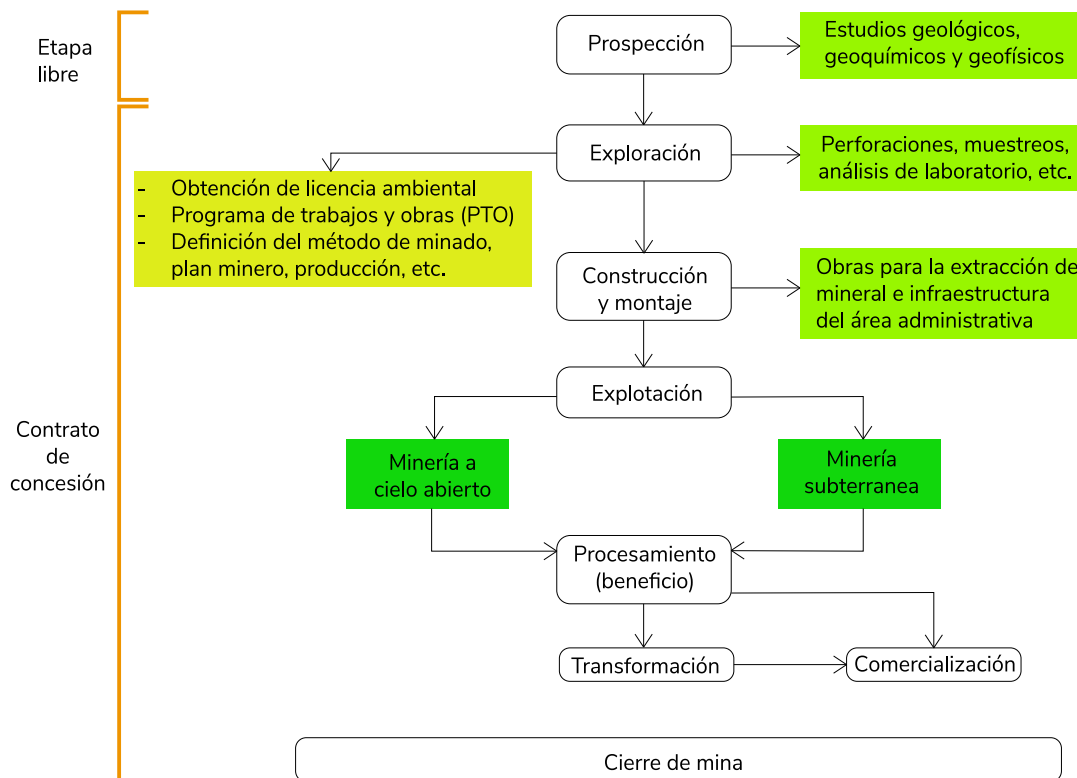
En esta fase se actualizó la arquitectura del modelo. Esto incluyó las representaciones de las principales fuerzas controladoras y procesos principales de toma de decisiones, de acuerdo con las dinámicas actuales del sector, para cada uno de los minerales estratégicos y el carbón térmico a nivel nacional y en las regiones priorizadas. El diagrama de flujo resultante consideró los aspectos discutidos en la primera fase con el mismo software de simulación utilizado en la versión del 2014 (Power Sim). En esta etapa se revisaron las ecuaciones utilizadas en el diagrama, de manera que el modelo pueda ser simulado. Las simulaciones se realizaron por módulos para posteriormente lograr un acople de todos los módulos.

En el proceso de desarrollo y operación del modelo fue necesario interactuar con todos los integrantes del equipo de trabajo de la Universidad Nacional y de la UPME, realizando consultas con expertos del sector. Adicionalmente, se llevó a cabo un taller el cual tuvo como objeto presentar y validar la conceptualización del modelo y levantamiento de información requerida para el ajuste del mismo, con el fin de hacer la simulación a nivel nacional y en las regiones priorizadas. Con el modelo resultante se analizó la presencia de singularidades en cada uno de los escenarios construidos y el impacto que tendrían sobre el sector minero.

2.3. La actividad minera en Colombia

La actividad minera en el país se desarrolla por fases las cuales, según el artículo 2 de la Ley 685 de 2001 comprenden: prospección, exploración, construcción y montaje, explotación, beneficio, transformación, transporte y promoción de los minerales. Para la modelación de escenarios es fundamental conocer el funcionamiento de esas fases o ciclo minero y la normatividad asociada en el país, pues esto permite entender la dinámica y a partir de allí, identificar los insumos necesarios para la construcción de los escenarios y la modelación del sector minero colombiano, teniendo en cuenta las etapas establecidas por la Ley, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1: Diagrama de flujo del ciclo minero



Fuente. Tomado y modificado de documento informe modelación convenio UPME – UNAL 2023

Adicional a lo anterior, es importante resaltar que hay dos divisiones principales en las fases del ciclo minero: la etapa libre y el contrato de concesión minera. En la etapa libre se desarrolla la prospección, que es el proceso mediante el cual se identifican las zonas con potencial para contener minerales de interés (Prieto Rincón, Guatame Aponte, & Cárdenas, 2019). Posteriormente, se debe suscribir un contrato de concesión minera para continuar con el proceso de exploración y extracción del recurso mineral. Este contrato está regido actualmente bajo el código de minas - Ley 685 de 2001 y bajo su concesión se permite que, dentro de la zona concedida, se hagan estudios de exploración, trabajos y obras de infraestructura y extracción de minerales bajo principios técnicos e ingenieriles, siempre que se cumpla con la normatividad técnica y ambiental requerida (Agencia Nacional de Minería, 2015).

Posterior a la explotación del mineral, se deben tener en cuenta los procesos de beneficio y comercialización del mineral. También se debe desarrollar un proceso de cierre y abandono que consta en el retiro de la maquinaria, los equipos, el desmantelamiento de las instalaciones de exploración y explotación y finalmente, la rehabilitación de las zonas en donde se desarrolló la actividad minera.

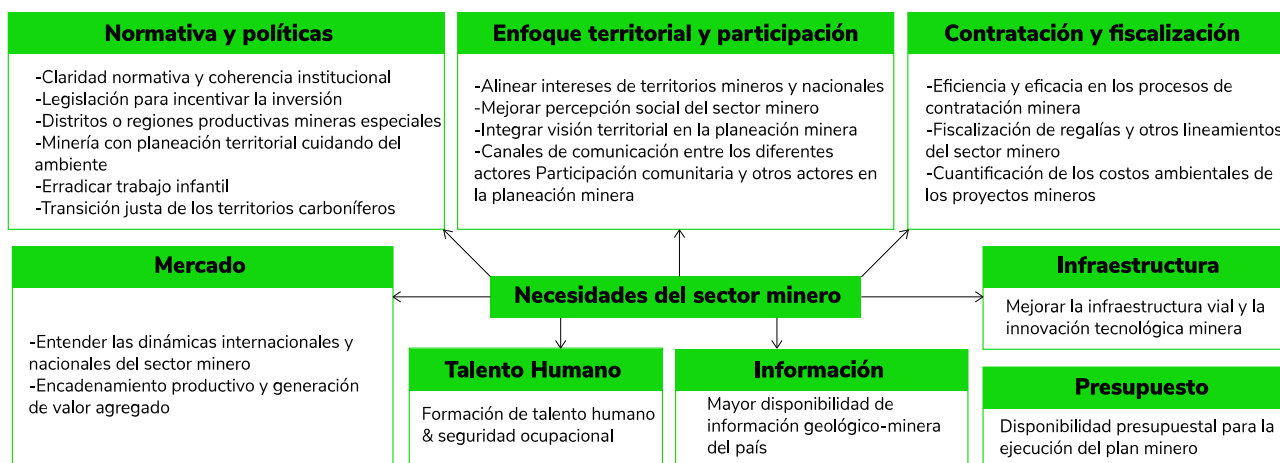
La identificación de las fases del ciclo minero y las variables que las afectan permiten enriquecer la modelación, de manera que se incluyen variables que están directamente relacionadas con la actividad y que pueden influir ampliamente en los diferentes escenarios propuestos.

2.4. Revisión y análisis de los planes nacionales de desarrollo minero 1997 – 2022

Como parte de los insumos para la elaboración del modelo y los escenarios mineros, así como para la identificación de prioridades a tener en cuenta en el PNDM, se han revisado y analizado los siete planes nacionales de desarrollo minero elaborados por la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME desde 1997 hasta la fecha³.

En la formulación de cada plan de desarrollo minero se ha partido por el reconocimiento de una serie de necesidades del sector, que han servido de base para la elaboración de cada uno de ellos. Al revisar estas necesidades se han identificado patrones que tienden a ser repetitivos y que reflejan los aspectos hacia donde se ha focalizado la atención en el proceso de planeación minera en el país, como los que se muestran en la Figura 2.

Figura 2: Necesidades del sector minero según los planes nacionales de desarrollo minero



Fuente: Universidad Nacional de Colombia, 2023

Con base en las necesidades, en la revisión se ha identificado que han surgido aspectos que son pilares para el establecimiento de los objetivos de la planeación minera en Colombia (ver Figura 3) y, por lo tanto, han marcado el eje central de los PNDM. Así, la planeación minera ha estado enfocada en promover el desarrollo del sector en función del crecimiento económico lo que, a su vez, se ha traducido en la búsqueda y establecimiento de condiciones que contribuyan al mejoramiento de la competitividad del sector minero Colombia y, en ese sentido, incrementar la inversión tanto nacional como extranjera, de modo que, se aporte a las finanzas públicas y al bienestar social. Asimismo, a este enfoque común y central en los PNDM se le han venido sumando otros aspectos que han emergido de las necesidades socioambientales de los territorios mineros.

Figura 3: Pilares de la planeación minera según los planes de desarrollo minero



Fuente: Universidad Nacional de Colombia, 2023

³ Se han desarrollado 7 planes nacionales de desarrollo minero en los años 1997, 2002, 2006, 2007, 2012, 2017 y una versión preliminar en 2022 que actualmente se considera como la fase I del actual PNDM.

Al revisar las líneas estratégicas de los planes se evidencia que, en términos generales, están fundamentadas en las necesidades presentes en el periodo de desarrollo del plan. Sin embargo, debido a que varios de los retos del sector minero no han sido sorteados, estos son reiterativos entre los diferentes planes, por lo que existe cierta convergencia. En la Tabla 1 se realiza una síntesis general basada en las tendencias identificadas respecto a la convergencia entre líneas estratégicas.

Con base en la revisión y análisis de los planes, la Universidad Nacional de Colombia concluyó que, en general, la planeación minera debe aunar esfuerzos hacia el establecimiento de propósitos y acciones que permitan dar continuidad a las estrategias previamente propuestas en el ejercicio de planeación, considerando como retos:

- La inclusión explícita de las dinámicas socioculturales
- Los posibles impactos sociales, económicos, culturales y ecológicos de la actividad en el territorio minero, así como su mitigación
- Mayor coordinación interinstitucional y estrechar brechas entre esta institucionalidad con el sector empresarial y las comunidades mediante la promoción de canales de comunicación y escenarios de participación ciudadana
- Velar por el reconocimiento de la percepción y aceptación social de la actividad minera y la articulación con la visión local del territorio
- Promover avances tecnológicos y capacitaciones del recurso humano para el desarrollo de la actividad, y contribuir al desarrollo de las capacidades de la comunidad local con fines de disminuir la dependencia del territorio a la minería.

Igualmente, es importante tener estrategias para centralizar y mejorar la disponibilidad de la información de relevancia al sector minero, la revisión de investigación científica disponible para tener un mejor panorama de los que sucede en el sector, y la articulación con los lineamientos propuestos en el PND (Universidad Nacional de Colombia, 2023).

Tabla 1. Síntesis de las líneas estratégicas reportadas en los planes nacionales de desarrollo minero

Líneas estratégicas	PNDM						
	1997	2002	2006	2007	2012	2017	2022
Fortalecimiento institucional	X	X	X	X	X	X	X
Desarrollo sostenible/manejo ambiental	X	X	X	X		X	X
Exploración básica y conocimiento geológico	X	X		X	X	X	
Información sobre el sector minero y manejo de regalías	X	X		X	X	X	
Encadenamientos productivos		X			X	X	X
Ciencia y capital humano				X	X	X	
Infraestructura vial y de transporte	X	X				X	
Formalización MAPE	X				X		X
Ordenamiento territorial/participación ciudadana						X	X

Fuente: Universidad Nacional de Colombia, 2023

3. HALLAZGOS DE TEMAS ACTUALES, TENDENCIAS GLOBALES Y TEMAS EMERGENTES DEL SECTOR MINERO

La política pública del sector minero es fundamental para guiar y optimizar las actividades que involucren las fases del ciclo minero, incluyendo el beneficio y la transformación de los minerales para generar valor agregado. El contexto actual es de incertidumbre en la economía global, y está marcado por las consecuencias de la emergencia sanitaria, económica y social causada por el COVID-19, así como por los conflictos geopolíticos actuales (CEPAL, 2022 a). Por lo tanto, se requieren análisis integrales de las proyecciones de oferta y demanda de minerales para escenarios tecnológicos y energéticos cambiantes.

Actualmente, los combustibles fósiles representan el 80% del consumo de energía y entre el 70% y 75% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial; el carbón por sí solo produce más del 25% de las emisiones globales (Berns, 2023). El panorama actual es de transición hacia fuentes de energía más limpias y la consecución de objetivos globales de reducción de emisiones de carbono, lo que implica, según Berns (2023), que las energías renovables deben aumentar en un 12% el suministro de energía en 2021 y entre 50% y 70% para el 2050; así mismo la capacidad de generación de energía solar y eólica debe aumentar diez veces, y las redes eléctricas globales deben expandirse en un factor de 2,5 veces; con niveles de inversión similares en ambas áreas. Estos cambios implican un considerable aumento en la demanda de diversos minerales fundamentales para la fabricación de tecnologías energéticas sostenibles; no obstante, persiste la incertidumbre en torno a cuáles minerales tendrán mayor demanda y de cuánto será este incremento.

La magnitud de la demanda de minerales para la transición energética depende de la elección de fuentes y tecnologías de generación de energía eléctrica, así como de la adopción masiva de vehículos completamente eléctricos o híbridos, y los tipos de baterías que prevalecerán. Además, esta demanda se verá influida por la innovación y el desarrollo de nuevas tecnologías, procesos, métodos y materiales.

Así mismo, es importante analizar las diferentes tendencias y requerimientos ambientales que a nivel gubernamental, sociedad civil, comunidades étnicas y organizaciones han exigido. La exploración y producción real de estos minerales dependerá de factores ambientales, sociales y de gobernanza específicos de cada país debido a los importantes riesgos que deben gestionarse adecuadamente para garantizar el desarrollo sostenible.

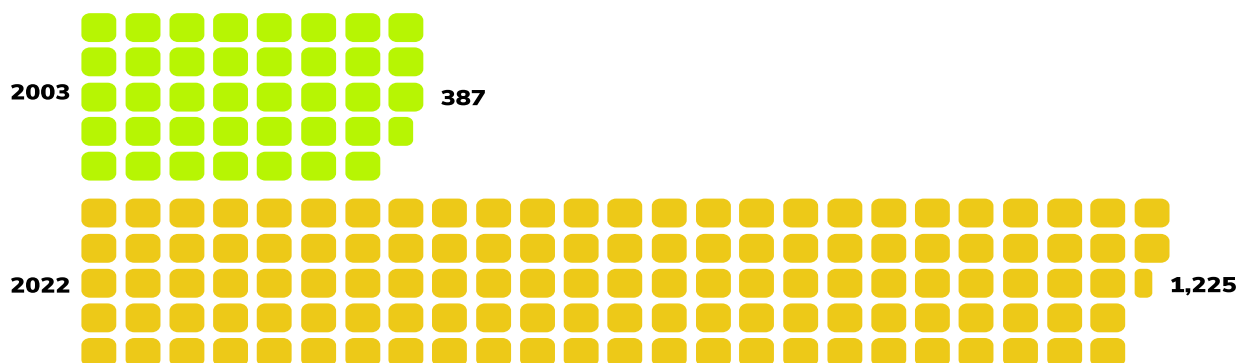
3.1. Contexto global

En los últimos años la industria minera ha experimentado un cambio sustancial en su producción. Anteriormente, el carbón era el mayor contribuyente a los ingresos de las empresas mineras, respaldando a 19 de las 40 mayores compañías mineras del mundo; sin embargo, para el año 2022, solamente 11 de las 40 principales empresas mineras obtuvieron ingresos del carbón (PwC, 2023). La misma fuente indica que en este periodo es donde se observa un notable impulso en la producción de tecnologías con energía renovable y vehículos eléctricos, lo que demuestra una canasta de producción minera más diversificada que hace una década.

Así mismo, la consolidación de la industria ha impulsado un crecimiento en el valor del mercado y lo ha triplicado, como lo muestra la Figura 4. En el 2003, la capitalización bursátil de las 40 compañías mineras más grandes rondaba los 387 mil millones de dólares; para el 2022, esta cifra aumentó considerablemente y alcanzó más de un billón de dólares. Más de un tercio de estas empresas se ha fusionado con otros actores aumentando las transacciones del mercado (PwC, 2023).

Figura 4: Capitalización bursátil en miles de millones de dólares del top de empresas mineras

Market capitalisation on the Top 40 mining companies (US\$bn)

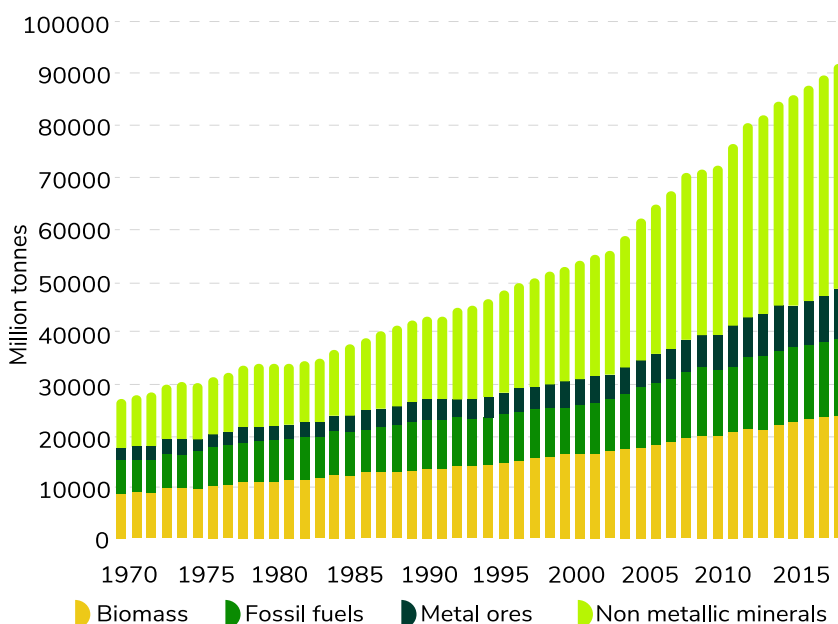


Fuente: (PwC, 2023)

Como se observa en la Figura 5, desde 1970 hasta 2017 la extracción anual de materiales a nivel global se triplicó, gracias al aumento poblacional y crecimiento económico. Se espera que el uso de materiales a nivel mundial se mantenga en constante aumento, pasando de 79 gigatoneladas (Gt) en 2011 a 167 Gt en 2060 (United Nations Environment Programme, 2020). Los minerales no metálicos, como los materiales de construcción, arena y grava, representan más de la mitad del uso total de materiales por peso. Se proyecta que este uso pase de 35 Gt en 2011 a 82 Gt en 2060 (United Nations Environment Programme, 2020).

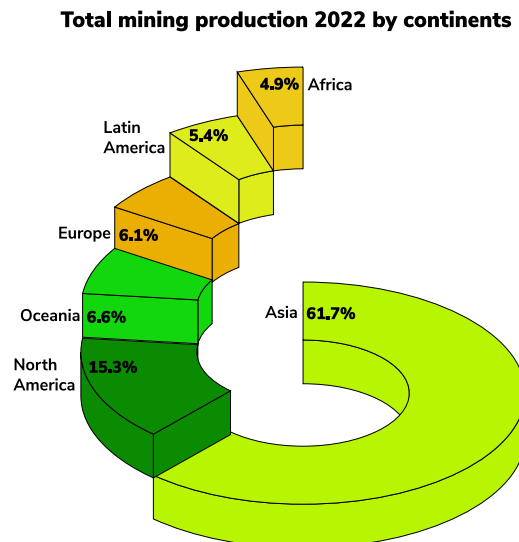
Entre 1984 y 2021 predominó la producción de los minerales combustibles con ligeros crecimientos en minerales ferrosos e industriales. En su mayoría la producción en 2022 se concentró en Asia como indica la Figura 6, con China liderando la producción de 28 minerales y metales en la industria así: 4 metales ferrosos (Mo, Ti, W, V), 14 metales no ferrosos (Al, Sb, As, Bi, Cd, Ga, Ge, In, Pb, Hg, REE, Se, Te, Sn, Zn), 1 metal precioso (Au), 7 minerales industriales (fluorita, grafito, yeso, magnesita, roca fosfórica, sal, azufre) y 2 materiales combustibles (carbón y coque) (World Mining Data, 2024).

Figura 5: Extracción de minerales de 1970 a 2020



Fuente: (United Nations Environment Programme, 2020)

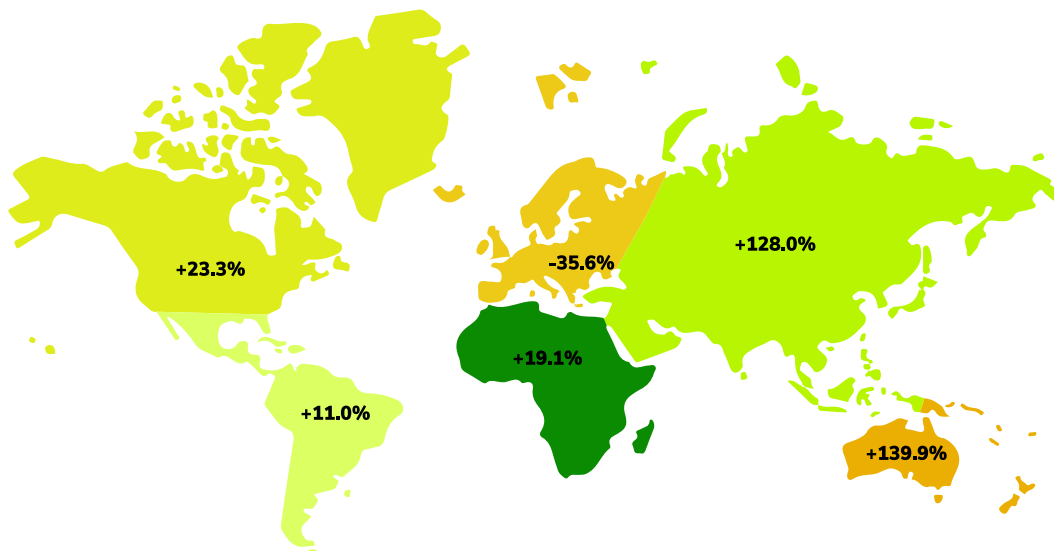
Figura 6: Producción minera por continente en el año 2022



Fuente: (World Mining Data, 2024)

Al analizar el aumento en la producción por continente durante los años 2000 a 2022, tal como se muestra en la Figura 7, se observa un crecimiento positivo en la mayoría de los continentes, destacando especialmente Oceanía y Asia, que experimentaron un incremento de más del 100%. Únicamente en Europa se presenta una disminución del 35,6% en la producción respecto al 2000.

Figura 7: Variaciones en la producción de minerales en el período 2000-2022

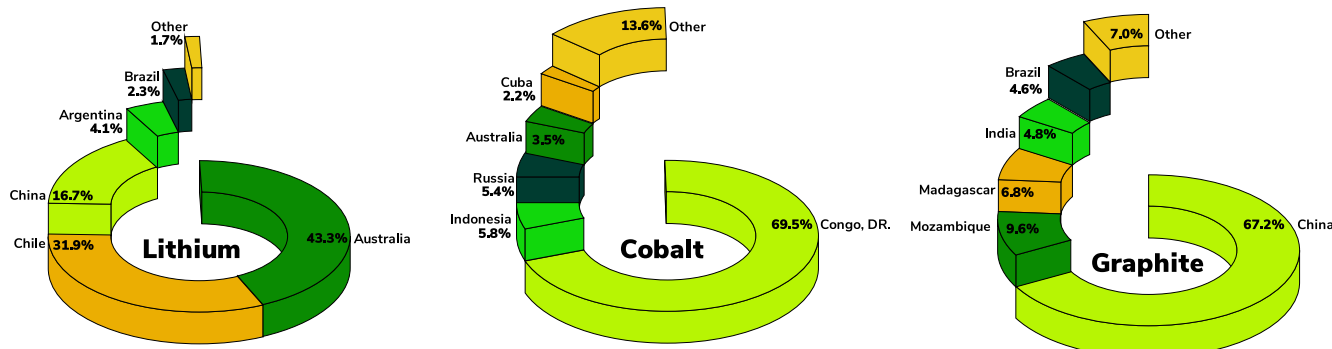


Fuente: (World Mining Data, 2024)

Al final del primer trimestre de 2022, el ranking de las 50 principales compañías mineras del mundo alcanzó un récord histórico al registrar un valor total conjunto de USD 1,75 billones. Este logro fue impulsado por los elevados precios de metales como el cobre, níquel, litio, oro, platino, uranio y estaño (Mining.com, 2024). Debido a la creciente demanda y los altos precios de los minerales, el tamaño del mercado de minerales clave para la transición energética se duplicó en los últimos cinco años, alcanzando los 320 mil millones de dólares, lo cual es equiparable con el tamaño del mercado de hierro. Como resultado, los minerales para la transición energética, que solían ser un segmento pequeño del mercado, ahora están tomando protagonismo en la industria minera (International Energy Agency, 2023).

En cuanto a los materiales empleados en baterías, la producción de litio está encabezada por Australia con 43,3%, seguida de Chile con 31,9% y China con 16,7%. Por su parte, la producción de Cobalto se desarrolla en un 69,5% en Congo, mientras que la de grafito en un 67,2% por China, como se observa en la Figura 8 (World Mining Data, 2024).

Figura 8: Producción de materiales empleados en baterías por continente, año 2021.



Fuente: (World Mining Data, 2024)

Algunos de los minerales críticos experimentaron aumento de precios durante 2021 y principios de 2022, acompañados de una fuerte volatilidad, especialmente en el caso del níquel y el litio. La mayoría de los precios comenzaron a moderarse en la segunda mitad de 2022 y en 2023, sin embargo, continúan estando por encima de las medias históricas. Los precios más altos o volátiles de los minerales en 2021 y 2022 destacaron la importancia de los precios de los materiales en los costos de transformar los sistemas energéticos (International Energy Agency, 2023).

La refinación y procesamiento de los minerales para la transición energética, así como su proceso de manufactura en energías limpias se realiza en cadenas de suministro globales (Berns, 2023). En la Figura 9 se observa que, para el caso del cobre, Chile lidera la extracción, pero China tiene protagonismo en el procesamiento, refinería y manufactura.

La producción de energía limpia demanda más minerales y metales que la obtenida de combustibles fósiles (United Nations Environment Programme, 2020). Las baterías para autos eléctricos (aluminio, cobalto, hierro, plomo, litio, manganeso y níquel) y otras tecnologías (turbinas eólicas, paneles solares) requieren estos recursos, por lo que su importancia estratégica impulsa la búsqueda de seguridad en el acceso y diversificación de fuentes. Algunos países ya han legislado sobre la producción, procesamiento, fabricación y almacenamiento de estos minerales críticos.

Figura 9: Transición energética y energía limpia



Fuente: (Berns, 2023)

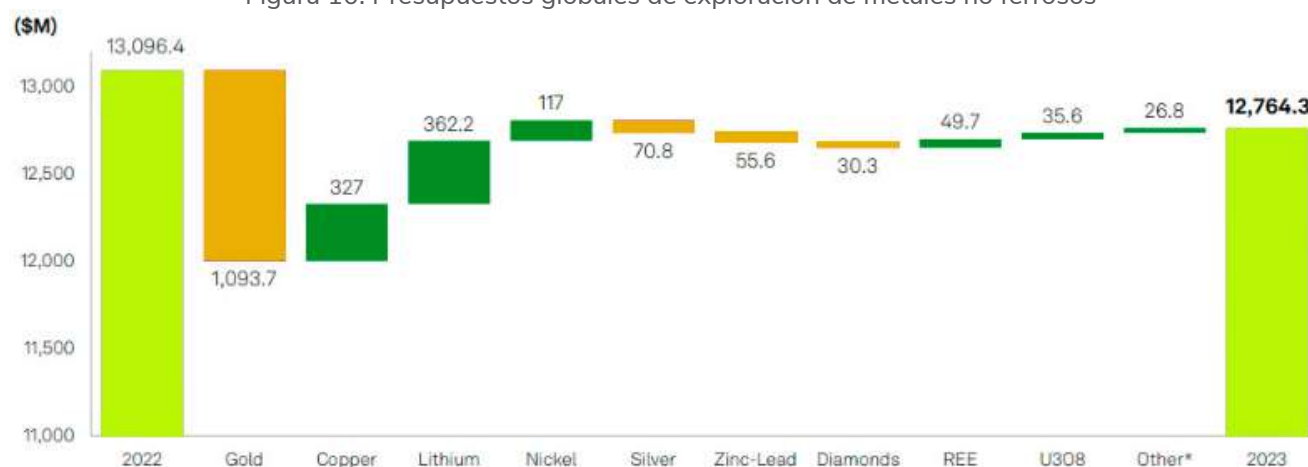
En diciembre de 2022 Canadá actualizó su Estrategia de Minerales Críticos; para marzo de 2023 la Unión Europea publicó su Ley de Materias Primas Críticas; Reino Unido actualizó su Estrategia de Minerales Críticos; y se espera que Australia publique una actualización de su estrategia existente en 2023 (PwC, 2023). De acuerdo con EY Global Mining & Metals (2023), México decidió nacionalizar sus recursos de litio, mientras que Estados Unidos actualizó sus regulaciones con el objetivo de disminuir su dependencia de China. Por otra parte, Canadá implementó restricciones adicionales a las inversiones provenientes de empresas estatales extranjeras en minerales críticos, y Zimbabue optó por prohibir la exportación de litio sin procesar. En enero de 2023, Filipinas contempló la posibilidad de prohibir las exportaciones de níquel o imponer impuestos a este mineral; en junio del mismo año Namibia prohibió la exportación de litio sin procesar y minerales críticos y finalmente en agosto China restringió sus exportaciones de galio y germanio (EY Global Mining & Metals, 2023).

En la ley de reducción de la inflación de 2022 (US Inflation Reduction Act -IRA), Estados Unidos estableció incentivos como préstamos, créditos fiscales y subvenciones de investigación que promueven, entre otros, el desarrollo de la cadena de valor de los minerales críticos para la transición energética. Estos incentivos incluyen, por ejemplo, estímulos para abastecer los componentes de baterías de vehículos ensamblados en los EEUU de proveedores locales. Las oportunidades para las empresas mineras están en la extracción y procesamiento (PwC, 2023).

Otra tendencia reciente ha sido establecer fondos para invertir en proyectos y cadenas de suministro de minerales críticos. Por ejemplo, la Agencia de Crédito a la Exportación de Australia, (Export Finance Australia), creó el *Critical Minerals Facility* para cubrir déficits en la financiación privada de proyectos de minerales críticos. El gobierno australiano también destina una parte de su Fondo Nacional de Reconstrucción de 15 mil millones de dólares a empresas de minerales críticos que construyan capacidad de procesamiento, refinación o fabricación en el país. De igual manera, el Gobierno de Estados Unidos mediante la Oficina de Programas de Préstamos del Departamento de Energía está proporcionando financiamiento significativo para proyectos de minerales críticos en temas de reciclaje de baterías, proyectos de litio, boro y procesamiento de grafito (PwC, 2023).

Por otra parte, los presupuestos globales para exploración de minerales cayeron un 3% en 2023 después de alcanzar un máximo de nueve años en 2022, especialmente para minerales como oro y plata. Esto se debió principalmente a la caída de los precios de los metales y a dificultades en el entorno financiero. Sin embargo, la exploración de minerales críticos, encabezados por el cobre, el litio, el níquel, los elementos de tierras raras y el uranio, registraron un crecimiento, pues la transición energética global sigue siendo un factor de impulso para estos metales críticos. En la Figura 10 se observa el aumento en la exploración de minerales como cobre, litio o níquel entre 2022 y 2023, mientras se evidencia una alta caída en la exploración del oro y en menor proporción para otros minerales como plata, zinc o diamantes.

Figura 10: Presupuestos globales de exploración de metales no ferrosos



Fuente: tomado de (S&P Global, 2024)

Según EY Global Mining & Metals (2023) los factores ambientales, sociales y gubernamentales están entre los 10 riesgos y oportunidades para minería y metales en 2024. La economía circular, que busca reducir residuos y reutilizar recursos, puede reducir estos riesgos, mejorar la eficiencia y disminuir la extracción primaria de minerales. La reducción del consumo de energía, agua, productos químicos en la producción de minerales se puede lograr mediante diseños de ecología industrial, procesos mineros más eficientes y el reciclaje de minerales al final de su vida útil. No obstante, el reciclaje puede ser técnicamente complicado y económicamente inviable (United Nations Environment Programme, 2020).

La industria minera enfrenta desafíos como la evaluación de reservas considerando riesgos geotécnicos, impactos sociales y ambientales, y el nacionalismo de recursos. La incertidumbre política, las restricciones a la exportación y la oposición social también la afectan. Además, debe lidiar con la corrupción, los cambios tecnológicos, la volatilidad de precios y la competencia. Superar estos desafíos requiere una estrategia sólida y una gestión efectiva para garantizar la sostenibilidad y la rentabilidad (Ayuk, 2020).

En palabras de Larsen (2023), las principales tendencias globales asociadas con el sector minero son, en primer lugar, la escasez de minerales críticos, como el litio y el cobre, los cuales plantean desafíos significativos para la transición hacia fuentes de energía renovable y tecnologías sostenibles. En segundo lugar, la demanda de electricidad creciente debido a la creación de nuevas políticas gubernamentales y la necesidad de alimentar las tecnologías emergentes, lo que implica una mayor necesidad de minerales críticos, como el cobre, para respaldar la infraestructura eléctrica y las tecnologías renovables. En tercer lugar, el reciclaje es una estrategia fundamental para la recuperación y reutilización de materiales críticos, incluidos minerales y metales esenciales para diversas aplicaciones.

En cuarto lugar, existe un aumento significativo en la demanda de una amplia gama de productos y tecnologías en todo el mundo. Esto se debe en gran medida a la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y las políticas que la respaldan. En quinto lugar, a pesar de la creciente demanda en el sector de energías renovables, existen desafíos económicos en Europa y los Estados Unidos, particularmente en lo que respecta a la rentabilidad de las inversiones en proyectos eólicos. Esto resalta la importancia de abordar problemas financieros para garantizar el éxito de la transición energética. Por último, aunque cada región y país tiene sus particularidades en términos de retos y dificultades, se pueden resaltar aspectos comunes como lo son: los conflictos por oposición de las comunidades, los riesgos geotécnicos, la incertidumbre política y regulatoria, los cambios rápidos en la tecnología y la volatilidad de los precios.

3.2. Contexto latinoamericano

Los choques negativos de la economía global en los últimos tres años aún impactan el desempeño económico latinoamericano. En los últimos cuatro trimestres el producto interno bruto de la región ha permanecido estancado (CEPAL, 2022 a).

América del Sur experimentó un crecimiento promedio del 2,3% en el primer trimestre de 2022, mientras que las economías de Centroamérica mostraron una desaceleración significativa, con un crecimiento del 5,7%, reduciéndose en 3,5 puntos porcentuales (CEPAL, 2022 a). Una recuperación de la producción del sector de la minería, unida al alza en los precios internacionales, aumentó los beneficios y los pagos por impuestos de los principales productores de minerales de esta región (OCDE, 2023). Los ingresos promedio procedentes del sector de la minería aumentaron del 0,34% del PIB en 2020 al 0,68% en 2021 y al 0,7% en 2022.

Las estadísticas publicadas por World Mining Data indican que el 6,1% del total de la producción minera mundial en 2021 se originó en América Latina mientras que, el 61,7% de la producción se origina en Asia. Sin embargo, la producción de minerales de América Latina tiende a crecer, pues entre 2000 y 2017 aumentó en 24,3% y aunque se ralentizó por la pandemia de COVID-19, creció un 2,7% entre 2020 y 2021 (World Mining Data, 2024). Además, el presupuesto para exploración en la región, especialmente de cobre y litio, ha venido aumentando, con Chile, Argentina, Colombia y Guyana como mayores contribuyentes de este desempeño (S&P Global, 2024).

La contribución de los ingresos procedentes de la explotación de materias primas a las economías de muchos países de América Latina es significativa. Por ejemplo, la producción anual total de materias primas en Brasil generó unos ingresos de más de 95.000 millones de dólares, mientras que en México se sitúa en torno a los 65.000 millones de dólares (Universidad Nacional de Colombia, 2023). Sin embargo, las cifras de ambos países incluyen una cantidad de exportaciones mineras de petróleo y gas, que en Brasil en 2019 fueron del orden de 32.500 millones de dólares; y el porcentaje de contribución de México es significativamente menor. En contraste, Chile presenta ingresos del orden de 41.000 millones de dólares, con unos 34.000 millones de dólares en metales no ferrosos (Coles, 2020).

América Latina podría expandirse hacia una variedad de otros materiales, como elementos de tierras raras que se requieren para motores de vehículos eléctricos y turbinas eólicas, y níquel, un componente clave de las baterías. Sin embargo, para aprovechar este potencial, las actividades mineras deben cumplir con altos estándares ambientales, sociales y de gobernanza, así como buscar formas de generar beneficios tangibles para las comunidades locales (International Energy Agency, 2023 b).

Aunque la mayoría de los países de la región tienen algunos recursos minerales, Chile, Perú, Brasil y México representan el 85% de las exportaciones totales de minerales y metales. Los metales más explotados en América Latina son el cobre, el mineral de hierro, el oro y la plata, aunque también se producen litio y níquel, minerales críticos para la transición energética. El cobre es especialmente importante ya que Chile es el primer exportador mundial, responsable de alrededor del 25% de la producción mundial, con Perú inmediatamente detrás. Brasil es el tercer productor mundial de mineral de hierro, y México el primer productor de plata, aunque Perú tiene mayores reservas (Coles, 2020).

Chile y Argentina ocupan el segundo y cuarto lugar en la producción mundial de litio mientras que Chile y Perú ocupan el segundo y tercer lugar en la producción global de molibdeno. En el caso del litio, la sostenibilidad de la extracción desde salares (y su impacto en aguas subterráneas) y la capacidad para suplir el aumento esperado de la demanda son las principales preocupaciones de la región. Se estima que sólo para abastecer la demanda del sector energético, la producción de litio en 2042 debe ser 4,88 veces la producción actual (CEPAL, 2022 b).

De hecho, disponer de reservas y/o producción de minerales no asegura la competitividad de costos, la cual requiere además capacidades tecnológicas, de procesamiento, refinación, manufactura, etc., entre otros. Ejemplo de esto, se plantea la situación actual de Brasil, que a pesar de ser el tercer productor de hierro ha tenido que iniciar una investigación para establecer la existencia de *dumping* en las exportaciones de acero de China. Según la Circular No. 10 del 7 de marzo de 2024 se tienen hechos que justifican la investigación (Diário Oficial da União, 2024) y se espera que los aranceles antidumping aumenten para proteger la industria nacional de este país.

Por lo tanto, se requiere que la industria minera se mantenga actualizada para atender las oportunidades de mercado que se prevén. Algunos de los escenarios propuestos por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), estiman que el aumento en la demanda de minerales para la descarbonización crea una oportunidad económica para América Latina estimada en USD 50 mil millones por año en 2050, equivalentes al producto interno bruto (PIB) nominal de Uruguay de 2020. La producción real dependerá de la capacidad de cada país de gestionar de manera adecuada los riesgos ambientales, sociales y de gobernanza minera (Banco Interamericano de Desarrollo, 2022).

De acuerdo con un análisis comparativo de políticas públicas y estándares industriales para impulsar la sustentabilidad en minería liderado por el BID en 2023 (Rojas, 2023) se han logrado avances significativos en términos de leyes, regulaciones, políticas y prácticas destinadas a fortalecer la minería sostenible en América Latina. No obstante, es importante continuar trabajando para cerrar las brechas entre las acciones del sector minero y las regulaciones nacionales vigentes.

Entre algunas de las conclusiones y temas identificados se encuentra la necesidad de establecer marcos normativos en relación con los aspectos de gestión de relaves, el cierre de minas (ambiental y social) y la gestión de pasivos ambientales, particularmente en países que carecen de regulaciones al respecto o que requieren actualizar sus normativas para reflejar las prácticas actuales del sector. Por

otra parte, existen oportunidades de mejora en la regulación relacionada con el cambio climático y la eficiencia energética, fundamentales para la transición energética en los países latinoamericanos estudiados.

Respecto al tema social, la participación ciudadana actualmente se está concibiendo únicamente en el marco de los procesos de licenciamiento ambiental. Por lo tanto, es importante que sea fortalecida para abordar las preocupaciones de las comunidades en asuntos ambientales y sociales. Según una base de datos mundial sobre conflictos mineros, el 45% de los conflictos reportados se ubican en América Latina. La ratificación del Acuerdo de Escazú en algunos países del estudio podría impulsar una mayor participación y acceso a información ambiental y sobre la explotación minera.

En el marco de la transición energética y de las tendencias de producción que se proyectan en la región se recomienda la creación de un espacio de diálogo regional, ya sea mediante una instancia existente o una nueva, con el propósito de reunir a todos los actores relevantes, tanto públicos como privados, relacionados con la industria minera y sus cadenas de valor en Brasil, Chile, Colombia y Perú. Este espacio serviría como punto de encuentro, intercambio de experiencias y definición de acciones conjuntas para el desarrollo de un sector minero sustentable e inclusivo (Hayes, 2023).

La adopción rápida y estricta de estándares socioambientales en la minería latinoamericana es crucial. Se debe complementar con estrategias globales como:

- Colaboración entre la industria minera y el sector de innovación en minería, equipos, tecnología y servicios
- Inversión en infraestructura compartida para múltiples empresas mineras
- Exploración de la economía circular en la minería, aumentando el reciclaje
- Establecimiento de un régimen fiscal flexible y adaptado a los ciclos de mercado
- Implementación de marcos ESG y adhesión a iniciativas de sostenibilidad
- Fortalecimiento de la relación con las comunidades locales: beneficios compartidos, transparencia y licencia social

Uno de los principales desafíos a nivel regional, en especial en aquellos países con un potencial alto en minerales estratégicos y críticos, radica en acelerar la adopción de estándares socioambientales en la industria minera como una estrategia esencial para aprovechar las oportunidades económicas en la minería. Estos estándares pueden ayudar a obtener los permisos ambientales y sociales, reducir el riesgo de conflictos, y satisfacer las demandas de inversores y compradores.

3.3. Contexto colombiano

La minería en Colombia constituye uno de los principales motores de desarrollo del país, siendo uno de los sectores con mayor crecimiento en los últimos años frente a otros sectores como la silvicultura, piscicultura e incluso la manufactura en algunos periodos. La producción de minerales está constituida principalmente por carbón, níquel, esmeraldas, oro y materiales de construcción (Ministerio de Minas y Energía, 2023). Se proyecta que, aún con los retos que existen para la extracción de minerales, el comportamiento va a continuar siendo creciente.

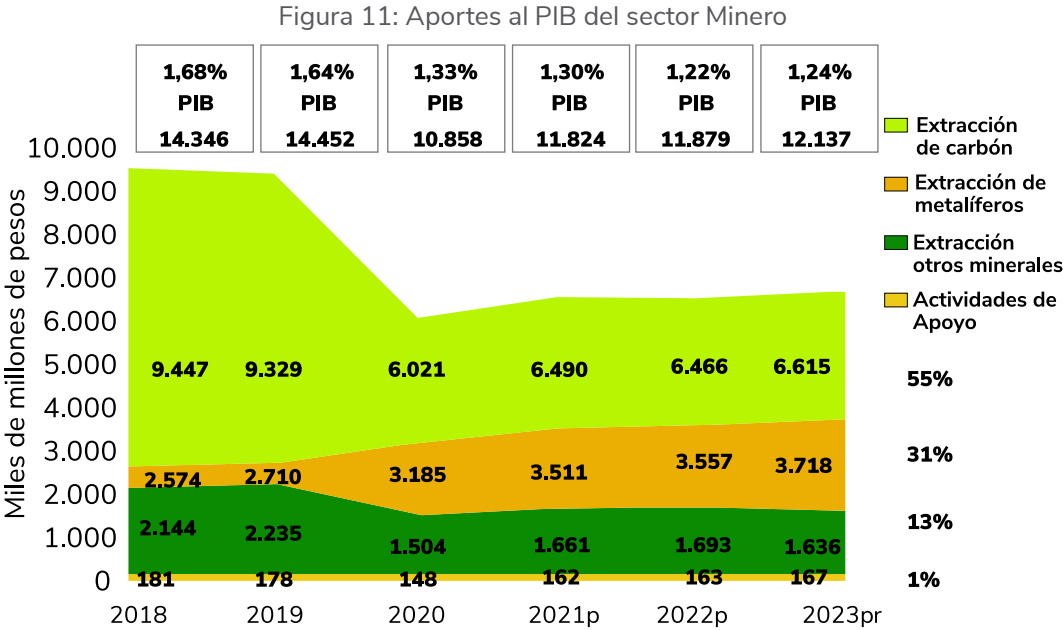
El sector minero está expuesto a eventos globales y fluctuaciones de la demanda, los precios de algunos minerales y la inversión. También enfrenta los retos de los altos niveles de ilegalidad, conflictos sociales y ambientales, por lo que lograr avanzar en la resolución de estas problemáticas es crucial para el desarrollo económico.

El sector minero, sin el aporte del sector energético, constituyó el 1,24% del PIB⁴ para el 2023, el 28,4% de las exportaciones, el recaudo de regalías por 9,19 billones de pesos, 14.068 USD millones de exportaciones mineras y una inversión extranjera directa de 3.005 USD millones, la cual es 6 veces mayor que en el 2020 (Unidad de Planeación Minero Energética; Agencia Nacional de Minería, 2024).

4 Información preliminar de enero a septiembre de 2023.

El carbón es el mineral que más aporta al PIB colombiano, con un 55% para el año 2023, seguido por el oro y metales con un 31%, tal como se muestra en la Figura 11.

En 2020 Colombia llegó a ser el primer país de Latinoamérica en el índice de atractividad para la inversión y en el índice de potencial mineral con mejores prácticas, quedando en el puesto 27 entre los países evaluados. Sin embargo, para el año 2023, ocupó el último puesto entre los países latinoamericanos y el puesto 83 a nivel global (Fraser Institute, 2024).



Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética; Agencia Nacional de Minería, 2024

El conocimiento del subsuelo para saber la disponibilidad de minerales, así como las condiciones ecológicas y sociales de los territorios, son un punto clave para avanzar en temas de exploración y extracción de recursos. El levantamiento de información actualmente tiene como foco incrementar la producción, diversificar la oferta de minerales y lograr aumentar los niveles de formalización de aquellos que ejercen la actividad minera de manera no regulada. Se sabe que la extracción de cobre y oro tiene un alto potencial en términos de disponibilidad, seguido por minerales como el níquel.

Hasta ahora, hay actividad minera reportada en menos del 3% del territorio, lo cual indica que hay una extensión considerable que puede ser sometida a exploración; para esto, hay que tener presentes las áreas excluidas que al momento constituyen aproximadamente un 20% del territorio continental. Cabe destacar que, al ver el interés existente para realizar exploración minera, se han solicitado títulos para el 4,71% del territorio nacional (Agencia Nacional de Minería, Unidad de Planeación Minero Energética, 2024). Actualmente, la expedición del Decreto 044 de enero de 2024 por el cual se establecen criterios para declarar y delimitar reservas de recursos naturales de carácter temporal en el marco del ordenamiento minero-ambiental y se dictan otras disposiciones, puede implicar una disminución del área disponible para actividades de explotación y explotación minera y la posible afectación a proyectos mineros que no cuenten con licenciamiento ambiental.

El Servicio Geológico Colombiano -SGC- ha experimentado progresos en las áreas de prospección, lo que ha permitido obtener información crucial para evaluar el potencial de minerales en el país. Entre algunas de sus acciones han sido las campañas de reconocimiento geológico, geoquímica, geofísica, análisis metalogénico y caracterizaciones de potencial mineral en diferentes zonas del país, cuya información ha servido para la toma de decisiones desde la ANM. A esto se suma la propuesta del Plan Nacional de Conocimiento Geocientífico que servirá de guía a la institución durante los próximos años.

Se ha logrado determinar cuándo se considera que se dispone de datos adecuados para establecer un potencial minero, asegurando un proceso de toma de decisiones más informado. Sin embargo, la disponibilidad de minerales no solo depende de su potencial, sino también de la atención a las restricciones ambientales y sociales. El cumplimiento de estas restricciones es esencial para garantizar que los recursos minerales estén verdaderamente disponibles, promoviendo un desarrollo sostenible y responsable en el sector minero de Colombia.

Respecto a los minerales extraídos, Colombia es el quinto exportador de carbón del mundo y produce el 77,8% del total de Latinoamérica. En el país se produjeron 67,7 Mton de carbón en 2023, con lo que se aportó en 87,4% al recaudo de regalías (Agencia Nacional de Minería, Unidad de Planeación Minero Energética, 2024). El 89% es carbón térmico de alta capacidad calorífica y el 11% carbón metalúrgico. El 88% de la producción de carbón es a cielo abierto y el 12% subterráneo (Agencia Nacional de Minería, 2022 b).

Respecto al oro, se espera que la producción de este mineral crezca en los próximos años. Hasta ahora, el 23% de la titulación del país corresponde a oro y metales preciosos, mientras que el 59% de la explotación de oro proviene de minería a pequeña escala y de subsistencia (Agencia Nacional de Minería, Unidad de Planeación Minero Energética, 2024). Según la plataforma GENESIS de la ANM existen 102.888 mineros de subsistencia y chatarreros registrados para metales preciosos.

Por otra parte, el cobre es fundamental para la infraestructura eléctrica del país y se espera que la demanda mundial de este mineral crezca en 52% en los próximos 10 años (Universidad Nacional de Colombia, 2023). Hay 1.081 títulos y 1.414 solicitudes correspondientes al 0,92% y 2,42% del territorio. Según la Agencia Nacional de Minería la producción de concentrados polimetálicos osciló entre 7,644 y 9,372 toneladas/año para el periodo de 2018-2020, (Agencia Nacional de Minería, 2022 b). Por otro lado, la cuenta satélite de minería del DANE reporta valores de producción de cobre y sus concentrados entre 19.406 y 52.558 toneladas entre el 2015 y el 2021 (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2023).

3.4. Retos y oportunidades del sector minero en Colombia

El sector minero en Colombia se enfrenta a problemáticas como el narcotráfico, la deforestación y la presencia de grupos armados ilegales que ven en la explotación ilícita de minerales una fuente de recursos económicos para financiar sus actividades delictivas. Estos grupos atacan contra la comunidad y la capacidad productiva, especialmente en zonas con débil control estatal. Estas problemáticas afectan los procesos de licenciamiento y titulación minera y dificultan la solución de los conflictos ambientales y sociales por la actividad minera.

Respecto a los conflictos ambientales, se han logrado reconocer varios de estos y se ha avanzado en el reconocimiento de derechos mineros a comunidades ancestrales con prácticas artesanales y de pequeña escala teniendo en cuenta sus problemáticas socio-ambientales particulares. Se resalta la creación de distritos mineros especiales como herramienta para resolver estos conflictos, mejorar la articulación institucional y la diversificación productiva. Finalmente, en Colombia no se cuenta con un sistema de acceso actualizado y eficaz que permita conocer los recursos y reservas, así como la oferta y demanda de minerales.

Por otra parte, el crecimiento de la demanda mundial y local de recursos minerales, impulsada por los compromisos climáticos, es una oportunidad para el sector minero colombiano. Colombia, junto con Chile, lideró la iniciativa “Energías Renovables en Latinoamérica y El Caribe – RELAC” mediante la cual se planteó como objetivo alcanzar el 70% de la introducción de energías renovables. Esto constituye una oportunidad de crecimiento considerable para el sector minero. Por ejemplo, cada Megavatio (MW) de capacidad instalada solar requiere de 45 toneladas de cobre mientras que el 90% de los conductores de los paneles solares contienen plata y las conexiones a internet usan los conductores de oro (ICCM, 2019). Colombia está avanzando hacia la transición energética y el sector minero debería tener la capacidad de responder a las nuevas demandas y próximos cambios que tendrá el mercado.

Para aprovechar estas oportunidades, se requiere fortalecer la sostenibilidad de la minería. En la actualidad se están utilizando fuentes alternativas de generación de energía, como la solar en la Mina de carbón La Margarita, Antioquia, o el proyecto de autogeneración en la mina de carbón de Milpa, Boyacá. Así mismo, se busca velar por una economía circular, alineada con la gestión del cambio climático (Ministerio de Minas y Energía, 2022). En ese sentido, el país se alineó con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente asociados al sector minero, los que se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible y su relación con el sector minero

ODS	Relación con el sector minero
ODS 1: Fin la de pobreza	A través de la generación de empleo y el pago de impuestos y regalías del sector, se busca la erradicación de la pobreza a partir del desarrollo de bienes públicos de uso básico como la vivienda, educación, infraestructura y la asistencia sanitaria. En el año 2020 las regalías se redujeron en un 33,6% probablemente como resultado de la contingencia sanitaria del Covid-19. Ese año el recaudo fue de \$1,52 billones, siguiendo la tendencia de que el carbón tiene la mayor participación en el total con un 69,37% de las regalías. Se espera que, tras este evento de impacto mundial, los aportes a través de las regalías puedan seguir aportando al fin de la pobreza.
ODS 6: Agua limpia y saneamiento	Por el alto consumo de recursos hídricos y el impacto en su calidad y disponibilidad, se están implementando estrategias para hacer un uso más eficiente del recurso. En el Estudio Nacional del Agua realizado por el IDEAM en el 2018, el sector minero tuvo una participación en el consumo del agua del 1,76%, cifra menor a la del sector agrícola o energético.
ODS 7: Energía asequible y no contaminante	El sector es imprescindible para lograr garantizar un suministro de energía constante y de fuentes alternativas. Aquí, se fomentan las prácticas de minería sostenible y responsable que velen por la transición energética y permiten una reducción en la dependencia que se tiene de fuentes no renovables. Ahora mismo, se busca aumentar el potencial eólico y solar que tiene el país, que en la actualidad representa un porcentaje bajo de la matriz energética.
ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico	La actual política minera busca desarrollar la industria de manera ética y equitativa, promoviendo un empleo seguro y bien remunerado, que además permita dar las garantías necesarias al trabajador por medio de la formalización, disminuyendo los índices de informalidad que existen actualmente en el sector. Asimismo, desarrollar empleo con condiciones de seguridad y salud ocupacional apropiados para la actividad minera.
ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	La contribución del sector consiste en facilitar la adopción de tecnologías sostenibles en la minería para mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental. Hoy en día, se da una apuesta por la disminución de impactos y responsabilidad socioambiental. Además, el desarrollo de una economía productiva para el país puede asociarse a encadenamientos productivos con base en minerales estratégicos y procesos de reindustrialización.
ODS 12: Producción y consumo responsables	Una de las tendencias del sector minero es la del valor agregado, hay una proyección hacia el encadenamiento hacia adelante, de manera que se pueda surtir materia prima para la producción y desarrollo económico industrial. El índice de Producción Industrial del 2021 arrojó que el sector minero tuvo una contribución de 0,3 puntos porcentuales, indicando un incremento frente a datos anteriores (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2021). Esta tendencia del valor agregado se ha enfocado en la implementación de estrategias o acciones que permitan generar nuevos ingresos en los recursos mineros disponibles. Entre esto, está la producción de coque, la talla de gemas extraídas y la refinación de metales. Un punto en el cual hay oportunidades de crecimiento y mayor aprovechamiento de los minerales es en los insumos de base biológica, ya que la demanda de estos podría fortalecer la economía local, disminuyendo la dependencia de mercados internacionales en la cuestión de fertilizantes y otros insumos agrícolas y agropecuarios, tal como se indica en el Plan Nacional de Desarrollo 2022 – 2026. Entre los objetivos del Ministerio de Minas y Energía, se encuentra la producción de hidrógeno verde, se espera poder tener la capacidad de electrólisis de entre 1,5 y 4GW; también está el tema de la producción de hidrógeno azul que requiere la construcción de nuevas plantas. El transporte y la industria también generan una demanda de recursos a los cuales se espera poder responder con la producción minera del país (Ministerio de Minas y Energía, 2022)
ODS 13: Acción por el clima	Siguiendo la tendencia mundial dado el contexto de adaptación que está atravesando el planeta, el sector busca mitigar los efectos negativos de la minería en el cambio climático mediante prácticas más sostenibles y la adopción de energías renovables.
ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres	Hoy en día, existe una búsqueda por conservar la biodiversidad de nuestros territorios y lograr rehabilitar áreas afectadas o degradadas por la minería, asegurando la salud a largo plazo de los ecosistemas terrestres, tanto para la vida y sostenimiento de las comunidades como de las poblaciones de animales y plantas.
ODS 16: Paz, justicia e instituciones sólidas	Se busca establecer marcos regulatorios y de gobernanza sólidos y efectivos que permitan prevenir o mitigar conflictos en los territorios, tanto entre comunidades como con los proyectos de desarrollo, empresas y diversas entidades, promoviendo así una minería ética, legal y justa.

Fuente: elaboración propia, con base en los ODS.

Una de las metas del sector es continuar mejorando la calidad de vida de la población a partir del desarrollo de la minería, la cual debe realizarse con altos estándares técnicos, ambientales, económicos, laborales y sociales. Para esto, es necesario cambiar la percepción del sector, haciéndolo más atractivo para la inversión y mejorando las relaciones de confianza con las comunidades locales. Esto requiere una fuerte institucionalidad y un trabajo conjunto del Ministerio de Minas y Energía -MME-, la ANM, la UPME y el SGC. Además, la coordinación con los Ministerios de Interior, Trabajo, Defensa, Seguridad y Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible es crucial.

La falta de visión compartida entre las instituciones respecto a lo que debe ser el sector minero a mediano o largo plazo, pone en riesgo la planificación y ordenamiento territorial y el uso eficiente del suelo y otros recursos. Esta coordinación es uno de los principales retos del país en conjunto con cuestiones como la conflictividad en las regiones, los altos tiempos de espera e ineficiencia en los trámites, la falta de estándares o capacidades tecnológicas, las carencias en el financiamiento además de factores exógenos como la variación de precios internacionales y la falta de inversión.

Los principales ejes de acción en el conocimiento del subsuelo son: lograr aumentar la producción y diversificar la oferta de minerales, y elevar los niveles de formalidad por medio del conocimiento geológico, geofísico, geoquímico, político, social y ambiental del territorio (Ministerio de Minas y Energía, 2022). El Plan Nacional de Conocimiento Geocientífico es fundamental, pues generará insumos para la planeación del territorio, del uso del suelo y subsuelo, así como de la gestión integral y sostenible del agua.

El país tiene que, además, mejorar el estado de la infraestructura de transporte, tanto vial y férrea, como marítima, recuperando la navegabilidad de los ríos para lograr transportar insumos; una parte considerable de los costos de la extracción de los minerales corresponde a los costos de transporte de carga. El futuro minero para Colombia está proyectado para ser más organizado, tener una legitimidad frente a sus actividades que a su vez incluyan a las comunidades y sea competitivo en el mercado, lo cual permite un desarrollo nacional y regional que pueda apalancar las estrategias del posconflicto.

Colombia, alineada con la tendencia a nivel global, muestra un crecimiento en la producción desde el año 2021. A pesar de la ralentización de la producción minera en América Latina por la pandemia causada por el COVID-19, la tendencia es a un aumento en la producción; buscando disminuir la dependencia de minerales importados. Los procesos de encadenamiento y cadenas de valor son factores fundamentales en el desarrollo de la industria minera local. Así mismo se hace necesario seguir avanzando en marcos normativos referentes a la gestión de pasivos ambientales y cierre de minas (ambiental y socialmente).

La contribución de la minería al PIB varía ampliamente según la región del país, con algunos municipios dependiendo en gran medida de esta actividad. Esto destaca la importancia de la minería para el desarrollo económico local en algunas áreas. El reto radica en la mejora de la atractividad, por tanto, es fundamental mejorar la percepción pública y promover una minería responsable que beneficie a las comunidades. Esto incluye el cumplimiento de estándares ambientales, sociales y laborales.

3.5. Contexto de los minerales estratégicos para Colombia

Según el documento de “Lineamientos para el establecimiento de Minerales Estratégicos en Colombia” un mineral estratégico es:

Aquel que puede garantizar soberanía en el abastecimiento de la demanda interna actual o futura, asociada a los desarrollos industriales requeridos para soportar una transición ener-

gética gradual hacia fuentes de generación de energías limpias no convencionales y para el desarrollo de la infraestructura requerida para garantizar la industrialización de la economía y un sector minero productivo, competitivo y con la implementación de buenas prácticas técnicas, sociales y ambientales; de igual forma, lo son aquellos minerales necesarios para brindar seguridad alimentaria a los habitantes del territorio nacional, mayor disponibilidad y acceso mediante precios razonables, permitiendo reducciones en los costos de los fertilizantes y abonos agrícolas, y con ello el abaratamiento de los alimentos. Finalmente, resultan estratégicos los minerales priorizados para promover esquemas asociativos entre mineros tradicionales, ancestrales o en proceso de formalización, que permitan un aprovechamiento racional de los recursos minerales de propiedad del Estado y contribuyan a su formalización colectiva (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023)

Teniendo en cuenta esto, y en respuesta a las directrices de política pública del Gobierno nacional para el sector minero encontradas en el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia Potencia Mundial de la Vida”, la Agencia Nacional de Minería actualizó el listado de minerales estratégicos para el país mediante la Resolución No. 1006 del 30 de noviembre de 2023 (Agencia Nacional de Minería, 2023), en la cual se designaron 17 grupos de minerales:

- 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 ($P_2O_5 > 20\%$) y roca fosfática ($P_2O_5 < 20\%$) 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.

Para los fines de la construcción de escenarios y simulación de minerales estratégicos los materiales de construcción se dividieron en dos grupos: arenas y gravas; y arcillas.

Para la modelación también se tuvo en cuenta el carbón térmico, aun cuando no es considerado como mineral estratégico, por motivos mencionados previamente como son su alta producción, contribución al ingreso de pago por regalías y alta empleabilidad en las regiones donde se produce, entre otros.

4. MODELO DE SIMULACIÓN PARA MINERALES

Existe una variedad de métodos que permiten comprender posibles dinámicas futuras de un sistema complejo como la minería en Colombia. Estos métodos van desde pronósticos econométricos, pasando por análisis políticos, hasta métodos Delphi (Arango, y otros, 2017). El uso de modelos de simulación posee múltiples beneficios como comprender sistemas complejos, generar alertas tempranas, hacer análisis de escenarios y evaluación de estrategias y políticas, así como también permite estudiar posibles desafíos futuros (Verburg, y otros, 2016). En particular, una metodología como la dinámica de sistemas permite incorporar explícitamente los ciclos de realimentación, retardos y no linealidades existentes en el sistema minero.

La utilidad de los modelos reside en que abstraen y simplifican la realidad, expresándola de una forma entendible (Swanson, 2002), además de plantearse como problemas a solucionar. Los modelos están diseñados como respuesta a una pregunta científica o una pregunta de gestión, con diferencias en escalas espaciotemporales y a la diversidad de variables puntuales consideradas de acuerdo con el alcance del análisis. Además, el modelamiento posibilita prevenir los efectos colaterales, la resistencia a políticas planteadas que podría haber si no se tiene un conocimiento adecuado sobre el sistema intervenido (Gotts, y otros, 2019).

Durante los años 2013 y 2014 la Unidad de Planeación Minero Energética UPME adelantó en convenio con la Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín: los “Escenarios Mineros para Colombia a 2032” y la posterior *Simulación y evaluación del impacto de estrategias en el desarrollo del sector minero 2014-2032* (Unidad de Planeación Minero Energética; Universidad Nacional de Colombia, 2014). Se desarrolló un modelo agregado nacional cuyo alcance contó con las siguientes características:

- Permitió explicar el comportamiento del sistema a partir de su estructura
- Permitió analizar tendencias futuras bajo determinados escenarios y analizar la efectividad de políticas
- Permitió conocer órdenes de magnitud de las variables y de cambios en las mismas
- Respondió algunas preguntas sobre el sector minero, pero no pudo responderlas todas

Con base en lo anterior, en 2023 se llevó a cabo un convenio con la Universidad Nacional de Colombia, cuyo alcance fue la actualización de los escenarios y estrategias para el sector minero colombiano, reenfocando los ejercicios de planeación sectorial minera de acuerdo con los nuevos lineamientos de política minera y en concordancia con el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia potencia mundial para la vida”.

4.1. Objetivo y alcance del modelo

El objetivo del modelo es evaluar las posibles trayectorias del sector minero colombiano bajo distintos escenarios, con un horizonte de simulación a 2040, definido con base en las discusiones de los talleres de modelación realizados en el marco del Convenio y teniendo en cuenta los retardos de tiempo existentes en la dinámica del sector, como los tiempos requeridos para el inicio de nuevos proyectos mineros, el ajuste a la capacidad de producción, el tiempo de vida útil de las minas, entre otros.

Esta evaluación del sector minero se hace de manera agregada para analizar los 17 minerales estratégicos definidos por la ANM, los cuales son el carbón metalúrgico, hierro, yeso, arenas silíceas, fosfatos, níquel, bauxita, magnesio, manganeso, cromo, cobre, esmeralda, zinc, caliza, oro, platino y materiales de construcción, estos últimos divididos en dos grupos: arcillas y arenas y gravas. A este listado de minerales se ha sumado el carbón térmico dada su importancia económica para el país.

Para la calibración del modelo matemático en dinámica de sistemas se usaron los datos disponibles del sector y, en ausencia de información, se recurrió a la literatura, información secundaria, criterios de expertos y calibración del modelo.

Después de verificar, ajustar y validar el modelo, se usó para simular cuatro escenarios junto con el caso base (“Business As Usual -BAU”). Estos escenarios se basan en el ejercicio de Actualización de Escenarios Mineros para Colombia, los cuales abarcan: *Minería Transformada*, con una sólida estructura institucional y grandes inversiones; *Minería Estancada*, con una estructura estática y falta de recursos; *Minería Local*, con precios en alza pero limitaciones en investigación y desarrollo debido a controles sociales y ambientales; y *Minería en Competencia*, con inversión en información, consolidación institucional, posibles conflictos locales y baja inversión. Estos escenarios se explican en detalle en el siguiente capítulo de este documento.

4.2. Desafíos y alcance de la información

La disponibilidad de datos del sector minero es una de las principales dificultades encontradas en el desarrollo de este modelo. Los datos sobre recursos y reservas no se encuentran centralizados y no existe información oficial de base que permita conocer las tendencias en los resultados de la exploración. Por otra parte, la información relativa a la actividad extractiva tampoco cuenta con estadísticas validadas que permitan conocer el estado del arte y el comportamiento del sector minero y las dinámicas de la industria asociada a cada mineral considerado en el modelo.

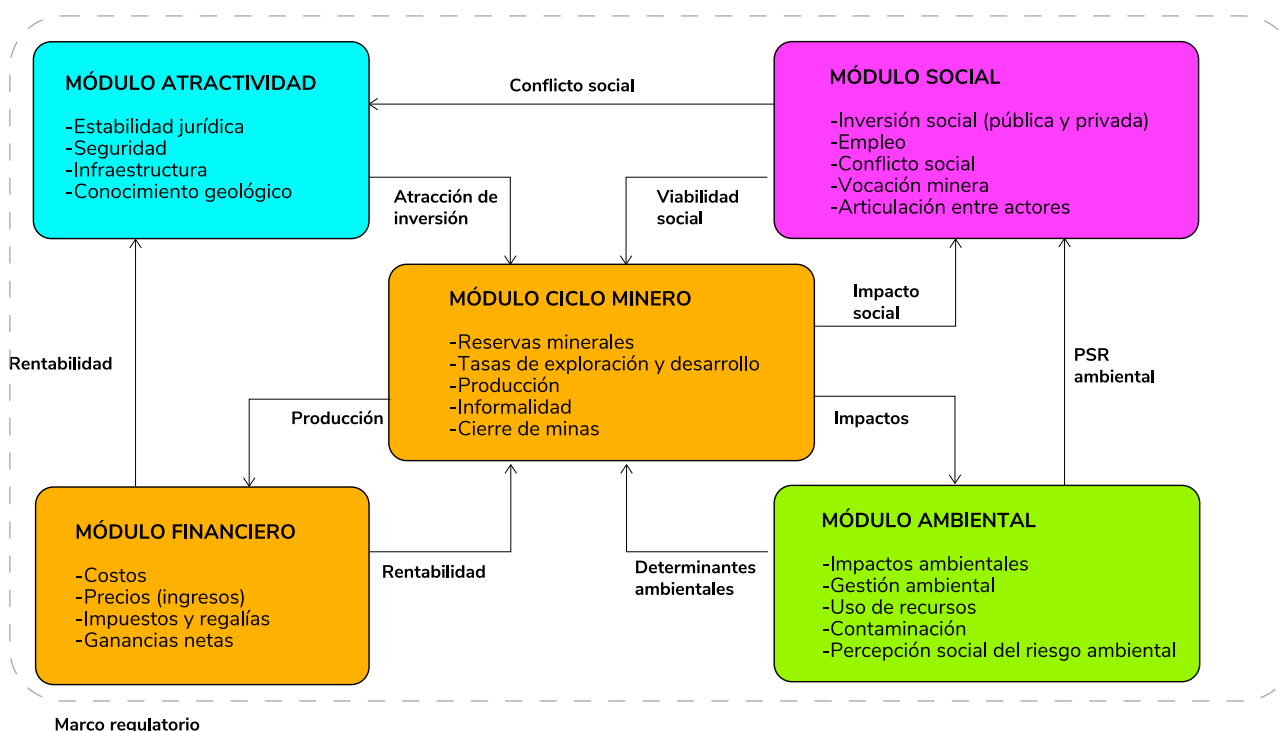
Desde la perspectiva de la ciencia de los datos, se encontraron desafíos de información en el sector tales como:

- **Longitud de las series:** la limitada longitud de las series temporales de producción anual de minerales plantea desafíos significativos desde el punto de vista estadístico y de modelado. La insuficiencia de datos a largo plazo puede comprometer la capacidad de los modelos para capturar patrones, tendencias y variaciones cíclicas.
- **Datos faltantes:** la presencia de datos faltantes introduce complejidades en la calidad y completitud de los conjuntos de datos. En la construcción de modelos, la falta de explicaciones claras para valores cero o datos faltantes puede sesgar los resultados y conducir a interpretaciones erróneas.
- **Agregación:** la agregación indiscriminada de datos de producción y reservas sin considerar la calidad del mineral subyacente plantea desafíos para la modelación de variables derivadas. La falta de granularidad en los datos puede afectar la precisión de los modelos, especialmente en la estimación de ingresos basados en el precio y la calidad del mineral.
- **Documentación incompleta de metodologías:** la carencia de metadatos, especialmente en relación con la liquidación de regalías y la estimación de reservas, impide una comprensión profunda de las metodologías subyacentes. En un contexto de ciencia de datos, la transparencia y documentación adecuada son esenciales para validar y replicar los procesos analíticos.
- **Ausencia de datos sobre minería informal:** la falta de información sobre la producción informal de minerales y el reciclaje de metales representa un vacío crítico en las estadísticas mineras. Desde una perspectiva de ciencia de datos, esta omisión puede llevar a sesgos en la comprensión del panorama completo del sector minero y afectar la validez de los modelos.
- **Oferta secundaria no reportada:** la falta de inclusión de la oferta secundaria de minerales en las estadísticas del sector constituye un obstáculo para evaluar de manera integral el impacto ambiental y las consideraciones de sostenibilidad en el ciclo minero.
- **Reservas no distinguidas:** la falta de distinción entre adiciones por revisión y descubrimientos, así como la agregación sin diferenciación de calidad mineral en las reservas, plantea desafíos específicos para la evaluación precisa de la disponibilidad de recursos a largo plazo.

4.3. Estructura del modelo

El modelo conceptual se construyó a partir del modelo desarrollado en el 2014, y una serie de talleres de modelación con actores claves, tales como asistentes de la UPME, ANM, SGC, MME, Asociación Colombiana de Minería -ACM- y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA-, entre otros. Con estos puntos de vista, opiniones y aportes se refinó la definición de las variables más relevantes en la dinámica del sector y su agrupación por bloques. Con el diagrama de bloques como punto de partida (Figura 12), se construyó la hipótesis dinámica del comportamiento del sector minero colombiano, la cual recoge los modelos mentales, las percepciones y su entendimiento por parte de los miembros de los participantes de los talleres y los plasma en un diagrama causal, cuyo objetivo es sintetizar las relaciones de causa-efecto que explican el comportamiento dinámico del sector.

Figura 12: Diagrama de bloques del modelo del sector minero



Fuente: Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME 2023.

En la Figura 13 se puede observar el diagrama causal general del sistema minero colombiano de manera holística, donde se muestran las relaciones de influencia de una variable sobre otra por medio de una flecha dirigida que indica cuál variable afecta a otra. El signo que acompaña cada flecha representa la dirección del impacto, o polaridad. Una polaridad positiva implica que los cambios (aumento/disminución) van en la misma dirección y una polaridad negativa que van en dirección contraria. Existe un ciclo de refuerzo (R) cuando la relación entre variables genera una retroalimentación positiva, lo que significa que las variables involucradas en el ciclo tienden a aumentar o disminuir juntas, y existe un ciclo de balance (B) cuando estas interactúan de manera que se mantienen en equilibrio o en un estado de estabilidad a lo largo del tiempo, evitando cambios significativos.

Este diagrama de flujo detalla la cadena de valor de la minería en Chile, desde la exploración hasta la producción y sus impactos. El proceso comienza con las **Nuevas reservas probables**, influenciadas por el **Conocimiento geológico**, que se convierten en **Reservas probables**. Este paso está regulado por la **Tasa de descubrimiento** (R3) y limitado por **Limitaciones técnicas, sociales y ambientales**. Las **Reservas probables** se transforman en **Reservas en desarrollo** a través de la **Tasa de desarrollo** (R4), un proceso que también está limitado por **Limitaciones técnicas, sociales y ambientales** y el **Conflicto social**. Las **Reservas en desarrollo** generan **Producción**, influenciada por la **Demanda interna y externa** y el **Cierre de minas**. La producción está regulada por la **Producción deseada** (R2) y el **Costo unitario**. Los impactos de la producción se dividen en tres categorías principales: **Impactos socioeconómicos** (que incluyen **Articulación entre actores**, **Conflicto social**, **Empleo**, **Inversión social**, **Participación toma decisiones**, **Impuestos y regalías**, **Renta minera** y **PSR Ambiental**), **Impactos ambientales** (que incluyen **Gestión ambiental** y **Impactos ambientales**) y **Impactos institucionales** (que incluyen **Informalidad**, **Seguridad**, **Infraestructura**, **Estabilidad jurídica** y **Impuestos y regalías**). El diagrama también muestra la **Producción deseada** (R2) y el **Costo unitario** (R5) como factores clave en la producción. Los impactos socioeconómicos y ambientales se retroalimentan, creando un ciclo de influencia entre ellos.

Los principales cambios del modelo respecto al desarrollado en 2014 están en la expansión y mayor elaboración de los módulos social y ambiental y su relación con el ciclo minero. Las reservas que no pueden ser explotadas por la designación de áreas protegidas y otros sitios que no pueden ser intervenidos por su carácter cultural e histórico, así como las reservas que no pueden ser extraídas por condiciones técnicas se representan por medio de la variable de limitaciones técnicas, sociales y ambientales. Dichas restricciones limitan el crecimiento de las reservas probadas y en desarrollo, lo cual está incorporado dentro del nuevo modelo.

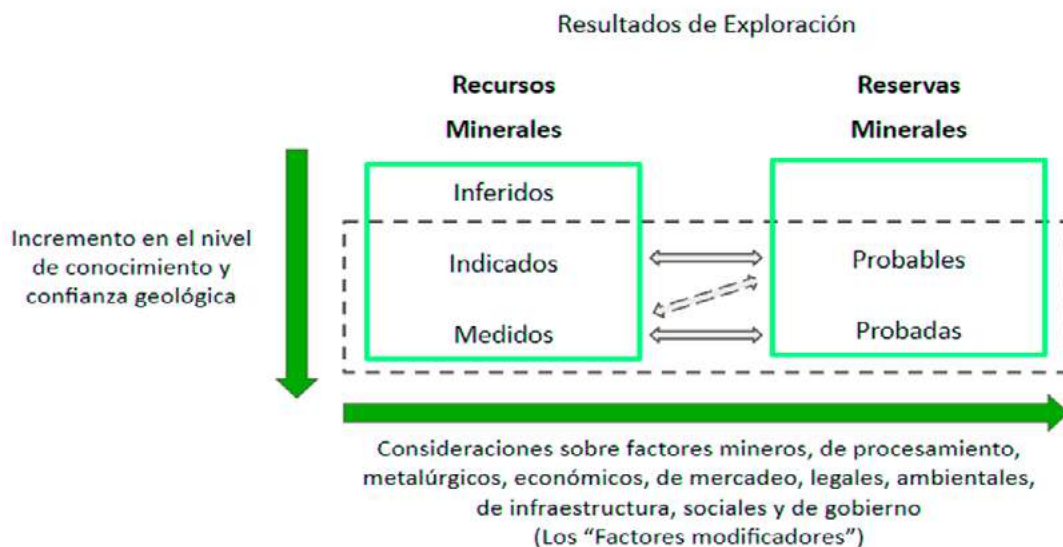
Las modificaciones a los módulos ambiental y social buscan capturar el contexto de mayor escrutinio ambiental y social derivado del cambio climático y la transición energética, así como de los conflictos sociales causados por la percepción de riesgo ambiental e interacciones con comunidades. Respecto al módulo social, se conserva el ciclo de refuerzo que contempla los beneficios del sector minero como la generación de empleo y la atracción de inversión tanto pública como privada. Se agregaron relaciones causales que permiten analizar el efecto de la participación en toma de decisiones en la gestión social de los proyectos, entendiendo que una mayor participación de las comunidades en un proyecto minero conlleva a una mayor gestión social, ya que en los espacios de diálogo donde los puntos de vista de las personas son tenidos en cuenta y se les participa se promueve la transparencia, se genera confianza, se comprenden mejor las necesidades locales, se identifican soluciones conjuntamente y se mejoran las relaciones. Por su parte, en el módulo ambiental se tienen ciclos de balance que se contraponen a los ciclos de beneficios ya que contemplan las externalidades negativas asociadas a la producción minera, como los impactos ambientales.

En esta actualización, los efectos positivos de la minería se consolidaron en la disminución de la variable conflicto social, determinada por la generación de empleo e inversiones en el territorio. Por su parte, los efectos negativos se capturaron en la variable de impactos ambientales, que repercuten en la percepción social del riesgo ambiental. Las mejoras percibidas por los ciudadanos derivadas de los proyectos mineros previenen el conflicto social, ya que entre mayor sea la percepción de estas, menor será su oposición; por ejemplo, mejoras como el desarrollo en infraestructura, la atracción de capitales y generación de ingresos, mejoras en la conectividad, desarrollo económico local, mejora en acceso a servicios básicos, a educación, ejecución de programas de responsabilidad social empresarial, entre otros, actúan como medios preventivos del conflicto social. Si las personas no perciben mejoras como las mencionadas anteriormente, esto desencadenaría conflictos sociales, los cuales generan una disminución de la atractividad del país. A continuación, se detallan cada uno de los bloques del diagrama causal.

4.3.1. Módulo de ciclo minero

El módulo del ciclo minero contempla las variables que determinan las dinámicas asociadas con el ciclo productivo de los minerales y su estructura principal se desarrolla a partir de tres niveles de reservas. Los primeros dos niveles corresponden a las reservas probables y probadas (Figura 14). Las reservas probables tienen relación con áreas exploradas, cuyo nivel de conocimiento geológico indican posibles cantidades de un recurso mineral con potencial de explotación, conservando un alto grado de incertidumbre en relación con la cantidad real de mineral disponible, mientras que las reservas probadas presentan mayor conocimiento geológico, lo que a su vez permite una medición de mayor precisión del recurso mineral, indicando que al menos el 90% del recurso es recuperable por medios económicamente rentables.

Figura 14: Resultado fase de exploración minera



Fuente: Universidad Nacional de Colombia 2023 con base en CRIRSCO, 2013.

El tercer nivel corresponde a las reservas en desarrollo, las cuales se encuentran disponibles para explotación; es decir, aquellas que cuentan con infraestructura adecuada, licencia ambiental y social, y de las cuales se obtienen beneficios económicos directos por su explotación (ver Figura 15).

Figura 15: Diagrama causal del módulo ciclo minero



Nota: Las variables y líneas grises son variables y relaciones exógenas a estos módulos.

Fuente: Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME 2023

La variación de los tres niveles de reservas está condicionada por los flujos de entrada y salida asociadas a 4 variables dinámicas correspondientes a las tasas de exploración y desarrollo del ciclo minero (ver círculos verdes en la Figura 16):

● **Nuevas reservas probables:** representa el efecto de las actividades exploratorias, permitiendo el aumento de las reservas probables, la cual es directamente proporcional al conocimiento geológico del área de interés.

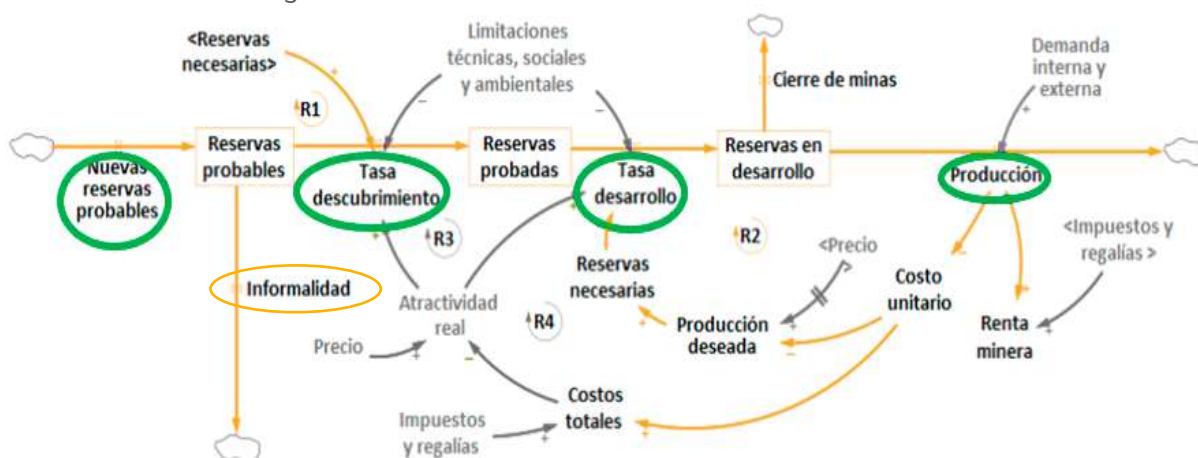
● **Tasa de descubrimiento:** corresponde a la cantidad de material que pasa cada año de reservas probables a reservas probadas, es decir, aquellas reservas sobre las que aumenta la certeza debido a actividades de exploración. La efectividad en su desarrollo depende de las posibles restricciones tecnológicas, ambientales, sociales, culturales y/o legales de acuerdo con la ubicación del área de interés.

Tasa de desarrollo: se relaciona con la cantidad de reservas por año que pasan de ser reservas probadas a reservas en desarrollo. Una vez creada la infraestructura deseada y de obtener todos los permisos ambientales y sociales, las reservas pasan a ser reservas en desarrollo.

Producción titulada: corresponde a la cantidad de mineral extraído anualmente de las reservas en desarrollo por empresas con título minero. La producción titulada puede ser restringida por conflictos sociales que pueden aparecer en el territorio y la relación costo-precio.

Los ciclos de refuerzo R1 y R2 representan la dinámica del módulo. El ciclo de refuerzo R1 se relaciona con el número de reservas necesarias y disponibles en el área de interés, mientras que el ciclo R2 con la producción minera en términos de precio y costo. Dichos ciclos representan la necesidad de aumentar el número de reservas para sostener la producción deseada, la cual está determinada por la rentabilidad del sector. A mayores ganancias (relación precio-costos), mayor será la producción deseada y la necesidad de reservas probadas y en desarrollo (ver Figura 16).

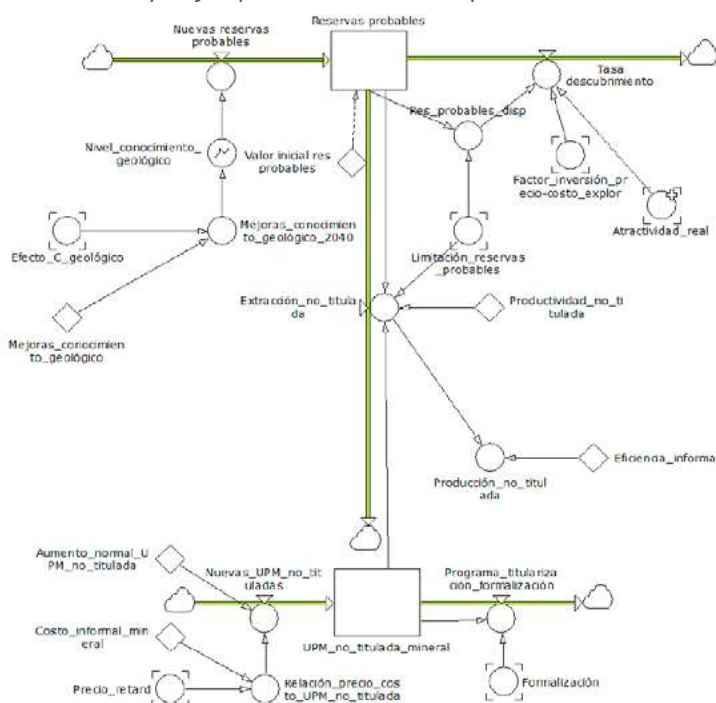
Figura 16: Variables dinámicas en el módulo “Ciclo Minero”



Nota: Las variables y líneas grises son variables y relaciones exógenas a estos módulos.

Fuente: Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME 2023

Figura 17: Diagrama de niveles y flujos para los minerales que fueron considerados con informalidad



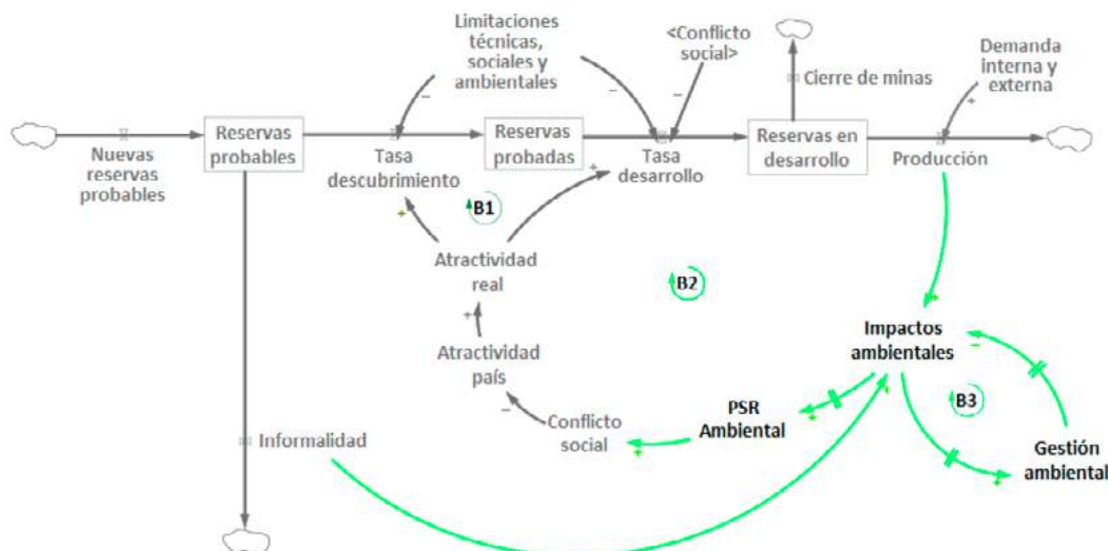
Fuente: Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME
2023

Para las simulaciones de los minerales oro, platino, arcillas, calizas y arenas y gravas se incluye un flujo de informalidad (marcado en color naranja en la Figura 16) dada su situación de extracción en los territorios. Este flujo adicional denominado “extracción no titulada” (ver Figura 17) representa la cantidad total de mineral extraído en un año por las unidades de producción minera (UPM) no tituladas de las reservas probables. Incluye tanto el mineral extraído correctamente como las pérdidas por malas prácticas. Este flujo determina la producción no titulada, la cual está definida como la cantidad de material efectivo con el que quedan las UPM no tituladas y que venden a terceros.

4.3.2. Módulo ambiental

El componente ambiental en el desarrollo minero es de vital importancia debido a su impacto directo en los ecosistemas, la biodiversidad y la calidad de vida de las comunidades locales. Algunos puntos clave, los cuales aportan insumos para el análisis de las variables seleccionadas y los escenarios propuestos, son: conservación de la biodiversidad, preservación del agua, calidad del aire, gestión de residuos, cambio climático, participación comunitaria, rehabilitación y restauración y cumplimiento normativo. En el diagrama causal esto queda representado mediante la variable ‘Impactos ambientales’, que considera el uso de recursos y la contaminación ambiental derivados de la actividad minera (Figura 18).

Figura 18: Diagrama causal del módulo ambiental



Nota: Las variables y líneas grises son variables y relaciones exógenas a estos módulos.

Fuente. Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME 2023

Un aumento en los impactos negativos lleva a las empresas mineras a implementar estrategias de corrección, mitigación o compensación para disminuirlos. Este proceso se captura mediante la variable ‘Gestión ambiental’ y genera un ciclo de balance (B3) según el cual las empresas reaccionan a la aparición o intensificación de impactos negativos para dar cumplimiento a la normatividad vigente y disminuir las probabilidades de aparición de conflictos sociales. Adicionalmente, se consideraron los impactos ambientales generados por la minería informal, ya que son considerables dentro del sector.

Por otra parte, un aumento en los impactos negativos también provoca un aumento en la ‘Percepción social del riesgo (PSR) ambiental’, definida como “la creencia de un individuo en relación con su exposición y vulnerabilidad frente a ciertas amenazas” (Bolaños-Valencia, Villegas-Palacio, López-Gómez, Berrouet, & Ruiz, 2019). Un aumento en la PSR ambiental conduce a la aparición o intensificación de ‘Conflictos sociales’, explicada con más detalle en el próximo módulo. Por un lado, estos conflictos disminuyen la ‘Atractividad del país’, es decir, disminuyen el interés de los inversionistas por hacer minería en Colombia, lo cual se traduce en una reducción en los procesos de exploración y producción. Esto, a su vez, disminuye los impactos negativos, y, por ende, disminuye también la PSR, formando así los ciclos de balance B1 y B2 (Figura 18).

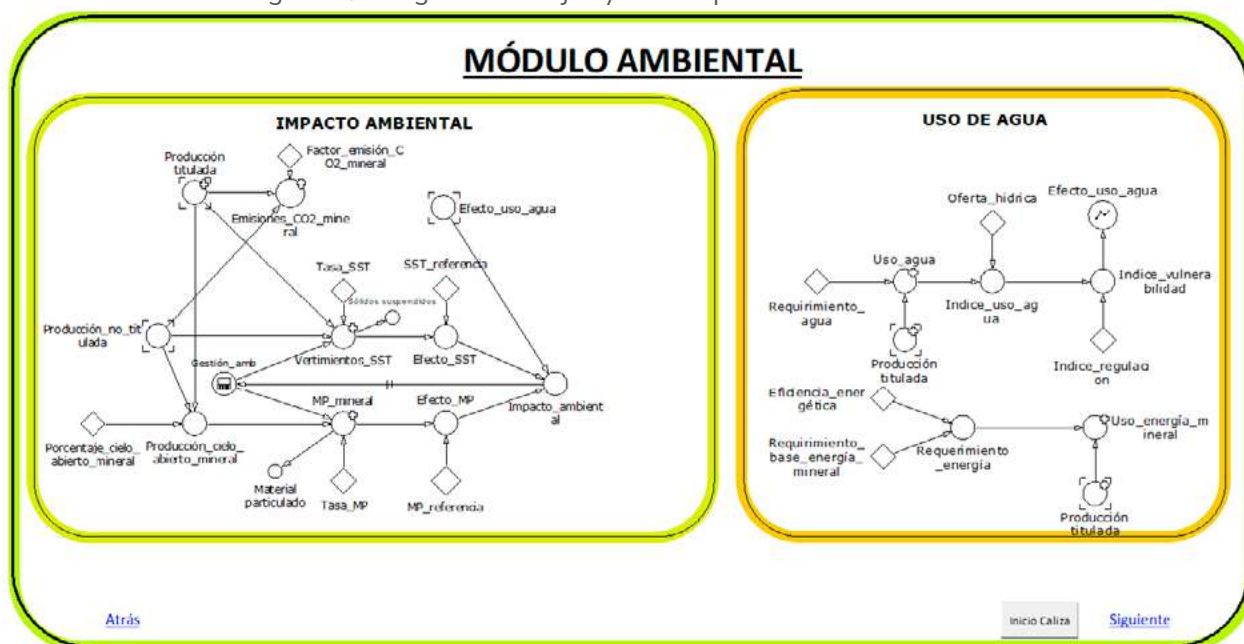
Al observar en detalle el diagrama de flujos y niveles para este módulo se observa que fue consolidado de acuerdo con dos aspectos: impactos ambientales y uso de recursos en la actividad económica (ver Figura 19). Los impactos ambientales derivados de la actividad minera son múltiples, afectando a los distintos componentes del medio (agua, suelo, aire, flora y fauna), sin embargo, en línea con el alcance planteado, el modelo consideró las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y, para algunos casos, la producción de sólidos suspendidos totales que afectan la calidad del agua.

En el caso del oro, también se consideraron los vertimientos realizados con mercurio y cianuro en la producción formal e informal de este mineral. Para las emisiones de material particulado se tuvo en cuenta la modalidad de minería (abierta o subterránea) dado que existe un factor diferenciador en las actividades que generan este tipo de impacto. Estos impactos ambientales posteriormente aportan en la amplificación o reducción de conflictos sociales generados por el módulo ambiental de acuerdo con los límites permisibles para cada uno de estos.

Para el consumo de recursos se consideró el agua y la energía teniendo en cuenta los requerimientos de esta actividad económica, por la competencia de este tipo de recursos y por las limitaciones que se están presentando. Tanto los impactos como el consumo de recursos dependen directamente de la producción de los minerales.

Los factores de emisiones de GEI, vertimiento en agua, material particulado y requerimiento de agua y energía fueron particulares para cada mineral simulado, tomado a partir de literatura científica publicada en bases de datos indexadas, informes de la Agencia de Protección Ambiental estadounidense (Environmental Protection Agency - EPA) y del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC).

Figura 19: Diagrama de flujos y niveles para el módulo ambiental



Fuente. Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME 2023

4.3.3. Módulo social

El módulo social está conformado por seis ciclos de refuerzo, es decir, un aumento en la producción desencadena una serie de efectos sobre otras variables que terminan por aumentar la producción en el largo plazo. Según esto, las acciones de producción serán positivas en el contexto social si los beneficios conllevan al desarrollo de las comunidades, tal como se identifica en la Figura 20.

Según Tanaka et al. (2007), la inversión social empresarial se fundamenta en la iniciativa de las empresas de invertir en las comunidades directamente afectadas, con el propósito de mitigar las tensiones existentes (Unidad de Planeación Minero Energética; Universidad Nacional de Colombia, 2014). Además, el Estado, a través de los ingresos generados por la renta minera estatal (regalías e impuestos), dispone de mayores recursos para invertir en los territorios. Para lograr una gestión social empresarial efectiva, entendida como el conjunto de planes, programas y estrategias desarrollados por el ente gestor del proyecto para armonizar la actividad minera con la dinámica social del territorio, que contribuya a mitigar el conflicto social, es necesario que la empresa minera establezca espacios de participación incidente con la comunidad.

El diagrama de flujo ilustra el proceso de minería en Chile, desde la identificación de nuevas reservas hasta la producción y su impacto social. El flujo principal comienza con 'Nuevas reservas probables', que se convierten en 'Reservas probables'. Desde aquí, se puede descubrir (Tasa de descubrimiento) o desarrollar (Tasa de desarrollo) reservas probadas. El desarrollo de reservas probadas puede estar limitado por limitaciones técnicas, sociales y ambientales, o por un conflicto social. Las reservas en desarrollo pueden cerrar o convertirse en producción debido a la demanda interna y externa. La producción genera renta minera, la cual es afectada por impuestos y regalías. La renta minera influye en el empleo, la inversión social y la participación en la toma de decisiones. El conflicto social, a su vez, afecta la articulación entre actores, la vocación minera y la PSR ambiental. La informalidad también juega un papel en la atraktividad real y país.

```

graph LR
    NRP[Nuevas reservas probables] --> RP[Reservas probables]
    RP -- "Tasa de descubrimiento (+)" --> RPp[Reservas probadas]
    RP -- "Informalidad" --> Inf[Informalidad]
    RPp -- "Limitaciones técnicas, sociales y ambientales (-)" --> RPp
    RPp -- "Tasa de desarrollo (+)" --> REd[Reservas en desarrollo]
    RPp -- "Conflicto social (-)" --> CS[Conflicto social]
    REd -- "Cierre de minas" --> CS
    REd -- "Demanda interna y externa (+)" --> P[Producción]
    P -- "Impuestos y regalías (-)" --> RM[Renta minera]
    RM -- "R7 (+)" --> IS[Inversión social]
    RM -- "R6 (+)" --> E[Empleo]
    RM -- "R5 (+)" --> CS
    IS -- "R7 (+)" --> P
    E -- "R6 (+)" --> P
    CS -- "R5 (+)" --> P
    CS -- "R8 (+)" --> RPp
    CS -- "R9 (+)" --> RPp
    CS -- "R10 (+)" --> AP[Atraktividad país]
    CS -- "Articulación entre actores (-)" --> CS
    CS -- "Vocación minera (+)" --> CS
    CS -- "PSR Ambiental (-)" --> CS
    AP -- "Atraktividad real (+)" --> RPp
    Inf -- "Atraktividad país (+)" --> AP
  
```

Fuente: Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME 2023.

Por otro lado, el ciclo de refuerzo de empleo (R10) resalta que el aumento en la producción conlleva a un incremento en el empleo, ya que se necesita una mayor mano de obra para satisfacer la creciente demanda (Ortiz, 2013). Este incremento en la actividad laboral no solo mejora la calidad de vida, sino que también contribuye a reducir el conflicto social. En contraste, el conflicto con las comunidades surge cuando las expectativas de empleo no se cumplen; cuanto mayor sea la discrepancia entre los empleos reales y los esperados, mayor será el conflicto. Un aumento en el conflicto social disminuye la atraktividad, la cual, debido a su relación positiva con la exploración y el desarrollo, conlleva a una disminución de la producción.

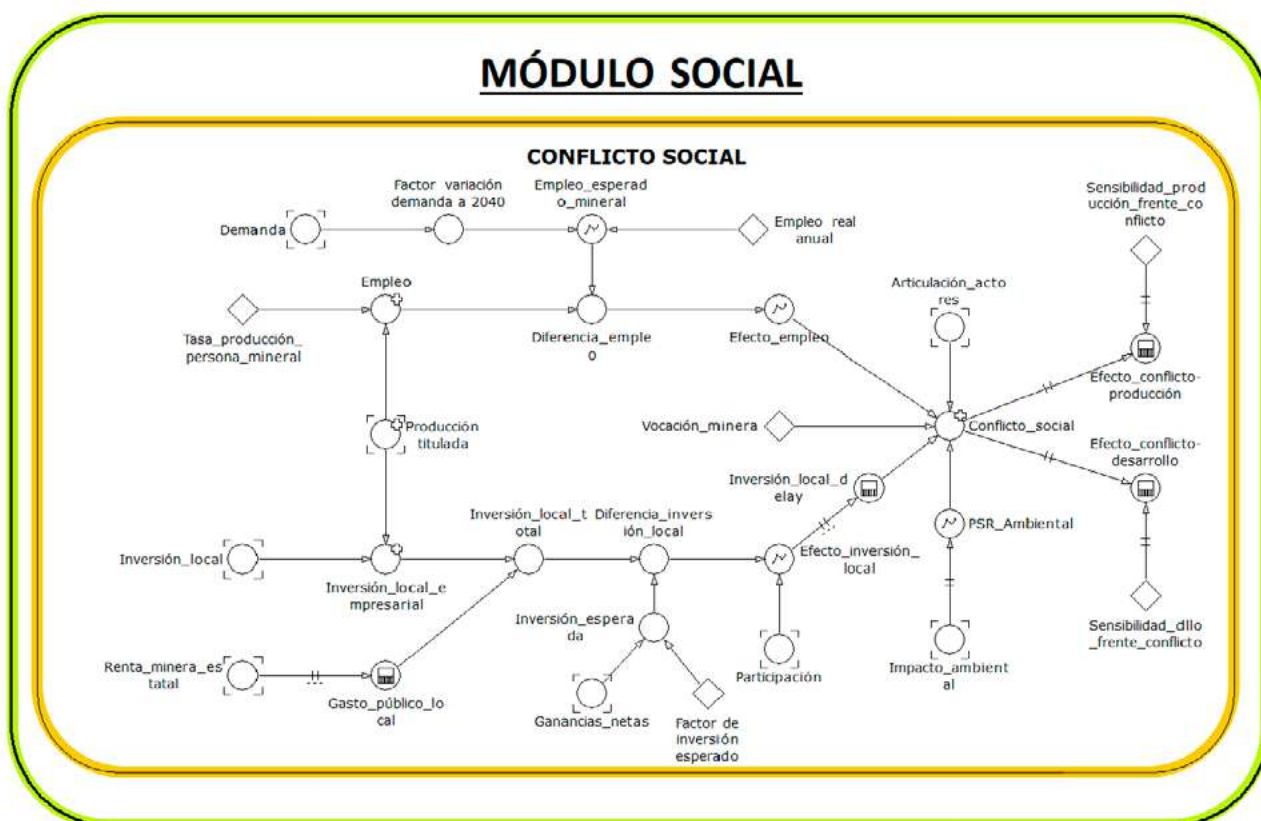
Los ciclos R8, R9 y R10 pueden verse como “versiones extendidas” de los ciclos R5, R6 y R7, respectivamente. Es decir, el efecto de los conflictos sociales no es únicamente sobre la etapa de producción. Por ejemplo, una reducción de tensiones sociales (fruto de un aumento en los empleos generados y/o en la inversión social) hace que el sector minero en Colombia sea más atractivo para potenciales inversionistas, generando a largo plazo un incremento en la tasa de desarrollo y en la ejecución de actividades de explotación en el país. Esto, a su vez, permitirá la creación de más empleos y aumentará la inversión social, perpetuando un ciclo virtuoso que beneficiaría tanto a las empresas como a las comunidades.

Finalmente, el conflicto social, también se ve afectado por la vocación minera y la articulación entre actores. La vocación minera de un territorio se refiere a la idoneidad y potencial que este posee para el desarrollo de actividades mineras dadas unas condiciones geográficas, económicas y sociales que hacen que la extracción de minerales sea viable social, ambiental y económicamente. Así mismo, vislumbrando las características culturales que adquiere el territorio en términos de patrimonios inmateriales y materiales, reconocimiento de los factores diferenciales, entre otros. Un territorio que históricamente ha usado la minería como medio de vida va a tener mayor disposición a aceptar la actividad minera, disminuyendo el conflicto social. Por el contrario, un territorio con vocación agrícola o forestal puede tener más resistencia a la implementación de proyectos mineros, desencadenando un conflicto social.

La articulación entre actores es la coordinación y comunicación existente entre los distintos actores que tienen incidencia en territorio para la toma de decisiones (privados, públicos y comunitarios). La existencia de articulación implica que los habitantes de la zona y las distintas instituciones allí presentes, realicen esfuerzos en conjunto para velar por el desarrollo de una actividad minera que busque armonizar con las dinámicas territoriales, gestionando adecuadamente los impactos sociales, ambientales entre otros e invirtiendo localmente.

Como se observó en el diagrama causal, para el módulo social se calcula el conflicto social de acuerdo con el empleo, la inversión local, la percepción social del riesgo ambiental, la articulación entre actores y la vocación minera. En la Figura 21 se observa el diagrama de flujos y niveles lo que permite evidenciar estos aspectos en más detalle.

Figura 21: Diagrama de flujos y niveles para el módulo social



Fuente: Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME 2023.

La inversión local comprende dos componentes: la inversión empresarial local, que abarca las iniciativas de responsabilidad social corporativa; y la inversión local estatal, que se financia con los fondos provenientes de la renta minera (impuestos y regalías). La cantidad destinada a la inversión local por parte de las empresas se estima a partir de un factor de inversión social real que se obtiene por los reportes de sostenibilidad y/o el 1% de la utilidad percibida por la actividad minera para cada mineral con respecto a la producción. La inversión estatal local se estipula como un porcentaje de la renta minera estatal.

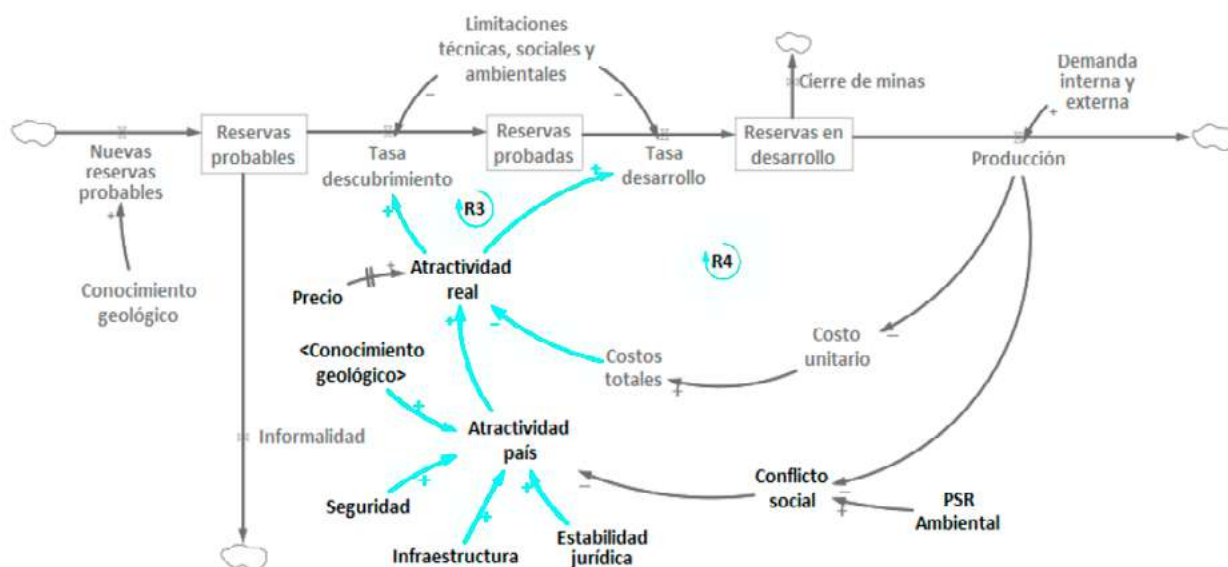
El total de la inversión local es la suma de la inversión proveniente de entidades empresariales y estatales, la cual se contrasta con un grado de inversión anticipado. La diferencia entre la inversión esperada y la real indica el efecto de la inversión local en los conflictos sociales. Si la inversión local supera las expectativas, tiende a disminuir el conflicto social. Por el contrario, si la inversión esperada es mayor que la real, aumenta la posibilidad de conflictos.

Tal como se mencionó anteriormente, la percepción social del riesgo ambiental depende de los impactos ambientales generados, los cuales incluyen contaminación del aire por material particulado, contaminación del agua por sólidos suspendidos, y consumo de agua. Estos tres aspectos descritos afectan al conflicto social de acuerdo con un efecto no lineal. El conflicto social es estimado para cada uno de los minerales considerados teniendo en cuenta las particularidades en cada uno de ellos.

4.3.4. Módulo de atraktividad

Este módulo se basa en la atraktividad del país frente a la inversión para actividades mineras, la cual es determinada por la capacidad estatal; que a su vez se conforma por las variables de seguridad, infraestructura y estabilidad jurídica de Colombia para desarrollar proyectos mineros, tal como se observa en la Figura 22.

Figura 22: Diagrama causal del módulo de atraktividad



Nota: Las variables y líneas grises son variables y relaciones exógenas a estos módulos.

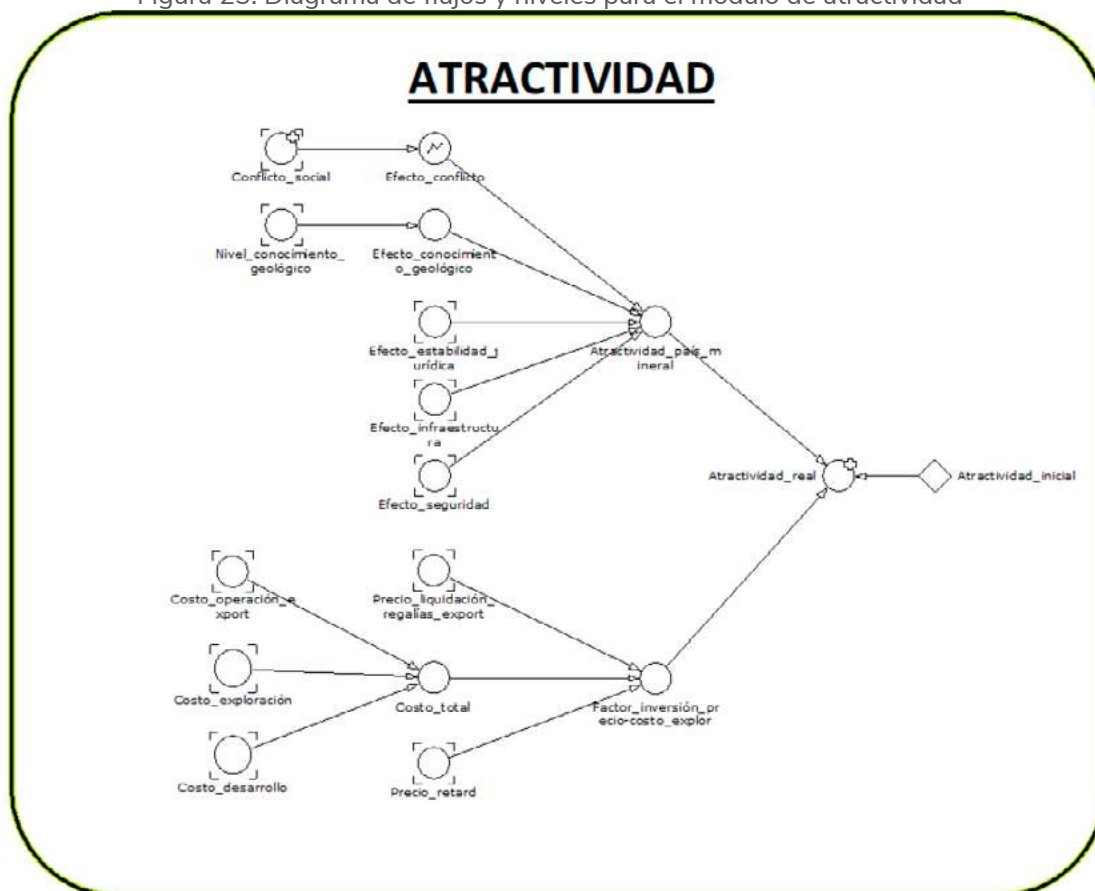
Fuente: Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME 2023.

Para entrar en detalle se describen cada una de las variables que conforman el módulo: la seguridad hace referencia a la incidencia del conflicto armado y la percepción de seguridad física en los territorios con actividad minera. Un entorno seguro, con disminución del conflicto, fomenta la confianza de los inversionistas. En cuanto a la infraestructura se analizan factores como la calidad de las vías, puentes, colegios, hospitales, telecomunicaciones, acueductos y alcantarillados, entre otros, que influyen signi-

ficativamente en la atraktividad del país para facilitar el desarrollo de proyectos mineros. Una infraestructura bien desarrollada crea un entorno propicio para la inversión al mejorar la calidad de vida de la población. Por su parte, la estabilidad jurídica se refiere a la consistencia y previsibilidad de la legislación. Un marco legal estable genera confianza y un ambiente propicio para la inversión al proporcionar reglas claras y duraderas. También se incluye como variable de análisis el conocimiento geológico dado que permite tener conocimiento de la distribución de los minerales estratégicos en el territorio con base en mapas geológicos y metalogénicos, facilitando la ubicación de reservas probables y orientando con más facilidad los procesos de prospección y exploración.

Adicional a lo anterior, la atraktividad del sector minero (atraktividad real) es determinada por la rentabilidad directa del ejercicio minero, que se representa por la relación precio-costo, como se muestra en la Figura 22 y en la Figura 23.

Figura 23: Diagrama de flujos y niveles para el módulo de atraktividad



Fuente. Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME 2023

Al igual que con los demás módulos, se propone la formulación de una atraktividad para cada mineral modelado, pues los inversionistas evalúan, además del país, los conflictos propios de la región con riqueza en determinado recurso y la rentabilidad de cada uno. Esto también se ve identificado en las figuras previas, donde el conflicto social se presenta como otra variable que influye en la atraktividad. Después de evaluar los impactos ambientales, consumo de recursos y los conflictos sociales de cada mineral, se procede a calcular la atraktividad global del país, la cual se realiza individualmente para cada mineral, como una media ponderada entre los factores ambientales y sociales (representados en la variable “conflicto social”) y los factores externos.

4.3.5. Módulo financiero

El módulo financiero tiene varios componentes: costos, ingresos, decisiones de inversión, regalías e impuestos, los cuales definen las ganancias netas obtenidas por la producción por la actividad económica.

Los ciclos R1 y R2 representan la necesidad de aumentar el número de reservas para sostener la producción deseada, la cual está determinada por la rentabilidad del sector. A mayores ganancias (relación precio-costos), mayor será la producción deseada y la necesidad de reservas probadas y en desarrollo.

El diagrama de flujo de la cadena de valor de la minería ilustra el proceso desde la exploración hasta la producción y el ciclo financiero asociado. Las etapas principales son:

- Nuevas reservas probables**: El punto de partida, influenciado por **Reservas necesarias** (R1).
- Reservas probables**: Se forman al aplicar la **Tasa de descubrimiento** a las nuevas reservas. Este proceso está limitado por **Limitaciones técnicas, sociales y ambientales**.
- Reservas en desarrollo**: Se forman al aplicar la **Tasa de desarrollo** a las reservas probables. Este proceso también está limitado por **Limitaciones técnicas, sociales y ambientales**.
- Producción**: El resultado final de la cadena de valor, influenciado por la **Demanda interna y externa**.

Factores adicionales que influyen en el proceso:

- Informalidad**: Afecta directamente a las **Reservas probables**.
- Reservas necesarias** (R2): Influyen en la **Producción deseada**.
- Precio**: Influye en la **Atractividad real** y en la **Producción deseada**.
- Costos totales**: Incluyen **Impuestos y regalías** y **Costo unitario**.
- Producción deseada**: Determina el **Costo unitario** y la **Renta minera**.
- Renta minera**: Influye en la **Producción**.
- Impuestos y regalías**: Influyen en la **Producción**.
- Cierre de minas**: Resulta de la **Producción**.

El **Módulo del ciclo financiero** (resaltado en amarillo) cubre las etapas de **Reservas probables**, **Reservas en desarrollo** y **Producción**, así como los factores de **Reservas necesarias** (R2), **Costos totales**, **Producción deseada**, **Costo unitario** y **Renta minera**.

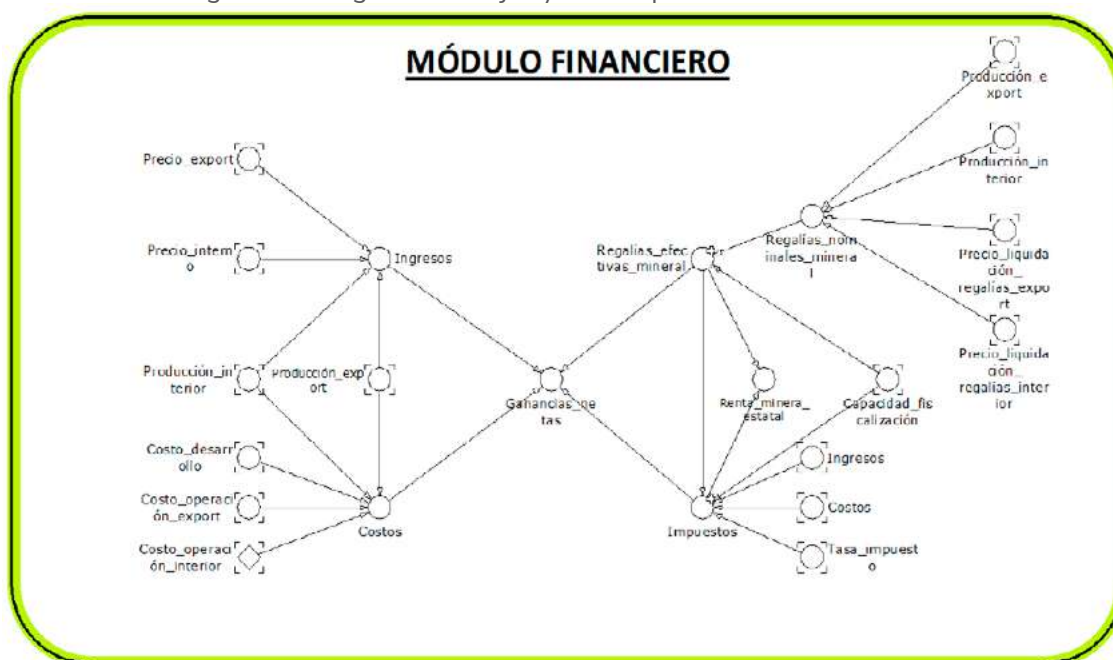
Otro factor crucial es la inversión necesaria para atender las demandas de crecimiento y descubrimiento. La inversión precisa para el crecimiento se determina multiplicando el costo de desarrollo por la tasa

de expansión, además de la ampliación de capacidad para reemplazar la depreciación. Mientras tanto, la inversión requerida en exploración se calcula mediante el costo de exploración multiplicado por la tasa de descubrimiento.

Con relación a las regalías, impuestos, ingresos y ganancias, las utilidades netas de la industria minera para cada tipo de mineral se determinan por la diferencia entre los ingresos y los gastos. Los ingresos se generan por la producción multiplicada por el precio de venta, mientras que los gastos se desglosan en costos (producción multiplicada por los costos de desarrollo y operativos), regalías efectivas e impuestos (ver Figura 25).

Por su parte, la renta minera estatal equivale a la suma de las regalías y los impuestos. Las regalías efectivas se calculan mediante las regalías nominales (producción por el precio de las regalías) multiplicadas por la capacidad de supervisión y los impuestos se determinan a partir de las ganancias netas después de las regalías (ingresos - costos - regalías) multiplicadas por la tasa impositiva y la capacidad de supervisión.

Figura 25: Diagrama de flujos y niveles para el módulo financiero



Fuente. Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME 2023

4.4. Verificación y validación del modelo

La Dinámica de Sistemas se distingue por describir las conexiones causales entre los componentes de un sistema mediante principios matemáticos. Esto facilita la predicción de futuros acontecimientos y la comprensión de diversos fenómenos. Dado que cada ecuación refleja la relación entre dos elementos del sistema, es fundamental validar cada una, ya que la falta de coherencia en una sola ecuación podría afectar la integridad general del modelo (Barlas, 1996).

En esta etapa se evalúa que tanto la estructura como el comportamiento representen fielmente el sistema real. Aunque la validación comienza en cuanto se escribe la primera ecuación, también implica otras series de pruebas como es la comparación del comportamiento simulado del modelo con el comportamiento real del sistema. Sin embargo, la validación implica mucho más que la replicación del comportamiento histórico. Cada variable debe corresponder a un concepto significativo en el mundo real, cada ecuación debe ser comprobada por la consistencia dimensional.

La validación es un proceso iterativo que puede requerir modificaciones en el modelo. Por esto, se realizaron numerosas simulaciones tendientes a la detección de eventuales errores y se ajustaron las hipótesis formuladas que se apartaron del comportamiento real del sistema. Además, se aplicaron las pruebas de validación que recomiendan Barlas (Formal aspects of model validity and validation in system dynamics., 1996) y Sterman (Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world, 2000) en cuanto a estructura y comportamiento, con el fin de generar confiabilidad en el modelo para el sector minero a nivel nacional. Estas pruebas se detallan a continuación.

4.4.1. Validación de estructura

La validación de la estructura se descompone en dos enfoques: las pruebas directas de la estructura y las pruebas de comportamiento centradas en la estructura. La distinción clave reside en que las pruebas directas son principalmente teóricas, mientras que las centradas en la estructura emplean la simulación como una herramienta para investigar la validez de los resultados.

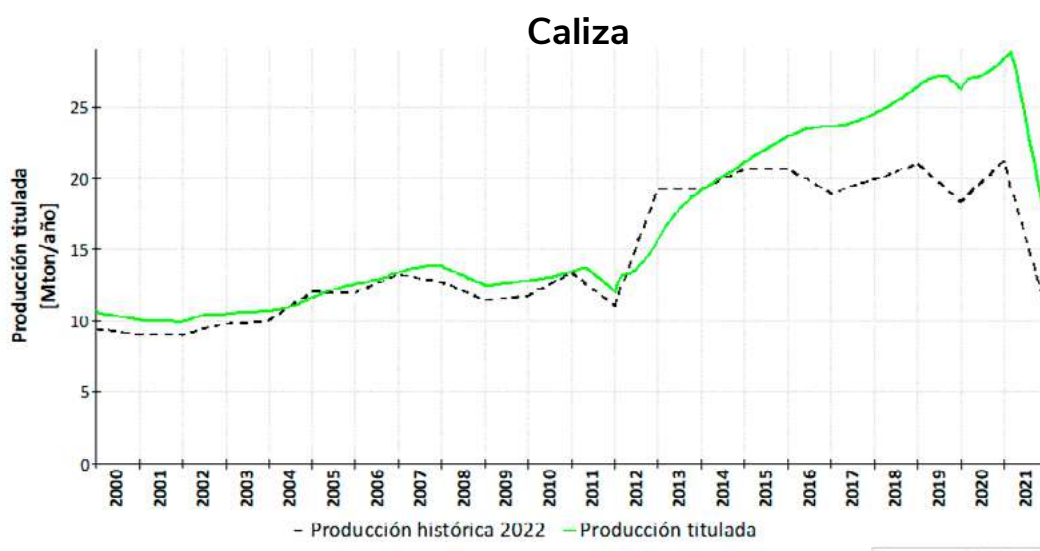
La evaluación directa de la estructura implica contrastar el modelo con el entendimiento existente sobre el sistema real, lo que se realizó a partir de la revisión de literatura, discusiones entre el equipo y con el desarrollo del segundo taller de modelación, al cual asistieron actores claves de diferentes entidades pertenecientes al sector como ANM, MME, SGC, entre otros.

Posteriormente, cada variable y relación se coteja con información adquirida directamente del sistema, como es el caso de la demanda interna y externa, precios de exportación, valores iniciales de las reservas, porcentaje de regalía para cada mineral. En la validación del comportamiento centrada en la estructura se detectan posibles deficiencias en la estructura a través de los resultados de simulación generados por el modelo. Esto se logra mediante pruebas bajo estrés o en condiciones extremas para comparar los resultados previstos con los resultados obtenidos en la simulación.

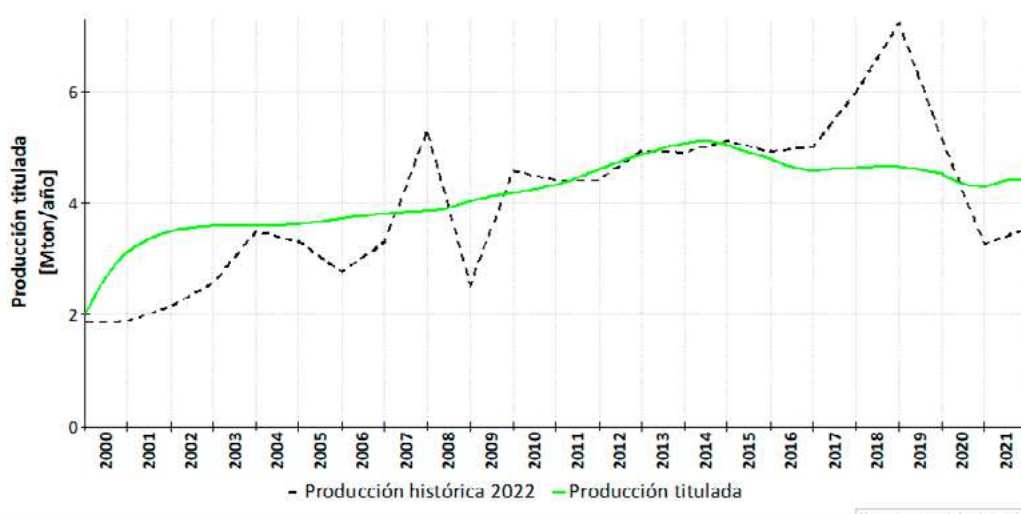
4.4.2. Validación de comportamiento

Para el caso del modelo del sector minero colombiano se intenta reproducir principalmente el comportamiento histórico de la producción de cada uno de los minerales considerados. A partir de allí, los parámetros de entrada del modelo con mayor incertidumbre fueron ajustados para lograr que las variables simuladas que muestran la dinámica de largo plazo de las variables reales capturen el comportamiento presentado con las series históricas. En la Tabla 3 se listan algunas gráficas de trayectorias de producción simuladas versus la producción histórica hasta el 2022 para algunos de los minerales considerados como un ejemplo del trabajo realizado en la validación de comportamiento.

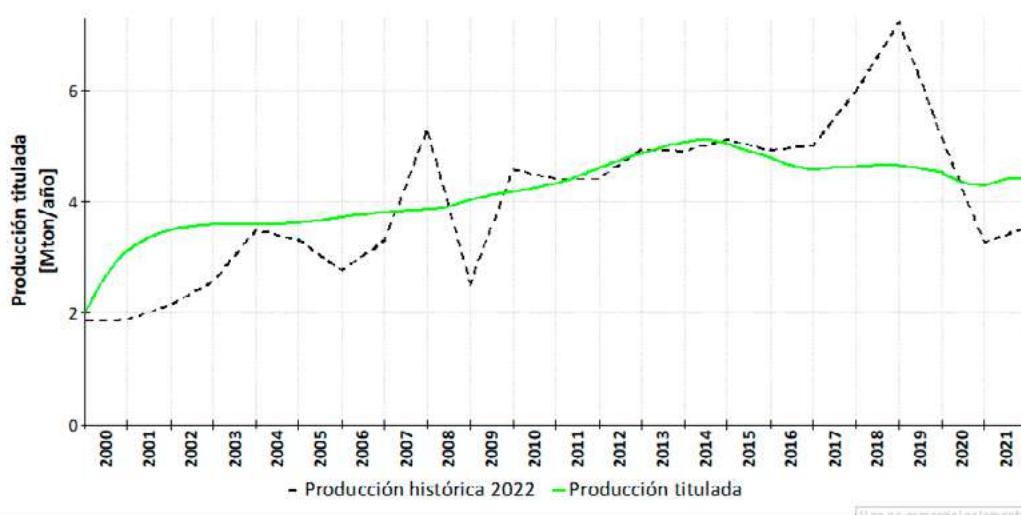
Tabla 3. Validación de estructura del modelo, mediante la revisión de producción histórica vs simulada para caliza, carbón metalúrgico, fosfatos y magnesio. Fuente: Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME 2023



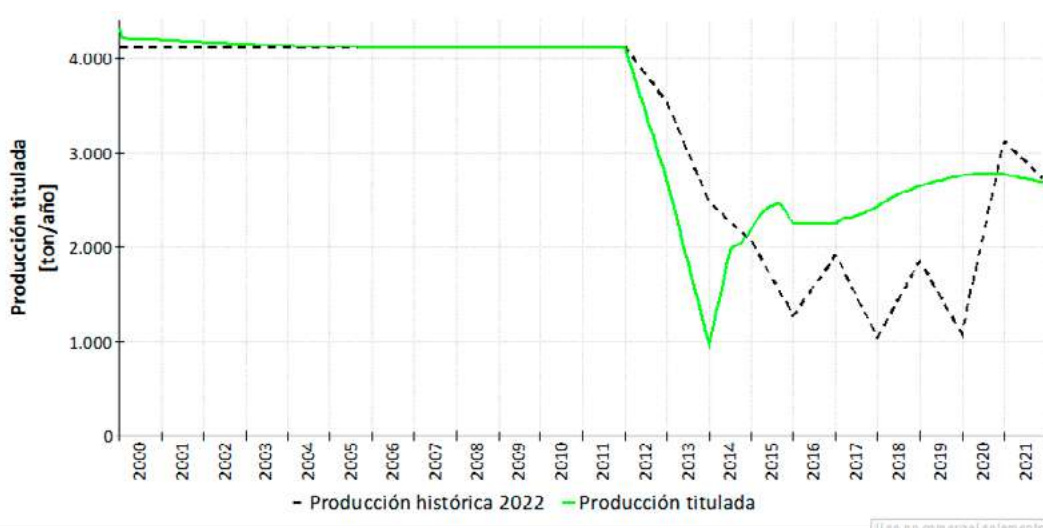
Carbón metalúrgico



Fosfatos



Magnesio



Fuente: Documento Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos. Convenio UNAL-UPME 2023

5. ESCENARIOS Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El sector minero energético tiene grandes implicaciones en variables macroeconómicas claves para el desarrollo del país, pero además, según el Ministerio de Hacienda y Crédito Público (Economía Colombiana: nuevos rumbos y contexto global, 2023), la política de reindustrialización y el proceso de transición energética favorecerán las exportaciones no tradicionales y de servicios, mejorando la composición de las cuentas externas del país, donde Colombia tiene la posibilidad de aprovechar su dotación de minerales estratégicos para la transición energética, el desarrollo agrícola e infraestructura pública. Sin embargo, en cualquier proceso de toma de decisiones que considere el futuro a largo plazo, hay incertidumbres muy difíciles de considerar, incluso de imaginar. Se trata de entender y representar cómo pueden evolucionar las variables más importantes en ese futuro de largo plazo.

Los escenarios son una herramienta estratégica generadora de futuros posibles, utilizada sistemáticamente por diferentes instituciones para entender y representar de una mejor manera aquello que puede pasar en el futuro. Tal como se indicó anteriormente, el sector minero de diferentes países del mundo continúa usando la herramienta de escenarios para la planificación bajo consideraciones de incertidumbre de largo plazo. Para la toma de decisiones, se busca tener una representación amplia y razonable de futuros posibles de largo plazo, donde se puedan presentar y probar las diferentes decisiones y/o estrategias propuestas, en la búsqueda por decisiones robustas y adaptativas, así como la caracterización de incertidumbres severas o profundas.

5.1. Escenarios para el sector minero en el mundo

El sector minero en diferentes países ha desarrollado escenarios, tales como el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI por sus siglas en sueco), que, en 2019, en conjunto con el sector minero de Suecia, adelantó un ejercicio de escenarios para la industria minera de dicho país. Los ejes jalonadores fueron: la globalización y las exigencias del desarrollo sostenible. Se definieron cuatro escenarios con los cuales se construyó un mapa de desarrollo sostenible y se evaluaron las acciones propuestas en relación con la Agenda 2030. Los escenarios definidos en este caso fueron: Escenario 1: Minería para un mundo globalizado y sostenible; Escenario 2: Nuevas soluciones tras la re-regionalización; Escenario 3: Una reactivación de la Agenda 2030 impulsada por las empresas y Escenario 4: La minería global y local. En la Figura 26 se muestran de manera esquemática los escenarios mineros propuestos por el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI) en 2019.

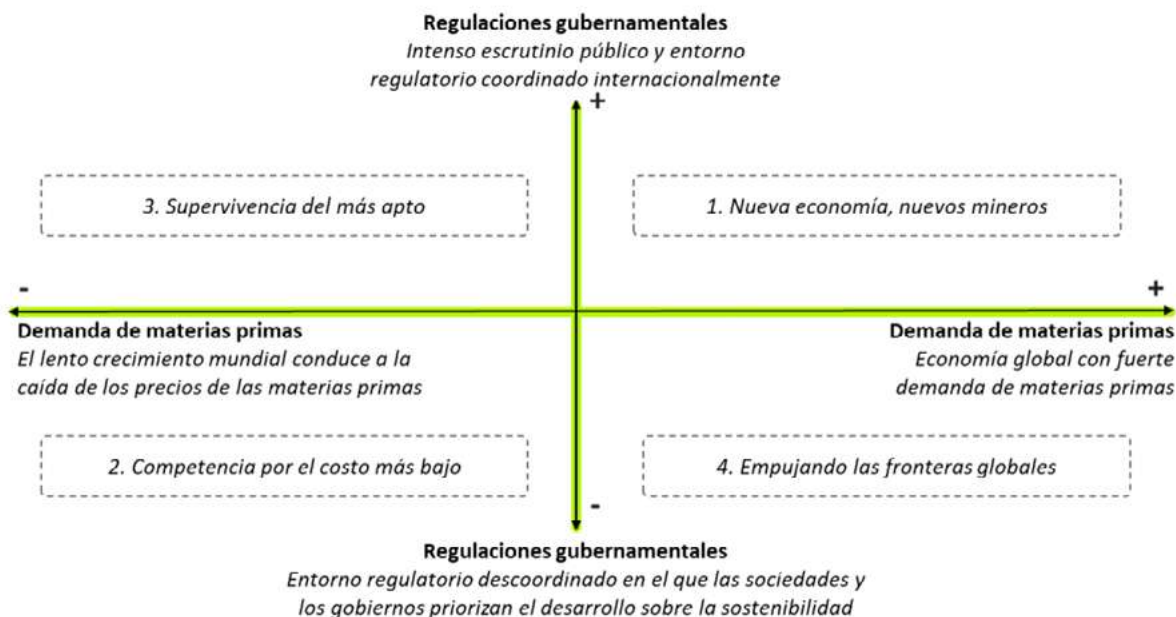
En el año 2021 en Chile se hizo un ejercicio de escenarios mineros liderado por el sector público del país (EY, 2021). Los ejes seleccionados para los escenarios fueron: la demanda global por materias primas y las regulaciones gubernamentales que impactan el desarrollo minero. Los cuatro escenarios resultantes fueron: Escenario 1: Nuevas economías, nuevos mineros; Escenario 2: Competencia por el costo más bajo; Escenario 3: Supervivencia del más apto y Escenario 4: Empujando las fronteras globales. En la Figura 27 se muestran de manera esquemática los escenarios mineros propuestos en Chile en 2021.

Figura 26: Escenarios propuestos para el sector minero de Suecia por el SEI en 2019



Fuente: Tomado de Informe de historias de los escenarios de largo plazo para el sector minero colombiano Convenio UPME UNAL 2023.

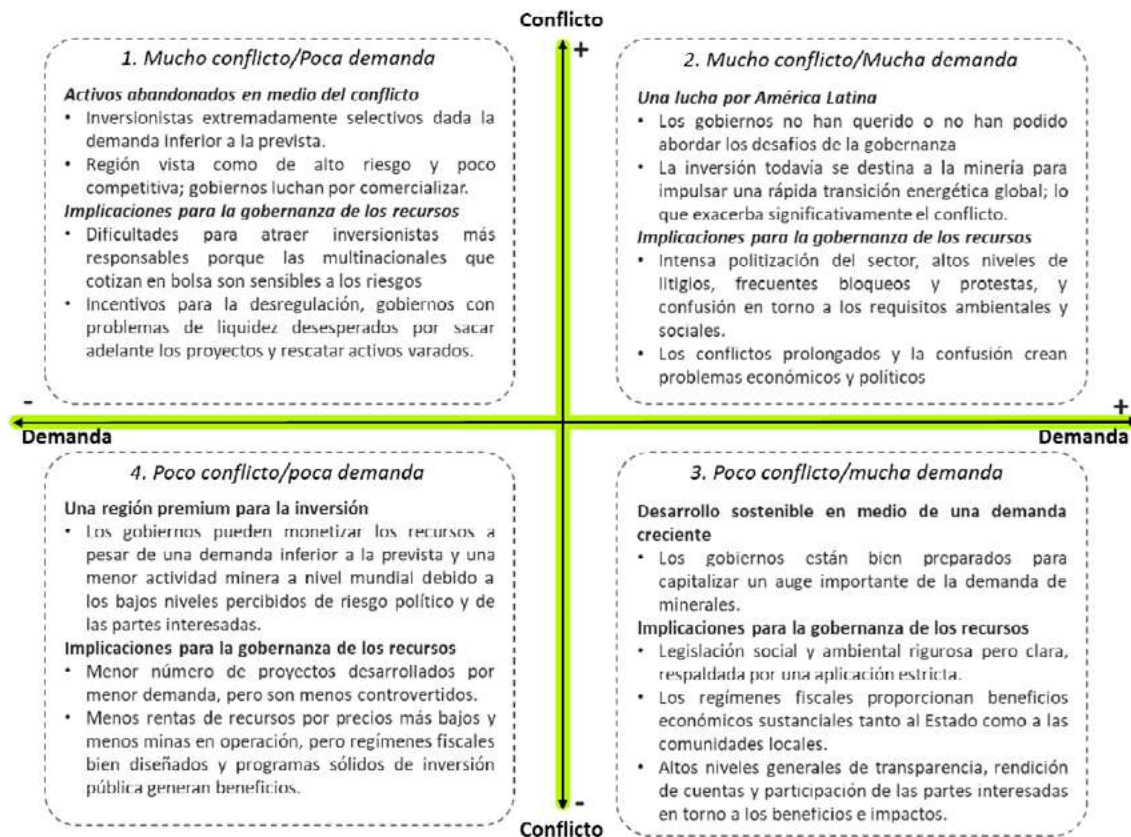
Figura 27: Escenarios propuestos por el sector minero de Chile en 2021



Fuente: Tomado de Informe de historias de los escenarios de largo plazo para el sector minero colombiano Convenio UPME UNAL 2023.

En el año 2022 en el proyecto Leveraging Transparency to Reduce Corruption (LTRC) se propusieron cuatro escenarios para el sector minero de Latinoamérica. Los ejes de los escenarios fueron: demanda global por minerales y conflictos para el desarrollo de la minería. Los escenarios propuestos fueron: Escenario 1: Activos abandonados en medio del conflicto; Escenario 2: Una lucha por Latinoamérica; Escenario 3: Desarrollo sostenible en medio de una demanda en auge y Escenario 4: Una región privilegiada para la inversión. En la Figura 28 se muestran de manera esquemática los escenarios mineros propuestos en este proyecto en 2022 (Purdy & Castillo, 2022).

Figura 28: Escenarios mineros propuestos por Leveraging Transparency to Reduce Corruption en 2022



Fuente: Tomado de Informe de historias de los escenarios de largo plazo para el sector minero colombiano Convenio UPME UNAL 2023.

5.2. Escenarios mineros para Colombia 2023 - 2040

Los escenarios mineros para Colombia consideraron un horizonte de planeación de 16 años, hasta el año 2040. Los escenarios representan futuros posibles que permiten desarrollar y probar estrategias, identificando aquellas que son más robustas, resilientes y adecuadas en diferentes situaciones; además permiten priorizar las estrategias del sector minero bajo consideraciones de incertidumbre. La consideración de las incertidumbres de largo plazo (escenarios) son complementadas con la consideración de incertidumbre puntuales (coyunturales) que puedan ocurrir en el horizonte de planeación (20 años) llamadas incertidumbre profundas o “cisnes negros”.

El uso de esta herramienta parte de reconocer dos problemas interrelacionados: el primero consiste en generar futuros posibles con una buena representación de lo que pueda pasar en el largo plazo, y el segundo está en proponer, evaluar y escoger, utilizando esos futuros posibles, las diferentes opciones de estrategias. Uno de los métodos generadores de futuros posibles es el método de Escenarios, orientado a responder preguntas del tipo “¿Qué pasaría si?”.

Para la construcción de los futuros posibles del sector minero colombiano (escenarios) se desarrolló un trabajo conjunto entre la UPME y la Universidad Nacional de Colombia, que se realizó a través de etapas. En primer lugar, se revisó la literatura de estudios realizados en Colombia y de otros ejercicios de escenarios mineros internacionales. En segundo lugar, se realizaron entrevistas a directivos del sector minero colombiano para captar sus percepciones y propuestas para la minería en el país, entre ellos la Asociación de Profesionales del Sector Minero Colombiano, ANM, Viceministerio de Minas, SGC y UPME. Finalmente se hicieron dos talleres relacionados con: a) la identificación y selección de variables, fuerzas jalonadoras y clasificación según su importancia e incertidumbre y b) selección de los escenarios mediante la combinación de las variables inciertas definidas y propuesta de políticas y estrategias para el sector minero.

Como resultado de este trabajo se identificaron nueve variables inciertas cruciales, y mediante un análisis estructural se seleccionaron dos variables clave: **la demanda global por minerales y la disponibilidad de minerales en el país**, considerando aspectos geológicos, sociales y ambientales. Los resultados definen escenarios a 20 años con base a combinaciones de estados de las variables inciertas e importantes seleccionadas. Estos escenarios son útiles para evaluar políticas y estrategias, priorizar decisiones y fortalecer la resiliencia del sector ante las condiciones que se puedan presentar en el futuro. La información sobre disponibilidad de minerales se destaca como crucial, requiriendo una mayor inversión en investigación para avanzar en el sector.

Los cuatro escenarios propuestos son: *Minería Transformada*: alta demanda de minerales críticos a nivel global y disponibilidad de estos en Colombia; *Minería estancada*: demanda nula o baja por minerales críticos a nivel global y no se encuentran o se encuentran pocos de estos en Colombia; *Minería local*: demanda global alta por minerales críticos y no tenemos o tenemos pocos minerales críticos disponibles en el país; y *Minería en competencia*: demanda global a la baja por minerales críticos y alta disponibilidad de minerales en el país; tal como se observan en la Figura 29.

Figura 29: Escenarios mineros de largo plazo para el sector minero colombiano 2023



Fuente: Elaboración propia con información de talleres y sesiones de modelamiento entre grupo de trabajo UNAL-UPME.

5.2.1. Escenario uno: Minería transformada

Este futuro posible del sector minero colombiano se plantea a través del desarrollo de las variables claves de demanda global alta por minerales estratégicos y alta disponibilidad de minerales, incluyendo los componentes ambientales, sociales y geológicos en el país. Las características de este escenario son:

Estructura institucional sólida: se ve respaldada por una gobernanza que sigue altos estándares internacionales, promoviendo una colaboración efectiva entre el Estado, las empresas y las comunidades. Este enfoque integral garantiza la transparencia, la responsabilidad y la equidad en todas las operaciones, fortaleciendo así la confianza de los diferentes actores involucrados. Además, la democratización del sector se establece como un pilar fundamental, fomentando la participación inclusiva de diversos sectores de la sociedad en la toma de decisiones y el acceso a los beneficios generados por las actividades económicas. Sin embargo, se reconoce la existencia de zonas “objetivo” de grupos armados ilegales, lo que subraya la importancia de implementar estrategias específicas para abordar y mitigar los riesgos asociados, asegurando así un desarrollo sostenible y seguro en todas las regiones afectadas.

Inversiones significativas en información geológica: estas han impulsado un panorama minero más informado y sostenible, no solo han mejorado la eficiencia y precisión en la exploración y extracción de recursos minerales, sino que también han trazado el camino para una minería con estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. La industria minera, consciente de su impacto ambiental, ha adoptado enfoques innovadores para reducir sus emisiones de carbono, implementa tecnologías más limpias y gestiona eficazmente sus residuos. Además, la integración de una planeación intersectorial estratégica ha permitido un desarrollo armonioso de la actividad minera, considerando no sólo los aspectos geológicos, sino también los sociales, económicos y ambientales. Esta perspectiva holística ha facilitado la identificación de áreas de oportunidad para el crecimiento sostenible, al tiempo que se minimizan los posibles impactos negativos, promoviendo así una minería responsable y alineada con los objetivos de desarrollo sostenible.

Descubrimiento de yacimientos y desarrollo de proyectos: se han generado resultados notables al fortalecer la red de conocimiento del sector con la participación de todos los actores involucrados. Este enfoque colaborativo ha permitido integrar diversos conocimientos técnicos, científicos y comunitarios, contribuyendo así a una toma de decisiones más informada y equitativa. La soberanía del mineral se ha consolidado como un elemento fundamental, garantizando que los beneficios económicos y sociales generados por la actividad minera permanezcan en la jurisdicción nacional. Además, se han implementado garantías sólidas para el respeto de los derechos humanos y del medio ambiente a lo largo de todas las fases del proceso minero. Este compromiso ético no solo ha mejorado las condiciones laborales y de vida de las comunidades locales, sino que también ha asegurado la preservación de los ecosistemas circundantes. Un enfoque diferencial en la planeación minera ha permitido abordar de manera específica las necesidades y preocupaciones de grupos vulnerables, asegurando así que el desarrollo minero sea inclusivo y beneficie a toda la sociedad de manera justa y sostenible.

Bonanza minera y demanda en alza: estas se han visto respaldadas por un sólido desarrollo del recurso humano en todas las dimensiones, abarcando desde niveles básicos hasta niveles técnicos y tecnológicos. La formación integral de profesionales y trabajadores ha fortalecido las capacidades y competencias necesarias para abordar los desafíos y las oportunidades que presenta la industria minera en constante evolución. Este enfoque en el capital humano no solo ha contribuido a la eficiencia operativa, sino que también ha generado un impacto positivo en el desarrollo territorial integral. Se ha promovido una diversificación económica a través de la creación de encadenamientos productivos, conectando la actividad minera con otros sectores económicos; esto ha llevado a un desarrollo más equitativo y sostenible, aprovechando las sinergias entre la minería y otras actividades económicas locales. En consecuencia, la bonanza minera no solo se traduce en beneficios económicos directos, sino que también ha catalizado un crecimiento integral que impulsa el bienestar de las comunidades y fortalece la resiliencia del territorio ante posibles fluctuaciones del mercado.

Desafíos y consideraciones futuras: se han encontrado respuestas innovadoras a través de la implementación de principios de economía circular. En este contexto, los cierres mineros se han abordado con estrategias planificadas desde el inicio, siguiendo rigurosos estándares legales, ambientales y sociales. La transición hacia una economía circular ha permitido redefinir el concepto de cierre minero, considerándolo no solo como el fin de la extracción, sino como el inicio de un proceso de recuperación y reutilización de recursos. Estos cierres planificados no solo buscan cumplir con las obligaciones legales, sino que también están diseñados para minimizar los impactos ambientales y sociales. La economía circular en el cierre minero implica la rehabilitación de áreas afectadas, la gestión sostenible de residuos y la reintegración de terrenos en procesos productivos alternativos. Este enfoque integral no solo asegura la sostenibilidad a largo plazo de las operaciones mineras, sino que también contribuye a la construcción de un legado positivo para las comunidades locales y el medio ambiente circundante.

En consecuencia, se esperaría que el país cuente con una estructura institucional sólida, alto control social y ambiental. Se adoptará una nueva Ley Minera y se creará la Empresa Nacional Minera en el primer quinquenio de la década del 2020. En este periodo el país, por medio del SGC, habrá invertido recursos importantes en información confiable de la disponibilidad de minerales críticos bajo consideraciones geológicas, sociales y ambientales.

En la primera década, de 2024 a 2034, se habrán encontrado varios yacimientos de minerales críticos y se habrán empezado a desarrollar varios proyectos mineros para la extracción de esos minerales, los cuales se materializan en la segunda década, de 2034 a 2044, incluyendo procesos de valor agregado, lo cual contribuye a la consolidación de una verdadera industria minera en el país. Los minerales encontrados habrán permitido que el país se enfoque en una minería acorde con los requerimientos estratégicos del sector: minerales para la transición energética justa, la soberanía alimentaria y el desarrollo de la infraestructura requerida. Los nuevos desarrollos mineros significan que el país habrá logrado atraer importantes inversiones para el sector minero que se han materializado en todo el periodo considerado.

El país habrá logrado acuerdos con las grandes empresas mineras para desarrollar en Colombia procesos de valor agregado en los territorios asociados a las explotaciones mineras; es así como en Colombia se han cerrado negociaciones que permitirán que el país instale algunas refinerías y/o procesos de transformación para el procesamiento de los minerales críticos en explotación. Estos acuerdos se habrán logrado con base en un compromiso por parte del Gobierno Nacional de mantener una regulación en el sector minero estable y coherente para beneficio de todos. Estos desarrollos habrán encontrado un mercado de minerales críticos y sus derivados con excelentes precios con tendencia al alza debido al incremento de la demanda, lo cual ha generado una bonanza minera en Colombia.

En la segunda década se tendrá una minería con excelentes prospectivas que permiten impulsar el desarrollo del país, consolidando un sector con buenas prácticas ambientales y sociales, y una comunidad beneficiándose de los desarrollos mineros, los cuales aportarán de manera significativa al mejoramiento de su calidad de vida, y una minería en los territorios coexistiendo de manera adecuada con otras actividades productivas. En este periodo se habrá avanzado considerablemente en la adopción de buenas prácticas en los desarrollos mineros, incluyendo el relacionamiento con la comunidad y diferentes grupos étnicos, la descarbonización de las operaciones mineras (minería limpia), adaptabilidad al cambio climático y adopción de tecnologías más eficientes. En el periodo se avanzará de manera significativa en la formalización y regularización de las actividades mineras, se “descriminalizará” de manera importante esta actividad.

5.2.2. Escenario dos: Minería se estanca

Este escenario, se plantea a través del desarrollo de dos variables claves: demanda global a la baja de minerales estratégicos y desconocimiento de los minerales que tenemos o pocos minerales en el país, incluyendo los componentes ambientales, sociales y geológicos en el país. Las características de este escenario son:

Estructura institucional estática: el país ha generado resultados mixtos en términos de eficiencia y gestión de la renta. Aunque la estabilidad en la estructura institucional ha brindado cierto grado de continuidad en las políticas y procesos, también ha evidenciado limitaciones significativas, especialmente en la gestión de la renta generada por actividades económicas clave, como la minería.

Recursos limitados para investigación: a pesar de esto, se han logrado algunos resultados valiosos, sin embargo, es crucial reconocer que la disponibilidad de información sobre minerales estratégicos en el país sigue siendo limitada debido a las restricciones presupuestarias. Aunque el SGC ha enfrentado desafíos financieros, ha trabajado de manera eficiente para optimizar los recursos disponibles y priorizar la recopilación de datos. Con la limitada investigación realizada, en todo el periodo se han encontrado unos pocos yacimientos con potencial de explotación.

Ausencia de yacimientos importantes: se ha visto acentuada por el escaso conocimiento de posibles depósitos minerales, a pesar de los avances sustanciales en la obtención de información confiable bajo diversas consideraciones. Aunque se han implementado tecnologías y metodologías para la exploración geológica, no se han identificado yacimientos significativos. Este resultado destaca la complejidad inherente a la búsqueda de recursos y subraya la necesidad continua de invertir en investigación y desarrollo geológico.

Estancamiento minero: reflejado por la falta de desarrollo y su escaso impacto en el crecimiento del país, se ha visto agravado por una gestión deficiente de la renta minera recibida. La baja demanda global y la existencia de significativos depósitos en otros países actúan como factores desincentivadores para la exploración y explotación de minerales críticos en el país. Esta situación subraya la necesidad urgente de reformas en la gestión de los recursos mineros, buscando estrategias que optimicen los beneficios económicos para el país y fomenten la inversión sostenible. Además, la práctica de estándares mínimos en aspectos ambientales, sociales y empresariales evidencia la importancia de fortalecer la regulación y supervisión de la industria. Se requiere un cambio hacia prácticas más responsables y sostenibles que no solo cumplan con las normativas básicas, sino que también contribuyan al bienestar de las comunidades locales, al resguardo del medio ambiente y al desarrollo nacional.

Impacto nulo y desafíos asociados: en términos de desarrollo económico y social, los resultados revelan impactos negativos significativos, tales como la ausencia de inversión nacional y externa, la carencia de ingresos derivados de minerales estratégicos y críticos, y la presencia de conflictos locales asociados a la actividad minera. Estos elementos adversos plantean desafíos considerables que afectan la sostenibilidad y la prosperidad de las regiones. Uno de los desafíos más destacados es la falta de articulación institucional, esta carencia compromete la capacidad de implementar estrategias efectivas y abordar de manera integral los problemas asociados a la minería. Así mismo, la ausencia de normas y políticas claras agrega complejidad al panorama, generando incertidumbre y dificultando la toma de decisiones.

En consecuencia, se esperaría que la estructura institucional no hubiese sufrido cambios desde principios de la década del 2020. El SGC recibirá pocos recursos durante estos años, lo cual haría que la información sobre la disponibilidad de minerales estratégicos en el país continúe siendo limitada. Aunque avance en información confiable de la disponibilidad de minerales críticos bajo consideraciones geológicas, sociales y ambientales, no se han encontrado yacimientos importantes. No hay grandes desarrollos mineros y la mayoría de la minería en el país es extractiva y solo para exportación de minerales crudos.

El país habrá avanzado muy poco en los pilares estratégicos de la minería (reindustrialización, transición energética, seguridad alimentaria e infraestructura) debido a que no se han encontrado nuevos yacimientos minerales para lograr estos objetivos. Habrá estabilidad o lento crecimiento del precio de los minerales debido a la baja demanda, principalmente porque se han encontrado importantes depósitos en otros países garantizando una buena oferta de los mismos, lo cual no ha incentivado la exploración y/o explotación de minerales críticos en el país.

Las posibilidades de nuevos desarrollos mineros con encadenamientos productivos son mínimas. Debido a la falta de interés en la minería se tiene un sector desarticulado, con normatividad y regulaciones sin impactos significativos, poco planificado en los territorios, con prácticas mineras tradicionales, sin adoptar medidas para enfrentar el cambio climático, y con poca adopción de tecnologías más eficientes. La evolución de los indicadores relacionados con la minería será, en la mayoría de los casos, a la baja.

En la segunda década se tendrá una minería estancada, la cual le aporta poco al desarrollo del país y no se ha sabido administrar la escasa renta minera que se recibe, se tendrán prácticas ambientales que son solo las exigidas por las autoridades, y la responsabilidad social empresarial será solo la necesaria de acuerdo con sus propios intereses, y con poco impacto sobre las comunidades locales. Los desarrollos mineros en muchos casos estarán en conflicto con otras actividades productivas en los territorios. El relacionamiento del sector minero con las comunidades será muy inestable y se presentarán reiterados conflictos que se solucionan parcialmente.

5.2.3. Escenario tres: Minería local

Este escenario, se plantea a través del desarrollo de las variables claves: Demanda global alta por minerales y desconocimiento de los minerales que tenemos o pocos minerales en el país, incluyendo los componentes ambientales, sociales y geológicos en el país. Las características de este escenario son:

Estructura institucional estática: ha generado resultados mixtos en términos de eficiencia y gestión de la renta. Aunque la estabilidad en la estructura institucional ha brindado cierto grado de continuidad en las políticas y procesos, también ha evidenciado limitaciones significativas, especialmente en la gestión de la renta generada por actividades económicas clave, como la minería.

Recursos limitados para investigación: el país continúa sin saber el potencial minero existente. Es crucial reconocer que la disponibilidad de información sobre minerales estratégicos en el país sigue siendo limitada debido a las restricciones presupuestarias. Aunque el SGC ha enfrentado desafíos financieros, ha optimizado los recursos disponibles y prioriza la recopilación de información sobre minerales estratégicos. Aunque se han implementado tecnologías y metodologías para la exploración geológica, no se han identificado yacimientos significativos. Este resultado destaca la complejidad inherente a la búsqueda de recursos minerales y subraya la necesidad continua de invertir en investigación y desarrollo geológico.

Estancamiento minero: reflejado por la falta de desarrollo y su escaso impacto en el crecimiento del país, se ha visto agravado por una gestión deficiente de la renta minera recibida. La baja demanda global y la existencia de significativos depósitos en otros países actúan como factores desincentivadores para la exploración y explotación de minerales en el país.

Impacto nulo y desafíos asociados: aunque se observa un impacto muy bajo en términos de desarrollo económico y social, los resultados revelan impactos negativos significativos, tales como la ausencia de inversión, la carencia de ingresos derivados de minerales estratégicos y críticos, y la presencia de conflictos locales asociados a la actividad minera.

Control social y ambiental en la minería: ha desempeñado un papel crucial en el reemplazo de ingresos fiscales derivados de esta actividad extractiva. Sin embargo, este cambio no está exento de retos, especialmente en lo que respecta a la reconversión laboral de aquellos afectados por la disminución de la actividad minera. La necesidad de abordar estos desafíos ha impulsado un trabajo conjunto entre los sectores público y privado para desarrollar estrategias efectivas que faciliten la transición hacia actividades económicas alternativas y sostenibles. Además, la ilegalidad en la minería persiste como una preocupación, ya que, a pesar de la disponibilidad geológica de los recursos minerales, las restricciones sociales y ambientales pueden limitar el desarrollo minero legal y potencializar los escenarios de explotación ilícita. Es esencial que la cooperación entre actores públicos y privados se intensifique para abordar la ilegalidad, promoviendo prácticas sostenibles y garantizando un impacto positivo tanto en términos económicos como en la protección del entorno ambiental y los derechos sociales.

En consecuencia, de lo anterior es posible inferir que los precios de los minerales críticos seguirán al alza en todo el periodo debido al gran incremento de la demanda. Colombia aprovechará de manera limitada esta oportunidad de posible bonanza económica asociada a la explotación de los minerales críticos. El SGC habrá recibido pocos recursos durante estos años, lo cual habrá hecho que la información sobre la disponibilidad de minerales estratégicos en el país continúe siendo limitada. Se habrán encontrado algunos pocos depósitos y hacia el final del periodo se habrá iniciado su explotación con valor agregado en el país. Se continuará avanzado en tener información confiable sobre la disponibilidad bajo consideraciones geológicas, sociales y ambientales, sin embargo, se habrán encontrado pocos yacimientos.

La estructura institucional relacionada con la minería se habrá consolidado, y desde el inicio del periodo se tendrá una minería con alto control social y ambiental. Debido a la ignorancia sobre el real potencial minero del país y al poco desarrollo de los yacimientos encontrados, la minería no será factor de desarrollo, las prácticas ambientales del sector, aunque habrán mejorado, serán mínimas, y los programas de responsabilidad social empresarial serán solo los requeridos. Debido a que la minería no es factor de desarrollo, se tendrá un sector con normatividad y regulaciones sin impactos significativos, poco planificado en los territorios, con prácticas mineras tradicionales, sin adoptar medidas para enfrentar el cambio climático, y con poca adopción de tecnologías más eficientes. El relacionamiento del sector minero con las comunidades será muy inestable, la actividad minera estará en conflicto con otras actividades productivas en los territorios y se presentarán reiterados conflictos que se solucionarán parcialmente.

5.2.4. Escenario cuatro: Minería en competencia

Este futuro posible del sector minero colombiano se plantea a través del desarrollo de las variables claves de demanda global a la baja por minerales estratégicos y alta disponibilidad de minerales, incluyendo los componentes ambientales, sociales y geológicos en el país. Las características de este escenario son:

Exploración y acuerdos estratégicos: hay resultados significativos que respaldan la reindustrialización y la minería como elementos clave para satisfacer las demandas internas y reducir la dependencia de importaciones. La consolidación de la soberanía y gobernabilidad sobre los minerales ha permitido la implementación de una lógica de reserva, asegurando la disponibilidad de recursos para satisfacer la demanda interna. Este enfoque ha propiciado el desarrollo de cadenas de valor agregado, contribuyendo a la satisfacción de las necesidades tecnológicas y de seguridad alimentaria en sectores como la tecnología y la agricultura. La promoción de nuevas industrias ha sido respaldada por la creación de infraestructura pública, generando un entorno propicio para la diversificación económica. La reconversión y asociatividad de pequeños productores ha sido fomentada a través de la exploración con fines de ampliar el conocimiento y la institucionalidad, garantizando la cadena productiva mediante la participación activa de la Empresa Nacional Minera. Estos resultados reflejan una sinergia entre la exploración estratégica y la planificación integral, facilitando el camino para un desarrollo económico sostenible y autosuficiente.

Factores geopolíticos y baja inversión: a pesar de los desafíos en la región, un dinamizador clave ha emergido en la forma del mineral de interés, el cual presenta un atractivo tan significativo que ha posibilitado la creación de nuevos esquemas de alianza, inversión y contratación. Este mineral, por su singular valor, ha impulsado una reevaluación de estrategias y un replanteamiento de la planeación para anticipar una nueva demanda. Se ha diseñado un modelo de explotación que va más allá de las limitaciones geopolíticas y de inversión, aprovechando las características únicas del mineral para fomentar la participación de inversionistas y socios estratégicos. Este enfoque innovador no solo ha revitalizado el interés extranjero en la región, sino que también ha catalizado la creación de cadenas productivas que benefician tanto a la industria como a la economía local, generando así un entorno propicio para el desarrollo sostenible y la expansión de oportunidades en el sector.

Presión en regulaciones ambientales y posibles conflictos locales: la conflictividad socioambiental ha sido un desafío persistente en el sector minero, y la aplicación de nuevas regulaciones ambientales ha dado lugar a la configuración de nuevos conflictos. La imposición de normativas más estrictas para mitigar los impactos ambientales ha generado tensiones entre las comunidades locales, las empresas mineras y las autoridades. Sin embargo, este proceso también ha catalizado una fase de reconversión en la que se busca equilibrar el desarrollo económico con la preservación ambiental. En este contexto, la minería informal y su conexión con conflictos armados han emergido como puntos críticos. La necesidad de abordar estas cuestiones complejas ha llevado a la implementación de estrategias integrales que no solo buscan regularizar la minería informal, sino también prevenir y resolver conflictos armados relacionados. Estos esfuerzos están orientados a promover prácticas mineras más sostenibles y a mejorar las condiciones de vida de las comunidades afectadas, estableciendo así un equilibrio entre el desarrollo económico, la protección ambiental y la seguridad social.

Se puede inferir que, por medio del SGC, se generará inversión de recursos importantes en información confiable de la disponibilidad de minerales críticos bajo consideraciones geológicas, sociales y ambientales. Esta disponibilidad, no obstante, encontrará una tendencia de precios estable o con bajo crecimiento, por el hallazgo de depósitos de minerales críticos en otros países que aumentan la oferta y disminuye los incentivos para la exploración y/o explotación en el país con capital extranjero. Para los pocos minerales que habrán iniciado su explotación, el país habrá logrado acuerdos con las empresas mineras para desarrollar en Colombia procesos de valor agregado en los territorios asociados a las explotaciones mineras, es así como en Colombia se habrán cerrado negociaciones que permitirán que en el país se instalen algunas refinerías y/o procesos de transformación con valor agregado para el procesamiento de los pocos minerales críticos en explotación.

En este periodo la estructura institucional minera se habrá consolidado con la Ley de Minería, la creación de la Empresa Nacional Minera – ENM y las mejoras en las articulaciones institucionales e intersectoriales. Se tendrá un sector bien planificado, con una excelente gestión en los territorios y con una adecuada coexistencia con otras actividades productivas. En todo el proceso de planificación y desa-

rollo minero del país se dará prioridad a los minerales para la transición energética justa, la seguridad alimentaria e infraestructura pública requerida. La disponibilidad de minerales se definirá bajo consideraciones geológicas, ambientales, sociales y territoriales. Incluso, debido al poco interés de inversión en el país para explorar, explotar y desarrollar una minería en el país basada en los minerales críticos, la ENM será socia de las explotaciones de minerales críticos que se adelantarán en el país, y de los emprendimientos de valor agregado que se desarrollen. La inversión en minería en el país tenderá a la baja durante la primera mitad del periodo y luego crecerá levemente de manera sostenida debido a las actuaciones de la ENM.

El sector minero aportará en la reducción del cambio climático con la implementación de buenas prácticas. Colombia cumplirá la mayoría de los acuerdos firmados relacionados con la sostenibilidad y la reducción del cambio climático. Debido a esto se tendrá en la segunda década un sector con bajos conflictos sociales y ambientales, además de una minería con limitadas perspectivas para impulsar de manera importante el desarrollo del país, debido en gran parte al incremento de la oferta de minerales críticos a nivel global, consolidando un sector con buenas prácticas ambientales y sociales, y una comunidad beneficiándose de los desarrollos mineros, los cuales aportarán de manera significativa al mejoramiento de su calidad de vida. En este periodo se avanzará en la adopción de buenas prácticas en los desarrollos mineros, incluyendo el relacionamiento con la comunidad y diferentes grupos étnicos, la descarbonización de las operaciones mineras (minería limpia), adaptabilidad al cambio climático y adopción de tecnologías más eficiente. En el periodo se tendrán algunos logros en la formalización y regularización de las actividades mineras.

Teniendo en cuenta los conceptos gestados en el marco de los escenarios mineros desarrollados anteriormente, se consideran cinco diferentes posibles trayectorias para cada variable exógena, como se muestra en la Figura 30. Allí se plantea un escenario base con las condiciones actuales de cada variable, y cuatro posibles variaciones de acuerdo con cada uno de los escenarios evaluados. En el modelo se puede seleccionar cualquiera de los escenarios presentados en el control y observar cómo cambia variables claves del sector minero considerados en cada módulo (por ejemplo, producción, reservas, empleo, impactos ambientales, entre otros).

Figura 30: Variaciones de parámetros (variables exógenas) del modelo que representa cada uno de los cuatro escenarios consolidados.

La tabla a continuación muestra las variaciones de cada variable según el escenario. El valor de referencia es siempre el dato del año 2023. El valor indicado en la tabla representa la variación para el año 2040 en comparación con el dato del año de referencia. Por ejemplo, si la demanda es de 100 toneladas/año en 2023 y el escenario indica una variación del +10%, significa que el valor aumentará linealmente alcanzando una demanda de 110 toneladas/año para el año 2040. A la derecha encontrará un escenario personalizable donde puede probar su propio escenario. Ingrese los valores directamente en la columna "Personalizado". En caso de desear probar una variación negativa, no se olvide de incluir el signo "-".

Control de Escenarios				
Cambio porcentual final a 2040 (año fin) respecto al valor de 2023 (año base)	Transformada	Se estanca	Local	En competencia
Cambio en la demanda total de cada mineral	+50%	-5%	+10%	+30%
Cambio en la estabilidad jurídica	+30%	-5%	+20%	+10%
Cambio en calidad de infraestructura en el país	+50%	-5%	+15%	+40%
Cambio en las condiciones de seguridad en el país	+50%	-10%	+50%	+30%
Cambio en la tasa de impuesto a la renta	+30%	-5%	+10%	+15%
Cambio en el precio internacional de cada mineral	+80%	-10%	+80%	+10%
Nivel de conocimiento geológico esperado a 2040	90%	40%	70%	80%
Cambio en la tasa de regalías de cada mineral	+30%	-20%	+30%	+60%
Cambio en las limitaciones sobre reservas probables	+50%	-10%	+20%	+40%
Cambio en las limitaciones sobre reservas probadas	+60%	-10%	+20%	+50%
Cambio en la capacidad de fiscalización del Estado	+50%	-5%	+25%	+40%
Cambio en la tasa de inversión social	+60%	-10%	+20%	+50%
Cambio en la tasa de formalización de cada mineral	+60%	-30%	+30%	+50%

Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

5.3. Resultados de simulación de variables en los escenarios

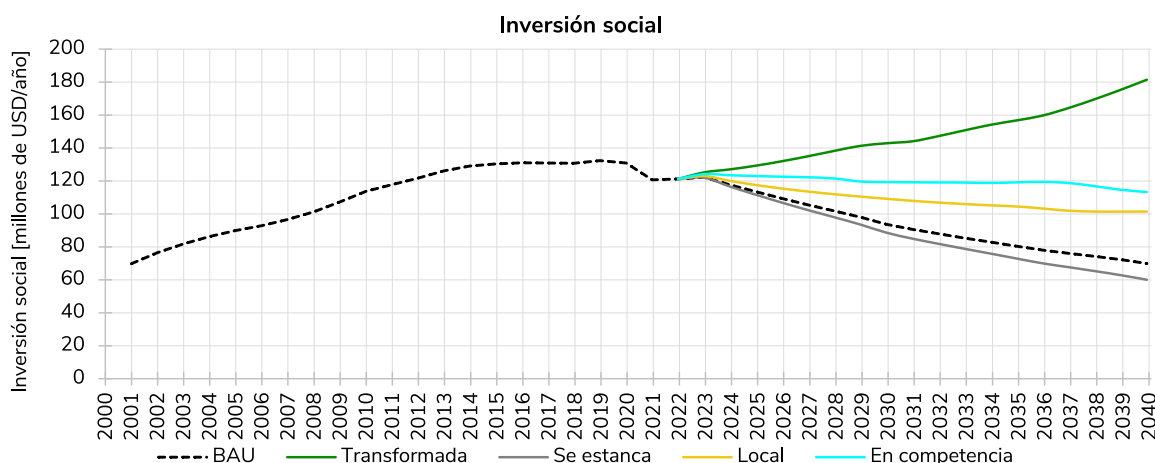
Teniendo en cuenta los datos de entrada asignados a los minerales modelados, es posible obtener información a nivel nacional, en donde se identifique el comportamiento de algunas variables claves que representa los módulos que fueron considerados y que encuentran interacción en el sector minero. A continuación, se presentan las diferentes trayectorias de variables a nivel nacional, de algunos minerales estratégicos, y del carbón térmico, el cual se ha incluido en el modelo por su importancia económica y laboral actual, pero no ha sido modelado bajo los escenarios que se presentan para los minerales estratégicos sino bajo el escenario internacional de descarbonización que se está manejando a nivel mundial.

5.3.1. Inversión Social

Es posible obtener una mayor inversión social direccionada a los territorios, cuya fuente sea, tanto de las empresas a través de los planes de gestión social teniendo en cuenta la Ley 1753 de 2015, artículo 22, como también a través de inversiones que realice el estado por la renta minera, todo esto siempre y cuando se continúe avanzando con la formalización minera, mejorando los recaudos en regalías y la capacidad de fiscalización de los diferentes proyectos, entre otros factores.

En el escenario de minería transformada se presentaría un crecimiento en la inversión social, logrando obtener mayores ingresos asociados a Plan de Gestión Social, Inversión Regional, Plan de Manejo Ambiental e Inversión Voluntaria. En el escenario minería se estanca se esperaría que disminuya el citado indicador, ya que las inversiones en general para el sector minero y su correspondiente inversión social y ambiental decaerían. En ese escenario se espera que la inversión social sea similar a la percibida para el año 2000. Se debe notar que no disminuye en su totalidad teniendo en cuenta que se continuarían desarrollando los contratos mineros existentes en el país. Para el escenario de minería local se presentaría un ligero aumento, respecto del Business As Usual – BAU, pero igualmente la inversión va a la baja, llegando alrededor de los 100 millones USD/año. Por último, en el escenario de minería en competencia se esperaría una continuidad o estancamiento de los valores actuales de inversión social, en atención a factores geopolíticos y baja inversión extranjera (Figura 31).

Figura 31: Inversión social a nivel nacional en los escenarios propuestos



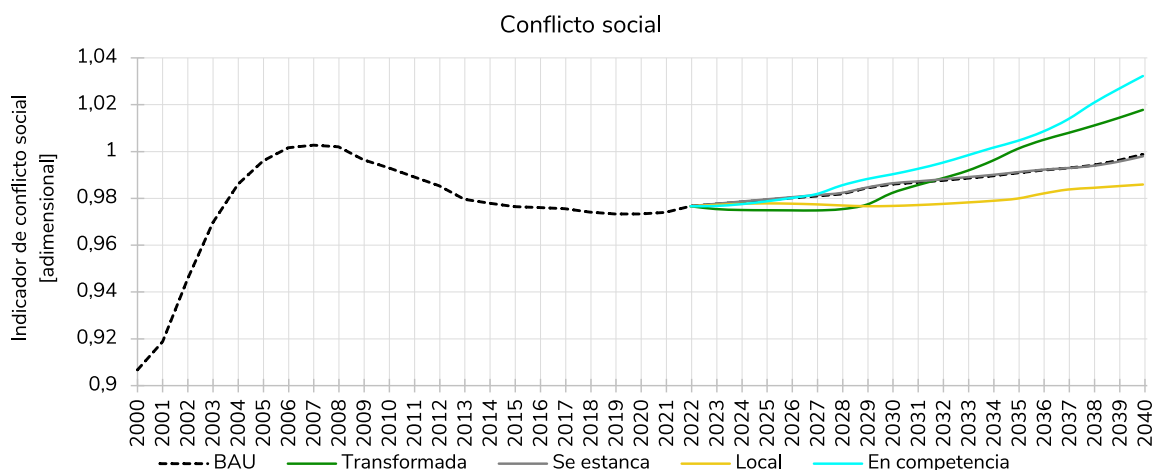
Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

5.3.2. Conflicto social

El sector minero ha sido objeto de conflictividad territorial, la cual está basada en disputas y luchas sociales a favor y en contra de esta actividad extractiva. Dicha variable se interrelaciona con la producción, la cual a medida que aumenta, podría llegar a disminuir la citada conflictividad, siempre y cuando el empleo, la inversión social y la renta minera lleguen a los territorios en donde se realiza la minería. No obstante, existen otras variables que configura e inciden tales como la participación en la toma de decisiones de las comunidades en la inversión social que genera por parte de los y las titulares mineras. La vocación del territorio y la articulación entre los actores indican positivamente en la disminución del conflicto asociado a la explotación minera.

Los resultados de la simulación indican que en el escenario tendencial (BAU) el indicador de conflictividad aumentaría levemente, sin llegar a sobrepasar las tendencias que se pudieron dar en los años 2005 – 2009, esto se debe especialmente al empleo esperado, ya que se generan expectativas mayores que las que posiblemente genere la actividad minera. En el escenario de minería transformada el indicador de conflictividad social aumentaría levemente teniendo en cuenta que existirían inversiones significativas en información geológica, descubrimiento de yacimientos y desarrollo de proyectos, bonanza minera y demanda en alza. En el escenario minería se estanca se esperaría algo muy similar a la línea tendencial, dado que disminuirían las tensiones sociales y ambientales en el desarrollo de la actividad minera, al disminuir la producción y en general las labores asociadas al ciclo minero (Ver Figura 32).

Figura 32: Conflicto social a nivel nacional en los escenarios propuestos



Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

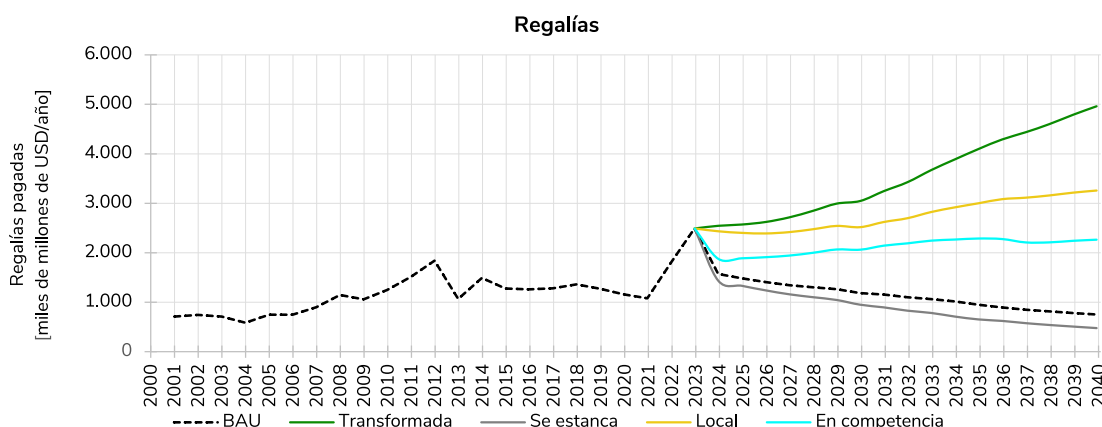
Para el escenario de minería local se presentaría una estabilización del indicador de conflictividad proyectado a 2040, lo anterior, dado que en efecto se generarían procesos que den cuenta de una participación activa en lo local, se generaría mayor incidencia en el uso de la inversión social esperada y de la renta minera, así como el cuidado y preservación de la vocación del territorio y mayor articulación entre los actores. Por último, en el escenario de minería en competencia se esperaría un aumento en la conflictividad, teniendo en cuenta que se generaría una menor inversión social, menor renta minera, determinados por factores geopolíticos y baja inversión extranjera. Nótese que, a pesar de la variabilidad de los escenarios, el indicador (que es adimensional) no varía considerablemente en sus valores y se mantiene en un rango similar (Ver Figura 32).

5.3.3. Regalías pagadas a nivel nacional

Las regalías pagadas por el sector están determinadas en función de la producción de minerales y su precio internacional, así como la capacidad de fiscalización por parte de la autoridad minera. En los últimos años se ha observado un aumento en el precio y mejoras por parte de la autoridad minera, lo que implica incrementos en las regalías recaudadas que se acentúan a partir del año 2022 (Ver Figura 33).

Con respecto a los escenarios, el comportamiento de las regalías está fuertemente correlacionado con la dinámica evidenciada en la producción de los minerales y por tanto en el escenario de minería transformada se presenta un acelerado crecimiento de las regalías que recauda el país. En efecto, a pesar de la caída en la producción de carbón térmico, la alta disponibilidad de minerales y el aumento de los precios derivado de la creciente demanda global generarían un escenario favorable para el recaudo de las regalías superando en 2040 los 5 mil millones de dólares.

Figura 33: Regalías pagadas a nivel nacional en los escenarios propuestos



Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

Por su parte los escenarios, local y en competencia, si bien presentan comportamientos de crecimiento menos acelerados de las regalías con respecto al caso anterior, aún siguen manteniéndose por encima de los promedios históricos, garantizando un flujo de ingresos importante para la nación. Finalmente, el escenario en donde la minería se estanca muestra un decrecimiento sostenido de las regalías debido a las condiciones negativas tanto a nivel local como internacional por tanto el sector cada vez pierde más participación dentro de las actividades generadoras de recaudo para la nación.

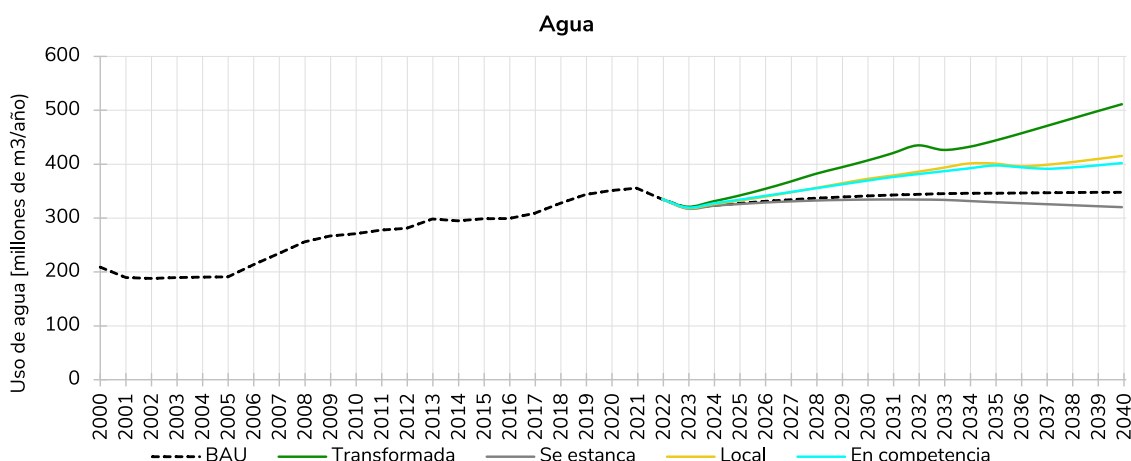
5.3.4. Uso de agua

El sector minero se encuentra ubicado dentro de los cuatro sectores de menor consumo de agua del país, según el Estudio Nacional del Agua 2022⁵. Su requerimiento de agua es proporcional a los niveles de producción de minerales en el país, por lo cual, su comportamiento es similar a las diferentes trayectorias que conduzca la producción en los escenarios evaluados.

Con relación a los resultados, se observa que en el escenario de minería transformada se presentaría un aumento en el consumo de agua, cercano a los 500 millones de m³/año; mientras que en el escenario minería se estanca se esperaría una disminución en el uso de agua que rondaría los 320 millones de m³/año. Para el escenario de minería local y de minería en competencia se presentaría un ligero aumento respecto del Business As Usual –BAU, con 415 y 402 millones de m³/año respectivamente para el año 2040 (Figura 34). Como se espera, estos comportamientos se asocian a la producción esperada de los diferentes minerales en los escenarios propuestos.

⁵ Información recuperada el día 27 de diciembre de 2023 en <https://mineriasosteniblecolombia.com/2023/03/10/lo-que-debes-saber-de-la-mineria-y-el-uso-del-agua-en-colombia/>

Figura 34: Uso de agua en etapa de producción a nivel nacional en los escenarios propuestos



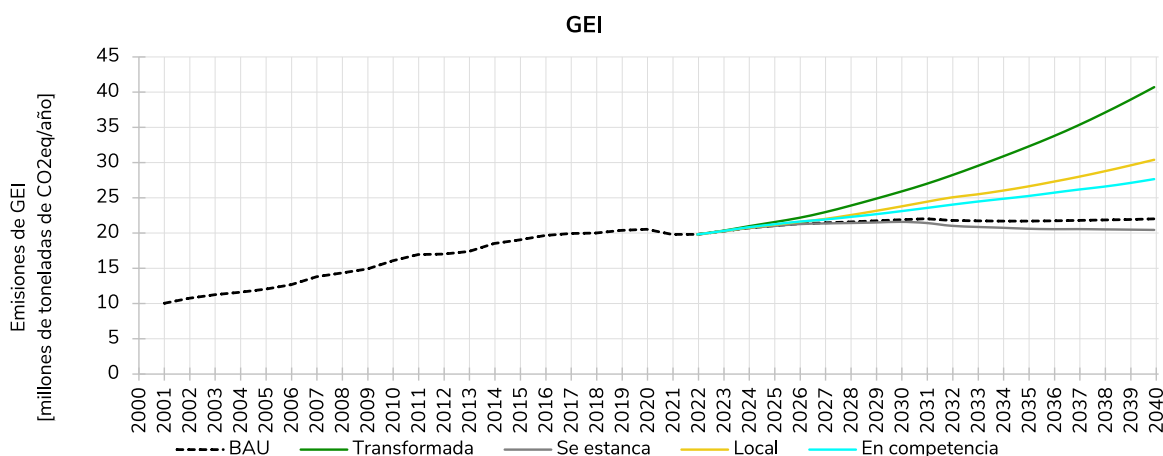
Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

5.3.5. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), al igual que el consumo de agua, es directamente proporcional a los niveles de producción, por lo tanto, su comportamiento es similar de acuerdo con los escenarios evaluados. Los niveles de GEI representan una línea base para evaluar las diferentes estrategias tecnológicas y de prácticas que permitirán reducir su huella, actividades que son responsabilidad del gobierno y de las empresas mineras.

Si bien la tendencia de estos gases es a estabilizarse alrededor de los 22 millones de toneladas de CO₂eq (línea negra punteada en la Figura 35), en un escenario de minería transformada se esperaría que aumenten las emisiones duplicando las actuales, ya que los procesos de beneficio que se desarrollen pueden producir este tipo de contaminantes en sus operaciones. Caso contrario ocurre en el escenario de minería se estanca, ya que se esperaría que al disminuir la producción también disminuyan las emisiones de GEI alrededor de los 20,45 millones de toneladas de CO₂eq. En los escenarios de minería local y en competencia la tendencia es al aumento, con proyecciones a 2040 de 30, 41 y 27,66 millones de toneladas de CO₂eq respectivamente (ver Figura 35).

Figura 35: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en etapa de producción minera a nivel nacional en los escenarios propuestos



Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

5.4. Resultados de simulación de minerales estratégicos y carbón térmico

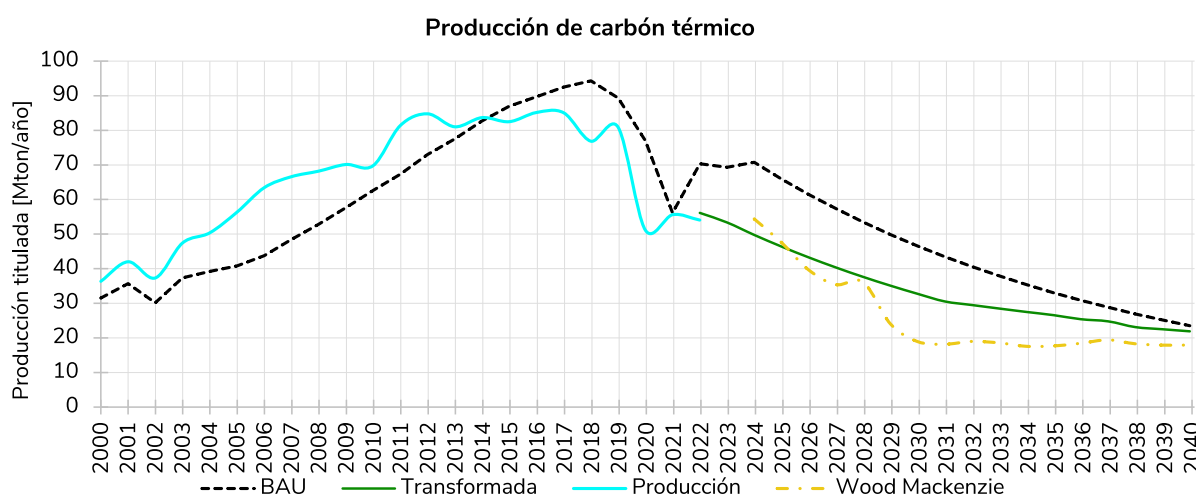
A continuación, se presentan los resultados de la simulación con énfasis en la producción para algunos de los minerales estratégicos y el carbón térmico. Esta simulación se basa en las variables que han alimentado cada módulo del modelo, así como la interacción entre las mismas.

5.4.1. Carbón térmico

Como se mencionó anteriormente, el carbón térmico no se ha simulado en los mismos escenarios de los minerales estratégicos, sino que se ha analizado con base en el mercado internacional y los procesos de descarbonización que actualmente existen a nivel global. En general, el carbón térmico ha presentado una trayectoria variable en su producción, con una fuerte caída marcada en los años 2020 y 2021 debido a la pandemia de COVID-19 que afectó el mercado a nivel mundial y posteriormente, para el caso de Colombia, la salida en la operación de Prodeco (ver línea verde clara en la Figura 36). Según Wood Mackenzie (Wood Mackenzie, 2023), el panorama a futuro es que se presenta una declinación inminente de la demanda de este mineral, debido a los esfuerzos de descarbonización a nivel mundial (línea naranja punteada en la Figura 36).

Al considerar las políticas de descarbonización, en la modelación la producción de carbón térmico se reduce hasta alcanzar las 19 Mton/año en el 2040 aproximadamente, conservando la tendencia que proyecta Wood Mackenzie para el país. A este mineral particularmente se le ha dejado el mismo patrón descendente para todos los escenarios propuestos, ya que las políticas de descarbonización propuestas se asumen a nivel mundial, por lo que se espera que tanto la demanda como la producción disminuyan en escenarios a 2050. Además, se debe tener en cuenta la disminución en los recursos y reservas que actualmente se presentan y las propuestas de cierre minero planteadas por las principales empresas productoras de carbón térmico en el país. Es por esto que se evalúan tres escenarios de 2024 a 2040: la tendencia actual en el escenario de descarbonización (línea negra punteada), la tendencia en el escenario propuesto de modelación (línea verde oscura) y el escenario propuesto por Wood Mackenzie para Colombia (línea naranja punteada).

Figura 36: Escenarios de simulación para producción de carbón térmico en Colombia



Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

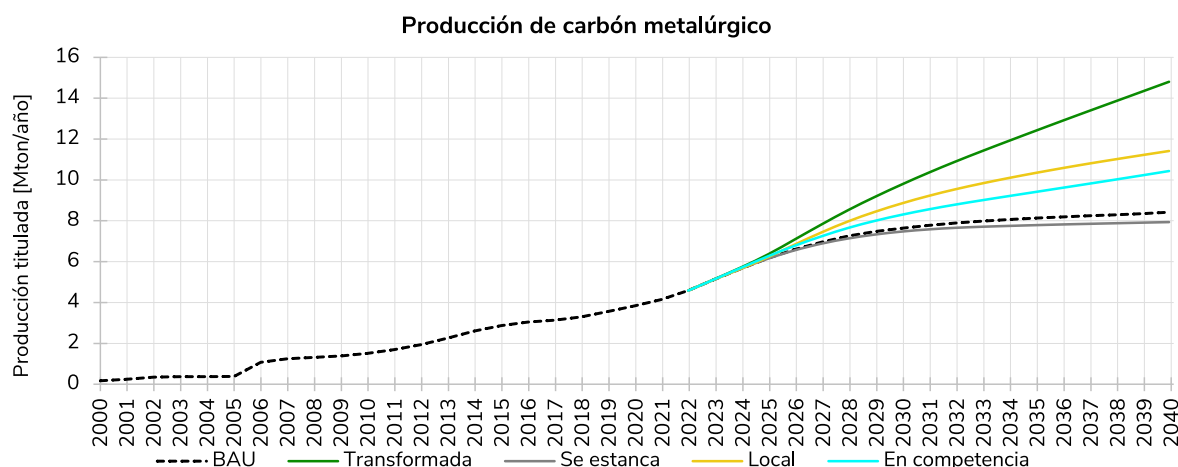
5.4.2. Carbón metalúrgico

En general, la producción de este mineral hasta el año 2022 presenta una tendencia creciente que no se vio afectada por la crisis económica derivada de la pandemia de COVID-19. La demanda de carbón metalúrgico se asocia principalmente a la industria del acero y ferroaleaciones, por lo que es un mineral necesario que se proyecta con cierta estabilidad en el mercado internacional, tal como lo propone Wood Mackenzie.

En un escenario de minería transformada, la producción se proyecta a ir en aumento tendiendo a triplicar la producción actual en el país, lo que se necesitaría en un escenario de producción de acero o de encadenamientos a base de este mineral; mientras que en el escenario de minería estancada tiende a estar por debajo de la línea tendencial (BAU), aun cuando presenta un ligero aumento con respecto a la producción actual. Los escenarios de minería en competencia y local también muestran escenarios tendientes al aumento, con variaciones en la cantidad proyectada de entre 10 y 12 Mton/año respectivamente (Figura 37).

Por otra parte, desde el año 2018 se observa un aumento acelerado de las reservas probadas en el escenario tendencial, fruto de los procesos exploratorios que se llevan a cabo en el país. Si bien de acuerdo con los resultados las reservas en desarrollo disminuirían en un 14% aproximadamente entre 2023 y 2040, existe un gran potencial para aumentar la producción de carbón metalúrgico.

Figura 37: Escenarios de simulación para producción de carbón metalúrgico en Colombia



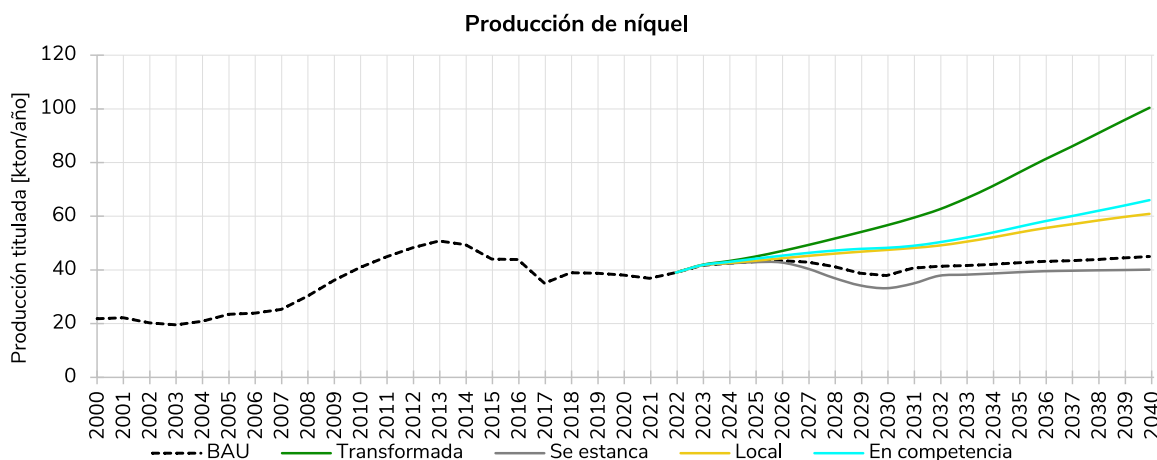
Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

5.4.3. Níquel

La producción del níquel en Colombia responde fundamentalmente a producción de la mina Cerromatoso, la única que produce el mineral en el país y tiene contrato prorrogable hasta el año 2044. El níquel, al ser un mineral fundamental para la transición energética, se consolida con la producción que ha venido desarrollando hasta el momento que varía entre 40.000 y 50.000 ton/año aproximadamente.

En un escenario de minería transformada se proyecta un aumento de la producción tendiente a duplicar para 2040 los valores actuales, mientras que los escenarios de minería local o en competencia proyectan un aumento que no supera las 65.000 ton/año para ese mismo periodo de tiempo. Por otra parte, en el escenario de minería estancada se observa un breve descenso en la producción, sin que esto implique disminuir los valores con respecto a la producción histórica (Figura 38).

Figura 38: Escenarios de simulación para producción de níquel en Colombia



Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

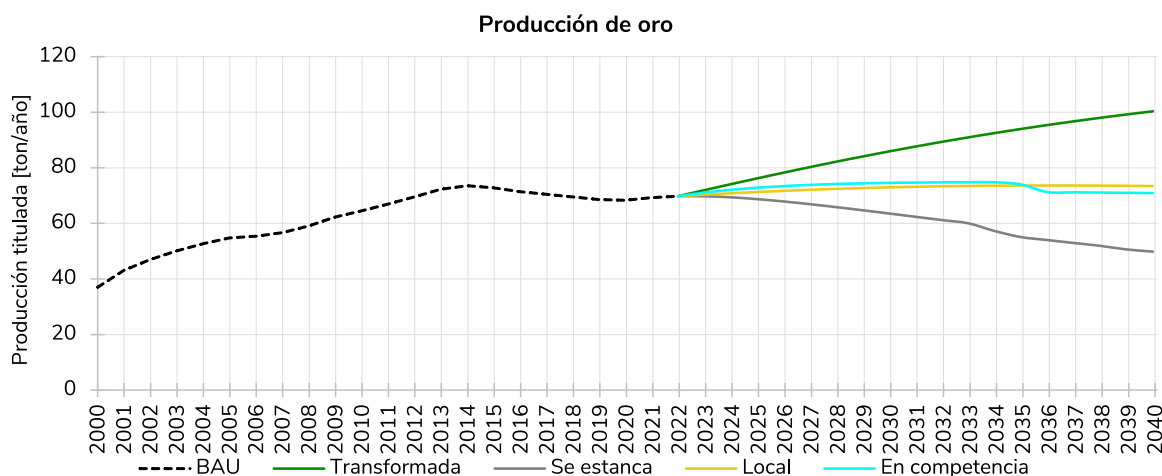
Estos escenarios pueden variar en la medida que se conozcan nuevos depósitos de níquel con viabilidad económica, social, ambiental y geológica para explotarse. Sin embargo, actualmente el conocimiento de depósitos de este mineral es insuficiente para poder modelar un aumento de reservas y por ende, suponer un aumento de la producción para algún momento en particular a futuro.

5.4.4. Oro

Al ser una de las principales reservas de valor en el mundo, la producción de oro está fuertemente impulsada por las condiciones de mercado, siendo el precio internacional uno de los factores de mayor incidencia. A pesar de que la tendencia histórica del precio ha sido al alza, existen otros factores que desincentivan la minería de oro en Colombia, como una incierta seguridad jurídica, conflictos sociales, riesgos de orden público, entre otros, y que llevan a que la tendencia de la producción (BAU) sea levemente decreciente hacia el 2040 (ver Figura 39).

Para los escenarios a futuro se plantea un aumento en la producción para la minería transformada, superando por poco las 100 toneladas de oro al año; mientras que en el escenario de la minería se estanca se tiende a la baja llegando alrededor de las 50 toneladas de oro para 2040. Los escenarios de minería local y en competencia para este mineral son muy similares, con producción alrededor de las 72 toneladas al año, ya que en el caso de Colombia si se tienen reservas probadas de este mineral, lo que permite afirmar que se tienen este tipo de depósitos en el país. Sin embargo, no necesariamente se tiene viabilidad social o ambiental para su explotación; y por esto se ven ligeras diferencias en los escenarios.

Figura 39: Escenarios de simulación para producción de oro en Colombia



Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

La informalidad es uno de los mayores retos de la minería de oro en Colombia. Los resultados sugieren que previo a 2017 la producción no titulada similar (y posiblemente mayor) que la producción titulada. Sin embargo, con la entrada en funcionamiento del RUCOM y otras medidas asociadas, se modela una amplia disminución en la producción no titulada con tendencia a aumentar un poco hacia 2040 pero sin alcanzar los valores de producción previos (ver Figura 40). Es de resaltar que en todos los escenarios la producción no titulada se comporta relativamente similar a la tendencia general (BAU) y tiende a ser menor que la producción titulada. Sin embargo, para la fase III del PNDM se plantea incluir escenarios con estrategias de formalización para evaluar este tipo de variables en la modelación.

Figura 40: Producción de oro por minería no titulada en el escenario tendencial (BAU)

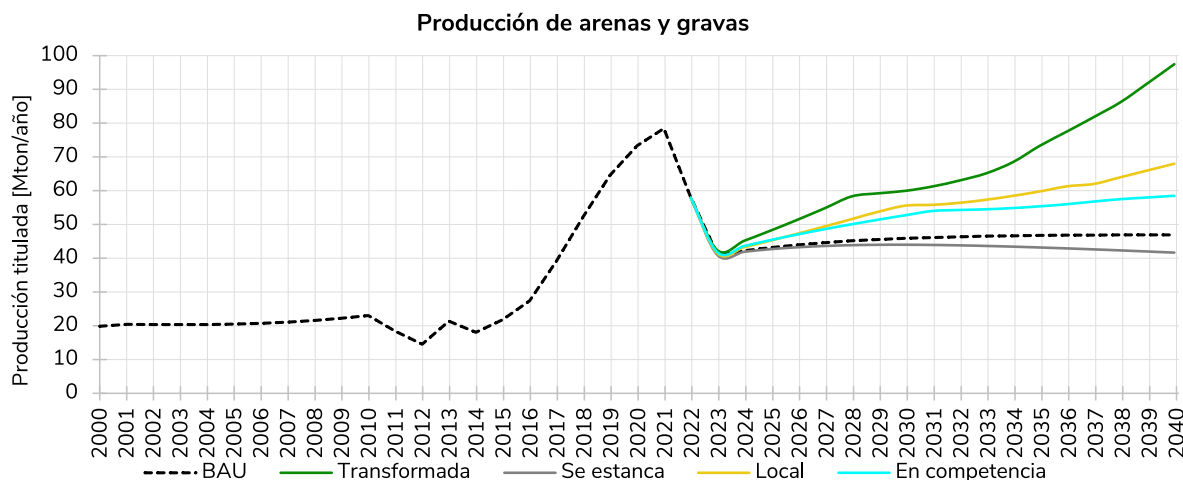


Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

5.4.5. Arenas y gravas

Las arenas y gravas son materiales fundamentales para la fabricación de concreto y asfalto, por lo que la producción de estos minerales se ha visto fuertemente jalonada por el auge del sector infraestructura. Su creciente demanda, junto con sus precios competitivos y bajos costos de operación, han creado un entorno favorable para su explotación, la cual se espera que se mantenga estable (Ver Figura 41). A pesar de su gran importancia nacional, las arenas y gravas son minerales con un alto grado de informalidad en su producción.

Figura 41: Escenarios de simulación para producción de arenas y gravas en Colombia



Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

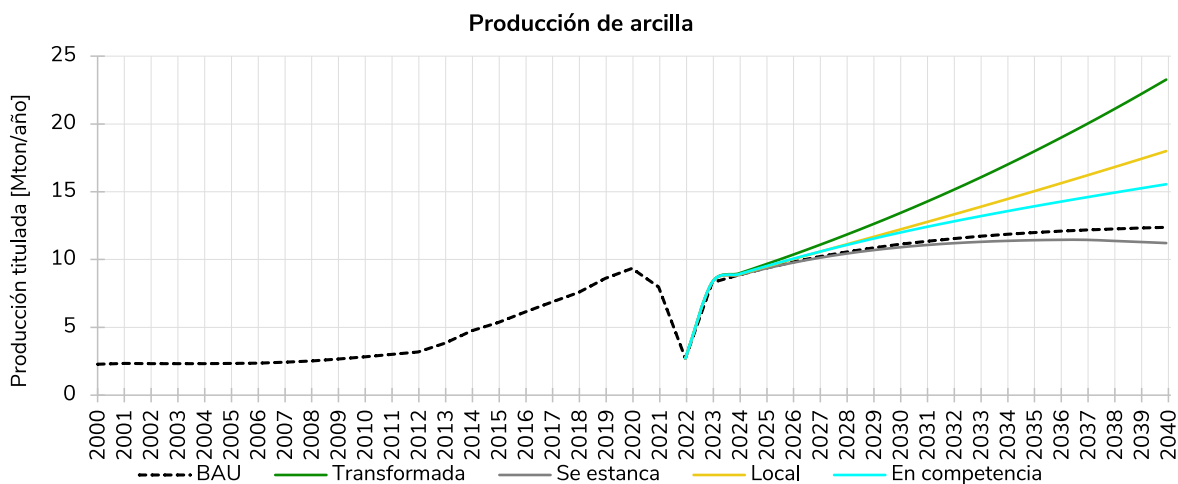
Al analizar los escenarios tendenciales se observa que se espera un crecimiento en la mayoría de los escenarios, lo que se basa en la oferta y demanda interna (para este caso) y en los recursos estimados. La producción titulada (Figura 41) en todos los escenarios tiene una tendencia al aumento, excepto en el caso de la minería se estanca, la cual se estancaría relativamente similar a la producción actual. En la minería transformada se espera una producción que alcance los 100 Mton/año para 2040; mientras que para la minería local se plantea un escenario que alcanzaría los 70 Mton/año y para la minería en competencia sería alrededor de los 60 Mton/año. Sin embargo, para este mineral en particular se debe analizar el comportamiento de la minería no titulada, la cual no se presenta en esta fase por no contar con información suficiente que permita evidenciar la producción de este tipo de actividad.

5.4.6. Arcillas

Las arcillas se incluyen dentro del grupo de materiales de construcción y son la materia prima fundamental para la elaboración de ladrillos. Los resultados de la simulación muestran un ajuste adecuado a los datos históricos, y su comportamiento obedece principalmente a la demanda interna del mineral. Los crecientes precios de mercado, así como sus bajos costos de operación, sugieren que la producción de este mineral se mantendrá alta hacia el año 2040, cuando alcanzará valores por encima de las 12 Mton/año. Como es habitual para los materiales de construcción, las arcillas presentan altos niveles de explotación informal.

En los escenarios se observa en general un crecimiento en la producción de este material, que para el caso de minería transformada alcanza una producción que podría superar los 23 Mton/año en 2040. En el escenario de minería local se alcanzarían los 18 Mton/año y en el de minería en competencia los 16 Mton/año; mientras que en el escenario de minería se estanca la producción no superaría los 12 Mton/año para 2040 (Figura 42).

Figura 42: Escenarios de simulación para producción de arcillas en Colombia



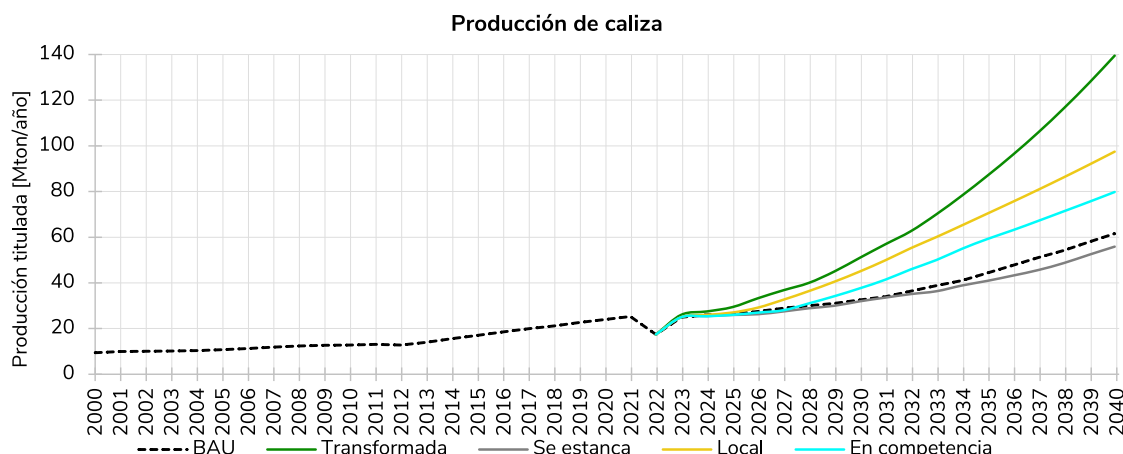
Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

5.4.7. Calizas

La caliza es un mineral de alto interés para la infraestructura y se produce en el país en varias regiones. Su producción histórica ha alcanzado los 21 Mton/año aproximadamente y la línea tendencial (BAU) tiende a aumentar alcanzando los 61 Mton/año para 2040 (Figura 43). Se debe tener en cuenta que este mineral también cuenta con minería no titulada, por lo que parte de la producción actual (que no se encuentra reportada en esta gráfica) se presenta por estos mineros artesanales y otros, pero se espera que a 2040 la totalidad de la producción si sea titulada para este mineral.

Los escenarios para este mineral tienden al alza, aún en el escenario de minería se estanca, ya que las reservas, demanda y precios continúan también hacia el incremento. Además, el aumento en las reservas probadas y en desarrollo desde el 2021, son coherentes con los pronósticos de crecimiento del sector infraestructura colombiano⁶. Para las proyecciones se tuvieron en cuenta nuevos procesos exploratorios y la alta informalidad (34% según la simulación, 60% de acuerdo con estimaciones de Ávila & Cabra, 2019), por lo que todos los escenarios presentan cierta similitud. Como se puede observar, en la minería transformada se espera un alza con producciones que alcanzan los 140 Mton/año para 2040, mientras que en los escenarios de minería local y minería en competencia también se observan incrementos hasta llegar a 100 y 80 Mton/año respectivamente (ver Figura 43).

Figura 43: Escenarios de simulación para producción de calizas en Colombia

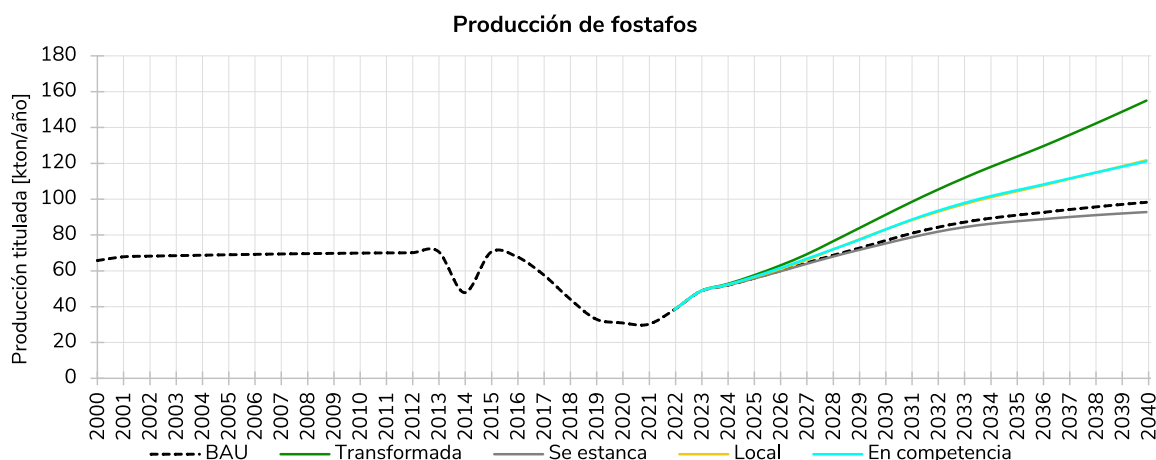


Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

5.4.8. Fosfatos

La producción de este mineral se reporta en las plataformas de la ANM y el SIMCO a partir del año 2012, motivo por el cual se modela una producción estimada para los años anteriores. Los resultados de producción de fosfatos en el periodo 2012 – 2022 muestran una tendencia variable producto de cambios en la demanda interna. Del 2022 en adelante, se observa un marcado crecimiento (ver Figura 44) como resultado de un aumento en los precios, provocados, a su vez, por múltiples factores exógenos como la pandemia de COVID-19 o la guerra entre Rusia y Ucrania, entre otros (Brownlie, y otros, 2023).

Figura 44: Escenarios de simulación para producción de fosfatos en Colombia



Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

⁶ Información recuperada el día 27 de diciembre del 2023 en https://camacol.co/sites/default/files/descargables/Informe%20Econ%20B3mico%20115_0.pdf.

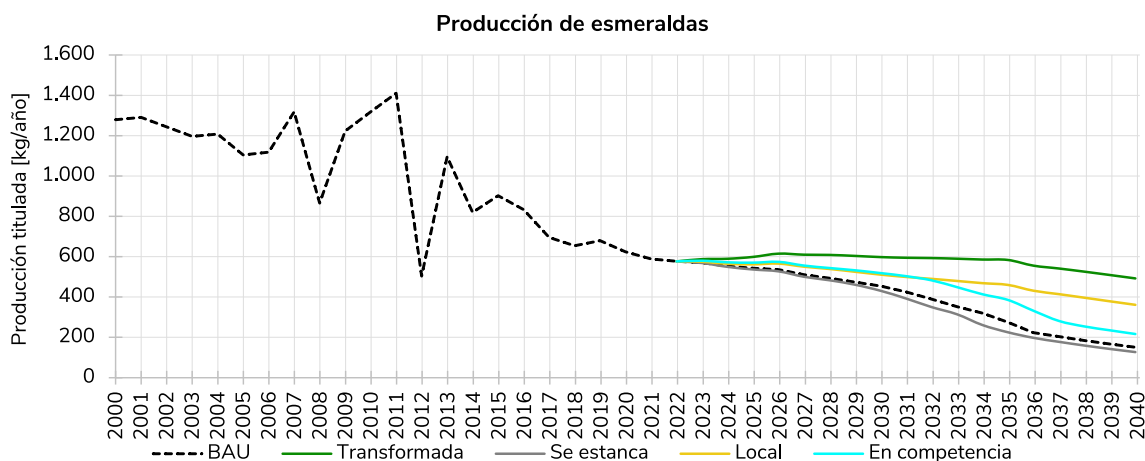
En general, la línea tendencial BAU al igual que la mayoría de los escenarios tienden al alza, comportamientos que obedecen a las metas planteadas por el Gobierno nacional para garantizar la seguridad alimentaria de todos sus habitantes (Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026). Sin embargo, el único escenario que no supera las 100.000 ton/año es el de minería estancada, mientras que los demás no solo superan este valor, sino que en la minería transformada alcanza las 160.000 ton/año para 2040.

5.4.9. Esmeraldas

La producción de esmeraldas registra una tendencia a la baja a partir del año 2011 hasta la fecha, por lo cual se espera que la tendencia al 2040 se mantenga con la disminución (ver Figura 45), lo que se encuentra relacionado con la reducción de las reservas en desarrollo. La dificultad de encontrar depósitos de esta gema y de determinar la cantidad de este mineral en un yacimiento se traduce en los bajos niveles de producción de la esmeralda en el país y el bajo conocimiento de reservas, lo cual coincide con los resultados simulados a partir del modelo.

Como se observa en los diferentes escenarios, las producciones esperadas no superan en ninguno de los casos los 600 kg/año (aproximadamente 3 millones de quilates) y en el escenario de minería se estanca tienen los valores más bajos con menos de 200 kg/año para 2040. Para este mineral, es más importante tener en cuenta la información de reservas que la demanda, debido al potencial y existencias de recursos que actualmente se presenta.

Figura 45: Escenarios de simulación para producción de esmeraldas en Colombia



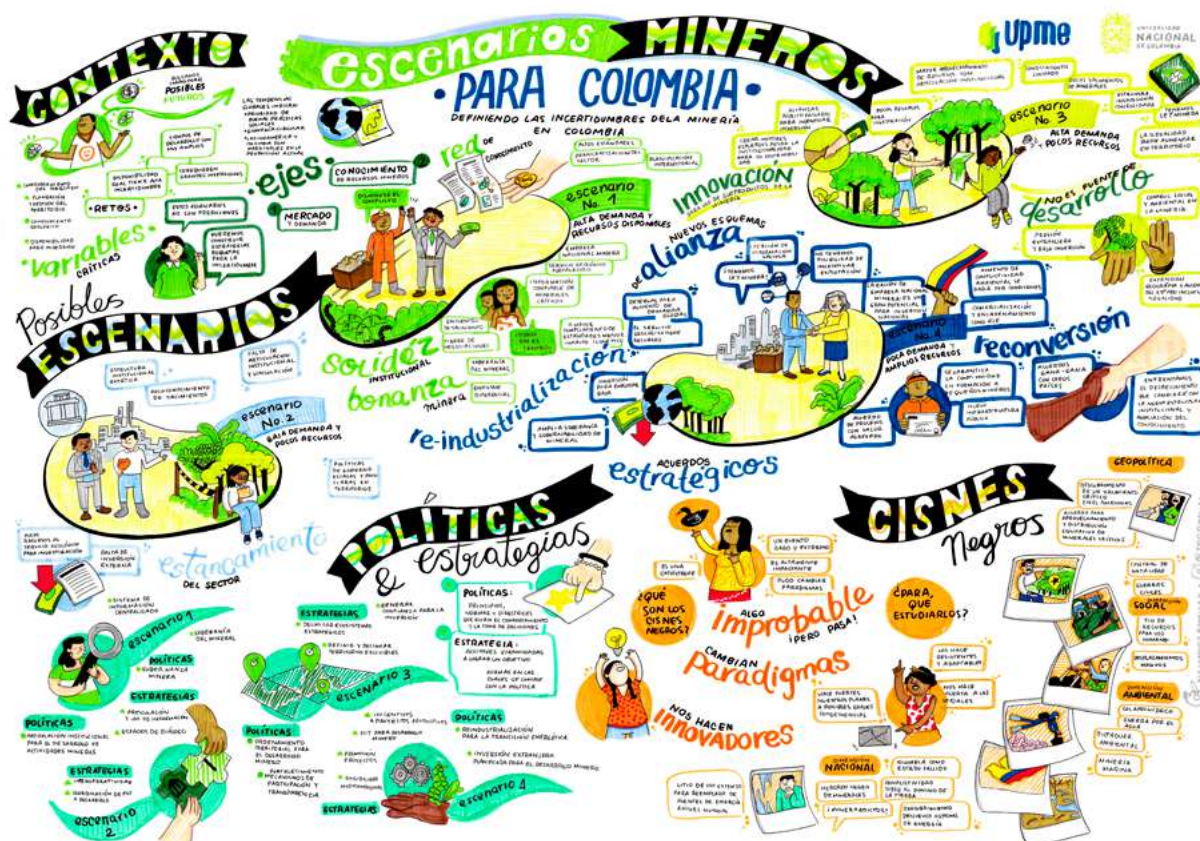
Fuente: Elaboración propia UNAL-UPME

6. PRINCIPALES CONCLUSIONES DEL MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL SECTOR MINERO COLOMBIANO

A partir de los elementos detallados anteriormente, entre los que se encuentran los hallazgos de temas actuales, tendencias globales y temas emergentes del sector minero, el modelo de simulación, escenarios y algunos resultados preliminares de simulación en minerales, se propone un conjunto integral de prioridades e insumos para determinar estrategias y políticas, que no solo responden a las metas nacionales sino que también abordan las complejidades y desafíos específicos que enfrenta la industria minera desde el ámbito global, nacional y territorial.

La metodología aplicada incluyó la revisión documental de políticas y estrategias propuestas para el sector minero a nivel global y local, así como el desarrollo de talleres con expertos del sector minero colombiano (Figura 46). Dichas estrategias contribuyen al desarrollo de una cadena de valor de los minerales estratégicos desde su exploración, explotación, hasta su industrialización bajo parámetros técnicos, ambientales, económicos, laborales y sociales adecuados ya que, por medio de una fuerte articulación institucional, se logre mejorar tanto la gobernabilidad y gobernanza del sector, como la gestión y administración de los recursos mineros del país.

Figura 46: Relatoría Gráfica del Taller “Definición de los escenarios y estrategias para el sector minero colombiano” UNAL – UPME. Fecha de elaboración 15 noviembre 2023.



Fuente. Talleres con expertos del sector minero colombiano 2023

Las propuestas de prioridades e insumos para determinar estrategias para el sector minero buscan fortalecer la resiliencia de este, alineándolo con los objetivos de desarrollo sostenible, anticipando po-

sibles desafíos y fomentando una gestión sostenible y transparente que promueva el equilibrio entre crecimiento económico, preservación del entorno e inclusión social. Las prioridades seleccionadas para el sector minero colombiano se deben analizar a la luz de los escenarios propuestos, y el conjunto de eventos coyunturales o de incertidumbre profunda, a través de un análisis de robustez, buscando priorizarlas. A continuación, se relacionan algunas de las prioridades propuestas inicialmente en los talleres realizados:

Figura 47: Propuesta inicial de prioridades - Insumos proceso talleres 2023



Fuente: Talleres con expertos del sector minero colombiano 2023

La minería en Colombia presenta un desafío entre su potencial como motor de desarrollo y las preocupaciones que impactan su crecimiento sostenible. A pesar de ser uno de los sectores de mayor crecimiento en el país, enfrenta desafíos significativos, como la falta de una planificación territorial adecuada, conflictos socioambientales y problemas de control y monitoreo, incluyendo el narcotráfico y la explotación ilícita de minerales. La necesidad de abordar preocupaciones ambientales y sociales, fortalecer la participación ciudadana y generar percepciones positivas en las comunidades locales se presenta como un imperativo para el éxito sostenible de la industria minera en este contexto cambiante.

La búsqueda de un sector minero en Colombia que cumpla con estándares técnicos, ambientales y sociales debe ir de la mano con una planificación integral que considere aspectos geológicos, ambientales y sociales. Avanzar en el conocimiento geocientífico del país y planificar la transición industrial en las zonas mineras puede convertirse en una oportunidad para diversificar la economía, promover el desarrollo industrial y contribuir a la transición energética, siempre y cuando se aborden los desafíos actuales y se promueva una visión compartida entre las instituciones y sectores involucrados.

En la Tabla 4 se muestran las prioridades e insumos para determinar estrategias analizadas por cada uno de los grupos participantes en los talleres realizados en 2023, teniendo en cuenta los parámetros establecidos en la metodología. Estos serán insumos para el análisis y consolidación de la fase III, donde se definirán y se establecerán las líneas de acción del Plan Nacional de Desarrollo Minero - PNDM.

Tabla 4. Prioridades e insumos para determinar estrategias identificadas en la fase II del PNDM para el sector minero colombiano

Prioridades	Tema general	División temática	Posible Estrategia
Gobernanza minera	Concurrencia Comunicación	Enfoque integral y coordinación interministerial	Estrategia 1.1 Articulación de ejercicios de planificación sectoriales y territoriales a diferentes escalas (institucional)
			Estrategia 1.2. Consolidación de un sistema de información centralizado, estandarizado, lenguaje apropiado y disponible.
	Comunicación	Transparencia y gobernabilidad	Estrategia 1.3. Una institucionalidad que dirima los conflictos (espacios de diálogo y acuerdos)
Articulación institucional para el desarrollo de actividades mineras	Información	Tecnología y manejo de información	Estrategia 2.1 Interoperabilidad de los sistemas de información de las entidades del sector minero
	Concurrencia	Enfoque integral y coordinación interministerial	Estrategia 2.2 Coordinación de los planes de desarrollo territorial a las políticas del sector
			Estrategia 2.3 Planificar y unificar el criterio de regulación en temas ambientales, sociales, técnicos, normativos y económicos
Generar condiciones para atraer inversión a los territorios donde la minería sea una actividad generadora de valor y empleo	Economía y buena gobernanza		
Ordenamiento territorial para el desarrollo del sector minero	Precaución / Prevención	Sostenibilidad ambiental e inclusión social	Estrategia 4.1 Delimitar los ecosistemas estratégicos a completitud excluidos de la actividad minera
	Ambiente	Sostenibilidad ambiental e inclusión social	Estrategia 4.2 Definir y delimitar los territorios de valor étnico y cultural excluidos de la actividad minera
			Estrategia 4.3 Definir áreas con favorabilidad geológica para recursos minerales
	Concurrencia	Enfoque integral y coordinación interministerial	Estrategia 4.4 Ordenamiento territorial integral para el aprovechamiento racional
Fortalecimiento de los mecanismos de participación y transparencia	Comunicación	Transparencia y gobernabilidad	
Reindustrialización para la transición minero-energética y productiva	Economía y buena gobernanza	Desarrollo estratégico y atracción de inversión	Estrategia 6.1 Incentivos a proyectos de encadenamientos productivos orientados a territorios con tradición minera
	Concurrencia	Enfoque integral y coordinación interministerial	Estrategia 6.2 Fortalecimiento o promoción de proyectos agroindustriales con asociatividad
Inversión planificada y condicionada para el desarrollo minero	Economía y buena gobernanza	Desarrollo estratégico y atracción de inversión	Estrategia 7.1 Promoción de proyectos para el desarrollo planeado de minerales críticos
	Concurrencia	Enfoque integral y coordinación interministerial	Estrategia 7.2 Exigibilidad de reinversión socioambiental
	Información	Tecnología y manejo de información	Estrategia 7.3 Garantías de transferencia tecnológica para los territorios priorizados

Fuente: Elaboración propia con información del documento “Informe de políticas, estrategias y cisnes negros

Por otra parte, se proponen otros elementos de análisis como son los “cisnes negros”, los cuales son eventos impredecibles o de bajísima probabilidad de que ocurran, pero altamente impactantes y, generalmente, implican cambios significativos de paradigmas. Según Taleb (Taleb, 2007) quien acuñó el término, un cisne negro es un evento muy raro (de bajísima o casi nula probabilidad de ocurrencia), difícil de pronosticar e incluso de imaginar, con impactos extremos, muchas veces catastróficos. Suele ocurrir, además, que las personas explican su ocurrencia haciendo inferencias después del hecho, haciéndolo explicable y predecible, lo que Taleb llama “predictibilidad retrospectiva”. Pero en realidad son muy difíciles de siquiera imaginar antes de que ocurran, por lo tanto, no es mandatorio que se tengan que tomar decisiones como si ellos fueran a ocurrir explícitamente en sí, sino que debemos prepararnos para sus consecuencias impactantes.

Identificar si un evento del pasado ha sido cisne negro o no, es difícil; incluso expertos no se ponen de acuerdo si la pandemia producida por COVID-19 lo fue, dado que ya se habían dado alertas previas sobre una posible pandemia. Por ello, se incluyen aquí eventos raros y extremos, que para algunos podrían no ser cisnes negros. Todo ello permite aprender, a imaginar próximos eventos y analizar cómo prepararse para posibles consecuencias.

Algunos de los cisnes negros que se han gestado a nivel global han sido: A) la crisis financiera de 2008, con impactos económicos globales. Ningún modelo había pronosticado la severidad y rapidez con que se dio, dado que se tenían datos de más de 40 años que confirmaban que todo funcionaba bastante bien y los modelos planteaban escenarios muy optimistas. Esta crisis, desencadenada por la quiebra de grandes instituciones financieras y la caída del mercado inmobiliario, tuvo graves consecuencias a largo plazo en la economía mundial e hizo cambiar la percepción de confiabilidad en los modelos y las reglas de juego de transacciones bancarias. B) el reciente asalto de Hamas, cuya acción sorprendió a uno de los ejércitos más poderosos del mundo y, además, la desbordante respuesta de Israel. C) el atentado contra las torres gemelas y el Pentágono: el gobierno estadounidense, con su gran capacidad en seguridad nacional, no estaba preparado para un evento de tal magnitud. Sus consecuencias cambiaron la percepción sobre la validez de la venganza y la guerra preventiva y la confianza entre las personas, por ejemplo, al entrar a otro país.

Con relación al sector minero, se han registrados algunos eventos extremos que han afectado o que tienen implicaciones; estos han sido algunos graves accidentes que no solo han dejado gran cantidad de decesos, pérdidas ambientales y económicas, sino que han cambiado radicalmente la percepción sobre la explotación minera. Entre ellos en 2010, se derrumbó la mina San José en Chile, quedando atrapados 33 mineros durante casi 70 días, quienes después de un alto impacto mediático fueron rescatados con vida. En 2010, en Nueva Zelanda, se dio una explosión en la mina de carbón Pike River que dejó a casi 30 mineros muertos. En West Virginia, Estados Unidos, se dio una explosión de la mina de Carbón Upper Big Branch, que causó 29 muertos aproximadamente. En 2019, se produjo el rompimiento de la presa de residuos mineros en Brumadinho, Brasil, liberando una avalancha de lodo tóxico sobre la región. Todos estos eventos cambiaron la percepción sobre la seguridad industrial y los peligros de la minería, generando cambios significativos en las políticas y regulaciones y en la aceptación social de esta actividad.

En Colombia, en 2007, se produjo un vertimiento de mercurio en el río Atrato, Chocó, originado por una mina ilegal de oro, lo que ocasionó un importante impacto ambiental. Esto afectó gravemente la fauna, flora y el bienestar de las comunidades que dependen del río. En 2015, cerca de la mina de Carbón Cerrejón desapareció repentinamente una parte del cauce del río Ranchería: esto afectó a las comunidades locales, especialmente a los indígenas Wayuu, por lo que no solo impactó directamente a la subsistencia de los habitantes locales, sino que generó controversia mediática generando tensiones entre el desarrollo económico y la preservación del medio ambiente.

Identificar los pasados cisnes negros y analizar la forma en que se dan los efectos sobre sistemas, preparados o no preparados, dan enseñanzas de cómo se deben o no enfrentarlos y así prepararse para el futuro; no de un evento cisne negro como tal, ya que pocas veces se repite, sino prepararse para consecuencias similares o del mismo impacto.

Existe una necesidad significativa de prepararse y gestionar los fenómenos exógenos tanto impredecibles como predecibles. El análisis de los cisnes negros y el ejercicio de suponer algunos de ellos para el futuro, es una práctica que las grandes empresas, ejércitos y naciones están considerando en sus ejercicios de planeación. Por tanto, algunos de los cisnes negros planteados en la construcción del Plan Nacional de Desarrollo Minero están catalogados en la Tabla 5.

Tabla 5. Cisnes Negros en la construcción del Plan Nacional de Desarrollo Minero.

Dimensión	Eventos nivel nacional	Eventos nivel global	Consecuencias de gran impacto
Ambiental	Colapso hídrico Minería en el mar Dictadura ambiental	Guerra por el agua	No minería: reducción drástica de la actividad minera
Tecnológica		Descubrimiento de yacimiento de litio extenso de fácil acceso el cual reemplazará las demás energías usadas en el mundo	Cambios repentinos en las tecnologías para la generación de energía
Geopolítico Económico	Descubrimiento de un yacimiento de clase mundial de tierras raras en el Amazonas	Único acuerdo mundial para el aprovechamiento y distribución equitativa de minerales críticos	Estabilización de precios
Social	Colombia república fallida: no hay soberanía del estado. Se entiende el estado como territorio, población y monopolio de la fuerza		Conflictividad por el territorio y por el usufructo del subsuelo con desplazamiento masivo de gente y violencia. Vulneración de derechos
		Se acaban los recursos de subsistencia en el planeta	Control de la natalidad a nivel global, mortalidad inducida. Guerras civiles por recursos

Fuente: Elaboración propia con información del documento “Informe de políticas, estrategias y cisnes negros para el sector minero colombiano” UNAL - UPME

A grandes rasgos, con respecto a los cisnes negros, se puede recomendar para el sector minero lo siguiente:

- Explorar, pues entre más conocimiento menos incertidumbre.
- Analizar en detalle cada acción propuesta, ya que cada acción trae consecuencias indirectas y a veces no triviales.
- La modelación permite análisis de efectos dominó.
- Diversificar y no monopolizar ni sesgarse a un solo proveedor, comprador o proyecto.
- Considerar estrictamente el principio de precaución: dar prioridad a la seguridad humana y ambiental.
- Ser conservador frente a los riesgos.
- Estar atento a las señales, implementar sistemas de monitoreo económico, geológico, tecnológico, etc. para estar alerta y actuar a tiempo, antes de que la crisis se materialice.

7. REFERENCIAS

- Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, Rueda, C., Rodríguez, F., Ortega, M., Ballesteros, J., Tovar, C., . . . Figueroa, G. (2023). *Lineamientos para el establecimiento de Minerales Estratégicos en Colombia*. Vicepresidencia de Promoción y Fomento - Agencia Nacional de Minería, Bogotá.
- Agencia Nacional de Minería. (2015). *El Título Minero*. Obtenido de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/titulo_minero.pdf
- Agencia Nacional de Minería. (2021). *La ruta de la nueva minería en Colombia, por un mundo más verde*. Obtenido de www.minenergia.gov.co/static/mineriaco/src/document/Presentacion-MineriaCO-211021.pdf
- Agencia Nacional de Minería. (2022 b). *Colombia diversidad minera*.
- Agencia Nacional de Minería. (2023). Resolución 1006 de 2023 “Por medio de la cual se determinan los minerales de interés estratégico para el país”.
- Agencia Nacional de Minería, Unidad de Planeación Minero Energética. (2024). *Minería en Cifras - Julio 2024*. Boletín Estadístico Informativo.
- Arango, S., Jaramillo, P., Olaya, Y., Smith, R., Restrepo, O. J., Saldarriaga-Isaza, A., . . . Larsen, E. (2017). Simulating mining policies in developing countries: The case of Colombia. *Socio-Economic Planning Sciences*, 60, 99–113. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.04.002>
- Ayuk, E. P. (2020). *Mineral Resource Governance in the 21st Century: Gearing extractive industries towards sustainable development*. United Nations Environment Programme.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2022). *Apalancando el crecimiento de la demanda de minerales y metales por la transición a una economía baja en carbono*.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review* 12(3), 183-210. Obtenido de [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199623\)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4)
- Berns, M. H.-S. (2023). *A Blueprint for the Energy Transition*.
- Bolaños-Valencia, I., Villegas-Palacio, C., López-Gómez, C. P., Berrouet, L., & Ruiz, A. (2019). Social perception of risk in socio-ecological systems. A qualitative and quantitative analysis. *Ecosystem Services*, 38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100942>
- Brownlie, W., Sutton, M., Cordell, D., Reay, D., Heal, K., Withers, P., . . . Spears, B. (01 de 03 de 2023). Phosphorus price spikes: A wake-up call for phosphorus resilience. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. doi:<https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1088776>
- Campbell, B. (1998). Process Failure in a Rapidly Changing High-Tech Organisation: A System Dynamics View. *Lecture Notes in Computer Science*, 1507, 291-300.
- CEPAL. (2022 a). *Estudio Económico de América Latina y el Caribe*. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48077-estudio-economico-america-latina-caribe-2022-dinamica-desafios-la-inversion>
- CEPAL. (2022 b). *Intensidad de materiales en la transición energética de América Latina*. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/87e04f79-e691-41a2-b491-0b8150a8d7c3/content>
- Coles, I. R. (2020). *Latin America Mining: Some Trends*.
- Corke, P., Winstanley, G., & Roberts, J. (1997). Dragline modelling and control. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, 2, 1657-1662.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2021). *Análisis económico y social de la minería en Colombia: Retos y oportunidades*.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2023). *Cuenta Satélite Minera*. Obtenido de <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/CSM/anex-CMS-BalanceOfertaUtilizacion-2015p-2021p.xls>
- Diário Oficial da União. (2024). CIRCULAR Nº 10, DE 7 DE MARÇO DE 2024. Obtenido de <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/circular-n-10-de-7-de-marco-de-2024-547033908>
- EY. (2021). *Future of mining 2040*. Obtenido de <https://www.portatax.cl/mineria/wp-content/uploads/2021/05/el-futuro-de-la-mineria-2040>

- EY Global Mining & Metals. (2023). *Top 10 business risks and opportunities for mining and metals in 2024*. Obtenido de https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_gl/topics/mining-metals/ey-top-10-business-risks-and-opportunities-for-mining-and-metals-in-2024-final.pdf
- Fraser Institute. (2024). *Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies, 2023*. Obtenido de <https://www.fraserinstitute.org/sites/default/files/2023-annual-survey-of-mining-companies.pdf>
- Gotts, N. M., van Voorn, G. A., Polhill, J. G., Jong, E. d., Edmonds, B., Hofstede, G. J., & Meyer, R. (2019). Agent-based modelling of socio-ecological systems: Models, projects and ontologies. *Ecological Complexity*, 40. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2018.07.007>
- Hayes, C. (2023). *Minería verde en América Latina y el Caribe: Análisis comparativo de políticas públicas y estándares industriales para impulsar la sustentabilidad en minería*. Obtenido de <https://publications.iadb.org/es/mineria-verde-en-america-latina-y-el-caribe-analisis-comparativo-de-politicas-publicas-y-estandares>
- ICCM. (2019). *Mining with principles. Annual Report, 2019*.
- International Energy Agency. (2023 b). *Latin America's opportunity in critical minerals for the clean energy transition*. Obtenido de <https://www.iea.org/commentaries/latin-america-s-opportunity-in-critical-minerals-for-the-clean-energy-transition>
- International Energy Agency. (2023). *Critical Minerals Market Review 2023*. Obtenido de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/afc35261-41b2-47d4-86d6-d5d77fc259be/CriticalMineralsMarketReview2023.pdf>
- Larsen, E. (2023). *Why are critical minerals critical?*
- Mining.com. (04 de 03 de 2024). *The top 50 biggest mining companies in the world*. Obtenido de <https://www.mining.com/top-50-biggest-mining-companies/>
- Ministerio de Minas y Energía. (2022). *Colombia Mining Diversity*.
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Intégrame*.
- Naill, R. (1992). A system dynamics model for national energy policy planning. *System Dynamics Review*, 8(1), 1-20.
- OCDE. (2023). *Estadísticas tributarias en América Latina y el Caribe 2023*. Obtenido de <https://www.oecd.org/tax/tax-policy/folleto-estadisticas-tributarias-en-america-latina-y-el-caribe.pdf>
- Ortiz, A. M. (2013). *Estudio sobre los impactos socio-económicos del sector minero en Colombia: encadenamientos sectoriales*.
- Prieto Rincón, G., Guatame Aponte, C., & Cárdenas, S. C. (2019). *Recursos minerales de Colombia: volumen 2 (Libros del Servicio Geológico Colombiano. ed., Vol. 40)*. Bogotá. Obtenido de <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/37>
- Purdy, C., & Castillo, R. (2022). *The Future of Mining in Latin America. Critical Minerals and the Global Energy Transition. Leveraging Transparency to Reduce Corruption - LTRC*.
- PwC. (2023). *Mine 2023: 20th edition. The era of reinvention*. Obtenido de <https://www.pwc.com/gx/en/issues/tla/content/PwC-Mine-Report-2023.pdf>
- Rojas, C. E. (2023). *Minería Verde en América Latina y el Caribe Análisis comparativo de políticas públicas y estándares industriales para impulsar la sustentabilidad en minería*. Obtenido de <http://www.iadb.org>
- S&P Global. (2024). *World Exploration Trends 2024*. Obtenido de <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/pages/world-exploration-trends-2024#sec1>
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.
- Swanson, J. (2002). Business Dynamics—Systems Thinking and Modeling for a Complex World. *Journal of the Operational Research Society*, 53(4). doi:<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601336>
- Taleb, N. (2007). *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. New York: Random House.
- Unidad de Planeación Minero Energética; Agencia Nacional de Minería. (2024). *Boletín Estadístico Informativo: Minería en Cifras. Datos económicos, precios, contexto y normatividad. Enero 2024*. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/BoletinMinerales/Boletin_mineria_en_cifras_enero_2024.pdf

- Unidad de Planeación Minero Energética; Universidad Nacional de Colombia. (2014). *Simulación y evaluación del impacto de estrategias en el desarrollo del sector minero 2014-2032*. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Simulaci%C3%B3n_evaluacion_del_impacto_estrategias_Sector_Minero_2014_2032.pdf
- United Nations Environment Programme. (2020). *Sustainability Reporting in the Mining Sector: Current Status and Future Trends*. Obtenido de <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/33924>
- Universidad Nacional de Colombia. (2023). *Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos en Colombia*.
- Verburg, P. H., Dearing, J. A., Dyke, J. G., Van Der Leeuw, S., Seitzinger, S., Steffen, W., & Syvitski, J. (2016). Methods and approaches to modelling the Anthropocene. *Global Environmental Change*, 39, 328-340. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.08.007>
- Verrier, B., Smith, C., Yahyaei, M., Ziemski, M., Forbes, G., Witt, K., & Azadi, M. (2022). Beyond the social license to operate: Whole system approaches for a socially responsible mining industry. *Energy Research and Social Science*(83). doi:<https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102343>
- Wolstenholme, E., & Holmes, R. (1985). The design of colliery information and control systems. *European Journal of Operational Research*(20), 168-181.
- Wood Mackenzie. (2023). *Coal Market Service: Global Thermal Coal Strategic Outlook 2023 to 2050*.
- World Mining Data. (2024). *World Mining Data*. Austrian Federal Ministry of Finance. Obtenido de https://www.world-mining-data.info/?World_Mining_Data___PDF-Files
- Xiu, G., Liu, D., Li, G., Hu, N., & Hou, J. (2019). System Dynamics Modeling: A Prototype Technical-Economic Analyzation Tool for Supporting Sustainable Development in Operational Metal Mines. *IEEE Access*, 7, 121805–121815. doi:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937939>
- Yunis, J. &. (2021). *Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies 2020*.
- Zdravkovic, R. (1983). Application of Catastrophe Theory in Economic Evaluation of Low-Grade Ore Bodies. *IFAC Automation in Mining. Mineral and Metal Procesing*, 16(15), 335-340.



Unidad de Planeación
Minero Energética



2024

