

Sostenibilidad y Circularidad En La Industria Minera, De La Teoría A La Práctica

Fabio Andres Soler Alvarado

Universidad Pontificia Bolivariana

Facultada De Ingeniería

Maestría En Sostenibilidad

Medellín

2024



Sostenibilidad Y Circularidad En La Industria Minera, De La Teoría A La Práctica

Fabio Andrés Soler Alvarado

Trabajo De Grado Para Optar Al Título De Magister En Sostenibilidad

Asesor

Guillermo Penagos García

Ph.D. En Sostenibilidad

M.Sc. En Ciencia Ambiental

Universidad Pontificia Bolivariana

Facultada De Ingeniería

Maestría En Sostenibilidad

Medellín

2024

San José De Cúcuta, 8 De junio De 2024.

FABIO ANDRES SOLER ALVARADO

Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad". Art. 92, párrafo, Régimen Estudiantil de Formación Avanzada.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Fabio Andres Soler Alvarado', enclosed in a light gray rectangular border.

Fabio Andres Soler Alvarado

Dedicatoria

Este trabajo de grado se lo dedico a Dios, quien es lo primero en vida y quien hace posible todas las cosas. Den gracias al Señor, porque él es bueno; su gran amor perdura para siempre. (Salmo 136:1)

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a mi director de proyecto, quien no solo con sus acertadas orientaciones, siempre supo encaminarme y orientarme hacia el logro de los objetivos propuestos en este trabajo de grado, sino que todo esto ha servido para aplicarlo de manera satisfactoria en mi vida profesional.

Agradezco a mi esposa quien ha sido un gran motor y motivación en mi vida, quien ríe, llora y sueña a mi lado, siempre dispuesta a apoyarme en la consecución de mis sueños y metas.

A mis padres que desde siempre me animaron a superarme, que con su ejemplo me enseñaron a valorar el trabajo duro, el esfuerzo y la perseverancia en la consecución de logros y objetivos.

Tabla de contenido

Resumen.....	13
Introducción	14
1. Planteamiento del Problema.....	15
2. Justificación.....	17
3. Objetivos.....	18
3.1. <i>Objetivo General</i>	18
3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	18
4. Marco conceptual	19
4.1. <i>Que es economía circular</i>	19
4.2. <i>Avances de la economía circular en el mundo</i>	21
4.3. <i>Avances en América latina y el caribe</i>	24
4.4. <i>Como contribuyen los minerales, los metales y la minería, a una economía circular y sostenible</i>	26
4.5. <i>Modelo de economía circular minera</i>	31
4.6. <i>Limitantes para la economía circular minera</i>	33
4.7. <i>Tipos de minería y sus procesos productivos</i>	38
4.8. <i>Principales residuos generados por la actividad minera</i>	41

4.9.	<i>Procesos susceptibles de implementación de prácticas para Reducir, Reusar y/o Reciclar</i>	45
4.10.	<i>El futuro de la minería</i>	50
5.	Metodología	51
5.1.	<i>Metodología individual</i>	51
5.2.	<i>Población</i>	53
5.3.	<i>Muestra</i>	54
5.4.	<i>Limitaciones</i>	54
6.	Casos de estudio	54
6.1.	<i>Caso 1. Minería verde, el proyecto de China para despedirse del carbón</i>	54
6.2.	<i>Caso 2. Mina de diamantes Diavik</i>	56
6.3.	<i>Caso 3. División el teniente</i>	56
6.4.	<i>Caso 4. Codelco, Antofagasta Minerals y Collahuasi</i>	59
6.5.	<i>Caso 5. Mina Morro Agudo</i>	62
6.6.	<i>Caso 6. Compañía Minera Antamina</i>	63
6.7.	<i>Caso 7. Cemex - cementera</i>	64
6.8.	<i>Caso 8. DRUMMOND LTD. en el cesar opera una planta de procesamiento de llantas residuales</i>	65
6.9.	<i>Caso 9. Sumicol - Corona</i>	67

6.10. Caso 10. Cementos argos.....	68
6.11. Caso 11. Paz del Rio extracción de hierro.....	69
6.12. Caso 12. Ladrillera Santa Fe.....	70
6.13. Proyecto de investigación 1. Reúso de agua residual en explotación minera por socavones (trabajo de grado).....	71
6.14. Proyecto de investigación 2. Producción minera de concentrados de Pb-Ag-Zn en Bolivia. (artículo).....	72
6.15. Proyecto de investigación 3. Mecanismo de producción más limpia: el reúso de aguas residuales en la actividad minera (Artículo).....	73
7. Análisis de resultado.....	74
7.1. Mejores prácticas de economía circular aplicadas en los casos de estudios.....	82
7.2. Factibilidad de implementación de las mejores prácticas seleccionadas en el contexto de la actividad minera en Colombia.	83
8. Conclusiones.....	86
9. Referencias	88

Lista de tablas

Tabla 1 Tipos de medidas a implementar en la etapa de explotación..... 48

Tabla 2 Resumen de estudios de casos 75

Lista de figuras

Figura 1	Diagrama de Mariposa de la economía Circular	20
Figura 2	Diagrama Sankey	22
Figura 3	Flujos en un sistema de explotación a cielo abierto	39
Figura 4	Flujo en un sistema de explotación subterráneo.....	40
Figura 5	Fases de la SLR	51
Figura 6	Etapas del análisis multicriterio	52
Figura 7	matriz DOFA.....	84

Glosario

Agua de mina: Es generada principalmente en explotaciones subterráneas producto del drenaje de aguas lluvias y deshielos y aguas subterráneas, que, al pasar por las rocas y actividades mineras, obtienen un alto contenido de metales, sulfatos y variaciones de acidez que afectan considerablemente las descargas a lagos, ríos y otros.

Economía circular: La economía circular es un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, el ciclo de vida de los productos se extiende.

Mina: Excavación que se hace para extraer un mineral.

Mineral: Sustancia inorgánica que se halla en la superficie o en las diversas capas de la corteza terrestre. Están compuestos de uno o varios elementos químicos.

Reciclaje: Es la recolección y el procesamiento de desechos para crear nuevos productos basados en esos mismos materiales.

Reducir: Consiste en consumir menos productos “de usar y tirar” para generar menos residuos.

Relaves: En minería, partículas de mineral que el agua del lave arrastra y mezcla con el barro estéril, y que para ser aprovechadas necesitan un nuevo lave.

Reutilizar: Volver a utilizar algo, bien con la función que desempeñaba anteriormente o con otros fines.

Sostenibilidad: se rige bajo el principio de asegurar las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, siempre sin renunciar a la protección del medioambiente, el crecimiento económico y el desarrollo social.

Resumen

Al abordar un acuerdo mundial que busca limitar el cambio climático en el planeta y al incorporar los países, la empresa privada y la sociedad civil una agenda de compromisos comunes y universales que busca la sostenibilidad de los recursos naturales, de la economía, del medio ambiente y la sociedad, hacen que al lograr conocerse, identificarse y analizarse estrategias, tecnologías e iniciativas llevadas a cabo por cada uno de estos actores, se garantice que entre todos se logren los objetivos y metas comunes, al poder compartirse experiencias y conocimientos en materia de circularidad.

El poder transformar el modelo energético actual en un modelo energético sostenible, es lo que se conoce como transición energética. Es entonces que la minera como actividad económica entra a jugar un papel fundamental en la extracción de los minerales estratégicos para la transición energética, tal y como los ha denominado el Banco Mundial, ya que es con estos, es que se lograrán fabricar todas las tecnologías que se implementarán en la generación de energías limpias. La Minería Climáticamente Inteligente busca garantizar que los países en desarrollo ricos en recursos, se beneficien de sus recursos minerales y los administren de manera sostenible, al tiempo que fomentan el crecimiento y el desarrollo económicos.

Este proyecto pretende entonces identificar casos de estudios en materia de circularidad para la industria minera, con el fin de dar a conocer y compartir conocimientos de como una industria que se estigmatizaba por su modelo económico lineal, se ha ido transformando hacia esa administración sostenible, que contribuye a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la generación de nuevos negocios verdes.

PALABRAS CLAVES: Minería, residuos de mina, economía circular.

Introducción

Actualmente las grandes industrias se están renovando para hacer frente a los desafíos que traen las nuevas políticas ambientales, los compromisos y pactos mundiales por mitigar los efectos del cambio climático; cuyas consecuencias ya se están viviendo en muchos países alrededor del planeta. Efectos que no esperaron a ser evidentes en el mediano y largo plazo.

Este proyecto buscaba poder identificar modelos de economía circular aplicados al sector de la minería, ya que, al tratarse de un proceso productivo lineal, surgía la pregunta de si era posible reducir los consumos de materias primas en explotación, y su reutilización para contribuir con ello a la reducción de la huella de carbono y al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

Es entonces que se lograron identificar y analizar casos de estudio de economía circular, aplicados al sector de la minería, y evaluar su factibilidad de implementación en la extracción de minerales dentro del contexto económico de la industria minera colombiana, de manera que puedan contribuir para el país, en el logro de las políticas públicas de transformación productiva a través de la bioeconomía; pasando de una economía extractivista, a una sostenible, y contribuyendo al uso de energías seguras, reduciendo su acción respecto a la huella de carbono aportante a la acción climática, y a los tratados internacionales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero GEI y sostenibilidad.

1. Planteamiento del Problema

El concepto de economía circular establece que se debe promover la eficiencia en el uso de materiales, del agua y de la energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales y la extensión de la vida útil a través de la implementación de la innovación tecnológica (Minambiente, 2019). Otro concepto define que se debe abandonar el modelo actual de economía lineal, que se basa en “tomar, hacer y desechar” y en el que los recursos se extraen, se convierten en productos, se utilizan o consumen y posteriormente se desechan, para transformarlos en un modelo circular donde se reduzca el consumo de materias primas y se procure que los productos generados, se mantengan en circulación durante el mayor tiempo posible (Patrick Schröder y otros, 2020); rediseñando los procesos productivos, reparando y reciclando hasta el final del ciclo de vida de un producto.

En Colombia el sector productivo de la minería representa para el país el 1.3% del PIB, el 24% de las exportaciones, genera 179.000 empleos directos, regalías por 6 billones de pesos y el 11% de la inversión extranjera. Esta economía respecto a Latinoamérica y el Caribe posee a la nación como número uno en potencial minero y en inversión extranjera, primero en exportaciones de carbón y esmeraldas, cuarto en exportaciones de oro y ferroníquel y sexto en exportaciones de cobre (ANM, 2022).

Es entonces que surge una gran pregunta respecto a si se pueden aplicar modelos de economía circular a un sector como la minería, cuyo objeto económico es la extracción de yacimientos minerales para su posterior comercialización, ya que, al ser un proceso lineal, ¿cómo sería posible la reducción del consumo de las materias primas y su reutilización, y como podría contribuir este sector a la reducción de la huella de carbono y al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible? (ONU, 2015).

Dolfer Julca Zuloeta en su estudio *La Economía Circular en la Minería Peruana*, realiza un acercamiento hacia las estrategias que se deberían adoptar para convertir la minería en una actividad sostenible, incentivando la transición para que los procesos operativos sean regenerativos y restaurativos en lugar de ser extractivos, es decir, pasar de flujos lineales a circulares. Para de esta manera, interiorizar la retención de valor y la reducción de los impactos ambientales, al mismo tiempo que se crean oportunidades económicas adicionales frente a los desafíos propios de la actividad minera, trazando una ruta hacia una económica circular.

Se hace necesario entonces identificar y analizar casos de estudio de economía circular, regenerativa y bioeconomía aplicados al sector de la minería, para evaluar su factibilidad de implementación en la extracción de minerales dentro del contexto económico de la industria minera colombiana, de manera que contribuyan para el país, a cumplir con sus políticas públicas de transformación productiva a través de la bioeconomía; pasando de una economía extractivista a una sostenible y contribuyendo al uso de energías seguras, reduciendo su acción respecto a la huella de carbono aportante a la acción climática (PND, 2022), y a los tratados internacionales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero GEI y sostenibilidad.

2. Justificación

Lo que se conoce del modelo productivo de la minería en diferentes escenarios, es que corresponde a una actividad económica basada en procesos lineales cuyo objeto es la extracción, beneficio y comercialización de los minerales, que serán usados como materia prima en la fabricación de toda variedad de productos para el consumo humano (Minambiente, 2019). Y los conceptos de economía circular y economía regenerativa, en general establecen que se debe reducir el consumo de materias primas y procurar que los productos generados se mantengan en circulación durante el mayor tiempo posible (Patrick Schröder y otros, 2020).

Como podría entonces este modelo de negocio, contribuir con la reducción, la reutilización y la regeneración de sus productos, que son las materias primas que se consumirían en otro tipo de modelos de negocios, y como podría contribuir con las políticas públicas de transformación bioeconomía, economía circular, transición energética y reducción de gases contaminantes.

Es entonces, que, al identificarse casos de estudio de economía circular aplicados en el sector de la minería, se podrían analizar los procesos, las actividades llevadas a cabo para su implementación, los desafíos presentados y los beneficios obtenidos, como contribución hacia una economía más limpia, más sostenible y más amigable con el ambiente. Y al establecerse su grado de factibilidad de implementación, se podrían dar a conocer para que sean replicados por otras empresas en las diferentes etapas del proceso productivo, y de esta manera contribuir entre todos por el bienestar de todos y del planeta.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Evaluar el potencial de incorporación de un enfoque basado en economía circular en el sector de la minería en Colombia, a partir del análisis de estrategias, tecnologías e iniciativas identificadas en estudios de caso seleccionados.

3.2. Objetivos Específicos

- Mapear modelos de economía circular, que hayan sido aplicados por empresas del sector minero a nivel nacional y global.
- Identificar las mejores prácticas de economía circular aplicadas en los casos de estudios.
- Establecer la factibilidad de implementar las mejores prácticas seleccionadas en el contexto de la actividad minera en Colombia.

4. Marco conceptual

4.1. Que es economía circular

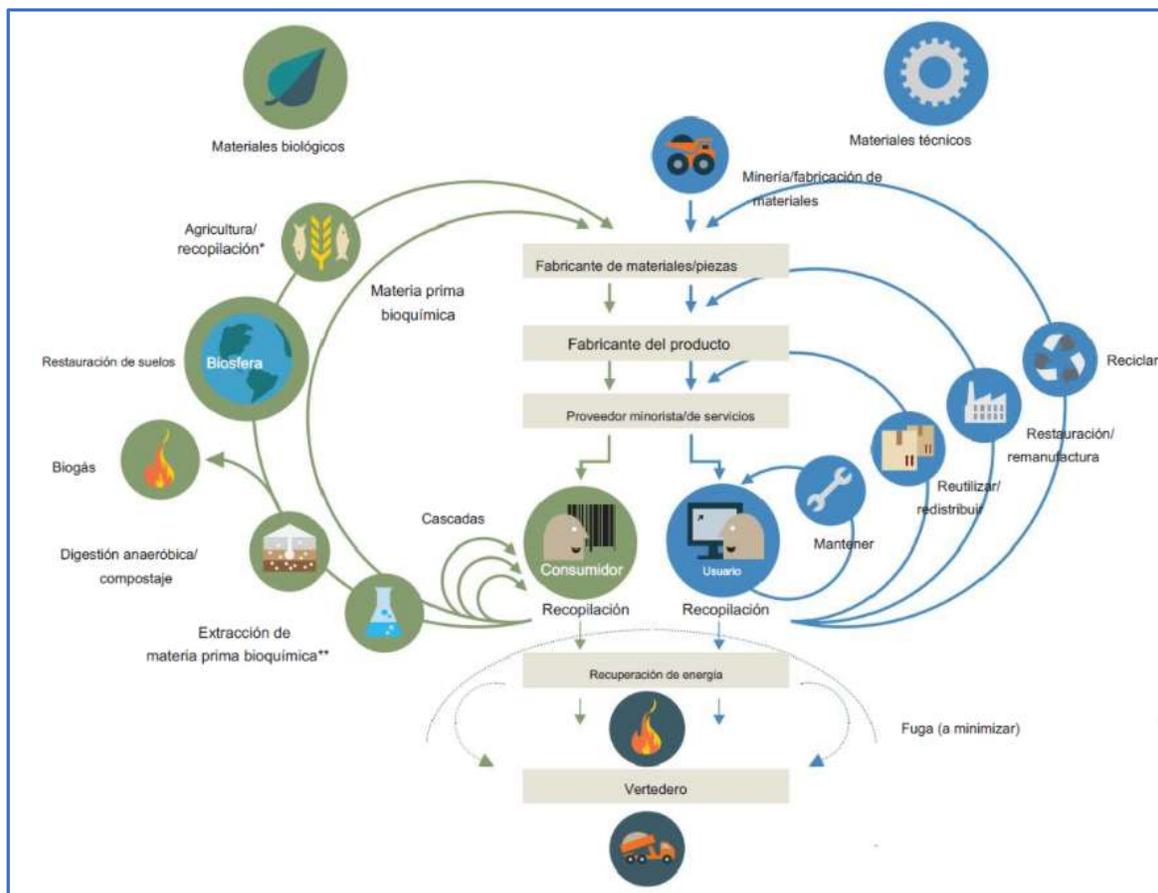
Una característica clave de la economía circular es la noción de que el final de la vida útil de los materiales se centra en la restauración, ya sea devolviendo materiales biológicos a la tierra o devolviendo materiales no biológicos a la economía. Se centra en garantizar que productos y cualquier subproducto de la producción (emisiones, desechos) puedan devolverse a la tierra o utilizarse como recursos o insumos en sistemas de productos similares o diferentes. (ICMM, 2016)

La Fundación Ellen MacArthur establece que la economía circular es un sistema industrial que es restaurador o regenerativo por intención y diseño. Reemplaza el concepto de "fin de vida" con restauración, avanza hacia el uso de energías renovables, elimina el uso de productos químicos tóxicos que perjudican la reutilización, y apunta a la eliminación de residuos a través del diseño superior de materiales, productos y sistemas. y, dentro de éste, los modelos de negocio. Una economía así se basa en unos pocos principios simples. En primer lugar, en esencia, una economía circular tiene como objetivo "eliminar" los residuos. Los residuos no existen: los productos están diseñados y optimizados para un ciclo de desmontaje y reutilización. Estos ciclos ajustados de componentes y productos definen la economía circular y la distinguen de la eliminación e incluso del reciclaje, donde se pierden grandes cantidades de energía y mano de obra incorporadas. En segundo lugar, la circularidad introduce una estricta diferenciación entre consumibles y componentes duraderos de un producto. A diferencia de hoy, los consumibles en la economía circular están hechos en gran medida de ingredientes biológicos que son al menos no tóxicos y posiblemente incluso beneficiosos, y pueden devolverse de manera segura a la biosfera, directamente o en una cascada de usos consecutivos. Por otro lado, como los motores o los ordenadores, están hechos de nutrientes técnicos inadecuados para la biosfera, como los metales y

la mayoría de los plásticos. En tercer lugar, la energía necesaria para alimentar este ciclo debería ser renovable por naturaleza, nuevamente para disminuir la dependencia de los recursos y aumentar la resiliencia del sistema. (Fundación MacArthur, 2012)

Figura 1

Diagrama de Mariposa de la economía Circular



Nota: Fundación Ellen McArthur 2019.

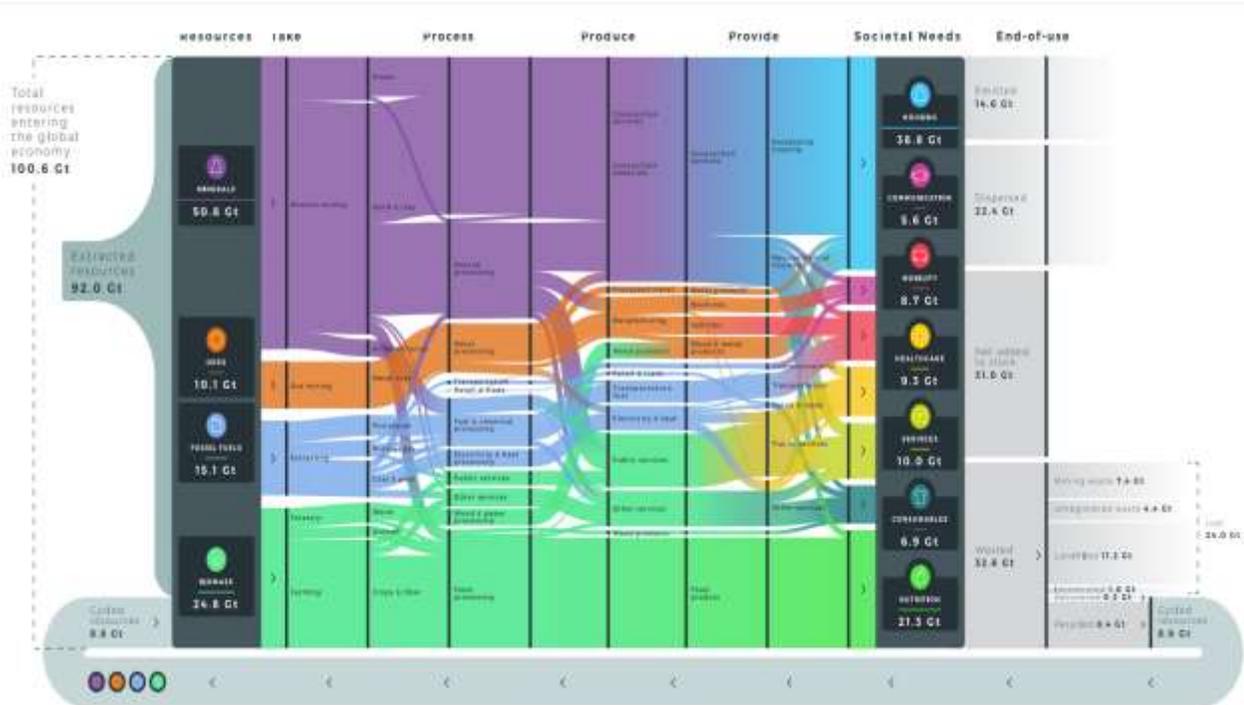
El diagrama del sistema de economía circular, conocido como diagrama de mariposa, ilustra el flujo continuo de materiales en una economía circular. Hay dos ciclos principales: el ciclo técnico y el ciclo biológico. En el ciclo técnico, los productos y materiales se mantienen en

circulación a través de procesos como la reutilización, reparación, remanufactura y reciclaje. En el ciclo biológico, los nutrientes de los materiales biodegradables se devuelven a la Tierra para regenerar la naturaleza (Figura 1).

En cuanto a su objetivo, cabe destacar que la economía circular no es un fin en sí mismo, sino un camino para avanzar hacia el reemplazo del modelo lineal que ha imperado hasta ahora (Fundación MacArthur, 2014). Lo anterior, a partir de ser regenerativa y restaurativa por intención y diseño para permitir que los sistemas cierren sus ciclos en el proceso de generación y captura de valor económico, social y medioambiental, desacoplando el uso de materiales y energía del crecimiento de la producción (Morseletto, 2020).

4.2. Avances de la economía circular en el mundo.

Si bien existen importantes avances en materia de compromisos políticos a niveles internacionales y nacionales con el diseño y aprobación de diversas hojas de rutas, estrategias, planes y fondos, la realidad muestra que en 2020 la circularidad del planeta alcanzó un 8,6%; esto representa una caída del 5% respecto de 2019, en un sistema económico global que consumió un 70% más de lo que el planeta puede entregarnos con seguridad (Circle Economy, 2022). Este es el escenario actual de la economía circular a nivel global, lo que habla de su estado inicial en términos de resultados y queda expresado en el siguiente diagrama Sankey del más reciente The Global Circularity Report 2022, en el cual podemos visualizar cómo nuestra huella global de recursos satisface nuestras necesidades sociales claves y que la economía global es sólo un 8,6% circular (Figura 2).

Figura 2*Diagrama Sankey*

Nota: The Global Circularity Report 2022.

En el diagrama se observa el volumen de recursos extraídos a nivel global por año (92 mil millones de toneladas) y todos los recursos que fueron ciclados (8,65 mil millones de toneladas). Esto trae el total de material ingresado a la economía para 100,6 mil millones de toneladas. Del total de insumos materiales, una parte considerable (48 mil millones toneladas) se convirtieron en existencias a largo plazo: principalmente edificios, infraestructura y maquinaria pesada. De ese mismo stock, se retiraron 17 mil millones de toneladas de materiales o demolido, dejando una adición neta de 31 mil millones toneladas en el año. En términos de los productos de corta duración que fueron consumido por la economía global en artículos como ropa o embalajes: una gran parte

sigue desaparecido y se supone que está disperso en el medio ambiente como residuo irrecuperable. En total, se recogen 32,6 mil millones de toneladas de materiales como desperdicio. La mayor parte de este flujo, 23,9 mil millones de toneladas, está perdido; se deposita en vertederos, se incinera y se desperdicia en la minería operaciones o se tratan de una manera informal. De los materiales clasificados como residuos, sólo 8.650 millones de toneladas, o el 8,6% del uso material total de sociedad, en realidad es cíclica. (Global Circularity Report 2022)

El cambio negativo general puede explicarse por dos tendencias subyacentes relacionadas: la primera dada por la tasa de crecimiento de la extracción de recursos que supera las mejoras en eficiencia y en la recuperación al final de su uso por un factor de dos a tres, y como resultado, las cantidades de Los materiales secundarios disponibles para su uso son caída corta. Y la segunda dada por las necesidades de una población en crecimiento, que siguen extrayendo materias primas para la construcción, vivienda, infraestructura, transporte y maquinaria, sin reutilizar los materiales que se encuentran ya disponibles. (Circle Economy, 2022)

A pesar de los limitados resultados que se han alcanzado, los países siguen avanzado en el diseño e implementación de hojas de ruta, estrategias y políticas. La Unión Europea y su Plan de Acción de 2015 y 2020 (European Commission, 2020) en el marco de su “Pacto Verde” ha sido el referente mundial para el diseño de acciones en países del viejo continente, como Países Bajos y su plan 2050 (Netherlands Enterprise Agency, 2019), El Road Map de Finlandia 2016- 2025 y su actualización (Sitra, 2016), la hoja de ruta actualizada 2021 para Alemania (CEID et al., 2021). A las acciones anteriores se suman la Visión 2020 de Japón (Japan, 2020), el XIV Plan Quinquenal de Desarrollo de la Economía Circular 2021 de China, y la Política de Residuos 2018 de Australia, que muestran el compromiso político de avanzar hacia la implementación de este nuevo modelo económico. (Circle Economy, 2022). De otra parte, African Circular Economy Alliance y otros

(2020) reseñan que La Alianza de Economía Circular de África ("ACEA" o "La Alianza") fue concebida en 2016 durante el Foro de Economía Mundial sobre África en Kigali y lanzado formalmente en Bonn en 2018. (MinMinas- ATG, 2020).

A lo anterior, se agrega el trabajo de diversos organismos multilaterales como Nacionales Unidas, el Banco Mundial, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), entre otros conjuntos de entidades de cooperación internacional como la SITRA de Finlandia, Konrad Adenaur Stiftung y su programa EKLA y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (Circle Economy, 2022). La implementación de modelos con objetivos, metas e indicadores de medición en sus estrategias (reducción, reutilización, reciclaje y aprovechamiento), se convierten en una herramienta efectiva para verificar los avances en economía circular y el uso intensivo de materiales para el sector productivo y las organizaciones en general, adicionalmente para el ODS 12. Producción y consumo responsables. El modelo de economía circular y su implementación no solo traen consigo beneficios ambientales y reputacionales para las organizaciones, sino además pueden conllevar beneficios económicos debido a la mejora en los procesos de producción o prestación de servicios. (Minminas - ATG, 2020)

4.3. Avances en América latina y el caribe

América Latina y el Caribe han mostrado importantes avances a nivel de políticas públicas, a medida que la economía circular es reconocida como un modelo válido para impulsar el desarrollo de los países de la región. Hasta el año 2020 se identificaron 196 iniciativas públicas referidas a temáticas de economía circular que se distribuyen en: programas (34%), normativas (16%), estrategias (13%) y acuerdos (23%) (Martínez-Cerna et al., 2019). A diferencia de los

países desarrollados, la economía circular en la región puede apoyar el desafío de una transición justa para combatir la desigualdad social en su amplio espectro económico, social, político, de género y medio ambiental, dado que la desigualdad sigue siendo un freno para el desarrollo sostenible del continente (Schröder, P; Albaladejo, M; Alonso Ribas, P; MacEwen, M y Tilkanen, 2020). Dado que la economía circular es un proceso que recién comienza a desplegarse en la región, existe un importante desconocimiento respecto de su significado y de las oportunidades que abre a gobiernos nacionales y territoriales, a organizaciones empresariales, a la academia y a la sociedad. La investigación científica en economía circular en América Latina y el Caribe es aún incipiente y no representa en total más del 4,5% mundial. Esto debe ser leído en el marco de la baja inversión que la región posee en ciencia, tecnología e innovación en general. (Circle Economy, 2022)

En Colombia aunque en el sector minero no están aún formalizados los procesos de economía circular en la actividad, es importante resaltar que en el año 2019 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, establecieron la principal herramienta para la implementación de la economía circular en Colombia, en el documento Estrategia Nacional de Economía Circular “Cierre de ciclos materiales innovación, tecnología, colaboración y nuevos modelos de negocio”. (Minminas - ATG, 2020)

El desarrollo de la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC) involucró un proceso de concertación entre diversos actores del sector público y privado, academia y sociedad civil, relacionados con la transformación de los sistemas productivos. Así mismo contó con la participación de distintos ministerios acompañados por el Departamento Nacional de Planeación DNP y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. Cabe destacar que dentro de la Estrategia Nacional de Economía Circular surge el Plan de acción sobre flujo de materiales

industriales y productos de consumo masivo, en el cual se contempla como línea de acción priorizada el flujo de las llantas, por tal motivo se formuló en el presente año la “Guía de Manejo Ambiental del flujo de llantas en la industria minera”. (Minminas - ATG, 2020)

4.4. Como contribuyen los minerales, los metales y la minería, a una economía circular y sostenible

En el informe *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition* (Minerales para la acción climática: El uso intensivo de los minerales en la transición hacia la energía limpia) el Grupo Banco Mundial determino que la producción de minerales, como el grafito, el litio y el cobalto, podría aumentar en casi un 500% para 2050, para poder satisfacer la creciente demanda de tecnologías de energía limpia. Se estima que se necesitarán más de 3 mil millones de toneladas de minerales y metales para implementar la energía eólica, solar y geotérmica, así como el almacenamiento de energía necesarios para lograr un futuro por debajo de los 2 °C. En otras palabras, la transición de energía limpia será significativamente intensiva en minerales y deberá gestionarse de una manera responsable y sostenible. El informe promueve una *Iniciativa De Minería Climática Inteligente* que apoya la extracción y el procesamiento sostenible de los minerales, y ayuda a los países en desarrollo a beneficiarse de esta creciente demanda, al tiempo que el sector minero garantiza la reducción de la huella ambiental y climática. (Grupo Banco Mundial, 2020)

Respecto a los metales, entendiéndose como producto final obtenido del beneficio de los minerales, se puede decir que son en su mayor parte infinitamente reciclables. Muchos tienen características inherentes como durabilidad, resistencia y propiedades anticorrosivas que mejoran la sostenibilidad de los productos en los que se utilizan: mejorando la longevidad, reduciendo los

requisitos de mantenimiento y proporcionando una mayor funcionalidad. Su valor mejora sus tasas de recuperación, y ya existe una infraestructura considerable para facilitar su reutilización, remanufactura y reciclaje. (ICMM, 2016)

La minería como actividad industrial llega a generar volúmenes considerables de residuos como rocas estériles, escombros, emisiones, relaves, lodos de tratamiento de aguas y agua de mina. Sin embargo, hay una variedad de aspectos de circularidad que pueden perseguirse dentro de las operaciones mineras. Varias asociaciones mineras han desarrollado guías y programas para ayudar a sus miembros a cumplir altos estándares y compartir las mejores prácticas en una variedad de actividades e impactos operativos. En Canadá, por ejemplo, la Asociación Minera de Canadá (MAC) ha desarrollado la iniciativa Hacia una Minería Sostenible (TSM), un programa obligatorio para las empresas miembros de MAC, diseñado para impulsar mejoras en las operaciones mineras y el cierre de minas. TSM incluye verificación externa del desempeño y requiere la participación de paneles de múltiples partes interesadas de la comunidad de interés, tanto en la supervisión del programa como en los sitios mineros individuales. En el programa TSM, el protocolo de energía y GEI incluye el fomento de energías alternativas que puedan reducir las emisiones. En la industria siderúrgica las dos principales rutas de producción utilizadas son la ruta del alto horno (BF), o integrada, y la ruta del horno de arco eléctrico (EAF), que representan aproximadamente el 70% y el 30% de la producción mundial de acero, respectivamente. El acero producido a través de la ruta EAF suele ser un 88% de chatarra reciclada, pero puede ser un 100%. El acero BF suele tener un 12 % de chatarra, pero puede ser de hasta el 35%. Las escorias se utilizan cada vez más como agregados en la construcción de hormigón y carreteras, y la sobrecarga se utiliza para el contorno del paisaje y la revegetación durante el cierre de las minas. La minería también contribuye a la circularidad mediante el reciclaje de elementos que ya finalizaron su vida útil, como los

neumáticos, maquinarias e infraestructura, se puede hacer remanufactura de equipos pesados, reutilizar el agua doméstica e industrial y los productos químicos, y hacer reusó de relaves en la industria de la construcción, entre otros. (ICMM, 2016)

En Colombia se han desarrollado varias iniciativas por parte de universidades y empresas privadas relacionadas con economía circular para el sector minero, para la reutilización de los minerales y sus subproductos. Entre las cuales se destacan:

La Unidad de Planeación Minero Energética- UPME y la Universidad Industrial de Santander- UIS en el año 2018, realizaron un análisis del potencial de reutilización de minerales en Colombia y definir estrategias orientadas a fomentar su aprovechamiento por parte de la industria en el país bajo el enfoque de economía circular, el cual surgió con el fin de evaluar una mayor utilidad en el aprovechamiento y reutilización de los minerales y metales, enmarcados en el modelo de economía circular. Dentro de los residuos evaluados en el estudio de la UPME-UIS, se encuentran las cenizas de carbón (producto del proceso de combustión del carbón mineral para generación de vapor de uso industrial y energía eléctrica) y los relaves (normalmente están constituidos por mezclas de roca molida, agua, minerales de ganga y algunos metales pesados como cobre, plomo, mercurio y arsénico). Para el caso de los relaves, también se presentan diversas aplicaciones con aprovechamiento parcial como es el caso de la extracción de estos metales preciosos ya sea por métodos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos o biometalúrgicos. Y el caso de una utilización total o mayor, se encuentra el sector construcción y su aplicación en la fabricación de ladrillos y cerámicos. Dentro del mismo sector minero actualmente se usan como retrolenados de minas para minimizar su disposición final. Estas posibles aplicaciones representan una opción viable para valorizar este residuo y minimizar la contaminación ambiental por las grandes

cantidades de relaves que se producen año tras año y los pasivos que se tienen actualmente sin ningún tipo de valorización. (Minminas – ATG, 2020)

La Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC junto con el Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales INCITEMA, elaboraron en el año 2018 un documento de investigación denominado “Caracterización, beneficio y usos potenciales de minerales estratégicos del departamento de Boyacá”; donde describen los análisis, metodologías y resultados de la investigación sobre los minerales del departamento de Boyacá, a partir esencialmente de dos fases: 1. Describir las principales y distintas técnicas de caracterización que fueron necesarias para determinar y reconocer la génesis, naturaleza y propiedades fisicoquímicas de los minerales estratégicos y de esta manera, mediante su estudio y desarrollo de diversas metodologías, determinar un potencial uso a cada especie mineralógica y 2. Desarrollo de una metodología, que consiste en un modelo de planeación estratégica basado en SIG (Sistemas de Información Geográfico), que tiene en cuenta aspectos bióticos, abióticos, socioeconómicos y la misma naturaleza de los minerales que están en un territorio específico para hacer una minería responsable con el ambiente, con la población y viable socioeconómicamente. (Minminas – ATG, 2020)

La Universidad Santo Tomás de Villavencio, elaboró una tesis de grado en el año 2019 denominada “Elaboración de unidades de mampostería perforada de concreto utilizando relaves provenientes de la minería de agregados”, en donde sus autoras analizan el uso de relaves provenientes de la minería de agregados de la planta Zafiro, ubicada en la ciudad de Villavencio – Meta, especializada en la extracción y producción de materiales de construcción, para la elaboración de unidades de mampostería perforada de concreto como reemplazo porcentual del cemento, evaluando el comportamiento físico de 4 diseños de mezcla con diferentes porcentajes

de reemplazo (10%, 20%, 30% y 50%), sometidas a ensayos físicos, químicos y mecánicos en distintas edades de curado. (Minminas – ATG, 2020)

El grupo de materiales de la Universidad Nacional de Colombia, actualmente está trabajando en tratar de valorizar los residuos que se generan de la minería aluvial, en el caso de los residuos de tierras raras que se generan en proyectos mineros, lo cual no se habían caracterizado, y se presentan muchos minerales de interés, uno de ellos el mineral más prometedor por su valorización económica que puede tener es la monacita, la principal mena de tierras raras, así mismo de este mineral se pueden derivar muchas cosas pero se debe tener en cuenta un aspecto, y es que depende del tipo de mineral y el tipo de extracción que se vaya a hacer, cielo abierto, aluvial o subterránea. (Minminas – ATG, 2020)

MINEROS S.A. cuenta con un Centro de Economía Circular, el cual se gestionan todos los residuos que se generan producto del desarrollo de las operaciones y del campamento minero. Por otro lado, a partir del 2020 – 2021, nacen unos retos importantes dentro de la implementación de modelo de Economía Circular en el proyecto, el cual se acoge a los lineamientos del modelo basura cero del país: Incremento de aprovechamiento de residuos sólidos hasta en un 35% (promedio histórico 21.3%), Disminución en disposición de RESPEL hasta en un 25%, Incremento en vida útil de vaso para depósito de residuos sólidos ordinarios, Generación de valor compartido – fortalecimiento de organizaciones locales para aprovechamiento de material. El Centro de Economía Circular surge a través de un modelo que propende el desarrollo de estrategias que permiten visualizar una gestión eficiente de los residuos del proyecto. Adicionalmente, bajo acciones efectivas se busca recuperar el valor económico de los residuos mediante su reutilización, remanufactura, rediseño y reciclado. (Minminas – ATG, 2020)

4.5. Modelo de economía circular minera.

La economía circular es en esencia, una economía ecológica. En relación con los “recursos – productos – residuos” en el carácter tradicional de la economía lineal, es la abreviatura de economía de ciclo material cerrado. La producción minera tradicional se basa en recursos minerales para formar un modo de operación unidireccional de exploración, explotación, procesamiento de minerales, consumo de productos y vertimiento de desechos. La economía circular minera se refiere a un sistema económico que sigue las características y reglas ecológicas naturales de los recursos minerales y los productos minerales y toma como núcleo la explotación altamente eficiente y la utilización integral de los recursos minerales. Constituye un flujo de materiales de circuito cerrado como recursos minerales y productos minerales, según la exploración, explotación, procesamiento, fusión, procesamiento profundo, consumo y otros procesos. Y el flujo material hacia el interior, se superpone con el flujo de energía y el flujo de información dependen de ello para alcanzar el desarrollo armonioso del medio ambiente global y el progreso social. (Energy Proceida, 2012)

La mayoría de los académicos coincidieron en que el principio que debe seguir la economía circular es Reducir, Reutilizar y Reciclar. Reducir pertenece al método de entrada, cuyo objetivo es reducir el flujo de material y energía en el proceso de producción y consumo. La reutilización pertenece al método de procedimiento cuyo objetivo es ampliar el tiempo que requiere el producto y servicio. El reciclaje pertenece al método de salida, que requiere que los materiales regresen a recursos renovables después de utilizarlos. (Energy Proceida, 2012)

La economía circular minera se rige por el principio de las 3R, su significado específico es el siguiente: Reducir durante el proceso de explotación, procesamiento y utilización de los recursos minerales. Reducir se muestra principalmente como: realizar la explotación eficiente de los

recursos mediante mecanización y automatización, y explotar la optimización. Reducir el índice de dilución minera y el índice de pérdida de mineral y mejorar la tasa de recuperación del procesamiento y fundición de minerales para mejorar la recuperación total de recursos. Reducir las emisiones de diversos contaminantes, como relaves, gangas y aguas residuales de minas. (Energy Proceida, 2012)

La reutilización se puede encontrar en el aprovechamiento cíclico de las aguas residuales de las minas. Las principales fuentes de aguas residuales de la mina son el agua descargada de los pozos de mineral y las aguas residuales descargadas de las plantas procesadoras. Existen métodos físicos, métodos químicos y métodos biológicos para el tratamiento de aguas residuales. El principio de cada método es separar las sustancias nocivas o convertirlas en sustancias inofensivas. Hoy en día, cada vez más plantas de concentración pasan a utilizar la tecnología de ciclo cerrado. No descargan las aguas residuales y las eliminan dentro del sistema, luego el agua se reutiliza. El 70% de las zonas mineras de carbón en China tienen escasez de agua. Por lo tanto, es de gran importancia eliminar el agua de las minas de manera que se cumplan los estándares de uso civil o al menos los estándares industriales, de modo que se recicle el agua de uso industrial. Por otro lado, prestar atención al desarrollo de relaves y minerales asociados puede lograr el efecto de reducir la contaminación y convertir los desechos en objetos de valor. Hay dos formas de aprovechar integralmente los residuos y los relaves. Uno de ellos recupera aún más los componentes útiles del mismo. A medida que se desarrolla la tecnología de procesamiento de minerales, los componentes que no se pueden recuperar o que son difíciles de recuperar ahora se pueden recuperar. Esto hace que se utilicen el mineral de baja ley y los relaves que solían tratarse como roca estéril y se recuperen los componentes asociados del mineral asociado, lo que redujo la cantidad total de desechos y aumentó la extensión del recurso. (Energy Proceida, 2012)

Reciclar requiere reducir la creación de basura tanto como sea posible procesando los productos de recursos minerales que han completado sus funciones para que vuelvan a ser recursos disponibles y puedan ingresar al mercado o proceso productivo secundario. En la actualidad, el valor total de la recuperación de recursos renovables en los principales países desarrollados ha alcanzado los 250 mil millones de dólares al año y ha crecido a una tasa anualizada del 10% al 20%. En el mundo, el 45% de la producción de acero, el 62% del cobre, el 22% del aluminio, el 40% del plomo, el 30% del zinc y el 30% de los productos de papel provienen de la recuperación de recursos renovables. El gran desarrollo de la tecnología y el mercado de uso secundario del metal favorece el alivio de la presión del suministro de recursos minerales, el consumo de energía y el medio ambiente. Por ejemplo, recuperar aluminio de latas de bebidas, recuperar manganeso, zinc e hidrargiro de pilas desechadas, convertir plásticos de desecho en gasolina y diésel, reduce el consumo de materias primas no renovables. El uso de chatarra de aluminio no solo redujo la generación de aluminio primario y desechos de productos de aluminio, sino que también ahorró mucha electricidad. Se estima que reciclar 1 kg de chatarra de aluminio puede ahorrar unos 46 kW. (Energy Proceida, 2012)

Finalmente se puede concluir que la economía circular minera se puede implementar a lo largo de todos los niveles de una organización, del área de la mina, de la cadena de valor del mineral y del sistema.

4.6. Limitantes para la economía circular minera.

Avanzar en la transición y aceleración de la economía circular en el sector minero en los países de América latina, requiere superar una serie de barreras y brechas para su implementación, que van desde la existencia o actualización de marcos legales hasta la innovación de base tecnológica. (CIRCULAC TEC, 2022)

Inestabilidad y corrupción. La principal amenaza surge desde el escenario político-social que enfrenta la región y que podría afectar el desarrollo de la industria. Se puede encontrar evidencia de esta preocupación en el trabajo de Henríquez-Aravena et al. (2021), en el que, aplicando una encuesta a 696 profesionales vinculados a sostenibilidad ambiental de la región, se observa que el 68% de los participantes mencionó que la corrupción en países de América Latina era la principal amenaza para el tránsito hacia la economía circular, seguida por la inestabilidad política y social con un 43%. (CIRCULAC TEC, 2022)

Ciencia, tecnología e innovación. Se reconoce que la región presenta una baja capacidad en I+D+i, lo que limita el impulso de la economía circular en la región, sobre todo al pensar en innovación orientada a soluciones para la industria. (CIRCULAC TEC, 2022)

Legitimidad de la actividad minera. Existe el acuerdo entre los participantes del estudio que la actividad minera en los tres países ha perdido legitimidad social, lo que se ha traducido en un incremento en la tensión entre la industria y la sociedad. En este sentido, se establece una relación paradójica entre la importancia económica que tiene la actividad para el crecimiento de los países y la valoración de esta por la sociedad. (CIRCULAC TEC, 2022)

Desarrollo de la industria local. La importancia de generar valor compartido con los territorios será fundamental como base para impulsar procesos mineros circulares. En este sentido, varios informes han puesto en valor la importancia de desarrollar el tejido productivo local, a lo que se denomina como proveedores mineros (Bamber & Fernandez-stark, 2021; Expande, 2019). Tal como se ha mencionado anteriormente, dichos proveedores tienen una doble importancia. Por una parte, contribuyen significativamente a las metas de reducción de emisiones para alcanzar las metas nacionales e industriales. Y, por otro, permiten fortalecer la legitimidad de la actividad minera a partir de estrategias de valor compartido que impulsen el desarrollo económico, social y medioambiental nacional. (CIRCULAC TEC, 2022)

La existencia de proyectos mineros que han sido diseñados sin la existencia de un marco de economía circular. Estos han debido incorporar nuevas exigencias sociales y medioambientales, como son el uso de energías renovables, la eficiencia hídrica y el cambio hacia el uso de agua de mar, además de mayores aportes al desarrollo local, entre otras que están en proceso de implementación. De esta forma, la economía circular resulta un nuevo vector para la industria. (CIRCULAC TEC, 2022)

El aseguramiento de la producción y resultados como orientación principal de las operaciones. Esto es resultado de las obligaciones que posee el sector privado en asegurar los retornos de inversión hacia los accionistas, como por la importancia que la minería representa para el PIB e ingresos fiscales de cada uno de los países (con especial relevancia para Chile y Perú). En este marco, cualquier potencial cambio busca ser implementado considerando un bajo riesgo para el proceso productivo. (CIRCULAC TEC, 2022)

Procesos productivos estandarizados con fuerte dependencia tecnológica internacional. Todo el proceso de producción, desde la exploración hasta la refinación, sigue procedimientos y tecnologías validados en la industria internacional. Por esta razón, cualquier modificación hacia la circularidad se focaliza primeramente en la gestión de los residuos masivos mineros e industriales mineros, sin asumir el rediseño de procesos productivos. Lo anterior no significa que la gestión de residuos carezca de importancia, sino todo lo contrario, debido a la envergadura del stock de pasivos ambientales existentes y a su potencial crecimiento en las próximas décadas. (CIRCULAC TEC, 2022)

Falta de incentivos legales. Existe consenso respecto de la necesidad de avanzar hacia marcos normativos que incentiven procesos de circularidad en la industria. Impulsar la transición y aceleración de la economía circular en la industria minera requerirá, en el mediano plazo, avanzar en marcos normativos que permitan implementar procesos de simbiosis intra e inter industrias. (CIRCULAC TEC, 2022)

Uso de residuos masivos mineros e industriales. Las actuales disposiciones legales no incentivan o incluso prohíben el uso de algunos residuos como relaves, rípios, barros, polvos y escorias como base

para otras industrias, tales como la construcción (COCHILCO, 2021a; UPME, 2019). Se suman a lo anterior todos aquellos residuos que no han sido abordados por las normas REP y respecto de los cuales no es clara la posibilidad de su utilización en otras actividades económicas. (CIRCULAC TEC, 2022)

Falta de vínculo industria-academia. Ambas partes poseen culturas y objetivos distintos al pensar en innovación, que son parte de sus historias institucionales. Desde el excesivo foco en publicaciones de investigación, hasta la búsqueda de resultados en el corto plazo, sin comprender que la ciencia de calidad toma tiempo, son expresiones de la divergencia de intereses que emergen en la relación industria-academia en el sector minero. (CIRCULAC TEC, 2022)

Aversión al riesgo de la industria. La naturaleza de la industria tiende a realizar una gestión de riesgos conservadora que limita las opciones de desarrollo de innovaciones locales. El *mindset* minero como concepto paraguas para explicar la toma de decisiones en la industria conduce a privilegiar la adquisición de tecnologías probadas en otros mercados, que coinciden con ser economías exportadoras tecnológicas. (CIRCULAC TEC, 2022)

Baja cooperación en la industria minera con otras industrias. La baja cooperación entre industrias se ve como una importante barrera para impulsar la circularidad. Los desafíos que plantea el cambio desde el modelo lineal hacia uno circular requieren priorizar la cooperación y la co-creación de soluciones. Las soluciones de circularidad requieren comprender y aplicar el concepto de simbiosis industrial. Si bien se reconocen las oportunidades del uso de los residuos mineros en diferentes industrias como construcción, plásticos, cementos, siderúrgica, entre otras, se advierten las dificultades de abordar de forma conjunta el desafío. (CIRCULAC TEC, 2022)

Debilidad de la cadena de proveedores locales circulares. Se reconoce que avanzar en economía circular y reducir los impactos ambientales de la industria requiere del desarrollo de recursos y capacidades en la cadena de proveedores locales que lleven a una transformación de sus modelos de negocios con base al esquema circular. La industria tiene el desafío de avanzar hacia la circularidad en una cadena de valor

que combina proveedores internacionales de gran tamaño, para los cuales la economía circular ya es parte de sus estrategias globales, como FLSmidth, Michelin, Komatsu, Sandvik o ENEL, con proveedores locales de distinto tipo, tamaño, capacidad financiera, competencias técnicas, entre otras, que deberán implementar modelos circulares a sus procesos y productos. (CIRCULAC TEC, 2022)

Falta de información. Uno de los aspectos transversalmente destacados es la falta, fragmentación y baja estandarización de la información para tomar decisiones a niveles sistémicos, interindustriales y organizacionales para impulsar los cambios requeridos hacia la circularidad. Si bien se logran identificar residuos con potencial de circularidad en la industria, no se conoce con precisión sus volúmenes (stock y flujos), estado y/o localización. Para avanzar en la economía circular es preciso realizar levantamientos de información permanentes que ayuden a dimensionar las oportunidades. Por ejemplo, en la actualidad existen informes parciales respecto de la cantidad de residuos masivos mineros (relaves, ripios, etc.), pero que no siguen una metodología estandarizada y, además, las fuentes de información son incompletas. En el caso de los residuos industriales la información es de difícil acceso, solo se puede obtener información que está en el marco de alguna ley o reglamentación, la cual queda rápidamente desactualizada. (CIRCULAC TEC, 2022)

Estudios técnicos. Junto con la información, la carencia de estudio técnicos y económicos respecto de la circularidad es un problema urgente. A diferencia de la disponibilidad de información, los estudios técnicos están referidos a aspectos específicos tales como ¿qué nivel de recuperación de aceros de neumáticos mineros pueden ser utilizados en la fabricación de bolas de molienda a nivel local?, ¿qué relaves presentan leyes costo efectivas para ser incorporadas en la fabricación de hormigones? En esto se reconoce un vacío que deberá abordarse en el corto plazo. (CIRCULAC TEC, 2022)

Valoración por la propia industria. Se requiere posicionar la importancia de la economía circular en los actores de la industria como un elemento de competitividad que está en el núcleo del negocio y no

solamente como un problema de tratamiento de residuos. La necesidad de avanzar colaborativamente en el posicionamiento de la EC requiere de un trabajo coordinado, que aún es incipiente, entre los gobiernos, la industria y la academia para generar lo que algunos denominan conciencia. Una parte significativa de las barreras pueden superarse mediante una comunicación efectiva y un posicionamiento que convoque a una misión compartida a nivel regional, nacional y subnacional, donde todos los actores están convocados a contribuir. (CIRCULAC TEC, 2022)

Superar estas barreras y desafíos progresivamente permitirá transformar la industria minera de una producción lineal a una producción circular en beneficio del ambiente, la sociedad y todos los actores involucrados directamente.

4.7. Tipos de minería y sus procesos productivos

Por la manera como se realiza la extracción solo existen dos formas para desarrollar la minería, la denominada minería a cielo abierto y la minería subterránea, a continuación, se hace una descripción breve de cada una:

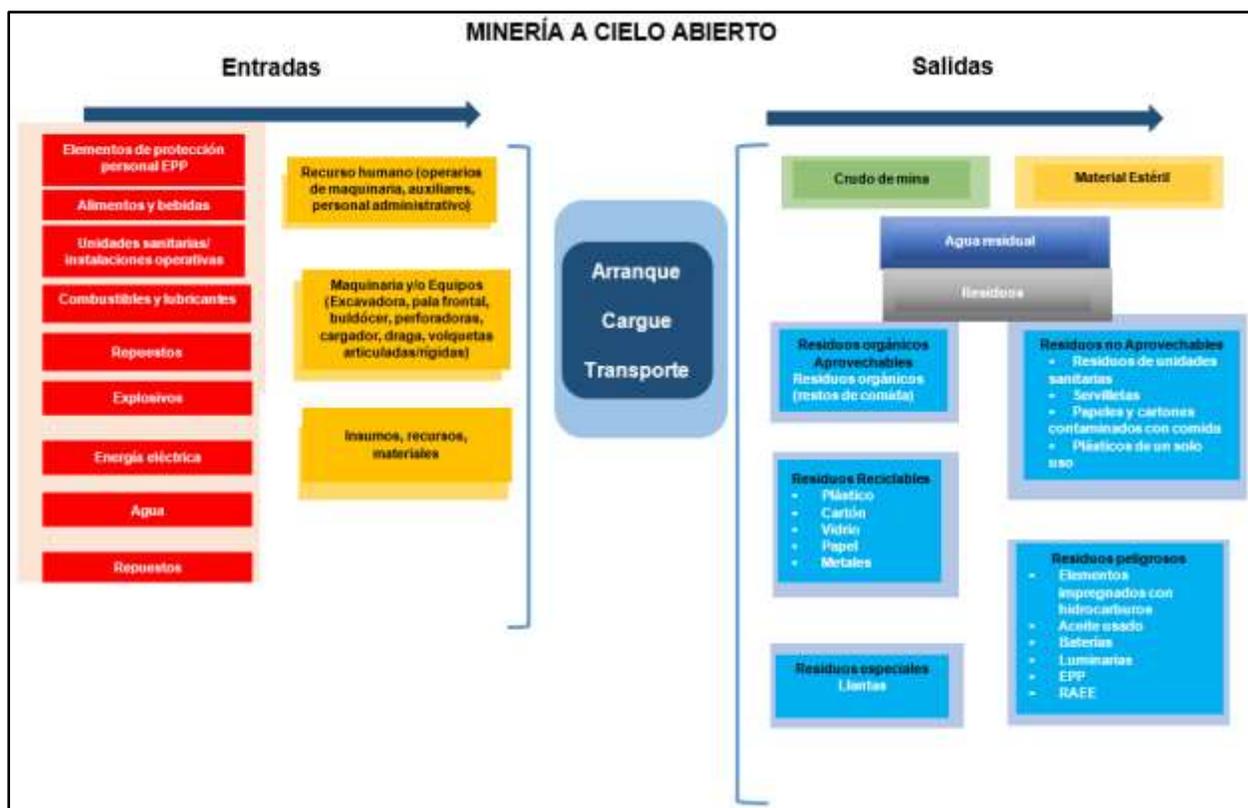
Minería a cielo abierto. Son las actividades y operaciones mineras que se realizan al aire libre, para sacar o extraer los minerales que se encuentran a poca profundidad o en la superficie. En Colombia, normalmente los minerales que se extraen a cielo abierto son materiales de construcción, oro, plata, caliza, dolomita, arcilla, grava, arena, mármol, feldespato, barita, talco, yeso, sal marina y terrestre, roca fosfórica, puzolanas, cobre y asociados, excepcionalmente hay yacimientos de carbón que en Colombia se explotan a cielo abierto. (ANM, 2015)

Minería subterránea. Son las actividades y operaciones mineras desarrolladas bajo tierra o subterráneamente. Los principales materiales extraídos en Colombia, bajo este método, son: piedras preciosas, níquel, carbón, esmeraldas y oro. (ANM, 2015)

Las figuras 3 y 4 presentan ejemplos de flujos aplicables a las principales actividades ejecutadas durante la extracción para cada uno de los dos métodos de explotación. (Minminas – ATG, 2020)

Figura 3

Flujos en un sistema de explotación a cielo abierto



Nota: Fuente (Minminas – ATG, 2020)

Figura 4

Flujo en un sistema de explotación subterránea



Nota: Fuente (Minminas – ATG, 2020)

De acuerdo a las imágenes, se tiene que de la cantidad de recursos que entran a una explotación minera a cielo abierto y subterránea dentro de sus procesos de arranque, carga y transporte, una parte es para el consumo humano en diferentes actividades como alimentación, vestido, aseo personal, entre otros. Otra parte es para el consumo de maquinaria y equipos en el uso de combustibles, lubricantes y repuestos. Finalmente, el consumo de agua, energía y explosivos se utilizan durante la cadena de valor. Cada uno de estos grupos genera unas salidas o desechos diferentes, que pueden ser clasificados para determinar el posterior uso o disposición final que se les debe dar.

Para el proceso de extracción es pertinente analizar cada una de las actividades desarrolladas e identificar los posibles cambios que podrían implementarse relacionados con la economía circular. Se deben determinar claramente los recursos que se utilizarán en cada una de las actividades de explotación (maquinaria y equipos), infraestructura de soporte minero (vías), insumos (elementos de voladura) y determinar si en cada actividad o proceso de la extracción es posible racionalizar el uso de los recursos requeridos.

4.8. Principales residuos generados por la actividad minera

Como ya se explicó anteriormente, la industria minera, como cualquier otra actividad industrial, requiere de insumos para poder desarrollar su proceso productivo, y como salidas de la operación y sus subprocesos, se generan diferentes tipos de residuos. El tratamiento de estos, y la reducción en el consumo de los insumos cobra su importancia en el medio ambiente y en la aplicación de los modelos de economía circular y sostenible.

Los grandes volúmenes de desechos mineros generados por los procesos mineros no pueden descartarse por completo, sino que deben gestionarse estratégicamente para satisfacer las demandas de prácticas ambientales cada vez más sostenibles y principalmente para mejorar el bienestar individual o comunitario. En algunos lugares, los peligros ambientales y los daños a las áreas circundantes podrían ser mucho más importantes que el sitio minero debido a diversos procesos y operaciones mineras. Por lo tanto, los estándares ambientales y de seguridad de la minería deben mantenerse continuamente. Por lo tanto, el tratamiento eficaz de los residuos mineros en los procesos mineros es muy crítico. Además, las estrategias de base tecnológica y la gestión de los residuos mineros deben estar dirigidas a la mitigación de los desafíos ambientales y relacionados con la salud de estos procesos mineros. (Thobeka, Joseph, Sphesihle, 2023)

Recuperación. La recuperación es un proceso de modificación o restauración del área minada después de las operaciones mineras. La rehabilitación medioambiental de los lugares afectados por la minería debería formar parte esencialmente de normas económicas y medioambientales. La rehabilitación ambiental debería poder restaurar las propiedades o perfiles del suelo alterados en estos sitios mineros, producir una calidad de agua que satisfaga las necesidades humanas y producir las características deseadas de la tierra a largo plazo. El proceso de rehabilitación incluye la minimización de la erosión del suelo, la generación de polvo, la contaminación del agua y otros factores diversos en estos sitios mineros. La tierra contaminada debido a la acumulación de sustancias de metales pesados en el suelo de los sitios mineros recuperados puede ingresar a la cadena alimentaria a través de las plantas de cultivo. Estos también pueden acumularse en el cuerpo humano mediante biomagnificación. Por lo tanto, las tierras contaminadas siguen siendo la mayor amenaza para la salud humana y los ecosistemas. La restauración de la vegetación y la reforestación aplicada en los desechos mineros o en el suelo minero de baja ley mitigarán la contaminación ambiental del suelo y preservarán la vida silvestre. Sin embargo, la aplicación de recuperación sigue sin ser plenamente apreciada ni implementada a nivel mundial en todas las empresas o industrias mineras, especialmente en los países subdesarrollados, porque requiere una gran cantidad de recursos. Realignar e implementar leyes y regulaciones mineras activas debería ser central para la gestión de la recuperación y la rehabilitación ambiental. (Thobeka, Joseph, Sphesihle, 2023)

Aguas residuales de mina. Las aguas residuales de las actividades mineras o de procesamiento de minerales son un recurso muy útil o valioso para superar la escasez de agua y las demandas de las actividades mineras. La naturaleza de las aguas residuales mineras, en particular su calidad y el nivel de contaminantes, puede ser muy variable debido a las diversas

operaciones y prácticas mineras adoptadas. La fuente de agua minera puede estar altamente contaminada debido a subproductos, metaloides, metales y otros contaminantes de las actividades mineras. La cantidad de contaminantes tóxicos puede tener diversos efectos sobre el medio ambiente y los seres humanos. Cada fuente de aguas residuales tendrá un nivel diferente de cantidad de contaminantes y naturaleza de los contaminantes. Una comprensión y una evaluación exhaustivas de cualquier reutilización o uso final del agua constituyen la parte más importante de la evaluación exhaustiva del análisis de la calidad del agua. Si no se tratan, los contaminantes de las aguas residuales de las minas pueden terminar en varios cuerpos de agua grandes, como represas, aguas subterráneas, ríos o arroyos. Incluso pueden dañar el medio ambiente y a los seres humanos en el entorno minero cercano. Las fuentes importantes de agua minera incluyen agua de procesamiento de minerales, agua alcalina, roca ácida o drenaje de mina y aguas residuales. Estadísticamente, el agua proveniente de las actividades mineras representa la proporción más significativa de las operaciones mineras. En la mayoría de los casos, estos pueden provenir de aguas residuales de minas a cielo abierto, aguas residuales de procesamiento de minerales y aguas residuales de diversas actividades de lavandería. (Thobeka, Joseph, Sphehile, 2023)

Drenajes ácidos en minas de carbón. El drenaje ácido de minas (AMD) se refiere a la salida de agua ácida de las minas de carbón o metales. AMD es el problema ambiental más importante en la mayoría de las operaciones mineras activas o abandonadas. Afecta a los ecosistemas acuáticos cuando los desechos mineros que contienen material sulfato, como pirita o sulfuro de hierro, se exponen al agua y al oxígeno. Se produce una solución de alta acidez en presencia de una alta concentración de metales pesados y sedimento o precipitado fino. Sin embargo, las fuentes de drenaje ácido de mina también pueden variar el color del corriente de agua debido a la ubicación afectada por la mina y al factor tiempo, es decir, agua de color naranja o rojo

dependiendo de la concentración de metales en el agua. El nivel de drenaje del agua de las minas de carbón está directamente relacionado con la presencia de aluminio, hierro, manganeso y otros contaminantes en diversas concentraciones. (Thobeka, Joseph, Sphesihle, 2023)

Los relaves. La reprocesamiento de minerales en relaves podría ofrecer diversos beneficios económicos y ambientales. Los relaves suelen contener muchos materiales de desecho de la extracción de minerales específicos y se producen más relaves en todo el mundo. Las características de los relaves en términos del nivel de contaminación y las cantidades de contaminantes dependen en gran medida del tipo de mineral procesado y de los procesos mineros utilizados. Los relaves pueden contener una alta concentración de elementos metálicos, sulfuros y óxidos, carbonatos, silicatos, fluidos de proceso y otros minerales. Por lo tanto, estos contaminantes tóxicos en los relaves producidos por las minas son una seria fuente de preocupación en los desechos mineros debido a los efectos tóxicos que pueden producir en el medio ambiente y la sociedad. Después del procesamiento, los relaves se descargan en el suelo, se bombean como lodo, se espesan como una pasta o para obtener una mayor densidad y se transportan a instalaciones de almacenamiento para su deposición. En las prácticas estándar, los relaves se almacenan en instalaciones de almacenamiento, como presas de relaves, subterráneos y ríos y, en algunos casos, se secan antes de descargarse finalmente. (Thobeka, Joseph, Sphesihle, 2023)

Residuos de rocas mineras. Los desechos mineros como las rocas estériles, son utilizados en los terraplenes de las carreteras, ya que presentan propiedades granulométricas aceptables. Sin embargo, existen posibilidades de lixiviación provocando contaminación del suelo. (Thobeka, Joseph, Sphesihle, 2023). Estos materiales también llegan a disponerse en grandes extensiones de terreno, lo que los inertiza para otra actividad económica.

Llantas. Las llantas usadas no son consideradas como un residuo peligroso; sin embargo, requieren ser devueltas a los productores mediante los mecanismos de recolección implementados, para favorecer principalmente el rencauche, el aprovechamiento y el reciclaje evitando que sean quemadas en espacios a cielo abierto y como combustible en actividades informales. (Minambiente, 2017)

4.9. Procesos susceptibles de implementación de prácticas para Reducir, Reusar y/o

Reciclar

Entendiendo que la minería es esencial para la vida, puesto que cotidianamente las personas en un 90% consumen elementos químicos y minerales que se extraen de la tierra, no es posible cesar esta actividad, pero si es posible transfórmala en una economía más sostenible con el planeta. Analizando entonces los insumos y residuos más comunes que se generan, se pueden proponer algunas estrategias para solucionar esos impactos, entre las cuales están: Uso de aguas recicladas. Una de las medidas para frenar el uso de agua es implementar el reciclaje de esta. Almacenando y tratando los recursos hídricos, para luego reusarlos en procesos industriales y domésticos. Cierre sostenible de minas. Se debe garantizar la recuperación y estabilización ambiental del área, y la regeneración del ecosistema. Optimización de recursos y energía. Implementando medidas y estrategias que respeten el medio ambiente y ayuden al ahorro de energía mediante las prácticas sustentables de uso de recursos renovables. Uso de la tecnología. La tecnología, en muchos casos, es capaz de reducir el impacto medioambiental de la actividad minera, ya que las tareas se podrían desarrollar de manera más eficiente. (SPT, 2022) Simbiosis industrial. Consistente en el intercambio beneficiosos entre industrias, donde el residuo de una, puede ser la materia prima de otra. (Anna Lluís – Alicia Martínez, 2022)

La Comisión Europea (2019) desarrollo orientaciones y promovio las mejores prácticas en materia de Planes de Gestión de Residuos Extractivos (EWMP por sus siglas en inglés), en el marco de su gestión ha definido las siguientes prácticas que se centran en la gestión de recursos aplicada en el sector extractivo que puede desempeñar un papel central en la economía circular y que tienen relevancia y aplicabilidad en el contexto colombiano. (Minminas – ATG, 2020)

Mejor práctica 1: Rompimiento eficaz de rocas. El aflojamiento de la roca se realiza tradicionalmente mediante excavadoras mecánicas o mediante perforación y voladura. Una selección óptima de revestimientos de pared mecanizados y de máquinas mineras depende de las condiciones geológicas y geotécnicas esperadas, lo que lleva a una extracción más específica y, como consecuencia, a la producción eficiente y la reducción de residuos. El mismo principio se aplica a la estrategia y técnica de voladura. (Minminas – ATG, 2020)

Mejor práctica 2: Transporte eficiente. La red de acceso y transporte de la mina y la elección de un equipo de transporte adecuado y la técnica es un problema de optimización multidimensional que debe tenerse en cuenta en la fase de diseño. Optimizando el camino (subterráneo o de superficie transporte, utilizando camiones o cintas transportadoras) por lo general conduce a uso eficiente de la energía, menos perturbación del entorno y en algunos casos reduce la cantidad de roca a excavar. (Minminas – ATG, 2020)

Mejor práctica 3: Clasificación efectiva de minerales y procesamiento selectivo de minerales. La separación de las fracciones de procesamiento maximiza la eficiencia del beneficio y puede, en algunos casos, reducir la nocividad de los residuos extractivos producidos. Una mejor separación in situ del mineral de los desechos de extracción significa ocasionalmente la prevención de generación de desechos y mejor gestión de residuos extractivos. (Minminas – ATG, 2020)

Mejor práctica 4: Uso efectivo de materiales excavados. Relleno de huecos de excavación con material excavado. La devolución de materiales extraídos en huecos de excavación se presenta como la mejor práctica ya que contribuye a la prevención y / o reducción de la generación de residuos extractivos.

Minerales de construcción como materiales comercializables a partir de desechos de extracción. La sobrecarga y la roca estéril pueden recuperarse para la producción de agregados y dar lugar a una reducción de los volúmenes de residuos extractivos. (Minminas – ATG, 2020)

Mejor práctica 5: Gestión eficaz de la capa superficial del suelo. Volver a colocar la capa superior del suelo después del cierre del proyecto, si esto no es factible, reutilizar la capa superior del suelo en otro lugar (por ejemplo, con fines de jardinería y revegetación) fortalece la aplicación de los principios de la Economía Circular. (Minminas – ATG, 2020)

Mejor práctica 6: Planificación y gestión de la eliminación para más adelante recuperación. Residuos de escaso valor originalmente, se someten a procesos de recuperación en para obtener productos totalmente calificados. (Minminas – ATG, 2020)

La tabla 1 muestra un listado general de las posibles medidas de reducción, reúso y reciclaje que se pueden implementar en la etapa de explotación, indicando el tipo de flujo al cual pertenece. (Minminas – ATG, 2020)

Tabla 1*Tipos de medidas a implementar en la etapa de explotación*

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Reducción de pérdidas de mineral	Flujo de residuos
	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo	Flujo de energía/ residuos/agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso	Flujo de energía/ residuos/agua
	Aprovechamiento de minerales de los estériles	Flujo de residuos
	Uso de desmonte y descapote para reconfiguración morfológica	Flujo de residuos
Reúso	Uso de capa orgánica (tierra negra) para reconfiguración morfológica	Flujo de residuos
	Uso de estériles para vías	Flujo de residuos
	Uso de estériles como material de relleno en labores subterráneas abandonadas	Flujo de residuos
	Uso de estériles para Reconfiguración morfológica	Flujo de residuos
	Uso de agua recirculada para el riego de vías	Flujo de agua
	Reúso de agua residual tratada	Flujo de agua
	Recirculación de agua para lavado de material	Flujo de agua
	Compostaje de residuos orgánicos	Flujo de residuos
	Uso de suelos	Flujo de residuos
	Reciclaje de residuos convencionales (plástico, papel, cartón)	Flujo de residuos
Reciclaje	Reciclaje de residuos del proyecto minero (llantas usadas, chatarra de hierro)	Flujo de residuos
	Residuos de minerales en estériles / botaderos/ ZODMES/ presas de relave/ colas de beneficio como materia prima para otros procesos	Flujo de residuos
	Uso de estériles como materiales de construcción (baldosas, ladrillos, estuco para fachaletas)	Flujo de residuos

En la tabla 1 se hace una descripción de cada uno de las actividades llevadas a cabo en un proceso de extracción de minerales, estos incluyen los flujos descritos en las figuras 3 y 4. Este análisis sirve de referencia para establecer el tipo de medida a aplicar en una clasificación de

residuos para su reusó o disposición final. Se tiene por ejemplo como los residuos convencionales como plástico, cartón y papel provenientes del consumo humano, se pueden disponer para el reciclaje. Otro ejemplo es la aplicación de medidas de reducción al emplear maquinarias o equipos con tecnologías más eficientes en consumo de agua y energía.

El tratamiento de las aguas residuales. Consiste en poner en marcha procesos físicos, químicos o biológicos para poder eliminar los contaminantes físicos, biológicos o químicos de las aguas residuales, con el fin de producir efluentes no dañinos, que se puedan reutilizar; también se produce un residuo biosólido o fango que luego también se reutiliza. Al tratamiento de las aguas residuales también se le conoce como depuración de aguas residuales. No existe un único procedimiento, para la depuración de las aguas residuales de la actividad minera, por la amplia diversificación en la composición de las aguas residuales de esta actividad. En la actualidad hay una serie de métodos, procesos, tecnologías, para el tratamiento de aguas residuales, los cuales con el pasar del tiempo van actualizándose, modernizándose y haciéndose cada vez más eficientes y eficaces. Las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales en minería, pueden ser tecnologías de tratamiento activo y tecnologías de tratamiento pasivo; también se clasifican en tratamientos previo, secundario y terciario, otros las clasifican como tecnologías biológicas, químicas y físicas.

Una empresa minera de acuerdo a las características de su efluente líquido puede necesitar no solo un proceso de depuración sino varios o combinaciones de las tecnologías de las que ahora se dispone para retirar los contaminantes del agua que produce su actividad. (Spena group, 2016).

4.10. El futuro de la minería

La minería evoluciona según las necesidades de la sociedad de su tiempo, por eso actualmente las compañías mineras se están adaptando a la llamada Minería Verde. La aceleración de la transición energética ha impulsado a muchas empresas a ir más allá y apuntar hacia la Minería Sostenible, que no solo contribuye a la descarbonización, si no que va más allá e introduce procedimientos para tener un impacto social positivo (Zabala innovation, 2023). Esta transformación en los últimos años, se ha impulsado a través de una industria 4.0, con la implementación de nuevas tecnologías como la automatización y la robótica, la inteligencia artificial, Internet de las Cosas, sensores especialmente diseñados para este sector, el uso de drones, gemelos digitales y realidad virtual, además, del aprovechamiento de los huecos mineros para almacenamiento y transmisión de energía. (MAPFRE global risks,2024)

Ángel Cámara Rascón, Doctor Ingeniero de Minas y Catedrático del Departamento de Energía y Combustibles de la Escuela Técnica Superior de Minas y Energía de la UPM, asegura que “la nueva minería está inmersa en la búsqueda continua de soluciones para desarrollar yacimientos cada vez más complejos, profundos y con leyes de mineral más bajas”. Asegura el experto que la mayoría de los procesos serán automatizados o remotos, “con menores consumos energéticos e hídricos, con un impacto ambiental cada vez menor y con una utilización progresiva de energías limpias”, mediante equipos accionados por baterías eléctricas y con todos sus procesos optimizados o el análisis de datos obtenidos y transmitidos en tiempo real con términos sinónimos para la gran mayoría de las instalaciones industriales. (MAPFRE global risks,2024)

5. Metodología

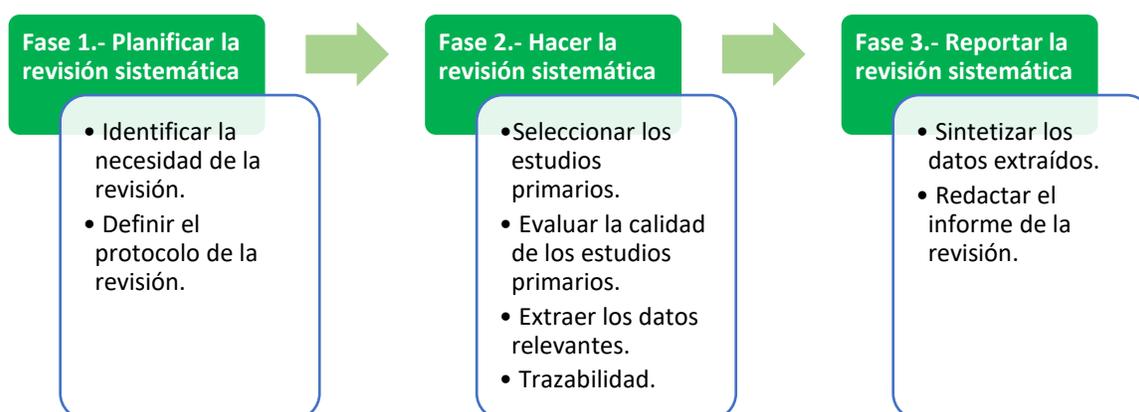
5.1. Metodología individual

El proyecto de grado se desarrolló en la modalidad de seminario alemán, con alternancia entre trabajo colaborativo y trabajo individual. Se seleccionaron casos a analizar de acuerdo a los criterios de economía circular que se hayan aplicado en minería, considerando los más representativos, o que por su facilidad de implementación son más replicados en la industria. Finalmente, se estableció unos criterios de factibilidad para su implementación en otros modelos de negocio del mismo sector.

Para identificar los casos de aplicación de los conceptos de economía circular aplicados en el sector productivo de la minería, se implementó una metodología de investigación documental apoyada en textos de diferentes especies, tal y como propone Garcia et al. (2021), en el seminario titulado “Técnicas para llevar a cabo mapeos y revisiones sistemáticas de la literatura”.

Figura 5

Fases de la SLR



Nota: Fuente (Garcia et al, 2021)

La revisión sistemática de la literatura se desarrolló por fases: Inicialmente consultando documentos con un soporte científico investigativo, posteriormente se consultaron artículos y ensayos de revistas o periódicos que abordaban el tema de interés, para finalizar con revisión de archivos, circulares, expedientes y páginas web generadas por las mismas empresas o terceros como presentación de sus trabajos (figura 5).

Los documentos y/o artículos seleccionados se estructuraron considerando datos relevantes, siguiendo los criterios de tipo de minería y modelo de economía circular aplicada, además se incluirá una descripción general, lugar de aplicación respecto a la cadena de valor de la actividad minera, beneficios generados y país del estudio.

Finalmente, con un análisis multicriterio se pudo determinar su grado de factibilidad de aplicación en otros tipos y tamaños de minería como propone Grajales-Quintero et al. (2013) (figura 6).

Figura 6

Etapas del análisis multicriterio



Nota: Fuente Grajales -Quintero et al, 2013)

1. Definición y estructuración del problema. Es definido por el escenario de evaluación, la disponibilidad de información y los posibles conflictos entre diversos intereses de cada actor involucrado.

2. Descripción de alternativas potenciales. Considera las posibles situaciones o escenarios de evaluación, es decir, son los elementos sobre los cuales se decide.

3. Elección de conjuntos de criterios de evaluación. Los criterios deben cumplir con dos cualidades: ser legible (número de criterios suficientes para soportar un procedimiento de agregación) y ser operativo (abarcar los múltiples intereses de todos los actores claves).

4. Identificación de un sistema de preferencia para la toma de decisiones y elección de un procedimiento de agregación. Busca la asignación de peso, resaltando la importancia relativa de los diferentes criterios de evaluación.

5.2. Población

Para definir la población objeto del proyecto se tuvo en cuenta unos criterios que permitían dar cumplimiento a los objetivos propuestos. El primero de ellos un criterio técnico: definido por el tipo de minería y enfocado en el proceso extractivo de las materias primas, de esta manera se descartó el proceso de beneficio y transformación que también hace parte de la cadena productiva. El segundo criterio debía considerar solo los modelos que aplicaran temas de economía circular en el proceso, entendiéndose unas medidas de reusó y reciclaje. Finalmente se tuvo en cuenta un criterio tecnológico, comprendiendo que alrededor del mundo existes países más desarrollados en términos de I+D+i, por tanto, se podrían consultar industrias mineras a nivel global.

5.3. Muestra

El marco teórico permitió identificar cuatro áreas representativas, en la que por su facilidad de implementación son las más replicadas en la industria minería, obteniendo de estos resultados significativos en la implementación de procesos de económica circular. Por tanto, los casos de estudio solo debían considerar reciclaje de llantas o residuos industriales, reutilización del agua, tratamiento de relaves y residuos orgánicos, en la etapa de explotación de los proyectos.

5.4. Limitaciones

Se encontraron limitaciones por acceso a información detallada, ya que las empresas en algunos casos, no profundizan en la manera como aplican sus procesos cuando son de desarrollo propio. También existen empresas que, aunque aplican modelos de reciclaje o reusó de residuos, no cuentan con páginas web o documentos que amplíen su información.

Solo las empresas más grandes y con considerables ingresos, son las que publican e implementan modelos de economía circular.

6. Casos de estudio

6.1. Caso 1. Minería verde, el proyecto de China para despedirse del carbón

- **Tipo de minería:** Subterránea
- **Modelo de economía circular:** Reciclaje
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reutilización de recursos.
- **País:** China

Descripción general: En aras de mantener una explotación sostenible a largo plazo, la principal compañía minera de Datong comenzó en 2003 la construcción del parque industrial de Tashan, en funcionamiento desde 2009 y que opera bajo el lema de "carbón negro, minería verde".

Con una inversión estimada de 3.034 millones de yuanes (440,9 millones de dólares o 388,6 millones de euros), el primer complejo de "minas verdes" de China reúne una veintena de proyectos, que van desde la propia explotación del carbón hasta su reutilización para la producción de químicos, electricidad o cemento, entre otros. En este sentido, el parque aprovecha los desechos producidos por la mina, tales como CO₂, agua contaminada o el propio calor desperdiciado, para ser utilizados por el resto de iniciativas del complejo, en una suerte de economía circular.

El propio reciclaje del agua contaminada es uno de los elementos más novedosos: un circuito cerrado purifica el 100% del agua de la mina, que es reutilizada para regar las zonas verdes del parque, enfriar los hornos o insertarse en el resto de procesos industriales. Asimismo, la mina ha cambiado la explotación a cielo abierto tradicional por la extracción subterránea con vehículos, de forma que el número de accidentes se ha reducido extremadamente, señala Ge Lilong, uno de los encargados de la seguridad del parque. "En las anteriores minas de carbón hacíamos prácticamente todo con las manos y había muchas más cosas de las que preocuparse, pero aquí el proceso está mucho más mecanizado", indica.

Dicho soterramiento revierte a su vez en una emisión de gases contaminantes mucho menor, una cualidad que mejora la calidad del aire y convierte a Tashan en la planta más completa de la provincia, no ofrecen datos precisos sobre el volumen de emisiones del complejo. De lo que

sí hay números, es de los 23 millones de toneladas de carbón que se extraen cada año de la mina, después de reducir un 15 % su capacidad en 2016 para cumplir con las nuevas regulaciones del Gobierno. (El economista.es, 2018)

6.2. Caso 2. Mina de diamantes Diavik

- **Tipo de minería:** Cielo abierto.
- **Modelo de economía circular:** Energías alternativas.
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Uso de energías renovables, reducción de emisiones.
- **País:** Canadá

Descripción general: Un ejemplo destacado del uso de energía con bajas emisiones de carbono en la minería es la mina de diamantes Diavik de Rio Tinto en los Territorios del Noroeste de Canadá. La mina cuenta con un parque eólico de 9,2 MW que compensa el uso de diésel y al mismo tiempo ahorra millones de dólares en costos de combustible.

6.3. Caso 3. División el teniente

- **Tipo de minería:** Subterránea
- **Modelo de economía circular:** Simbiosis industrial para el reciclaje de acero, ropa usada y neumáticos.
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reducción de energía, agua y emisiones de CO₂.

- **País:** Chile

Descripción general: El teniente es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta. Está ubicado en la comuna de Machalí, región del Libertador General Bernardo O'Higgins, a 50 kilómetros de la ciudad de Rancagua. Comenzó a ser explotada en 1905 y ya cuenta con más de 4.500 kilómetros de galerías subterráneas. La mina es operada por la estatal CODELCO una empresa autónoma propiedad de la República de Chile.

La División El teniente de Codelco creó en el año 2022 la Unidad de Economía Circular, con el objetivo de valorizar residuos a través de innovación y desarrollo de tecnologías en sus operaciones. La División se fijó como meta valorizar el 65% de sus residuos industriales al año 2030. Considerando la importancia que tiene cuidar el medio ambiente y generar prácticas de sostenibilidad, actualmente se desarrollan en la mina, tres proyectos de manejo de residuos sólidos que están generando un impacto positivo la reducción del consumo de energía, agua y emisiones de CO₂. (País circular, 2023)

Acero vuelve al acero

Uno de los aliados de la minera estatal en esta tarea ha sido Aceros AZA, empresa que desde 1953 se dedica a la fabricación de acero a partir del reciclaje de chatarra ferrosa y que, en marzo, entregó a División El Teniente su Declaración de Valor Circular. De este modo, la acerera verde reconoció a la minera por su contribución a la reducción del consumo de energía, agua y emisiones de CO₂ gracias a las más de 60 mil toneladas de chatarra ferrosa que han reciclado. La sinergia entre ambas empresas permite que la circularidad no se quede solo en el reciclaje, sino que, además, con la materia prima secundaria se fabrican pernos de fijación que vuelven a las operaciones de la cuprífera de la región de O'Higgins.

Juan Greibe Kohn, gerente de Compras Metálicas de Aceros AZA, detalla que a través del área que lidera se ha implementado un eficiente y directo sistema para el retiro y disposición final de grandes volúmenes de residuos de chatarra ferrosa y no ferrosa de la industria minera, tales como bolas de molienda, estructuras metálicas, maquinarias, palas, tolvas, cables de pala, despuntes, entre otros. “El acero es un material 100% circular, ya que se puede reciclar eternamente sin perder sus cualidades. Es por lo anterior que la empresa tiene la premisa ‘acero vuelve acero’. La compañía consume cerca de 600 mil toneladas de chatarra ferrosa al año. Con esto, es capaz de producir hasta 520 mil toneladas de acero en el mismo periodo.

Metálicas de Aceros AZA indica que desde el año 2019 han recolectado más de un millón de toneladas de chatarra, de las que 75 mil han sido directamente recogidas desde faenas mineras operadas por AZA. Además, gracias al uso de energía renovable y otras tecnologías, la huella de carbono de Aceros AZA es de 0,22 toneladas de CO₂ por tonelada de acero producido, una de las más bajas de la industria siderúrgica mundial. (País circular, 2023)

Ropa minera

Otro residuo voluminoso, y quizá menos conocido en el ámbito minero, son los textiles, que también pueden ser parte de la economía circular. Por ejemplo, la Minera Antucoya, de Antofagasta Minerals, comenzó este año la iniciativa “Antucoya por una tonelada de ropa”, que permitirá reciclar mil kilos de prendas de vestir en desuso de trabajadores de las faenas. El proyecto lo realizan junto a Ecocitex, cuya fundadora, Rosario Hevia, detalla la modalidad de trabajo.

En junio, la minera ya llevaba más de 600 kilos de ropa recolectados desde las faenas, y durante octubre serán recibidas por Ecocitex para clasificar las prendas y procesarlas. Hevia explica que Antucoya ya adquirió 1.500 frazadas de 1.4 kilos y 1.500 pieceras de 1 kilo. En el caso de las frazadas, serán para los campamentos mineros, mientras que las pieceras fueron usadas como regalos corporativos personalizados.

Si la ropa está en buen estado, se convierte en otros productos, como estuches y morrales, entre otros. Si el textil está percutido y es estirable es convertido en hilado, y si está en mal estado, pero no es estirable y no se puede convertir en hilado, se transforma en relleno para otro tipo de productos. Garantizando que todo el textil que se recibe, tendrá algún uso para lograr el formato de economía circular. (País circular, 2023)

Combustible de neumáticos

Los neumáticos de la gran minería no son un asunto menor. Tienen diferentes tamaños y algunos pueden superar los 4 metros de diámetro, por lo que cuando su vida útil acaba, termina en escombreras, generando un pasivo ambiental de grandes proporciones. En la actualidad estos neumáticos fuera de uso (NFU) pueden ser transformados gracias a un proceso llamado pirólisis. Tras el proceso de pirólisis, de los neumáticos se obtiene AANFU oil, acero y carbón black. Adicionalmente, en el procesamiento se genera un gas pirolítico que se utiliza como combustible para autoabastecimiento energético de la planta de transformación. (País circular, 2023)

6.4. Caso 4. Codelco, Antofagasta Minerals y Collahuasi.

- **Tipo de minería:** Cielo abierto.
- **Modelo de economía circular:** Energías alternativas
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reducción de energía y emisiones de CO₂.
- **País:** Chile

Descripción general: No son pocas las empresas mineras que han incursionado en el uso de energía solar para sus procesos, ya sea a través de plantas fotovoltaicas o de generación

termosolar, sobre las cuales hacen un positivo balance. Reducción de costos asociados al consumo energético, estabilidad de precios futuros de la energía, disminución de quema de combustibles fósiles directos, con una consecuente menor huella de carbono, son parte de los beneficios que expertos y compañías destacan de la incorporación de esta fuente alternativa en la matriz energética. Una planta solar térmica de 1.000 m² de área colectora ubicada en el desierto de Atacama, reduce en 300 toneladas las emisiones anuales de CO₂ y evita el consumo de 165 m³ de diésel al año.

División Gabriela Mistral, Codelco

Uno de los casos destacados en la incursión en fuentes alternativas de energía por parte de la minería, es la planta Pampa Elvira Solar (PES) de la División Gabriela Mistral de Codelco. Ésta es la instalación termosolar más grande del mundo, con 2.952 paneles solares de 15 m² cada uno y 3.500 metros de ductos, que le permiten generar calor por radiación por unos 56.000 MWh t anual.

Su principio de funcionamiento se basa en la captación de radiación solar a través de paneles que calientan una mezcla de agua y anticongelante, la cual se transforma en energía térmica (calor) que se inyecta al electrolito de la planta de electroobtención (EW). El balance de la planta es positivo, ya que ha permitido a la División tener un suministro de agua caliente seguro y confiable para el calentamiento del electrolito en el proceso de la planta EW, usando energía renovable en un 80% de su consumo y, a la vez, disminuyendo a sólo un 20% la utilización de diésel en este proceso.

Con un costo de inversión que bordeó los US\$33 millones, en Codelco destacan como beneficios asociados a la utilización de esta planta termosolar que al año la División deja de emitir 15.000 toneladas de CO₂, minimizando la contaminación asociada a la quema de combustibles fósiles, ahorrando al país aproximadamente un camión de diésel al día. (Codelco, 2023)

Minera Centinela, Antofagasta Minerals

Integrada al proceso de producción de cátodos de Minera Centinela, la planta termosolar de esta compañía perteneciente al grupo Antofagasta Minerals, inició su operación en noviembre de 2012.

La instalación, que utiliza la tecnología de concentradores cilindro-parabólicos con 1.280 unidades de módulos conectores, alcanza una producción anual de 25 GWh t. Además, cuenta con almacenamiento térmico de 300 m³; todo ello en una superficie total del terreno que alcanza las 5,5 hectáreas.

Para Minera Centinela utilizar esta tecnología ha significado en términos económicos un ahorro de entre US\$2.000.000 y US\$3.000.000 al año, sustituyendo aproximadamente el 55% del diésel utilizado en los calentadores que forman parte del proceso productivo de la compañía. (Antofagasta Minerals, 2023)

Minera Collahuasi

Construido por la empresa Solarpack, el complejo fotovoltaico Pozo Almonte Solar, que está en funcionamiento comercial desde principios de 2014, se compone de dos plantas: Pozo Almonte 2 y Pozo Almonte 3, las cuales cuentan con una potencia nominal combinada de 23,5 MW.

la energía generada por la planta es suministrada a Minera Collahuasi mediante un contrato PPA por 60.000 MWh/año, lo que supone un 13% del consumo de la mina. Esta generación con energía renovable, que equivale al consumo anual de 25.000 hogares, evita la emisión a la atmósfera de 50.000 toneladas de CO₂ cada año”. (Minera Collahuasi, 2023)

6.5. Caso 5. Mina Morro Agudo

- **Tipo de minería:** Subterránea.
- **Modelo de economía circular:** Transformación de relaves.
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reusó de materia primas.
- **País:** Brasil.

Descripción general: Ubicada en el estado de Minas Gerais, es una mina subterránea polimetálica. Sus operaciones comenzaron en 1988, y en 2021 produjo aproximadamente 17.3 mil toneladas de zinc y 4.7 mil toneladas de plomo. Es Propiedad de Nexa Resources en Brasil y es considerada como el mayor caso de éxito al ser “residuo cero”. la MINA MORRO AGUDO es una mina 100% sin residuos en la región de Paracatu en Brasil, que transforma los residuos de sus relaves para crear el Zincal 200, un insumo que posteriormente es utilizado para el control de la acidez de los suelos en territorios utilizados para la agricultura local. (Emilio Gómez de la Torre, 2022).

6.6. Caso 6. Compañía Minera Antamina

- **Tipo de minería:** Cielo abierto.
- **Modelo de economía circular:** Reciclaje de aceites.
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reusó de materia primas.
- **País:** Perú.

Descripción general: La mina está ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huari en la Región Ancash, a 200 km. de la ciudad de Huaraz y a una altitud promedio de 4,300 msnm. En la actualidad es uno de los mayores productores peruanos de concentrados de cobre y zinc y una de las diez minas más grandes del mundo en términos de volumen de producción. Antamina es una de las operaciones con menos conflictos sociales, esta operación está movilizand recursos para la construcción de obras de infraestructura de riego, con un portafolio de 56 proyectos para la agricultura.

Como referente en la gestión sostenible de sus operaciones, viene desde el 2018 reutilizando el aceite de los camiones de acarreo. El aceite es reutilizado como insumo en el proceso de voladura completando el ciclo circular del aceite utilizado, reduciendo significativamente los costos de ese proceso y disminuyendo el impacto ambiental. (El comercio, 2020).

6.7. Caso 7. Cemex - cementera

- **Tipo de minería:** Cielo abierto.
- **Modelo de economía circular:** Reciclaje y Reúsos.
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reusó de materia primas y reciclaje.
- **País:** México.

Descripción general: CEMEX, S.A.B. de C.V. (“CEMEX”) lanza en el año 2023 en la republica de México la filial Regenera, un negocio que ofrece soluciones de circularidad, incluyendo la recepción, gestión, reciclaje y coprocesamiento de residuos. Regenera aprovecha la presencia global de CEMEX y la capacidad de sus procesos de producción para consumir desechos no reciclables y subproductos industriales como sustitutos más sostenibles de combustibles fósiles y materias primas naturales.

El objetivo de Regenera es atender a una diversa base de clientes que incluye empresas industriales, manufactureras y de recolección de desperdicios; ONGs y autoridades gubernamentales. Regenera ofrece soluciones sostenibles para tres flujos de residuos principales: residuos municipales e industriales; residuos de construcción, demolición y excavación; y subproductos industriales. Regenera tiene presencia en las cuatro regiones de CEMEX: México; Estados Unidos; Europa, Medio Oriente, África y Asia; y América del Sur, Central y el Caribe. Regenera trabaja con el Gobierno de la Ciudad de México en su “Plan de Acción Basura Cero”, convirtiendo los desechos de la metrópoli en combustible, lo que reduce la cantidad de residuos enviados a rellenos sanitarios. En Querétaro, Regenera procesa más del 80% de los residuos

sólidos que se generan en la ciudad. En Colombia, Regenera firmó un acuerdo para trabajar con Tetrapak, compañía líder a nivel global en soluciones de procesamiento y envasado de alimentos. Regenera recibirá y separará cartones multicapa y devolverá a Tetrapak los que puedan reusarse o reciclarse. Además, a través del reciente lanzamiento de su centro de circularidad en Bogotá, Regenera recolectó más de 1.5 millones de metros cúbicos de residuos de construcción, demolición y excavación para producir agregados reciclados. (Cemex, 2023)

6.8. Caso 8. DRUMMOND LTD. en el cesar opera una planta de procesamiento de llantas residuales.

- **Tipo de minería:** Cielo abierto.
- **Modelo de economía circular:** Reciclaje de neumáticos.
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reusó de materia primas como caucho y acero.
- **País:** Colombia.

Descripción general: Con el objetivo de promover y fortalecer el modelo de Economía Circular, hacer minería ambientalmente sostenible, y generar un impacto positivo en sus comunidades de influencia, Drummond Ltd. aprovecha los residuos generados en sus operaciones. Dentro de sus instalaciones en el Cesar se encuentra una planta de procesamiento de llantas residuales, operada por la empresa contratista Duramos SAS, quienes desde hace 16 años se han especializado en el manejo de productos reciclables del sector minero.

Drummond contrató los servicios de Duramos SAS con el fin de realizar una adecuada disposición final de las llantas, aprovechando cada subproducto de acuerdo a los lineamientos de la legislación ambiental colombiana. La planta, que inició operaciones en el mes de diciembre del 2020, genera 31 empleos directos y aproximadamente 89 indirectos. El 94% de su personal pertenece a la zona de influencia de Drummond Ltd., lo que resalta el compromiso de la compañía con sus comunidades.

El proceso de reciclaje de llantas tiene dos etapas fundamentales. En la primera, las llantas pasan por un raspado que disminuye su tamaño. Luego, otra máquina extrae su vena de acero y, posteriormente, el caucho se sigue cortando en trozos cada vez más pequeños.

En la segunda etapa, una vez cumplidos los pasos anteriores, los pedazos de caucho pasan por un proceso de triturado por dos máquinas diferentes, hasta que se vuelven pequeños gránulos o tiras de caucho. El producto que se obtiene de los neumáticos reciclados se convierte en materia prima (caucho y acero), que puede ser reutilizado en otras industrias y presentar grandes beneficios al medio ambiente.

Algunos productos fabricados con neumáticos reciclados incluyen asfalto modificado, pisos, pistas deportivas, césped de juegos, canchas sintéticas, entre otros.

Duramos SAS cuenta con permisos ambientales y tecnología de la empresa estadounidense ECO Green Equipment: la ECO Razor, la ECO Extractor y la ECO Shear. Esto le permite reciclar los neumáticos más grandes del mundo. La planta está preparada para procesar y triturar llantas OTR mineras hasta Rin 63 y llantas de camionetas, automóviles y motos. Con el aprovechamiento de las llantas fuera de uso, Drummond Ltd. le apunta a seguir promoviendo la Economía Circular

en su operación, protegiendo el medio ambiente, dando prioridad al desarrollo de actividades sostenibles. (DRUMMOND LTD, 2022)

6.9. Caso 9. Sumicol - Corona

- Tipo de minería: Cielo abierto.
- Modelo de economía circular: Reciclaje.
- Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor: Extracción.
- Beneficios generados: Reducción de uso de materia primas.
- País: Colombia.

Descripción general: Sumicol S.A.S. es la empresa de la organización Corona que desarrolla soluciones innovadoras para la industria a través de la transformación de minerales no metálicos, el beneficio y procesamiento de materiales y la fabricación de partes o moldes para la conformación de piezas de varios sectores industriales. En materia ambiental la organización viene fortaleciendo el frente de economía circular. Se realizó un proceso de simbiosis industrial con una empresa del sector de la construcción cercana al parque industrial de Corona en Girardota, Antioquia. El proceso consiste en sustituir materia prima virgen (arcillas) en el proceso de preparación de pasta de la operación de pisos y paredes, con residuos (lodos) generados en el proceso productivo de agregados para la construcción. En la fase de análisis de laboratorio y pruebas industriales se obtuvieron excelentes resultados, por lo cual durante el 2022 se aprovecharán aproximadamente 400 toneladas al mes de este material como parte de la materia prima necesaria para el proceso. Con esta iniciativa se estiman ahorros económicos de

aproximadamente 20 millones de pesos mensuales y la reducción de tiempos y costos de distribución en el transporte de insumos.

6.10. Caso 10. Cementos argos.

- **Tipo de minería:** Cielo abierto.
- **Modelo de economía circular:** Simbiosis industrial. Reciclaje y reutilización.
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reusó de residuos.
- **País:** Colombia.

Descripción general: Cementos Argos es una multinacional cementera y concretera número uno en Colombia y una de las más relevantes del sector en el Caribe y Centroamérica. Se ha enfocado en la implementación de acciones de prevención, reducción, reutilización y reciclaje de sus residuos para dar cumplimiento al marco normativo en cada una de las regiones donde opera. Se resaltan acciones como: Acuerdos posconsumo: entrega al proveedor de residuos de aparatos eléctricos, electrónicos, luminarias y baterías de plomo ácido, compostaje de residuos orgánicos de servicios de alimentación, venta de residuos de chatarra metálica para ser reincorporada en otros procesos productivos, donación de residuos de cemento y concreto a las comunidades para mejoramiento de infraestructuras. 56% de los residuos generados fueron reciclados, reutilizados y recuperados a los proveedores.

6.11. Caso 11. Paz del Río extracción de hierro

- **Tipo de minería:** Subterránea.
- **Modelo de economía circular:** Reciclaje y tratamiento.
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reciclaje de residuos y tratamiento de agua.
- **País:** Colombia.

Descripción general: Acerías Paz del Río es la primera y única siderúrgica integrada del país, empresa encargada de la extracción de hierro, tiene operaciones de explotación de este mineral en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca. Dentro de las operaciones mineras se cuenta con un completo sistema de monitoreo y tratamiento de agua, que garantiza la no alteración de las fuentes hídricas receptoras y el no realizar aportes que conlleven la contaminación del recurso. En la mina El Santuario se cuenta con 4 plantas para el tratamiento de los vertimientos: la planta de tratamiento de agua residual doméstica (PTARD), la cual trata las aguas provenientes del área de oficinas de Paz del Río; los otros 3 sistemas son plantas de tratamiento de agua residual no doméstica (PTARNd), las cuales hacen parte del manejo de aguas provenientes de las diferentes áreas del proyecto minero.

Los residuos que se originan en la operación son clasificados como residuos ordinarios reciclables (papel, plástico, vidrio y cartón) y residuos peligrosos. Los residuos peligrosos (RESPEL) se originan en las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo, mientras que los residuos convencionales se originan por el funcionamiento de las áreas administrativas y de apoyo en la operación. Los residuos ordinarios para reciclaje se disponen que sean recolectados

por la empresa de servicios públicos del municipio donde se lleve a cabo la operación, y los residuos peligrosos son entregados a empresas especializadas en el tratamiento y disposición final de los RESPEL. (Paz del rio, 2023)

6.12. Caso 12. Ladrillera Santa Fe

- **Tipo de minería:** Cielo abierto.
- **Modelo de economía circular:** Reciclaje y tratamiento.
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reducción del consumo de agua, energía y emisiones.
- **País:** Colombia.

Descripción general: Ladrillera Santafé es una empresa colombiana de fabricación de productos derivados de la explotación de la arcilla roja, reconocida por su alta calidad, productividad, compromiso con el medio ambiente. Dentro de su compromiso de reducción de la huella de carbono, en los cuales tienen resultados de 0.14 toneladas de CO₂ por cada tonelada producida, han desarrollado una estrategia de reciclaje de cartón, plástico y chatarra, con lo que aportar a la reducción de los consumos de agua, energía y de emisiones. Han implementado iluminación LED en toda la operación, llevando un avance del 80% dentro de las metas propuestas. Se encuentra certificada internacionalmente por LEED y EDGE, y en Colombia por Casa Colombia. (Santa Fe, 2023).

6.13. Proyecto de investigación 1. Reúso de agua residual en explotación minera por socavones (trabajo de grado)

- **Tipo de minería:** Subterránea.
- **Modelo de economía circular:** Reutilización del agua.
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reducción de energía y agua.
- **País:** Colombia.

Descripción general: El carbón que más se produce en Colombia es el térmico, con un porcentaje de 94%, seguido del metalúrgico con un porcentaje de 5% y antracita con un porcentaje de 1%. Cuya principal característica es que está relativamente limpio de azufre, con un contenido inferior al 1% por lo que sus acondicionamientos no requieren de procesos complejos de desulfuración. Las minas de carbón liberan drenajes ácidos, por una reacción de los sulfuros contenidos en el carbón, que pueden convertirse en una fuente de contaminación debido a su capacidad de disolver metales pesados, con los cuales se reduce la calidad del agua y se afecta el ecosistema acuático. Este trabajo de grado busco luego de la aplicación de unos procesos de tratamiento para estas aguas como el de osmosis inversa y filtros, coagulación y floculación química, oxidación con ozono, y reactor anaerobio de flujo a pistón; establecer unas condiciones mínimas aceptables, para generar usos alternos de estas, en vez de realizar un vertimiento definitivo a los afluentes de agua. Tales usos potenciales son: Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal, Cultivos no alimenticios para humanos o animales, Cultivos de fibras celulósicas y derivados, Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante)

incluidos lubricantes, Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles, Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos, Áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento y Jardines en áreas no domiciliarias. (Julieth Gomez, Winddy Lozano, 2019)

6.14. Proyecto de investigación 2. Producción minera de concentrados de Pb-Ag-Zn en Bolivia. (artículo)

- **Tipo de minería:** Cielo abierto.
- **Modelo de economía circular:** Reutilización del agua industrial y residuos orgánicos.
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reducción de energía, agua y cierre de mina.
- **País:** Bolivia

Descripción general: En este artículo se aborda una propuesta circunscrita en la explotación minera de complejos de Pb-Ag-Zn, bajo el modelo de economía circular que permite, mediante un manejo integral tanto de los residuos mineros generados en la etapa de explotación, como de los residuos orgánicos y aguas residuales generadas en los campamentos mineros, así como el uso de los suelos del sector minero, no sólo disminuir los consumos de agua y energía en la operación, sino disminuir los costos vinculados al cierre ambiental de los sitios finales de disposición de desmontes y de relaves generados en la operación minera. El proceso consiste en hacer en una primera etapa, la separación selectiva de los desmontes generados en la explotación a cielo abierto en base a sus posibilidades de generación de drenaje ácido de roca; además, en una

segunda etapa, la desulfurización de las colas del proceso de flotación por espirales, a objeto de que el producto no sulfurado de éste proceso, sea utilizado como cobertura seca, previo deslame, en el cierre tanto del sitio de disposición de relaves como el de desmontes; además, de ser utilizado también para la conformación de top soil artificial, junto con el compost generado a partir de la materia orgánica de los residuos del comedor del campamento minero y de los lodos del proceso de tratamiento de las aguas residuales tratadas. Así mismo, el uso de las aguas residuales tratadas para la etapa de flotación de minerales. (Scielo, 2019)

6.15. Proyecto de investigación 3. Mecanismo de producción más limpia: el reúso de aguas residuales en la actividad minera (Artículo)

- **Tipo de minería:** Cielo abierto.
- **Modelo de economía circular:** Reutilización del agua.
- **Lugar de aplicación respecto a la cadena de valor:** Extracción.
- **Beneficios generados:** Reducción de energía, agua.
- **País:** Perú

Descripción general: En la etapa de explotación minera, es importante que las aguas residuales domésticas, generadas en el campamento minero, sean tratadas con fines de reúso, tanto para el riego en los invernaderos de producción de plantas autóctonas que serán empleadas como cobertura vegetal en el cierre de los sitios de disposición final de residuos mineros, como para su uso en el procesamiento mineral.

Varias tecnologías están disponibles para el tratamiento de las aguas residuales domésticas; sin embargo, el método SBR (Sequencing Batch Reactor) podría ofrecer las siguientes ventajas: El procesamiento se realiza en un sólo un tanque y en tiempos de residencia cortos, su operación es independiente de las influencias de flujo, construcción simple y fácil, y posible de ampliación en paralelo para mayores caudales, alta eficiencia de purificación y Permite la eliminación de N y P; por ende, obtener lodos con mayores contenidos de N y P para su posterior procesamiento en la planta de compostaje. (José Antonio Vera Torrejón, 2015).

7. Análisis de resultado

La tabla 2 presenta los casos de estudio analizados en este trabajo de manera resumida de acuerdo con el tipo de proyecto, el tipo de mineral, la compañía involucrada, su localización, los beneficios del proyecto, los indicadores impactados y la ocurrencia de procesos asociados a simbiosis industrial.

Tabla 2*Resumen de estudios de casos*

Tipo de minería / Proyecto	Tipo de mineral	Compañía	Localización	Proceso circular	Beneficios	Indicador	Simbiosis industrial	Tipo de simbiosis
Subterránea	Carbón	Minera Datong	China	Reducción de emisiones de CO2 y reutilización de agua	Reducción de emisiones por uso de tecnologías en vehículos. Agua reutilizada en riego y procesos industriales.	Reutilización del 100% del agua No hay información disponible de las emisiones de CO2	No	

Cielo abierto	Diamante	Diavik	Canadá	Energías alternativas	Parque eólico que suministra 9.2 Mw de energía.	0% de uso de combustibles fósiles	No	
Subterránea	Cobre	Codelco - División el teniente	Chile	Reciclaje de chatarra, prendas de vestir y llantas	Nuevos productos de acero y prendas. Formación de AANFU y gas para energía,	Valorizar el 65% de sus residuos industriales	Si	Transformación de residuos a través de su venta a tres empresas especializadas
Cielo abierto	Cobre	Codelco, Antofagasta Minerals, Collahuasi.	Chile	Energías alternativas	Planta termosolar y fotovoltaica	Reducción de 15.000 toneladas de CO ₂	No	Sustitución del 55% de

						uso de combustibles fósiles.	
						Reducción de 50.000 toneladas de CO ₂	
Subterránea	Zinc y plomo	Minas Gerais	Brasil	Transformación de relaves	Nuevo producto Zincal 200 (sulfato de zinc) para tratamiento de suelos ácidos.	Cero residuos	No
Cielo abierto	Cobre y zinc	Minera Antamina	Perú	Reciclaje de aceites y grasas de vehículos	Reusó de aceites y grasas para emplear en voladura.	100% de reciclaje de aceites usados de vehículos	No

Cielo abierto	Caliza	Cemex	México	Reciclaje y reusó	Uso de desechos no reciclables y reciclaje de residuos.	No hay información disponible respecto a las cantidades recicladas de residuos de mina	Si	Reciclaje no solo los desechos de mina, sino demás sectores productivos que lo requieran.
Cielo abierto	Carbón	DRUMMO ND LTD	Colombia	Reciclaje de llantas	Nuevos productos de caucho y acero.	Reciclaje del 100% de las llantas desechadas	Si	Empresa contratista que realiza el reciclaje de los residuos de llantas.
Cielo abierto	Arcillas	Sumicol - Corona	Colombia	Reusó de relaves	Nuevos agregados para construcción.	Ahorros económicos de 20.000.000 de pesos	Si	Se sustituye materia prima (arcilla) por residuos de lodos.

Cielo abierto	Caliza	Cementos argos	Colombia	Reciclaje de eléctricos, materia orgánica y chatarra	Transformación de equipos electrónicos, compostaje y productos de acero.	56% de los residuos generados fueron reciclados	Si	Se entregan residuos eléctricos y electrónicos Venta de residuos de chatarra
Subterránea	Hierro	Acerías Paz del Rio	Colombia	Tratamiento de agua y reciclaje de papel, plástico, vidrio y cartón, y RESPEL	Tratamiento de aguas para reusó industrial o doméstico. Almacenaje de residuos domésticos y peligrosos.	Tratamiento del 100% de los vertimientos	Si	Reciclaje a través de empresas de servicios públicos y de tratamiento de RESPEL
Cielo abierto	Arcilla	Ladrillera Santa Fe	Colombia	Reciclaje de chatarra y	Almacena de residuos domésticos y	0.14 toneladas de CO ₂ por	Si	Se entregan residuos reciclables

			residuos domésticos.	chatarra para posterior tratamiento.	cada tonelada de arcilla producida	ordinarios y de chatarra a empresas especializadas
			Implementación de tecnologías	Implementación de iluminación LED en toda el área de mina y oficinas.		
Proyecto de investigación	Carbón	Colombia	Tratamiento de aguas	Reusó para cultivos, riego y consumo de animales.		
Proyecto de investigación	Plomo, oro y zinc	Bolivia	Tratamiento de agua y reciclaje de residuos orgánicos.	Reusó de agua en procesos industriales y compostaje.		

Proyecto de investigación	Mineral es no metálicos	Perú	Tratamiento de agua y reciclaje de relaves	Reusó de agua y compostaje.
---------------------------	-------------------------	------	--------------------------------------------	-----------------------------

7.1. Mejores prácticas de economía circular aplicadas en los casos de estudios

De los casos de estudio aplicados a la explotación de minerales en su etapa extractiva, se logran identificar unas mejores prácticas de economía circular, que permitirán establecer unos criterios para la factibilidad de su replicación en otros ámbitos de la minería.

Los procesos de economía circular que se presentan en minería son aplicables tanto para extracción de minerales a cielo abierto como de manera subterránea.

Todos los casos de estudio analizados tienen la particularidad que son proyecto mineros grandes, con niveles de ingresos considerables, que les permiten reinventarse en sus procesos de reciclaje o transformación de los residuos. Una alternativa para las empresas pequeñas mineras, sería la de disponer y almacenar sus residuos para que pequeños recicladores o empresas de servicios públicos hagan su tratamiento y disposición final.

Los residuos más comunes que se generan durante la etapa de explotación de un proyecto minero son: Vertimientos de agua de uso industrial, relaves, chatarras de hierro o acero, llantas de vehículos, residuos peligrosos RESPEL y desechos domésticos. Particularmente se pueden incluir los residuos eléctricos y electrónicos.

Las medidas implementadas dentro de cada uno de los casos de estudio, permiten reciclar para dar un nuevo uso a los residuos y alargar su vida útil, o transformarlos en nuevos productos que podrán ser usados como materia prima en otras industrias.

Si bien se evidencia el uso de energías alternativas dentro de la actividad minera, por sus altos costos de implementación, actualmente estas solo se encuentran disponibles a proyectos de gran envergadura y con alto niveles de ingresos.

La simbiosis industrial presenta una gran alternativa a las empresas mineras, ya que, a través de este intercambio y beneficio mutuo, empresas especializadas pueden recoger los diferentes tipos de residuos sólidos, y realizar sus procesos de reciclaje y/o transformación. Beneficiando a las mineras en cuanto a llegar a ceros empresas cero residuos.

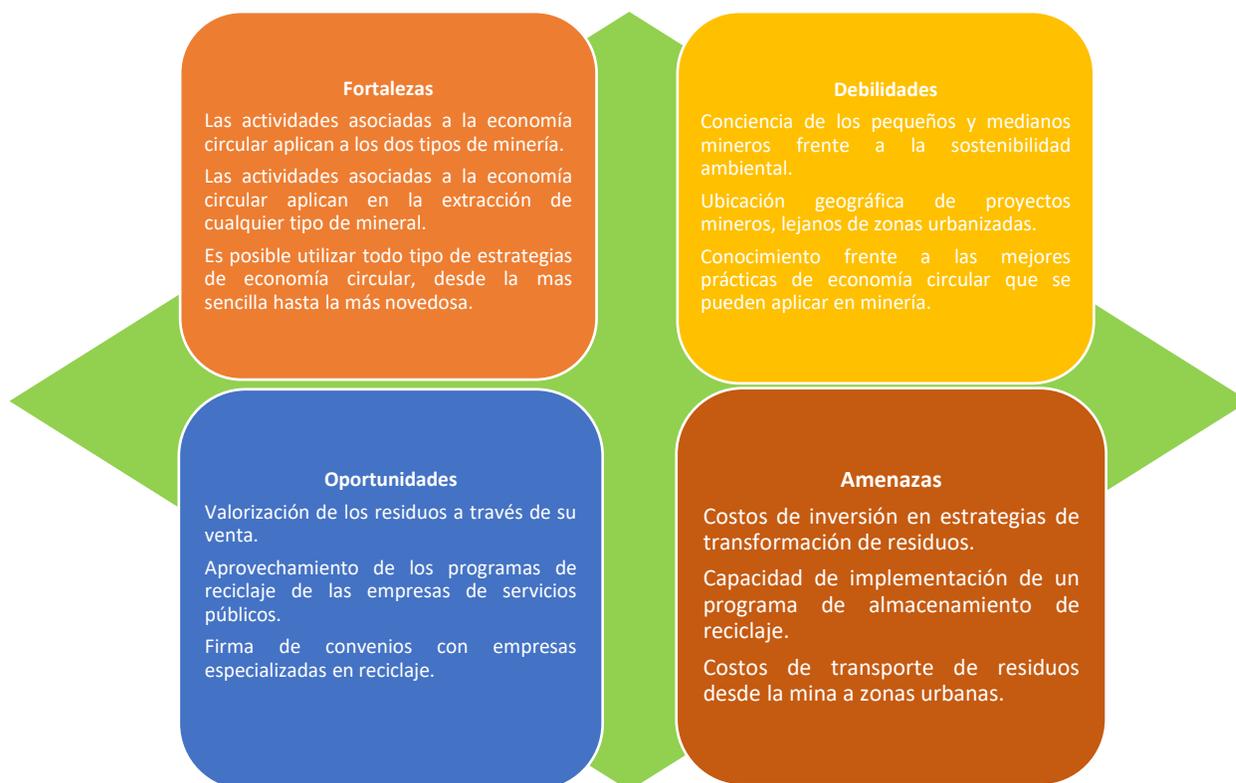
La academia hace parte importante de la actividad productiva, por eso el impulso a proyectos de investigación, permitirá desarrollar diferentes alternativas centradas o considerando las condiciones específicas de cada proyecto minero.

Actualmente la industria minera se está transformando y se puede reconocer como estas disponen de recursos económicos y humanos, para con responsabilidad corporativa, tratar y reutilizar todos sus diferentes tipos de residuos. Cumpliendo con las reducciones de sus emisiones y la sostenibilidad ambiental.

7.2. Factibilidad de implementación de las mejores prácticas seleccionadas en el contexto de la actividad minera en Colombia.

El análisis DOFA permite analizar las fortalezas, debilidades, oportunidades y las amenazas de implementación de las mejores prácticas en economía circular a los proyectos mineros. Resulta útil a la hora de aplicar los estudios de casos, y su aplicabilidad al mundo real.

Teniendo en cuenta lo anterior, se pudieron determinar unas características principales que permitirán establecer la factibilidad de replicación de casos de éxito, en diferentes proyectos de explotación minera. Estas se describen la figura 7.

Figura 7*matriz DOFA*

Conceptos como economía circular, cambio climático, objetivos de desarrollo sostenible, son más cercanos a las grandes empresas, a organizaciones que requieren más visibilidad a nivel global, con clientes cada vez más exigentes frente a las buenas prácticas sociales, ambientales y económicas. Una debilidad fundamental que se deberá fortalecer, es la correspondiente a la divulgación de los casos de éxitos, entre las diferentes empresas del sector, apoyadas desde la empresa privada y las instituciones educativas.

Sera un reto para los proyectos mineros más alejados de las zonas urbanas, el establecer estrategias para almacenar y acercar sus residuos, a los centros de recepción de

materiales reciclables. Una oportunidad de financiación de esto, sería la valorización de los residuos y los convenios con empresas de este sector.

La contribución frente a la mitigación de los impactos y el cambio climático, se puede dar con grandes o pequeños estrategias frente a la mitigación, reducción o reciclaje. Los casos analizados han mostrado indicadores como mínimo de una reducción del 50% de los residuos generados por las empresas.

8. Conclusiones

El cambio climático no solo está transformando el mundo, sino que está cambiando la conciencia de las personas y de las industrias. El sector minero no ha sido ajeno a estos cambios de paradigmas, más cuando el mismo informe *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*” (Minerales para la acción climática: El uso intensivo de los minerales en la transición hacia la energía limpia) del banco mundial, ha establecido que los minerales serán fundamentales en la transición energética; minerales que solo pueden ser extraídos de la tierra, a través de técnicas de explotación minera.

En Colombia se logrando identificar cinco casos de éxitos de aplicación de estrategias de economía circular, aplicadas a la extracción minera. Siendo muchos más, tal como reporta la asociación colombiana de minería (ACM). Por tanto, el sector podría llegar a transformar, el estigma y la imagen que tiene frente a la sociedad civil y sectores del gobierno.

Los procesos de economía circular que se presentan en minería son aplicables tanto para extracción de minerales a cielo abierto como de manera subterránea.

Todos los casos de estudio analizados tienen la particularidad que son proyecto mineros grandes, con niveles de ingresos considerables, que les permiten reinventarse en sus procesos de reciclaje o transformación de los residuos. Una alternativa para las empresas pequeñas mineras, sería la de disponer y almacenar sus residuos para que pequeños recicladores o empresas de servicios públicos hagan su tratamiento y disposición final.

Los residuos más comunes que se generan durante la etapa de explotación de un proyecto minero son: Vertimientos de agua de uso industrial, relaves, chatarras de hierro o acero, llantas de vehículos, residuos peligrosos RESPEL y desechos domésticos. Particularmente se pueden incluir los residuos eléctricos y electrónicos.

Las medidas implementadas dentro de cada uno de los casos de estudio, permiten reciclar para dar un nuevo uso a los residuos y alargar su vida útil, o transformarlos en nuevos productos que podrán ser usados como materia prima en otras industrias.

La sinergia entre la empresa privada y las universidades es fundamental para desarrollar proyectos y tecnologías encaminadas a la aplicación de estrategias de economía circular en el sector.

La valorización de los residuos es una estrategia de financiación que le permitirá a las organizaciones, disponer de recursos fuera de sus presupuestos de funcionamiento, para aplicar medidas de mitigación, reducción o reciclaje, contribuyendo con las políticas de cero residuos.

9. Referencias

International Council on Mining & Metal ICMM (2016). *Mining and metals and the circular economy*.

Fundación Ellen MacArthur (2012). *Towards the Circular Economy, Volume 1: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*, Cowes, Isle of Wight.

Department of Mineral Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China (2012). *Discussion on the Model of Mining Circular Economy*.

Unidad Administrativa Especial de Gestión de Tierras Despojadas y la Agencia Nacional de Minería (2015). *Cartilla minera, preguntas frecuentes*. Obtenido de: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/cartilla_de_mineria_final.pdf

Geoinnova (2016). *Minería a cielo abierto y sus impactos en el medio ambiente*. Obtenido de: <https://geoinnova.org/blog-territorio/mineria-cielo-abierto-impactos/>

Stockholm Precision Tools (SPT AB) (2022). *Es posible una minería sostenible*. Obtenido de: <https://sptab.com/es/mineria-sostenible/>

Anna Lluís y Alicia Martínez (2022). *Manual de simbiosis industrial, implementación de un programa de económica circular para un desarrollo económico sostenible en México*. Obtenido de: https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/documents/2023/Manual_Simbiosis_Industrial.pdf

Restorative and regenerative: Exploring the concepts in the circular economy
Morseletto. P. (2020). *JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY*. Obtenido de:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.12987>

Circle Economy. (2022). *The Circularity Gap Report 2022*. Obtenido de:
https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/1._report_cgr_global_2022.pdf

Grupo Banco Mundial, *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. 2020.

Ministerio de minas y energía – ATG Ltda. (2020). *Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de economía circular en la actividad minería*. Obtenido de:
<https://repositoriobi.minenergia.gov.co/handle/123456789/2772>.

Circular Tec. (2022). *El arribo de la economía circular a la minería primaria de Chile, Perú y Colombia*.

Makhathini, T.P.; Bwapwa, J.K.; Mtsweni, S. *Various Options for Mining and Metallurgical Waste in the Circular Economy: A Review*. *Sustainability* **2023**, *15*, 2518. Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/2518>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. 2017. *Resolución 1326 por medio de la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas*

usadas. Obtenido de: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-1326-de-2017.pdf>

Spena group. (2016). *Tratamiento de aguas residuales en minería*. Obtenido de: <https://spenagroup.com/tratamiento-aguas-residuales-mineria/>

Zabala innovation. Artículo (2023). *El futuro de la minería será verde y sostenible*. Obtenido de: <https://www.zabala.es/opiniones/futuro-mineria-verde-sostenible/>

Mapfre global risks. (2024). *Minería 4.0 un sector en plena evolución*. Obtenido de: <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/mineria-4-0-un-sector-en-plena-evolucion/>

País circular. (2023). *Economía circular a gran escala: tres ejemplos de valorización a partir de residuos de la minería en Chile*. Obtenido de: <https://www.paiscircular.cl/economia-circular/gran-mineria-en-chile-una-enorme-oportunidad-para-la-economia-circular-tres-ejemplos-de-economia-circular-en-la-gran-mineria-chilena/>

SciELO Revista del medio ambiente y minería. Dr.- Ing. Gerardo Zamora E. M. Sc. Ing. Octavio Hinojosa C. 2019. *Economía circular en minería - caso de estudio: producción minera de Concentrados de Pb-Ag-Zn en Bolivia*. Obtenido de: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000100001

Escuela Colombiana de ingeniera. Julieth manzanares Gómez, windy rincón lozano. 2019. *reúso de agua residual en explotación minera por socavones*. Obtenido de:

<https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1111/Rinc%C3%B3n%20Lozano%20C%20Windy-2020.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

DRUMMOND LTD Colombia, 2022. *En las instalaciones de Drummond Ltd. en el Cesar opera una planta de procesamiento de llantas residuales*. Obtenido de: <https://www.drummondlt.com/comunicados-de-prensa/2022/06/08/planta-procesamiento-llantas-residuales-cesar/>

Emilio Gómez de la Torre. 2022. *Construyendo una minería más verde, circular y sostenible*. Obtenido de: <https://www.linkminers.com/blog/76>

El comercio. 2020. *Economía circular: ¿cómo se aplica en el sector minero?* Obtenido de: <https://especial.elcomercio.pe/mineriasostenible/economia-circular-como-se-aplica-en-el-sector-minero/>

José Antonio Vera Torrejón. 2015. *mecanismo de producción más limpia: el reúso de aguas residuales en la actividad minera*. Obtenido de: [Mecanismo De Producción Mas Limpia-5392833%20\(1\).pdf](#)

El economista.es. 2018. *Minería verde, el proyecto de China para despedirse del carbón*. Obtenido de: <https://www.eleconomista.es/economia/noticias/9585148/12/18/Mineria-verde-el-proyecto-de-China-para-despedirse-del-carbon.html>

Organización Corona. 2021. *Informe de sostenibilidad*. Obtenido de: https://www.gamma.com.co/wp-content/uploads/2022/09/Informe-de-Sostenibilidad_2021_OC.pdf

Cementos argos. 2022. *Reporte integrado*. Obtenido de: <https://argos.co/wp-content/uploads/2023/03/Reporte-integrado-2022.pdf>

Acerías paz del río. 2023. *Informe integrado de sostenibilidad*. Obtenido de: https://www.pazdelrio.com.co/wp-content/uploads/2024/05/informe_sostenibilidad_2023.pdf

Cemex. 2023. *CEMEX contribuye a economía circular con lanzamiento de Regenera, negocio para gestionar residuos*. Obtenido de: <https://www.cemexcolombia.com/-/cemex-contribuye-a-economia-circular-con-lanzamiento-de-regenera-negocio-para-gestionar-residuos>

Ladrillera Santa Fe. 2023. *Informe de sostenibilidad 2023*. Obtenido de: <https://www.santafe.com.co/sostenibilidad/>