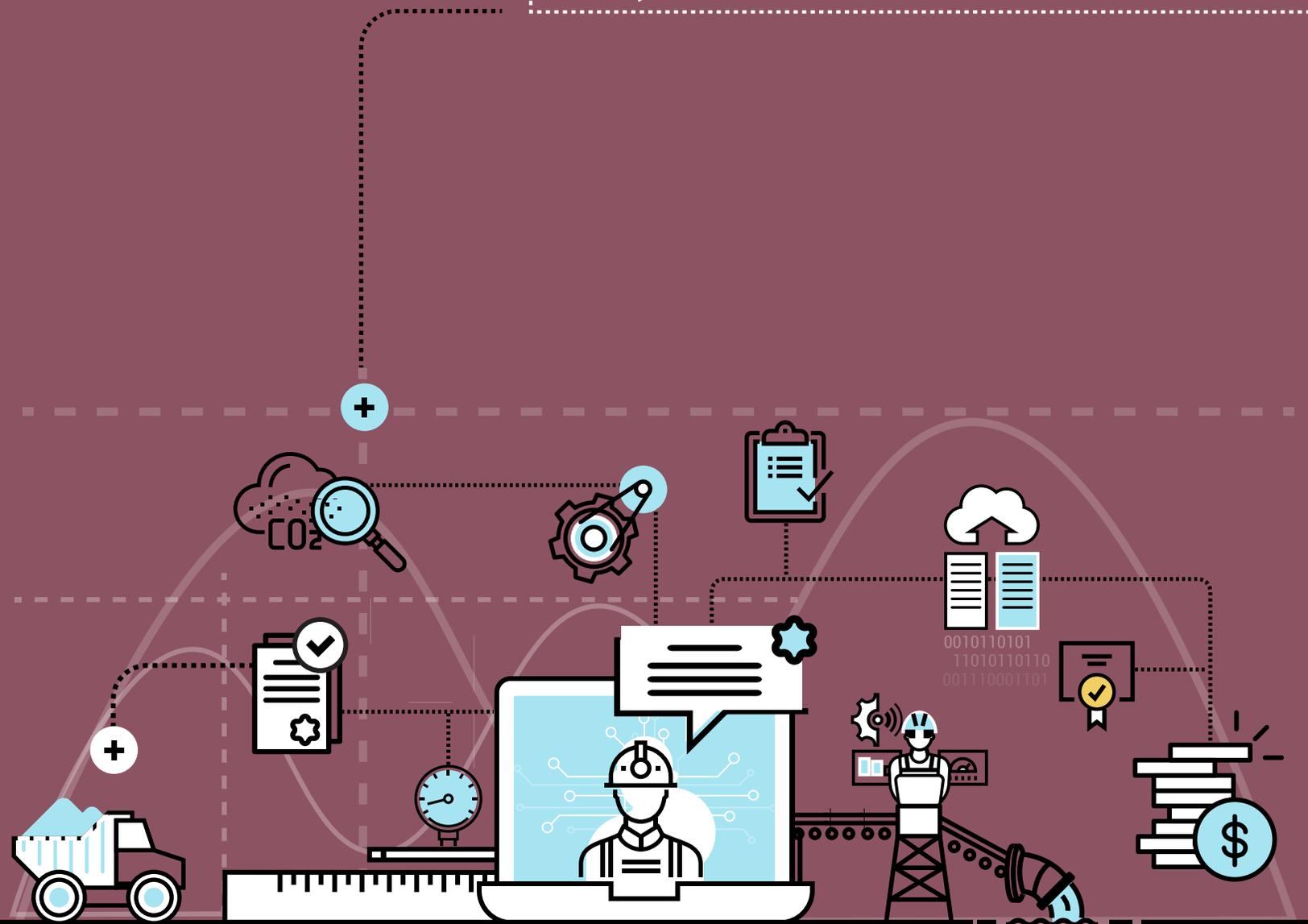


La economía circular en la **minería peruana**

Dolfer Julca Zuloeta



NACIONES UNIDAS

CEPAL



cooperación
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

giz

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

 www.cepal.org/es/publications

 www.cepal.org/apps

La economía circular en la minería peruana

Dolfer Julca Zuloeta



Este documento fue preparado por Dolfer Julca Zuloeta, Consultor de la Unidad de Recursos No Renovables, División de Recursos Naturales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco de las actividades de la División y del programa Cooperación Regional para una Gestión Sustentable de los Recursos Mineros en los Países Andinos (MINSUS), ejecutado por la CEPAL en conjunto con la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) y financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania. El autor agradece los valiosos comentarios al trabajo de José Luis Lewinsohn, así como los de Mauricio León, Orlando Reyes y Pablo Chauvet, de la CEPAL.

Asimismo, se agradecen los aportes de Nicolás Maennling y Víctor Andrés Garzón, del programa MINSUS.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad del autor y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representa.

Publicación de las Naciones Unidas
LC/TS.2022/39
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2022
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.22-00222

Esta publicación debe citarse como: D. Julca Zuloeta, "La economía circular en la minería peruana", *Documentos de Proyectos* (LC/TS.2022/39), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Resumen	11
Introducción	13
A. Objetivos del estudio	16
B. Alcance	16
C. Metodología	17
I. Estado del arte de la economía circular en la minería peruana	19
A. Transición de la economía lineal a la economía circular	19
1. Conceptos de la economía circular	21
2. Beneficios de la economía circular	24
3. Análisis de ciclo de vida y economía circular (EC)	27
B. Rol de la economía circular orientado a la minería	30
1. Procesos mineros	33
C. Economía circular en América Latina	38
1. Ejemplos de iniciativas y/o casos de economía circular (EC) aplicados en la minería	39
2. Iniciativas de políticas públicas orientadas a la economía circular en los países andinos	43
II. Diagnóstico de las iniciativas de la economía circular en la minería peruana	47
A. Escenario de la minería en Perú	49
B. Ecosistema de la minería hacia la economía circular en Perú	49
1. Diagnóstico político-legal	50
2. Diagnóstico económico	59
3. Diagnósticos colaborativos de la sociedad civil y las empresas mineras	61
4. Diagnóstico tecnológico-ambiental	63
C. Percepción de la economía circular en la minería peruana	64
III. Generación de valor para una minería sostenible	67
A. Análisis de ciclo de vida de los principales productos mineros	67
1. Flujo de materiales en la producción minera	69
2. Análisis del flujo de materiales en la producción minera	71
B. Desafíos en el tránsito de la minería peruana hacia la economía circular (EC)	71

IV. Responsabilidad extendida y/o compartida del productor	75
A. Implementación de la responsabilidad extendida del productor (REP)	76
1. Implementación de la REP en minería de la región andina	78
B. Aplicación de la REP en la minería peruana	79
V. Lineamientos de política pública de la economía circular en la minería peruana	83
A. Formación del ecosistema de la interrelación colaborativa	83
B. Planificación estratégica	85
C. Lineamientos para la implementación de la economía circular en la minería peruana	86
VI. Conclusiones y recomendaciones	89
Bibliografía	93
Anexos	99
Anexo 1	100
Anexo 2	101
Anexo 3	102

Cuadros

Cuadro 1	Investigación y/o aplicación de la EC en la minería	39
Cuadro 2	Esfuerzos colaborativos para la transición de la minería a la EC	42
Cuadro 3	Marco normativo e iniciativas de EC relacionados con la minería en los países andinos	43
Cuadro 4	Participación de la minería peruana a nivel mundial	47
Cuadro 5	Componentes mineros listados en la gran y mediana minería peruana	48
Cuadro 6	Marco normativo general entorno a la EC en Perú	50
Cuadro 7	Ejemplo de algunos de los principales proveedores del sector minero	81
Cuadro 8	Hoja de ruta para la ejecución de políticas de la EC en la minería	87

Diagramas

Diagrama 1	Objetivos específicos del estudio	16
Diagrama 2	Relación entre el sistema ambiental y sistema económico	20
Diagrama 3	Esquemas de la economía circular según los <i>think tanks</i>	23
Diagrama 4	Principales beneficios de la EC	25
Diagrama 5	Resultados de la evaluación de impactos del análisis de ciclo de vida para producir una tonelada de zinc	29
Diagrama 6	Integración de la minería en los principios de la EC	31
Diagrama 7	Procesos mineros y de beneficio de cobre, polimetálico, hierro, doré y material de construcción	34
Diagrama 8	Flujo de materiales en la etapa de explotación	35
Diagrama 9	Flujo de materiales en la concentración de Cu	36
Diagrama 10	Flujo de materiales en la producción de pellets de hierro	36
Diagrama 11	Flujo de materiales del producto refinado de cobre	37
Diagrama 12	Escenario de la minería peruana hacia una EC	49
Diagrama 13	Visión general del contexto y entorno de la EC en la minería peruana	50
Diagrama 14	Institucionalidad política legal de la EC en la minería peruana	59
Diagrama 15	Principales actores de la innovación, la minería sostenible y economía circular	63
Diagrama 16	Esquema de análisis de la evaluación de daño del modelo ecoindicador gga/i	68

Diagrama 17	Flujo de materiales en la producción de un kilogramo de concentrado <i>bulk</i> de plomo-zinc	70
Diagrama 18	Flujo de materiales en la producción de una onza de doré	70
Diagrama 19	Flujo de materiales en la producción de una tonelada de cobre	71
Diagrama 20	Ciclos de vida del producto y la REP	76
Diagrama 21	Normativa REP en los países andinos.....	78
Diagrama 22	Esquema de responsabilidad compartida en la minería peruana	80
Diagrama 23	Ecosistema colaborativo para el tránsito hacia la EC	84
Diagrama 24	Modelo para la implementación de políticas públicas en EC en minería peruana.....	84
Diagrama 25	Lineamientos generales para la planificación estratégica de política pública.....	86
Diagrama A1	Flujo típico de concentración de plomo-zinc	100
Diagrama A2	Flujo típico de producción de doré	101
Diagrama A3	Flujo típico de producción de cobre-flotación (sulfuros)	102
Diagrama A4	Flujo típico de producción de cobre-lixiviación (óxidos).....	102

Imágenes

Imagen 1	Ciclo de vida desde la cuna al puerto.....	17
Imagen A1	Evaluación de los efectos de la producción de TMF de concentrado <i>Bulk</i> de plomo-zinc	100
Imagen A2	Evaluación de los efectos de la producción de una onza de doré	101
Imagen A3	Evaluación de los efectos de la producción de TMF de cobre	103

Listado de siglas

ACV:	Análisis del Ciclo de Vida
ACVS:	Análisis de Ciclo de Vida Social
ADP:	Agotamiento Abiótico
ALC:	América Latina y el Caribe
AM:	Fabricación Aditiva
APL:	Acuerdos de Producción Limpia
AR:	Realidad Aumentada
AUI:	Associated Universities Inc.
BD:	<i>Big data</i>
BCR:	Banco Central de Reserva del Perú
BID:	Banco Interamericano de Desarrollo
BSI:	Organismo Nacional de Normalización del Reino Unido
CAF:	Banco de Desarrollo de América Latina
CC:	Computación en la nube
CCL:	Cámara de Comercio de Lima
CDN:	Contribución Determinada a Nivel Nacional
CELARE:	Centro Latinoamericano para las Relaciones con Europa
CEMS:	Centro de Estudios sobre Minería y Sostenibilidad
CEPAL:	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CIEC:	Centro de Innovación y Economía Circular
CIP:	Colegio de Ingenieros del Perú

CITE:	Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica
CONFIDE:	Corporación Financiera de Desarrollo
COMEX:	Sociedad de Comercio Exterior del Perú
CONCYTEC:	Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación
CORFO:	Corporación de Fomento de la Producción
CMIC:	Canadian Mining Innovation Council
CPS:	Sistema Ciberfísico
EICV:	Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida
EC:	Economía Circular
EKLA:	Programa Regional de Seguridad Energética y Cambio Climático en América Latina
FUNVESA:	Fundación Ventanilla SA
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
GTM-NDC:	Grupo de Trabajo Multisectorial para las Contribuciones Nacionalmente Determinadas
HEVA:	Horno Eléctrico al Vacío
ICV:	Inventario del Ciclo de Vida
IIMP:	Instituto de Ingenieros de Minas del Perú
INACAL:	Instituto Nacional de Calidad
INECC:	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEI:	Instituto Nacional de Estadística e Informática
INNÓVATE PERÚ:	Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad
IoT:	Internet de las Cosas
IoS:	Internet de los servicios
ISO:	Organización Internacional de Normalización
ITP:	Instituto Tecnológico de la Producción
I+D:	Investigación y Desarrollo
I+D+i+e:	Investigación, Desarrollo, innovación y emprendimiento
KAS:	Fundación Konrad Adenauer
MAPE:	Minería Artesanal y de Pequeña Escala
MEF:	Ministerio de Economía y Finanzas
MIDAGRI:	Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego
MINCETUR:	Ministerio de Comercio Exterior y Turismo
MINEM:	Ministerio de Energía y Minas de Perú
MINES:	Colorado School of Mines
MIPYME:	Micro, Pequeña y Mediana Empresa
MTPE:	Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo

MVC:	Minera Valle Central
ODS:	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OECD:	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
OEFA:	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
OIT:	Organización Internacional del Trabajo
ONG:	Organismos No Gubernamentales
ONU:	Organización de las Naciones Unidas
OSINERGMIN:	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería
PAC:	Programa de Apoyo a Clúster
PAGE:	Alianza para la Acción hacia una Economía Verde
PDP:	Programa de Desarrollo de Proveedores
PET:	Plástico de Polietileno
PESEM:	Plan Estratégico Sectorial Multianual
PIR:	Panel Internacional de Recursos
PGA:	Plataformas de Gestión Agroclimática
PNUD:	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PRODUCE:	Ministerio de la Producción
PYME:	Pequeñas y medianas empresas
RAE:	Residuo de Aparatos Eléctricos
REP:	Responsabilidad Extendida del Productor
RIMAY:	Centro de Convergencia y Buenas Prácticas Minero-Energéticas
SAMMI:	Clúster Minero Andino
SENACE:	Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles
SEIA:	Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental
SIN:	Sociedad Nacional de Industrias
SINACYT:	Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología e Innovación Tecnológica
SNMPE:	Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía
STT:	Solar Tailings Transformation
SUN:	Stiftungsfonds für Umweltökonomie und Nachhaltigkeit
SUNAT:	Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria
UE:	Unión Europea
UNAMAD:	Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios
UNEP:	United Nations Environment Programme
UNI:	Universidad Nacional de Ingeniería
UNSA:	Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

UQ: Universidad de Queensland

USAID: Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional

USGS: United States Geological Survey

UTE: Universidad de Ingeniería y Tecnología

Resumen

En una economía lineal globalizada que se sostiene en “tomar, fabricar y desechar”, donde las agendas globales se orientan al carbono neutral por un futuro sostenible, el rol de la minería es trascendental en la transición hacia fuentes bajas en carbono. Esto se debe a que es el proveedor de materias primas e insumos para las tecnologías de producción más limpias. Por ello, la continuidad y crecimiento de la minería debe atender las exigencias sociales y ambientales que limitan el acceso a los yacimientos mineros.

Dado el modelo de economía lineal que hoy se experimenta, surge la tendencia de la economía circular (EC) como un modelo que opera a todo nivel organizacional. Asimismo, previene la contaminación ambiental, protege el entorno ambiental y ofrece una ruta a la sostenibilidad, cuyo funcionamiento es regenerativo y restaurador en un sistema cerrado. Es decir, busca el desarrollo del sistema económico (mercado de bienes y servicios), a la vez que reduce la presión que este genera en el entorno natural. Las prácticas de la EC no son ajenas a las operaciones mineras; pues su patrocinio se entreteje como oportunidades para minimizar y otorgar valor a los residuos, mejorar la eficiencia en las operaciones mineras (extracción y beneficio), y remediar los sitios mineros con fines productivos a futuro.

En ese contexto, el objetivo del presente estudio es “plasmear lineamientos de políticas públicas para el desarrollo de la EC en la minería peruana”, cuyo alcance se circunscribe en la balanza comercial primario exportador (*upstream*), que comprende desde la cuna hasta el puerto (*cradle to port*).

La adopción de la EC en la minería peruana requiere la interacción de múltiples actores en un ecosistema colaborativo. Por lo tanto, las políticas en torno a la circularidad deben considerar enfoques globales, así como abordar las dificultades en la valorización y/o inertización de los residuos mineros según la capacidad de la minería peruana, y el ambiente geográfico y social en el cual se desarrolla. El tránsito hacia la economía circular debe ser gradual y progresivo, de lo simple a lo complejo, “nuevas soluciones a viejos problemas” alineadas a la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Introducción

En el *Panorama de los recursos globales* (2019), el Panel Internacional de Recursos (PIR) suscribe que, en los últimos 50 años, la demanda de los recursos naturales a nivel mundial ha aumentado en todos los ámbitos. Asimismo, indica que su extracción mundial se ha triplicado en este tiempo y se aceleró en el año 2000. El uso de los minerales metálicos no ha sido ajeno a esta demanda, de tal manera que, desde el año 1970 hasta el 2017, tuvo un incremento anual del 2.7 %. Además, la arena, la grava y la arcilla representan la mayor parte de los minerales no metálicos más utilizados. El PIR también suscribe que, de seguir los patrones de crecimiento económico experimentados en las últimas décadas de forma concurrente en la producción de materiales que se extraen, comercializan, procesan y desechan, en el corto plazo, se convertirá en un modelo insostenible (International Panel Resource, 2020).

En una economía globalizada en constante transformación y donde las agendas orientan a las economías al carbono neutralidad por un futuro sostenible, el rol de la minería es trascendental. Esto se debe a que es el proveedor de materias primas e insumos para la búsqueda de tecnologías de producción más limpias en la transición energética hacia fuentes bajas en carbono (uso de vehículos eléctricos, cambios en la matriz energética, masificación de paneles solares, aerogeneradores y/o almacenamiento energético), así como en el desarrollo de la construcción, la infraestructura, la manufactura y la producción de bienes de consumo. Por lo tanto, la continuidad y crecimiento de la minería tiene que enfrentar la evolución de sus actividades y procesos hacia un futuro sostenible. De esta manera, internalizar todos los costos y desarrollar estrategias que integren acciones y sinergias para minimizar la presión que genera en el sistema ambiental, alinear el valor compartido, fortalecer la confianza entre las partes interesadas, pasar de flujos lineales a circulares y promover la consecución de los ODS (World Economic Forum, 2015).

La minería es uno de los principales actores del crecimiento económico en los países andinos (Perú, Chile, Ecuador, Colombia y Bolivia). Asimismo, es un refugio de riqueza natural que podría convertirse en capital perdurable para el desarrollo social inclusivo, competitivo y sostenible de estos países. Sin embargo, no por ser una actividad principal y/o fundamental está exenta de exigencias y/o demandas por parte de los grupos de interés (Gobiernos, comunidades, accionistas y consumidores) para minimizar la presión que ejerce en el sistema ambiental. Por ello, urge repensar la planificación estratégica de las actividades mineras. Así, se incorpora en el análisis la prestación del sistema ambiental como proveedor de energía y recursos (renovables y no renovables), la capacidad de mantener sus funciones regenerativas, y los límites para asimilar todos los residuos que genera.

Las alertas de las presiones en el sistema ambiental y el llamado a repensar los patrones lineales que actualmente sigue el sistema económico, de manera específica la minería, han sido transmitidos (PIR, 2020). No obstante, los caminos y las acciones hacia la sostenibilidad aún se están forjando, por lo que una minería sostenible no ocurrirá espontáneamente sin una estrategia y concertación entre los grupos de interés.

¿Qué estrategia se debe adoptar para convertir la minería en una actividad más sostenible?

Se debe incentivar que los procesos operativos en la minería sean regenerativos y restaurativos¹ en lugar de ser extractivos, es decir, pasar de flujos lineales a circulares. De esta manera, se interioriza 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. Esto conllevará que la minería trace una ruta hacia una EC, donde la circularidad forme parte de una estrategia integral de los sectores minero, productivo e industria, y actividades económicas de un Estado para lograr el consumo y la producción sostenible. El involucramiento de los Gobiernos, el sector minero agremiado y no agremiado, la sociedad civil, la academia y las comunidades cumplirán un rol determinante en la sostenibilidad de la minería a partir del fortalecimiento de sus capacidades y de la creación de desarrollo tecnológico.

¿Qué es la economía circular (EC)?

El concepto de EC estendencia entre académicos, políticos y profesionales. Existen aproximadamente más de 114 definiciones (Kirchner, Reike y Hekkert), lo cual dificulta el consenso. Cabe señalar que, en los países de América Latina y el Caribe (ALC), el término está fuertemente dominado por conceptos relacionados con la **economía del reciclaje** (Henríquez-Aravena, Martínez-Cerna y Venegas-Cifuentes). A continuación, se presentan las definiciones más destacadas:

- [Es] un sistema industrial que es restaurador o regenerativo por intención y diseño. Reemplaza el concepto de 'fin de vida' con restauración, cambia hacia el uso de energía renovable, elimina el uso de químicos tóxicos, que perjudican la reutilización, y apunta a la eliminación de desechos a través del diseño superior de materiales, productos y sistemas y, dentro de este, modelos de negocio (Fundación Ellen MacArthur, 2013, p. 7).
- [Consiste en] utilizar los recursos de manera más eficiente a lo largo de su ciclo de vida al cerrar, extender y estrechar los circuitos de materiales que podrían resultar en la disociación del consumo de materias primas primarias del crecimiento económico (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD), 2018, p.2).
- Economía en el [sic] cual el valor de los productos y los materiales se mantiene el mayor tiempo posible y se minimiza el uso de los recursos y la generación de residuos [...] economía competitiva y eficiente en el uso de recursos (Unión Europea, 2018, p. 2).
- Es un sistema económico que reemplaza el concepto de 'fin de vida' por reducir, reutilizar, reciclar y recuperar materiales en los procesos de producción / distribución y consumo. Opera a nivel micro (productos, empresas, consumidores), nivel meso (parques eco-industriales) y nivel macro (ciudad, región, nación y más allá), con el objetivo de lograr el desarrollo sostenible, creando así simultáneamente calidad ambiental, económica, prosperidad y equidad social, en beneficio de las generaciones actuales y futuras (Kirchner et al., 2017, p. 228).

Dada la creciente importancia del concepto de EC, el presente documento intenta construir un marco conceptual cohesivo a partir de la literatura sobre el tema, destacando su relación con la consecución del desarrollo sostenible. En este sentido, Prieto-Sandoval *et al.* (2018) suscriben que, para establecer su concepto, son necesarios cuatro componentes relevantes: 1) la recirculación de recursos y energía,

¹ Según Mang y Reed (2015), el **diseño regenerativo** es un sistema de tecnologías y estrategias basado en el entendimiento del trabajo profundo de los ecosistemas. Este elabora diseños para regenerar, más que agotar, los sistemas de soporte vitales y los recursos dentro de los conjuntos socioecológicos. Por otro lado, el **diseño restaurativo** es un sistema de diseño que combina el retorno de sitios contaminados, degradados o dañados, y les otorga un estado de salud aceptable a través de la intervención humana, con diseños que reconectan a las personas con la naturaleza.

la minimización de la demanda de recursos y la recuperación de valor de los residuos, 2) el enfoque multinivel, 3) su importancia como camino para lograr el desarrollo sostenible, y 4) su estrecha relación con la forma en que la sociedad innova (p. 610).

Por ello, en el presente documento se construye el siguiente concepto:

“La economía circular es un modelo de desarrollo económico que opera a todo nivel organizacional, que previene la contaminación ambiental, protege el entorno ambiental y ofrece una ruta hacia la sostenibilidad ambiental, social y económica. La economía circular busca regenerar y restaurar los sistemas naturales reduciendo la entrada de materias primas (vírgenes) y la producción de residuos. Asimismo, la economía circular mantiene los productos y materiales el mayor tiempo posible en uso y que al finalizar su vida útil se convierten en recursos para nuevas actividades, todo ello sopesado en el diseño y desarrollo tecnológico para fabricar nuevos productos que respondan a un mantenimiento, reparación, reutilización, refabricación, restauración y reciclaje duraderos”.

Además, la EC promueve la retención de valor y la reducción de los impactos ambientales, así como reduce costos, y crea oportunidades económicas y convergencias en la consecución de los ODS de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 12 (producción y consumo responsables) y sus metas, coadyuvando de manera indirecta con las metas del ODS 6 (agua limpia y saneamiento), el ODS 7 (energía asequible y limpia), el ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico), el ODS 13 (acción por el clima) y el ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres).

El presente estudio se focaliza en Perú, donde la balanza comercial es de un exportador neto de materias primas, siendo la minería una de las principales actividades económicas. Según el Ministerio de Energía y Minas de Perú (Minem), en la publicación *Anuario minero* de 2020, “en los últimos diez años, la minería ha impulsado en promedio aproximadamente el 10% del PBI nacional y ha contribuido con el 60% de las exportaciones nacionales” (p. 1). Asimismo, de manera específica para el 2019, la contribución de la minería tributariamente fue de 2.2000 millones de dólares americanos (Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (Sunat), 2020).

Dada la relevancia de la minería para Perú, su necesidad de una recuperación resiliente ante la pandemia de la COVID-19 y el impulso global de cambio demandado por la creciente preocupación por el medio ambiente, se requieren adoptar cambios fundamentales en los sistemas de consumo y producción que permitan el crecimiento económico y el bienestar de la población peruana sin someter al entorno ambiental a una presión insostenible.

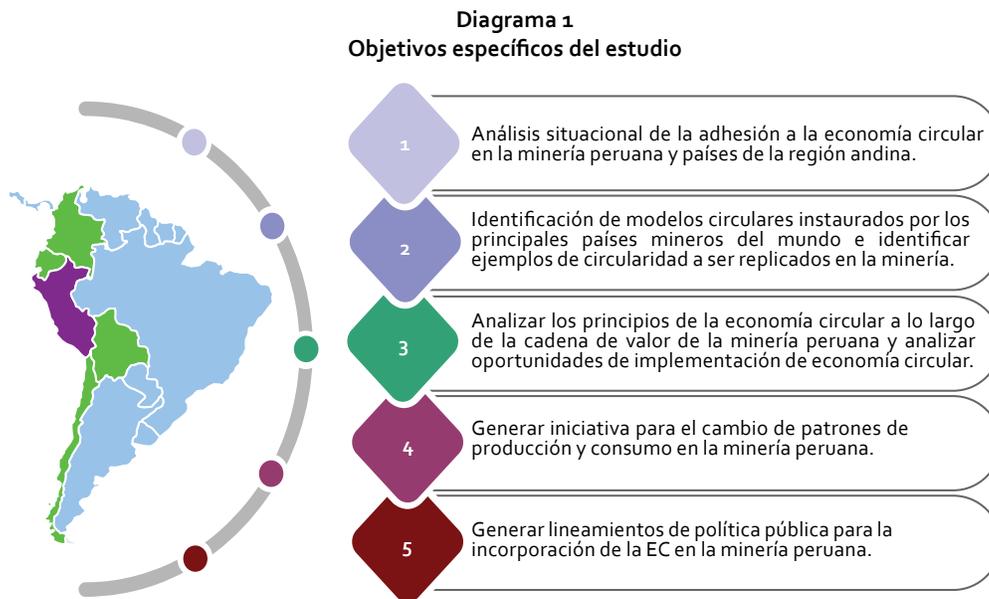
La expansión territorial de la minería en Perú alberga el desarrollo de una minería ferrosa y no ferrosa en regímenes de gran minería, mediana minería, minería artesanal y de pequeña escala (MAPE), que en la última década ha sufrido tensiones por el uso de territorio, agua, medios de transporte y contaminación. Por ello, las decisiones sobre esta actividad deben reconocer que el sistema ambiental es proveedor de servicios ecosistémicos sobre el cual se cimienta la salud, la riqueza y el bienestar de la población. En ese contexto, en el presente documento, se estudia un conjunto de procesos de la cadena de valor de la minería peruana que comprende desde la cuna al puerto (*cradle to port*). Ello con el propósito de capturar las oportunidades y los desafíos potenciales que tiene esta actividad en su transición hacia la EC.

La transición de la minería hacia la EC conducirá a mejorar los estándares, aumentar las exigencias y/o formular políticas públicas adecuadas para favorecer el cierre de brechas por una minería sostenible. Para ello, en el presente estudio, se aúnan esfuerzos al proponer y/o desencadenar lineamientos de acción colaborativa que fomenten una economía más circular en la minería peruana, con un énfasis primordial en fortalecer las políticas públicas y propiciar la participación de todos los grupos de interés.

A. Objetivos del estudio

La consecución de los ODS por la minería en los países andinos es un gran desafío; pues conlleva un gran despliegue de recursos humanos, físicos, tecnológicos y financieros. El objetivo de este texto es plasmar lineamientos de políticas públicas para el desarrollo de la EC en la minería peruana.

A partir del objetivo general, se trazan los siguientes objetivos específicos:



Fuente: Elaboración propia.

B. Alcance

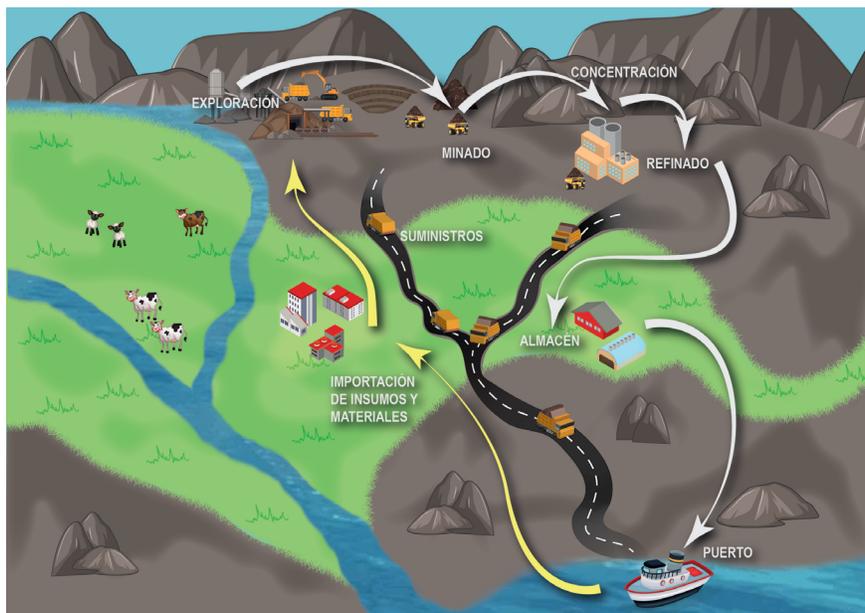
Se focaliza en Perú, considerado como un exportador neto de materias primas y donde la minería es una de las principales actividades económicas. La minería en Perú tiene una importante historia desde tiempos remotos y, en las últimas décadas, ha tenido un crecimiento. Se ha desarrollado en gran amplitud territorial (costa, sierra y selva), y se ha convertido en un referente en la región y en el mundo por la producción y potencial minero de cobre, zinc, plomo, estaño, plata y oro.

Asimismo, la minería peruana se caracteriza por ser una **actividad extractiva primario-exportadora**. En conformidad con el sistema de cuentas nacionales que utiliza el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), los procesos de exploración, minado y concentración conforman la actividad extractiva; y los procesos de fundición y refinación, la actividad manufacturera primaria.

En concatenación con los objetivos planteados y habiendo señalado que la cadena de valor de la minería peruana se concentra en la actividad primario-exportadora (*upstream*²), el alcance del presente estudio se circunscribe en los modelos operativos de la minería ferrosa y no ferrosa, sea cual fuere su tamaño. Asimismo, su ciclo de vida va desde la cuna al puerto (*cradle to port*), conforme al siguiente esquema:

² *Upstream*. Utilizando la metáfora de un río, la producción río arriba se refiere a todas las actividades necesarias para reunir los materiales necesarios para crear un producto.

Imagen 1
Ciclo de vida desde la cuna al puerto



Fuente: Elaboración propia.

Nota. Refinado se refiere al proceso de elaboración de cátodos de Cu y doré de Au-Ag.

Las operaciones mineras producen inevitablemente residuos, cuyo volumen depende de la calidad del yacimiento, del tipo de minería (subterránea o a tajo abierto) y del mineral que es extraído, así como de la escala de la operación. Por lo tanto, definido el ciclo de vida y la cadena de valor de la minería peruana, el análisis de los principios de la EC permitirá abordar las oportunidades y/o desafíos que tiene la minería para ser menos invasiva, gestionar sosteniblemente los residuos propios de la actividad minera y fomentar un consumo responsable de los recursos e insumos esenciales (agua y energía).

Además, cabe señalar que a nivel mundial, y con mayor relevancia en países de Asia y Europa, existe una alta tendencia de aprovechamiento de metales (oro, plata, platino, cobre y otros) proveniente de los residuos electrónicos. Esta actividad en los países de América Latina aún está en desarrollo. Dicho aprovechamiento es conocido también como minería urbana, el cual se considera para efectos del presente estudio, excepto del alcance.

C. Metodología

Este proceso implica un conjunto de pasos clave para el logro de los objetivos del estudio, coadyuvando a responder cuestionamientos sobre ¿qué es la EC?, ¿por qué es importante la EC en la minería peruana?, ¿quiénes participan en el ecosistema de EC en la minería peruana?, ¿cómo la EC puede ayudar a cerrar brechas para una minería sostenible?, ¿cuánta materia prima y residuos se evitarían en la minería al adoptar principios de EC?, ¿en qué parte de los procesos de la minería se identifican oportunidades y desafíos potenciales para trasladarse a una EC?

El enfoque de análisis del presente estudio se aborda conforme a los siguientes pasos:

Primero. Revisión de la literatura del estado del arte con base en datos de artículos científicos a nivel nacional e internacional respecto a la EC y su tránsito por la minería.

La revisión de la literatura se realizó conforme al procedimiento sistemático de Tranfield *et al.* (2003), el cual consiste en seguir los pasos de planificación, ejecución y presentación.

Segundo. Para el conocimiento situacional de la adhesión de la EC en la minería peruana (contexto y entorno), desde su perspectiva, crecimiento y orientación, se usa el método Pestel. Este consiste en un análisis político, económico, social, tecnológico, ambiental y legal.

El análisis bajo el método Pestel determina la situación actual sobre la cual se cimenta la EC en la minería peruana, con la finalidad de aprovechar las oportunidades e identificar los posibles desafíos.

Con respecto al método Pestel, Naghedi *et al.* (2020, p. 5) afirman lo siguiente:

“Este método ilustra todos los aspectos de la situación actual en un enfoque holístico para ayudar a comprender las posibles soluciones futuras (Carpenter y Dunung, 2012) y es de uso frecuente en temas ambientales para encontrar factores externos efectivos (Song *et al.*, 2017)”.

Tercero. Realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) para comprender los aspectos e impactos ambientales potenciales de las actividades mineras, en aras de identificar oportunidades y desafíos a ser abordados para la gestión circular en la minería.

La evaluación del ciclo de vida es una técnica de análisis para evaluar los impactos ambientales asociados con todas las etapas de la vida de un producto y/o actividad. Estos van desde la extracción de la materia prima, el procesamiento, la fabricación y la distribución hasta el uso de los materiales (United Nations Environment Programme (UNEP), 2011). La metodología de evaluación del ciclo de vida se realizará según la norma internacional ISO 14040.

El conocimiento de los impactos, oportunidades y desafíos de las decisiones de consumo, y de sus métodos de producción en las diferentes etapas de la cadena de valor de las actividades mineras que principalmente tiene Perú se centrarán en lo siguiente:

- Producción de concentrados y cátodos de cobre (Cu).
- Producción de concentrado polimetálico de plomo (Pb)-plata (Ag)-zinc (Zn).
- Producción de concentrado de hierro (Fe).
- Producción de doré.
- Aprovechamiento no metálico de materiales y materiales de construcción.

Cuarto. Con base en métodos teóricos (inducción y deducción, análisis y síntesis) y con el soporte de herramientas de gestión pública, proponer lineamientos de políticas públicas de EC en la minería. Específicamente, los esfuerzos aunados se orientan a fortalecer las políticas complementarias a la Política Nacional del Ambiente 2021-2030:

“Las políticas complementarias, son aquellas políticas que perfeccionan, mejoran o renuevan las grandes políticas, se desarrollan a través de decretos, leyes secundarias, lineamientos y/u hojas de ruta que tienden a complementar a la gran política solamente en un objetivo y/o apartado especial (Gutiérrez, 2016, p. 184)”.

I. Estado del arte de la economía circular en la minería peruana

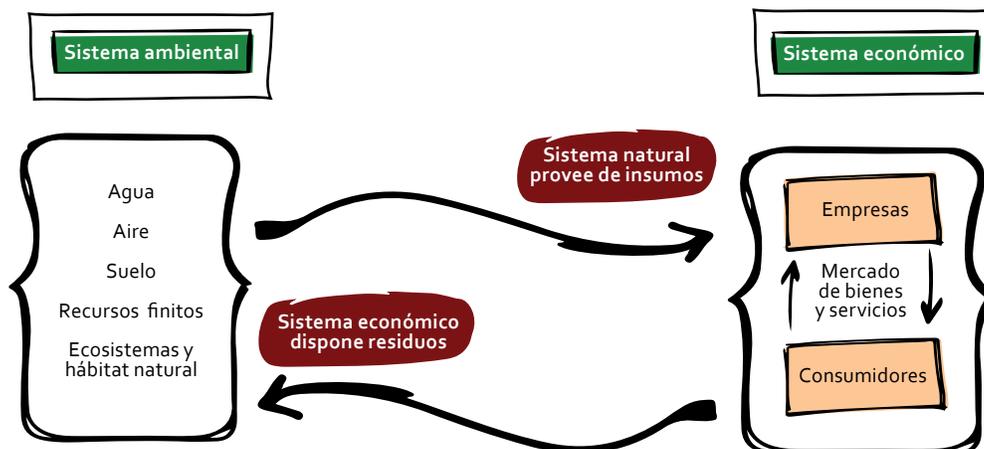
En el presente capítulo, se expondrá la revisión literaria del estado de arte de la conceptualización de la EC, plasmando de manera sistemática el análisis, la discusión y las aproximaciones en la minería. Adicionalmente, se explican los procesos productivos típicos de la minería para la producción de concentrados y catados de Cu, concentrados polimetálicos (Pb-Ag-Zn), y producción de doré y minerales no metálicos.

A. Transición de la economía lineal a la economía circular

En la última década, las miradas de todos los actores de la economía mundial prestan atención al concepto y modelo de EC, con el objetivo de proporcionar una alternativa al modelo de economía lineal de “tomar, fabricar y desechar”. Este modelo ha dominado la economía hasta ahora y, en la actualidad, las empresas y los Gobiernos evidencian los impactos y las limitaciones del sistema lineal al acceso a los recursos naturales renovables y no renovables, los crecientes volúmenes de desechos y la contaminación ambiental, amenazando el bienestar de la sociedad, y repercutiendo en los beneficios y la continuidad empresarial. Para ello, es necesario una transición hacia una economía inclusiva y circular, la cual busque desacoplar el crecimiento económico sin aumentar la presión ambiental (límites de hundimiento), y el uso de energía y recursos (límites de fuente). Para lograr el movimiento a la EC y el desacoplamiento absoluto, se requerirán niveles de inversión significativo, y decisión política para introducir los principios de la EC e incentivos económicos. De esta manera, se mejora la eficiencia de los recursos naturales (Club of Roma, 2016).

Para contextualizar, el desacoplamiento del crecimiento económico con respecto al uso de recursos naturales y la presión ambiental es importante remarcar que existe una relación bidireccional entre el sistema económico (representado en el mercado) y el sistema ambiental natural (Galarza, 2010, pp. 21–22; Pearce & Turner, 1989, p. 30). En estos los sistemas económicos son abiertos, los cuales dependen para su reproducción de los insumos extraídos del sistema natural (medio físico). A este le devuelven contaminantes y residuos (Kapp, 1994, p. 338), produciéndose específicamente dos tipos de residuos: el calor disipado y los residuos materiales (Martínez *et al.*, 1998). En virtud de lo suscrito, en el diagrama 2, se esquematiza la relación entre la economía y el ambiente.

Diagrama 2
Relación entre el sistema ambiental y sistema económico



Fuente: Elaboración propia sobre la base de Pearce y Turner; Elsa Galarza, William Kapp y Juan Martínez.

Con base en este esquema, se puede explicar la presión ambiental que provoca la economía lineal actualmente. Esta alimenta una cultura de consumo excesivo y genera grandes volúmenes de residuos que son insostenibles de asimilar por el sistema ambiental a largo plazo. En antítesis al sistema lineal, el medio natural opera de manera regenerativa y circular, donde el subproducto de una especie (residuo) es la materia prima de otra.

“La economía circular se basa en el ciclo de la naturaleza y tiene como objetivo el bajo consumo de materias primas, energía y desperdicio cero, caracterizándose por generar bajas emisiones contaminantes y alta eficiencia de los recursos, cuyo desarrollo ayudará para mejorar la protección del medio ambiente no solo a nivel regional sino también a nivel mundo, lo que hace que la economía circular forme parte de una estrategia integral para lograr el desarrollo sostenible (Läpple, 2007, pp. 9-10)”.

La EC ha ganado popularidad en el ámbito empresarial y político con el apoyo de organizaciones como la Fundación Ellen MacArthur (Bocken *et al.*, 2017), y la rápida expansión de la investigación (Ghisellini *et al.*, 2016). Sin embargo, la transición a la EC requiere grandes cambios en los patrones de producción y consumo. Para ello, es necesario transitar hacia nuevos tipos de tecnologías, nuevos productos, y modelos comerciales y cambios sociales, donde el diseño es la etapa crucial para incorporar el cambio de “desechos, residuos o subproductos” hacia “insumos para otros productos” (Zink & Geyer, 2017, p. 559).

¿Por qué transitar de una economía lineal a una EC en América Latina?

Conforme a lo expuesto por Henríquez-Aravena *et al.* (2021), América Latina desde tiempos coloniales ha vivido de su extracción de recursos, pero requiere urgentemente pensar en su conservación y regeneración. Consensuando entre la muestra de su estudio, que la EC es una oportunidad trascendental para la generación de empleo y la reducción de la pobreza, además de ser significativa para la conservación de los recursos naturales del presente y futuro. Por lo tanto, “transitar desde la linealidad hacia este nuevo modelo requiere buscar innovaciones que permitan potenciar la desmaterialización, el desarrollo de la industria 4.0, la búsqueda de innovaciones tecnológicas disruptivas, así como la generación de nuevos modelos de negocios” (Henríquez-Aravena *et al.*, 2021, p. 67).

Si bien se ha producido una disociación relativa del crecimiento económico en relación con el uso de recursos a lo largo de la última década, en realidad los avances logrados hasta ahora solo se traducen en mayores controles. Debido al incremento del consumo, los recursos ahorrados por un aumento en la eficiencia se agotan muy pronto. Ante esa dualidad, la EC como concepto entra en juego.

1. Conceptos de la economía circular

La humanidad está en un punto de inflexión porque sus patrones de consumo no son sostenibles, llegando al límite y/o rebasada la tolerancia de la naturaleza (Club of Roma, 2016; Rangel, 2014). De esta manera, se evidencia que, al año 2019, la demanda de los recursos naturales a nivel mundial ha aumentado en todos los ámbitos y la extracción de estos se ha triplicado en los últimos 50 años, acelerándose la extracción en el año 2000 (IPR, 2020). Las señales de alerta que nuestro esquema actual de producción y consumo no son sostenibles, ante lo cual se formula la siguiente pregunta:

¿Qué hacer para gestionar los recursos y residuos, y perdurar como sociedad sin destruir nuestro espacio territorial?

En respuesta a la interrogante previa, en el presente capítulo, se amplía el concepto de EC, para lo cual se articula un espacio discursivo que se centra en el análisis de trabajos previos respecto a un conjunto de definiciones y/o principios sobre esta desde sus orígenes a la actualidad.

Una anotación relevante que se debe considerar antes de explorar el concepto de la EC es remarcar cuál es su posicionamiento y percepción en América Latina. Esta manifestación fue recopilada en el trabajo conjunto entre el Programa Regional de Seguridad Energética y Cambio Climático en América Latina (EKLA) de la Fundación Konrad Adenauer Stiftung, el Centro de Innovación y Economía Circular (CIEC), el Observatorio de Innovación de la Facultad de Economía y Negocios de la Universidad de Chile, y el Centro Latinoamericano para las Relaciones con Europa (Celare). Estas instituciones identifican que la percepción de la EC en América Latina está fuertemente dominada por conceptos de la economía del reciclaje (Henríquez-Aravena et al., 2021, p. 31).

El concepto de EC es tendencia entre los académicos, políticos y profesionales, existiendo aproximadamente más de 114 definiciones de este término (Kirchherr et al., 2017). Esto se evidencia al comparar varios conceptos e interpretaciones donde el rol de la circularidad varía entre diferentes pensadores, laboratorio de ideas (*think tanks*), instituciones legislativas, instituciones asesoras, académicos y empresas (Blomsma & Brennan, 2017). Respecto a la EC, Murray et al. (2017) afirman que la economía circular representa el intento más reciente de conceptualizar la integración de la actividad económica y el bienestar ambiental de manera sostenible.

La trayectoria del concepto de EC comienza articulando y agrupando conceptos preexistentes, el cual tiene raíces principalmente en la economía ecológica y economía ambiental (Ghisellini et al., 2016) y en la ecología industrial (Felix Preston, 2012). No obstante, Pearce y Turner (1989) introdujeron inicialmente el concepto de sistema EC y explican el cambio del sistema económico tradicional abierto al sistema económico circular basándose en la idea de Boulding. Este autor sostiene que la economía debe ser un sistema cerrado sin ningún intercambio de materia con el entorno exterior. Identifica tres funciones económicas del medio ambiente: provisión de recursos, sistema de soporte vital, y sumidero de residuos y emisiones (Pearce & Turner, 1989, pp. 40–41).

En la misma línea de tiempo, Robert Frosch (1992) conceptualiza la ecología industrial basada en una analogía directa con los sistemas ecológicos naturales, donde se maximiza el uso económico de materiales de desecho y productos al final de sus vidas como insumos para otros procesos e industrias, incluyendo el diseño de los residuos junto con el diseño de productos y procesos. Además, internaliza los costos de eliminación de residuos al diseño, a la elección de procesos y a la fabricación de producto. Erkman (1997) suscribe que la ecología industrial analiza el sistema industrial y su entorno como un ecosistema conjunto caracterizado por flujos de material, energía e información de “cómo funciona el sistema industrial, cómo se regula y su interacción con la biosfera” (p.1), así como por la provisión de recursos y servicios de la biosfera. Por su parte, Saavedra et al. (2018), según sus hallazgos en la literatura, consideran a la EC una disciplina más amplia que la ecología industrial debido a la inclusión de cuestiones económicas y políticas.

Charonis (2010) cita que los principios detrás de una EC no son nuevos, y que el concepto de operar en el finito de los recursos naturales y extender la vida útil de los bienes —con la finalidad de reducir el agotamiento de los recursos y el residuo— fue presentado por Walter R. Stahel en 1982 en *Factor de vida útil del producto*. Asimismo, Gower y Schröder (2016) sostienen que este modelo tiene sus orígenes en la biomimética³, a lo cual Bar-Cohen (2006) refiere que esta es una herramienta que ayuda en el diseño de procesos verdes y permite a los diseñadores plasmar un enfoque de optimizar en lugar de maximizar. Asimismo, es la inspiración de la naturaleza, el conducto para mejoras tecnológicas con impacto positivo para la sociedad y el ambiente en todos los aspectos.

Por la parte empresarial, surgen varias estrategias preparatorias a la EC como la producción más limpia (Bilitewski, 2012); la ecoeficiencia centrada en la dimensión económica y medioambiental de la sostenibilidad sin tener en cuenta la dimensión social, es decir, producir más (incrementar valor) con menos recursos e impacto ambiental (Ness, 2008); y el ecodiseño, siendo el diseño inicial la etapa que tiene un impacto significativo en la consecución de la sostenibilidad (Ramani *et al.*, 2010).

La gestión de residuos es otro precedente importante para la EC, ya que propicia una alternativa de mirar los residuos como una recuperación de recursos y prevención del impacto ambiental: una forma alterna a deshacerse de los residuos mediante disposición final o la incineración. Según la revisión literaria, Almas Heshmati (2015) indica que esta surge y/o se relaciona inicialmente con el principio de las “3R: Reducción, Reutilización y Reciclaje” (p.5).

Alemania es la pionera en implementar principios precursores de la EC durante 1999, los cuales fueron acompañados por la promulgación de la Ley Ciclo Cerrado de Sustancias y Ley de Gestión de Residuos. Asimismo, otro elemento precursor es la Ley de Promoción de la Economía Circular de la República Popular China en 2008, la cual define el término de EC en su artículo 2 como “(...) Es un término general para las actividades de reducción, reutilización y reciclaje en la producción, circulación y consumo”⁴.

A partir de esta concisa descripción de algunos de los principales antecedentes teóricos y los conceptos preparatorios de la EC, a continuación, se presentan las diferentes definiciones explícitas que líderes de opinión, académicos, instituciones políticas, instituciones asesoras, laboratorio de ideas (*think tanks*), y otras personalidades influyentes han expresado y/o documentado con respecto a este término.

Laboratorio de ideas (*think tanks*)

- La Fundación Ellen MacArthur (2013) define a la economía circular como un sistema industrial que es restaurador o regenerativo por intención y diseño. Reemplaza el concepto de “fin de vida” con restauración, cambia hacia el uso de energía renovable, elimina el uso de químicos tóxicos, que perjudican la reutilización, y apunta a la eliminación de desechos a través del diseño superior de materiales, productos y sistemas. y, dentro de este, modelos de negocio (p. 7).
- The Green Alliance (2014) suscribe que “una economía circular maximiza el uso sostenible y el valor de los recursos, eliminando el desperdicio y beneficiando tanto a la economía como al medio ambiente”⁵ (p. 15). Asimismo, afirma que una economía circular restaura productos, piezas y materiales antiguos a su uso original de una manera que utiliza la menor cantidad de recursos para ofrecer la misma función. Idealmente, esto significa la reutilización directa de productos, lo que preserva tanto el carácter de alta ingeniería de un producto como su función útil (Green Alliance, 2013, p. 15).
- Ellen MacArthur Fundación, Stiftungsfonds für Umweltökonomie und Nachhaltigkeit (SUN), Deutsche Post Foundation, y McKinsey, en su publicación conjunta *Growth Within* (2015),

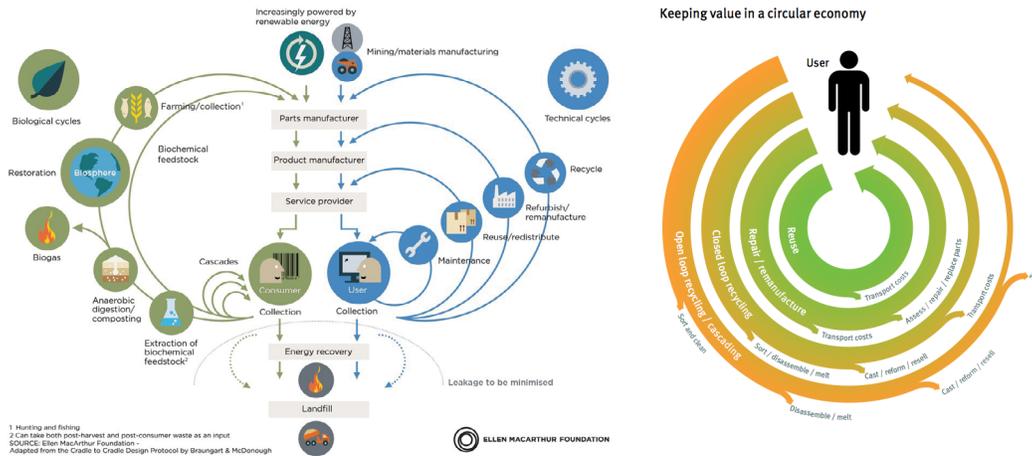
³ El término biomimética fue acuñado por Otto H. Schmitt (1969), el cual representa los estudios y la imitación de la naturaleza, métodos, mecanismos y procesos (Bar-Cohen, 2006).

⁴ Recuperado de <http://www.bjreview.com.cn/document/txt/2008-12/04/content_168428.htm>.

⁵ Recuperado de <<https://publications.parliament.uk/pa/cm201415/cmselect/cmenvaud/214/21402.htm>>.

aluden que los “principios de la economía circular puede traducirse en seis acciones comerciales en el marco RESOLVE: Regéntrate (regenerar), Share(compartir), Optimize (optimizar), Loop (circularidad), Virtualice (virtualizar) and Exchange (intercambiar)” (p. 25).

Diagrama 3
Esquemas de la economía circular según los think tanks



Fuente: Tomado de Towards the Economy (Ellen MacArthur Foundation (2013) , y tomado de Green Alliance (2013).

Instituciones internacionales (asesoras y de políticas)

- El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2006) tiene un enfoque incidente por parte de los consumidores y suscribe que la EC es una economía que equilibra el desarrollo económico con el medio ambiente y protege los recursos. Pone énfasis en el uso eficiente y reciclaje de recursos, así como la protección del medio ambiente. Una economía circular representa un bajo consumo de energía, baja emisión de contaminantes y alta eficiencia. Implica aplicar producción más limpia en empresas, desarrollo de parques eco-industriales y planificación integrada basada en recursos para desarrollo en la industria, agricultura y áreas urbanas (United Nations Environmental Program (UNEP), 2006, p. 2).
- El club de Roma (2016) define a la economía circular como un sistema industrial que es restaurador por intención y diseño. La idea es que, en lugar de descartar los productos antes de que el valor se utilice por completo, deberíamos utilizar y reutilizarlos. Actualmente, solo unos pocos puntos porcentuales del valor del producto original son recuperados después de su uso.
- Según la OECD (2018), la economía circular consiste en “utilizar los recursos de manera más eficiente a lo largo de su ciclo de vida al cerrar, extender y estrechar los circuitos de materiales que podrían resultar en la disociación del consumo y el crecimiento económico” (OECD, 2018, p. 2).
- Para la Unión Europea (2018), en la economía circular el valor de los productos y los materiales se mantiene el mayor tiempo posible y se minimiza el uso de los recursos y la generación de residuos [...] economía competitiva y eficiente en el uso de recursos (p. 2).

Academia

- Kirchner *et al.* (2017), después de revisar y compilar 114 definiciones, definen a la EC como sistema económico que reemplaza el concepto de ‘fin de vida’ por reducir, reutilizar, reciclar y recuperar materiales en los procesos de producción / distribución y consumo. Opera a niveles micro (productos, empresas, consumidores), nivel meso (parques eco-industriales) y macro (ciudad, región, nación y más allá), con el objetivo de lograr el desarrollo sostenible, creando así

simultáneamente calidad ambiental, económica, prosperidad y equidad social, en beneficio de las generaciones actuales y futuras (p. 228).

- Geissdoerfer *et al.* (2017) define a la EC como un sistema regenerativo en el que la entrada de recursos y el desperdicio, las emisiones y las fugas de energía se minimizan al reducir la velocidad, cerrar y estrechar los circuitos de material y energía. Esto se puede lograr mediante un diseño, mantenimiento, reparación, reutilización, refabricación, restauración y reciclaje duraderos (Geissdoerfer et al., 2017, p. 766).
- Murray *et al.* (2017) sugieren como definición que la economía circular es un modelo económico en el que la planificación, la dotación de recursos, las adquisiciones, la producción y el reprocesamiento se diseñan y gestionan, como proceso y salida, para maximizar el funcionamiento del ecosistema y el bienestar humano (p. 25).
- Prieto-Sandoval *et al.* (2018) definen a la economía circular como un sistema económico que representa un cambio de paradigma en la forma en que la sociedad humana se interrelaciona con la naturaleza y tiene como objetivo prevenir el agotamiento de los recursos, cerrar los circuitos energéticos y materiales, facilitar el desarrollo sostenible a través de su implementación en las micro (empresas y consumidores), meso (agentes económicos integrados en simbiosis) y macro (ciudad, regiones y gobiernos). Alcanzar este modelo circular requiere innovaciones ambientales cíclicas y regenerativas en la forma en que la sociedad legisla, produce y consume (Prieto-Sandoval et al., 2018, p. 613).

En el esfuerzo de explorar la brecha de conocimiento y evaluar las definiciones que actualmente adopta la EC dentro de su trayectoria, resulta pertinente remarcar que el concepto vertido por la Fundación Ellen MacArthur (2013) representa cognitivamente un concepto dominante en la discusión sobre la gestión de residuos y recursos. Adicionalmente, se puede subrayar que, de la revisión literaria, la EC articula la capacidad de extender la vida productiva de los recursos como un medio para crear valor y reducir la presión ambiental.

En virtud de lo antes mencionado, y en consideración a los objetivos del presente estudio y la revisión literaria citada, se construye el siguiente concepto:

“La economía circular es un modelo de desarrollo económico que opera a todo nivel organizacional, que previene la contaminación ambiental, protege el entorno ambiental y ofrece una ruta hacia la sostenibilidad ambiental, social y económica. La economía circular busca regenerar y restaurar los sistemas naturales reduciendo la entrada de materias primas (vírgenes) y la producción de residuos. Asimismo, la economía circular mantiene los productos y materiales el mayor tiempo posible en uso y que al finalizar su vida útil se convierten en recursos para nuevas actividades, todo ello sopesado en el diseño y desarrollo tecnológico para fabricar nuevos productos que respondan a un mantenimiento, reparación, reutilización, refabricación, restauración y reciclaje duraderos”.

2. Beneficios de la economía circular

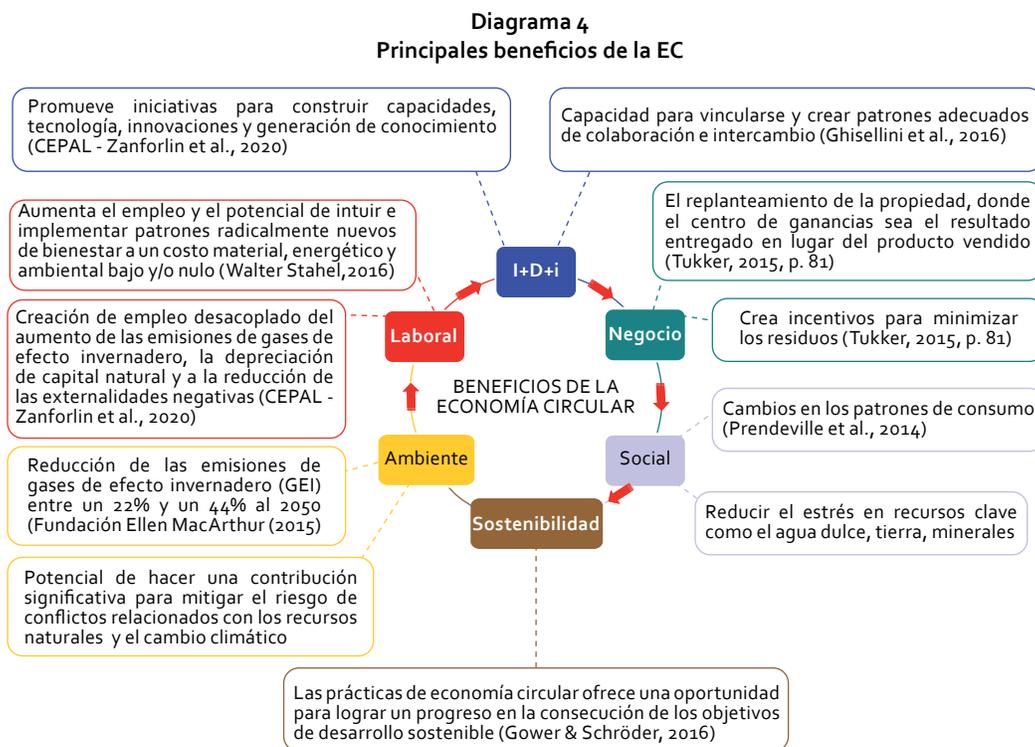
El modelo de economía lineal basado en “extraer, producir y tirar” representa una amenaza para los países en desarrollo en sus tentativas por alcanzar la sostenibilidad social y ambiental. Esto se debe a los impactos ambientales negativos que este modelo genera, los cuales repercuten principalmente sobre las personas al comprometer los servicios de los ecosistemas, tales como el agua pura, el aire limpio, el suelo fértil y la biodiversidad.

¿Qué beneficios tiene la incorporación de la EC como modelo estratégico de desarrollo?

La EC promueve iniciativas para construir capacidades, tecnología, innovaciones y generación de conocimiento mediante el aprendizaje acumulativo (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal), Zanforlin *et al.*, 2020), cuyas experiencias exitosas en la transición hacia esta provienen

de la participación de todos los actores de la sociedad, y su capacidad para vincularse y crear patrones adecuados de colaboración e intercambio (Ghisellini *et al.*, 2016). Del mismo modo, la EC propone un replanteamiento de la propiedad, donde el centro de ganancias sea el resultado entregado en lugar del producto vendido. De esta manera, funciona como catalizador de este modelo de negocio el sistema producto-servicio (productos tangibles, y servicios intangibles diseñados y combinados para que juntos sean capaces de satisfacer las necesidades específicas de los clientes) (Tukker, 2015, p. 81).

En el diagrama 4, se presentan los principales beneficios de la EC.



Fuente: Elaboración propia.

El modelo de la EC es fundamental para impulsar los cambios sociales necesarios en modos de producción y consumo (Prendeville *et al.*, 2014), repercutiendo en importantes beneficios como creación de empleo, innovación, productividad y eficiencia de recursos. Además, el financiamiento público tiene un efecto positivo para promover el desarrollo de la EC, permitiendo a este tipo de proyectos de inversión reducir la exposición al riesgo, asegurar la viabilidad financiera y económica (Aranda-Usón *et al.*, 2019).

La EC implica optimizar la eficiencia de los recursos, así como oportunidades de nuevos empleos para un crecimiento sostenible. En esa línea, conforme se intensifican las prácticas de la EC en las organizaciones, estas repercuten de manera particular en la generación de empleos verdes. Este efecto queda supeditado al carácter radical o incremental de las prácticas circulares adoptadas por las organizaciones (Moreno-Mondéjar *et al.*, 2021).

Cecere y Mazzanti (2017) resaltan que la innovación en productos y servicios ecológicos es esencial para la creación de empleos verdes.

Por su parte, la Organización Internacional del Trabajo (OIT) indica lo siguiente:

“Los empleos verdes son empleos decentes que contribuyen a preservar y restaurar el medio ambiente mediante la incorporación de uno o más de los siguientes aspectos: aumentar

la eficiencia del consumo de energía y materias primas; limitar las emisiones de gases de efecto invernadero; minimizar los residuos y la contaminación; proteger y restaurar los ecosistemas; y contribuir a la adaptación al cambio climático”⁶.

Además, (INECC, 2016, p. 12) menciona que estos son “empleos formales que se generan gracias a actividades económicas cuya finalidad es preservar o mejorar el medio ambiente y los recursos naturales” (p. 12).

Schroeder *et al.* (2019) suscriben que las prácticas de la EC tienen una estrecha relación con las metas del ODS 6 (agua limpia y saneamiento), el ODS 7 (energía asequible y limpia), el ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico), el ODS 12 (consumo y producción responsables) y el ODS 15 (vida en tierra). Así, coadyuvan a alcanzar directamente 21 metas y contribuir indirectamente a cumplir 28 metas adicionales. Asimismo, las prácticas de EC ofrecen potencial para crear sinergias entre varios ODS como los que promueven el crecimiento económico y el empleo (ODS 8), la eliminación de la pobreza (ODS 1), la erradicación del hambre y la producción sostenible de alimentos (ODS 2), y los ODS que apuntan a la protección de la biodiversidad en los océanos (ODS 14) y en tierra (ODS 15).

Una parte importante de la compilación bibliográfica del concepto y de las prácticas de la EC se circunscribe a realidades de países europeos y asiáticos, por lo cual es pertinente formular la siguiente interrogante:

¿Cuáles son los beneficios de transitar hacia la EC en ALC?

Esta interrogante tiene resonancia en la economía peruana y en la de los países andinos, que frecuentemente se encuentran ante el dilema de elegir entre el desarrollo económico o la protección del medio ambiente.

Ante las deficiencias de la economía lineal⁷, expuestas por la pandemia de la COVID-19, la EC con un enfoque de innovación social expresa ser un marco alternativo en la recuperación económica postpandemia en los países de ALC. Esto se debe a que asiste en reducir la pobreza, promueve el desarrollo humano y fomenta patrones de consumo sostenibles en pro de una sociedad más resiliente e inclusiva. Asimismo, la EC beneficiará a los países de ALC en la medida de su grado de inversión en ciencia y tecnología para la implementación de la industria 4.0 como eje de nuevos modelos de negocio, así como en la reducción de las externalidades negativas (Schröder *et al.*, 2020).

Si los países en vías de desarrollo logran dar un salto hacia una EC, evitarán las enfermedades (y sus costos asociados) y la contaminación ambiental que están coligadas a los grandes volúmenes de residuos que acompañan el crecimiento de la economía lineal. Del mismo modo, el patrocinio de esta en países en desarrollo incrementará la productividad y creará más puestos de trabajo, especialmente en la base de la pirámide económica. Estos beneficios se obtendrán siempre y cuando los países en desarrollo establezcan regulaciones, impuestos y/o incentivos para garantizar un clima favorable para las prácticas circulares con respecto a las prácticas lineales (Fernandes, 2016).

La inversión en I+D+i es la base para lograr una EC competitiva y, sobre su evidencia, se diseñen políticas públicas que articulen las acciones circulares de todos los actores sociales, donde el sector público acompañe la inversión circular (promueva incentivos tributarios para la inversión y alternativas de financiamiento). De igual manera, promueva redes y asociaciones en EC (academia, empresa, gobierno y sociedad civil); module un trabajo conjunto entre autoridades políticas locales, regionales y/o nacionales; realice monitoreo y mejora continua de las políticas, programas y proyectos de economía circular; y el Gobierno tenga injerencia comunicativa para cambiar el desconocimiento de los consumidores con respecto a la EC (CIEC, 2019).

⁶ Recuperado de <https://www.ilo.org/global/topics/green-jobs/news/WCMS_220248/lang--en/index.htm>.

⁷ Deficiencias asociadas al agotamiento de los recursos naturales, incremento en las brechas de desigualdad y vulnerabilidad de las cadenas de valor a nivel mundial.

En virtud de todo lo expuesto, se concluye que la EC tiene el potencial de aportar considerables beneficios económicos, sociales y ambientales tanto para los países desarrollados como para los países en vía de desarrollo. Del mismo modo, apertura un camino para lograr los ODS, específicamente alcanzar 25 metas directas y coadyuvar en lograr 28 metas de manera indirecta. Sin embargo, es importante resaltar que ostentar todo beneficio de la EC en ALC necesita políticas deliberadas, inversión I+D+i, e incentivos para crear y garantizar prácticas circulares.

3. Análisis de ciclo de vida (ACV) y economía circular (EC)

La EC abarca un amplio espectro entre distintos campos como el social, el económico y el ambiental, entre otros. De esta manera, une varios conceptos que se complementan con el ACV, ya que tienen como objetivo común reducir los impactos ambientales. El ACV es una herramienta cuantitativa e integral que es usada para evaluar el desempeño ambiental y social de los productos y servicios desde sus orígenes hasta el final de su vida útil. En función del desempeño ambiental, el ACV permitirá evaluar no solo el diseño circular de productos y/o servicios, sino también la transición hacia una economía más circular (Haupt & Zschokke, 2017). Mirzaie *et al.* (2020) sostienen que los enfoques de análisis de huella del producto y/o de la organización respaldan decisiones más informadas para lograr los objetivos de la EC. Adicionalmente, Goedkoop *et al.* (2017) indican que el ACV es una herramienta potencial para medir el progreso de las actividades y productos comerciales en el marco de la consecución de los ODS.

EL procedimiento general para el análisis se encuentra formalizado en la ISO 14040 (2016), y requiere evaluaciones de entradas, y salidas de flujos de materia y energía en un proceso productivo (ISO, 2016). Cabe destacar que esta no es la única metodología aceptada para analizar la circularidad de un producto. Con base en la revisión de autores de este documento, se identificó el concepto de ACVS —que sigue el mismo esquema de análisis para un producto, con el objetivo principal de estimar los aspectos socioeconómicos positivos y negativos a lo largo del ciclo de vida de un producto o servicio a partir del costo y evaluación social (UNEP, 2011). No obstante, dicho método aún se encuentra en la etapa de desarrollo y no ha alcanzado la madurez para medir cuánto contribuye un producto en el cumplimiento de los ODS (Herrera Almanza & Corona, 2020; Teah & Onuki, 2017).

Actualmente, los ACV se pueden abordar desde tres puntos de vista:

- i) **ACV de la cuna a la puerta de la fábrica (*cradle to gate*)**. Estudia únicamente las fases de extracción de materias primas, transporte a fábrica y producción.
- ii) **ACV de la cuna a la tumba (*cradle to grave*)**. Explora todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la obtención de las materias primas hasta la gestión de los residuos al finalizar su vida útil.
- iii) **ACV de la cuna a la cuna (*cradle to cradle*)**. Analiza todas las fases del ciclo de vida del producto; además, incluye la gestión de los residuos al final de la vida y su reutilización como materia prima que reinicia el ciclo.

Cualquier proyecto de ACV involucra a múltiples actores en diferentes roles y diferentes entornos. Por ello, en un contexto de gestión del ciclo de vida, se reconocen numerosas acciones relacionadas con la aplicación del pensamiento del ciclo de vida, el desarrollo de herramientas y tareas para lograr cadenas de productos sostenibles con abastecimiento sin conflictos, así como constantes auditorías de cumplimiento (Baumann *et al.*, 2018).

En una primera aproximación, es importante considerar la definición establecida por la ISO con respecto al ciclo de vida:

Ciclo de vida. Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final; y **ACV.** Recopilación y evaluación de las entradas, resultados y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto durante su ciclo de vida (ISO 14044, 2006).

La aplicación del procedimiento del ACV según la ISO 14044 (2006) establece una secuencia de cuatro procesos, los cuales se resumen a continuación:

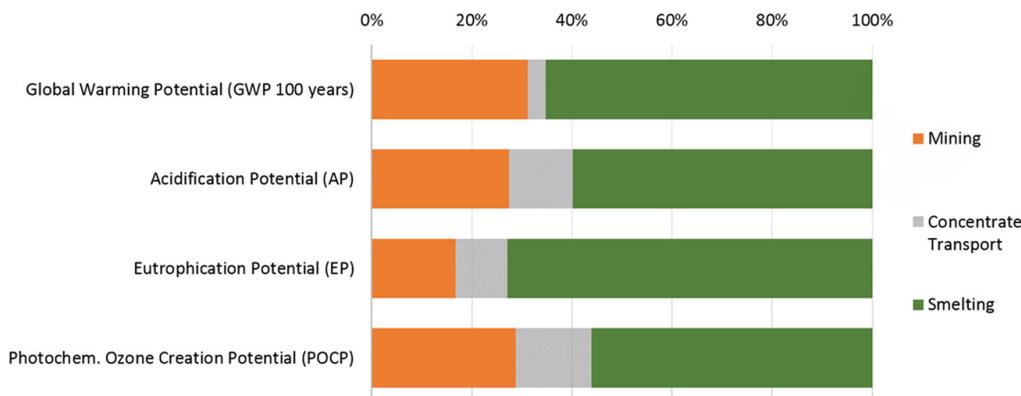
- i) **Definir el objetivo y el alcance del ACV acorde y coherente con la aplicación prevista.** Ello involucra definir el producto a estudiar, funciones del sistema del producto, la unidad funcional, límites del sistema (diagrama de flujo de procesos, entradas y salidas de masa, energía, e importancia ambiental), procedimientos de asignación, metodología de la evaluación de impactos de ciclo de vida, juicios de valor y limitaciones.
- ii) **Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV).** Definido el objetivo y el alcance del estudio, en esta parte del proceso se recopilan datos, se validan, se sensibilizan al valor unitario y a la unidad de medida para elaborar una base de datos asociada con la producción unitaria.
- iii) **Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).** En la evaluación, es importante considerar de manera secuencial la categorización de impacto, indicadores de categoría, modelos de caracterización, asignación de resultados a las categorías de impacto para luego realizar el cálculo de los resultados.
- iv) **Interpretación del ciclo de vida.** En esta última fase, se interpretan los impactos del ciclo de vida de acuerdo con el objetivo y el alcance del estudio, considerando la integridad, sensibilidad y coherencia en el análisis.

En el trabajo de investigación de Santero & Hendry (2016), se compilan recomendaciones y/o consideraciones a tener en cuenta para el ACV, donde la selección de las etapas del ciclo de vida (límites del sistema) en un análisis que involucra metales es de vital importancia; toda vez que al momento de fijar el límite del sistema se establece la inclusión y exclusión de ciertos procesos unitarios, en específico, tomar precaución en los estudios de principio a fin, restringiéndose estos a no ser comparados a menos que se haya acordado una equivalencia funcional en el nivel del producto terminado. De esta manera, es la única forma de comparar dos metales (o un metal y otro material), escalando sus ICV a unidades funcionales idénticas.

Van Genderen *et al.* (2016) realizaron un estudio con respecto a la producción primaria de zinc desde la cuna hasta la puerta (*cradle to gate*). Este incluye la extracción de mineral de zinc, la concentración de mineral, el transporte de concentrado de zinc, y la fundición de concentrado de zinc, con datos primarios de 24 minas y 18 fundiciones. Estos representan operaciones de minería y fundición en África, Asia, Australia, Europa y América del Norte; cubren $4,7 \times 10^6$ TM de concentrado de zinc y $3,4 \times 10^6$ TM de zinc SHG, que en conjunto representan el 36% y el 27% de la producción mundial. En este estudio, se empleó una variedad de leyes de mineral (incluyen cobre y plomo) y una concentración promedio de zinc en el concentrado del 59%. Se seleccionó como unidad funcional la producción de 1 TM de zinc SHG con una pureza de 99.99% de zinc. Adicionalmente, se presentaron resultados para la producción de 1 TM del concentrado de zinc, asignando las cargas ambientales en la minería y la fundición bajo un enfoque de masa. Así, el modelo se creó utilizando el sistema de *software* GaBi⁶, cuyos resultados de la EICV fueron los siguientes:

"[...] Se puede observar que la fundición representa la mayor parte de la carga, entre el 56 y el 73% según la categoría de impacto considerada. Las cargas concentradas oscilan entre el 17 y el 31%. Finalmente, el transporte de concentrados intermedios varía entre el 4 y el 15%. En general, el mayor contribuyente a los impactos ambientales tanto del concentrado como del zinc SHG es el consumo de electricidad. Dentro de la minería, la contribución de la combustión de diésel es significativa [...]" (Van Genderen et al., 2016, p. 1591).

Diagrama 5
Resultados de la evaluación de impactos del análisis de ciclo de vida para producir una tonelada de zinc



Fuente: Tomado de (p. 1591), por Van Genderen *et al.*, 2016.

Dada la importancia de los recursos minerales para la sociedad y el debate de cómo se debe abordar el uso de recursos minerales en el ACV, se recomienda que para calcular los impactos sobre el uso de recursos minerales y metales es apropiado categorizar el impacto como “potencial de agotamiento abiótico (ADP por sus siglas en inglés)” (Guin, 2001, p. 72). Este enfoque se basa en el concepto de agotamiento de recursos, considerando que la extracción de un recurso de la corteza terrestre contribuye al agotamiento del *stock* natural. Asimismo, es una indicación que está en concordancia con el grupo de trabajo de las Naciones Unidas (ONU) sobre recursos minerales y la iniciativa del ciclo de vida, cuyo objetivo del grupo es cuantificar la contribución relativa de un sistema de productos al agotamiento de los recursos minerales (Sonderegger *et al.*, 2020). Sin embargo, Berger *et al.* (2020) manifiestan que el modelo potencial de agotamiento abiótico (ADP) presenta inconsistencias hasta que se implemente el concepto de disipación de recursos.

Beylot *et al.* (2021) definen la disipación de recursos como “los flujos disipativos de recursos abióticos, son flujos hacia sumideros o reservas que no son accesibles para futuros usuarios debido a diferentes limitaciones” (p.499). Así, suscriben de manera complementaria que los flujos disipativos deben informarse en unidades de masa a nivel de proceso unitario. Para corroborar su postulado, Beylot *et al.* (2021) desarrollaron un escenario de ACV de la cuna a puerta de 1 kg de cátodos de cobre, cuyo límite de operación es la extracción de sulfuros de cobre, la producción de concentrado de cobre (30% de cobre), relaves y la producción de cátodos de cobre (pirometalurgia) a partir del tratamiento del concentrado de cobre. En este último proceso, también se generan escorias de silicato de hierro, las cuales se consideraron para su uso en la construcción como práctica común en la industria. Los resultados fueron los siguientes:

“[...] Para producir 1 kg de cátodo de cobre, se generan 0,88 kg de flujos de recursos disipados, divididos en cuatro procesos unitarios, la disposición de relaves representa 0,37 kg (42% de la masa total de recursos disipados); la pirometalurgia con 0,25 kg (29% de recursos disipados) y la extracción y concentración con 0,23 kg (26% de recursos disipados), siendo el carbonato de calcio el principal mineral que se disipa directamente a lo largo de la producción de cobre de principio a fin (0,45 kg, es decir, 51% de la masa total disipada). Finalmente, en relación con los resultados anteriores, se observa que el 54% de los recursos se disipan al medio ambiente [...]”.

Sobre la base del pensamiento del ciclo de vida, ha surgido el ecodiseño, cuyo objetivo y principios consisten en desarrollar productos y servicios que sean ambientalmente amigables y que cumplan los requisitos del producto (técnicos, económicos y sociales). El ecodiseño, durante el proceso de desarrollo del producto, pensará en el impacto ambiental del nuevo producto para cada fase del ciclo de vida,

comenzando por la extracción de las materias primas, la producción de materiales a partir de estas y las técnicas de producción para transformar los materiales. Asimismo, pensará en componentes, en su ensamblaje en productos, en su distribución y empaque, en la fase de uso (el impacto de los consumibles y el consumo de energía), y finalmente en la fase de fin de uso por parte del consumidor. Este ecodiseño puede considerarse como el copiloto durante el proceso de desarrollo del producto, y su adopción es clave para el éxito de la EC (Van Doorselaer, 2021).

Como antecedente del ecodiseño, es importante mencionar que en 1976 se introdujo el concepto *cradle to cradle* (cuna a la cuna) por Walter Stahel⁸. Este fue desarrollado más tarde por Michael Braungart y William McDonough en su informe histórico *Cuna a la cuna: rehaciendo la forma en que hacemos las cosas*. El *cradle to cradle* (cuna a la cuna) se erige como una filosofía de diseño, el cual estima que todos los materiales empleados en los procesos industriales y comerciales son como nutrientes, estableciendo al metabolismo biológico como un modelo para ser desarrollado en la industria a través del metabolismo técnico, percibiendo que la elaboración de los productos puede ser diseñada para una continua recuperación y reutilización como nutrientes biológicos y técnicos. (Lehmann, 2019, p. 27).

B. Rol de la economía circular orientado a la minería

Uno de los principios clave en el concepto de EC y del desarrollo sostenible es desacoplar el crecimiento económico del uso de recursos primarios, así como vincularlos al uso de materias primas secundarias que fluyan mediante circuitos cerrados. Sin embargo, en el campo de la minería, muchos científicos y expertos suscriben que las sociedades y las economías seguirán requiriendo materias primas extraídas desde los recursos naturales, a pesar de las continuas mejoras en el reciclaje de metales (Sillanpää & Ncibi, 2019, p. 139). Esto ha sido refrendado por Julian Allwood (2014), quien indica que los metales primarios seguirán siendo necesarios durante la transición hacia una sociedad más sostenible, y no sería razonable pensar que el reciclaje de productos al final de su vida útil, en un futuro cercano o lejano, reemplazará la extracción primaria por completo.

La minería en comparación con otros sectores ha recibido poca atención por parte de los principales actores y defensores para hacer operativo el concepto de EC. De esta manera, hay poco desarrollo literario sobre la EC aguas arriba (*upstream*) de la cadena de valor de metales primarios. La gran mayoría de literatura, programas, políticas y prácticas de EC aborda aguas abajo de la cadena de valor (*downstream*), con un mayor énfasis en cerrar el ciclo de los materiales que ahora fluyen fuera de la economía como “desperdicio”. Así, se centra principalmente en el consumo, quedando en los modelos de circularidad la producción de materia prima virgen fuera de las cadenas de valor. Se considera el reprocesamiento de residuos mineros como extracción primaria, excluyendo el reciclaje de metales como debería ocurrir en la EC (Lèbre *et al.*, 2017; McCarney, 2021).

En sus etapas de extracción de minerales y beneficio metalúrgico, la minería a cielo abierto y/o subterránea produce residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Específicamente, en la extracción de minerales, se originan desechos mineros, material estéril, efluentes y emisiones hacia la atmósfera. Los **desechos mineros** se refieren al material que, por sus características económicas en su momento de extracción, no contiene la cantidad de mineral para ser procesado y se basa principalmente en la ley de corte. Dichos residuos son materiales heterogéneos en cuanto a sus características físicas (granulometría y contenido de humedad) y químicas (mineralogía y geoquímica). Asimismo, el **material estéril** es la remoción de macizo rocoso (sin valor económico) para acceder y extraer mineral (yacimientos económicamente extraíbles), tanto los desechos mineros como la roca estéril se disponen en grandes áreas durante el ciclo de vida de la mina.

⁸ Fundador y director del *Product Life Institute*, y principal defensor de la eficiencia de los recursos, quien se refiere al *cradle to cradle* como la necesidad de utilizar bienes y materiales durables en el tiempo que no terminen desechados cuando acabe su uso, sino que vuelvan a “la cuna”. Es decir, que puedan reutilizarse íntegramente para algo nuevo una vez acabada la función para la que habían sido diseñados.

El beneficio de minerales, independientemente del método (separación gravimetría, separación magnética, flotación), genera **residuos de procesamiento**, cuya característica principal es que tienen muy bajo valor económico para ser tratados. Estos remanentes pueden ser relaves, lodos y aguas residuales, con características físicas y químicas que varían según la mineralogía y geoquímica del mineral tratado, el tipo de tecnología de procesamiento, el tamaño de partícula del material triturado y el tipo de productos químicos usados en el proceso. Los relaves y lodos se disponen, por lo general, en presas, tranques o estanques que han sido construidos empleando residuos de minería, el propio relave u otros materiales procesados que se encuentran disponibles en la cercanía de la mina.

Diagrama 6
Integración de la minería en los principios de la EC

La **reducción** de residuos, la **recuperación** del valor máximo de las operaciones del sitio de la mina, mejorar la eficiencia en la extracción de recursos primarios y asegurar una **rehabilitación** efectiva de sitio de mina. (Geoff McCarney, 2021)

Reducir la tasa de dilución minera y pérdida de mineral, mejorar la tasa de recuperación del procesamiento de minerales, reducir el volumen de residuos y aguas ácidas, inertizar residuos, **extender la vida útil** de los productos extraídos, **recuperar y reciclar** los materiales extraídos que tengan valor para ser integrados a la cadena de suministro. (Sillanpää & Ncibi, 2019)

Reducir el pasivo y aumentar el valor de los residuos mineros, donde la mayor contribución que haría la minería hacia una economía circular es la introducción de **innovaciones disruptivas y la gestión proactiva de los residuos**, para ello es necesario iterar la caracterización de los yacimientos, la planificación de la mina, el procesamiento, la eliminación de desechos, incluyendo el **reprocesamiento, reciclaje, reutilización, y la rehabilitación de tierras en un enfoque integrador**. (Tayebi-Khorami et al., 2019)

Gestionar proactivamente los residuos (relaves) con un **enfoque en el origen de los problemas** ambientales, integrando técnicas de procesamiento de minerales para la eliminación de pirita y otros sulfuros por flotación antes de la eliminación de los relaves, (Edraki et al., 2014)

Prolongar las operaciones actuales en lugar de comenzar nuevas bajo ciertas condiciones y ver a los depósitos de residuos mineros como recursos abióticos. (Éléonore Lèbre et al., 2017)

Incorporar los relaves mineros en **nuevas cadenas de suministro**, como la incorporación de los relaves en la industria del cemento y/o vidrio (Alfonso et al., 2020)

Mejorar el desempeño de las empresas mineras (Gedam et al., 2020) **optimizar procesos, implementar tecnologías disruptivas**, reducir emisiones y uso excesivo de recursos, contribuir directamente en la consecución de los ODS (Danta et al., 2021)



Fuente: Elaboración propia.

La extracción de depósitos de minerales metálicos (por ejemplo, Cu, Pb, Zn, Au, Ni, U, Fe) tiene el potencial de exponer sulfuros a la oxidación y producir **agua ácida**. Según el grado de oxidación del sulfuro, puede liberar trazas de metales pesados (Lottemoser, 2010, pp. 9-11).

Con el creciente interés internacional en torno al concepto de la EC y las aspiraciones de transformar un futuro sostenible bajo en carbono, la minería ha adquirido una trascendencia relevante en esas aspiraciones. En ese contexto, explorar la integración de los sectores extractivos aguas arriba (*upstream*) en la tendencia de la EC es el propósito de esta sección. Esto con la finalidad de comprender cómo la EC se puede vincular a la minería, bajo la premisa de que este concepto es aplicable a todo tipo de recursos naturales y flujos de materiales (materiales bióticos y abióticos, el agua, y la tierra), y que el diseño, la reparación, la reutilización, la renovación, la remanufactura, el intercambio de productos, la minimización y el reciclaje de residuos son importantes en la EC. En el diagrama 6, se muestra cómo se puede integrar la minería en los principios de la EC.

Geoff McCarney (2021) señala que la vinculación de la minería y la EC radica en **repensar** los residuos mineros mediante el uso de sistemas de circuito cerrado para reducir su producción (la cantidad de residuos depende de la mina y sus operaciones), y **extender la vida útil de la mina** para reducir la necesidad de abrir nuevas minas. Esta adopción gira en torno a ampliar la productividad de la vida útil de la mina, asegurando que se recupere el valor máximo antes del cierre y/o rehabilitación (mirar a la mina como un producto), y **regenerar** la mina en su fase de cierre y/o rehabilitación con fines productivos a futuro.

Asimismo, Sillanpää y Ncibi (2019) sostienen que la industria minera en la actualidad se basa en un flujo unidireccional, por lo que transitar el concepto de la EC en la minería implica modificar todo el enfoque de explotación que sigue el “flujo natural” de los productos mineros. La aplicación de los principios de la EC en la minería mediante círculos de restauración es un esfuerzo oportuno y bien justificado para convertir los residuos mineros (sólidos y líquidos) que se presentan en las minas cerradas, abandonadas y en operación en recurso (residuos inertes), concretizando así la noción de convertir los residuos en riqueza.

Los desechos mineros y relaves pueden tener importantes impactos ambientales, por lo que se necesitan estrategias integrales de corto, mediano y largo plazo para transformar la industria minera hacia la circularidad. En este contexto, Tayebi-Khorami *et al.* (2019), en *Repensar los residuos mineros mediante un enfoque integrador dirigido por las aspiraciones de la economía circular*, explican que la aplicación del pensamiento de la EC sería una perspectiva transformadora de la minería para crear un nuevo valor económico y avanzar hacia una huella ambiental cero. Sin embargo, la circularidad requerirá algunos cambios fundamentales que incluyen infraestructura, legislación y economía favorable. Asimismo, el citado estudio formula la pregunta “¿cómo la industria minera puede crear un nuevo valor económico, minimizar sus impactos sociales y ambientales, y disminuir la responsabilidad de los residuos mineros?”. Los autores responden que la solución radica en **repensar los residuos** con un enfoque multidisciplinario e integrador de las dimensiones sociales, técnicas (geometalúrgicas), económicas y legales, para lograr, por ejemplo, residuos estables, inertes, gestionados con una huella mínima de uso de agua y energía, considerando los aspectos ambientales, sociales. Además, se debe seleccionar tecnología óptima de eliminación y brindar oportunidades para la reutilización.

Los métodos de eliminación de relaves en minas a cielo abierto y/o minas subterráneas (abandonadas/operativas) se disponen en presas, ya sea de **manera convencional**, que es la disposición de relave en modo de lechada de agua más relave. En este, los incidentes por la falta de control del balance hídrico o consistencia en su construcción han tenido repercusiones catastróficas por la rupturas de las presas. Los **relaves en pasta y espesados** son mezclas densas y viscosas de relaves y agua, dicha disposición minimiza la huella de almacenamiento; asimismo, se pueden disponer como rellenos en mina, y reduce el potencial de drenaje ácido y el riesgo de falla, pudiendo mezclarse con cemento *porland* para crear relleno cementado. De este modo, estabiliza los contaminantes presentes en el agua residual del relave. No obstante, con la extracción de minerales con menor calidad (leyes cada vez más baja y, en consecuencia, mayores volúmenes de desecho producido), la gestión de relaves necesita un enfoque integrador y multidisciplinario que permita la integración de técnicas de procesamiento de minerales con el fin de eliminar la pirita y otros sulfuros por flotación antes de la eliminación (principales generadores de acidez). Una de las técnicas más prometedoras para limitar la producción de drenaje ácido de mina a partir de relaves es la desulfuración, cuyo desafío principal es hacer flotar los sulfuros de forma selectiva desde una pulpa ya tratada (Edraki *et al.*, 2014).

Lèbre *et al.* (2017) exploran actividades de reprocesamiento de desechos mineros previamente descartados o simplemente sin explotar, proponiendo observar los depósitos de residuos mineros como recursos abióticos, con una peculiaridad en los residuos que contienen sulfuros, que con el pasar del tiempo su calidad mermaría debido a la generación de lixiviados. Asimismo, establecen que las pérdidas de minerales se pueden controlar en las prácticas de operación y cierre, y en las estrategias posteriores al cierre. La gestión de residuos mineros, con base en tecnología e innovación, debe ser proactiva para encontrar formas alternativas de emplear los desechos mineros ahora o en el futuro, o pueden eliminarse de una manera que los esterilice para cualquier propósito futuro.

En este contexto, se presenta el caso de la mina de Morgan, ubicada en el centro de Queensland, Australia. Esta operó desde 1882 hasta 1982 y, después de su cierre, se inició un proyecto de retratamiento de relaves que extendió la vida útil de la mina por otros ocho años. Así, se extrajo oro y plata de relaves sulfídicos vertidos en el tajo Sandstone Gully. Estas operaciones terminaron prematuramente porque los precios del oro eran bajos y por dificultades técnicas en la recuperación del oro debido a que el relave tenía presencia de cobre que reacciona con el cianuro. De esta manera, provocó un consumo excesivo de este

último y una disminución en la recuperación. Después de varios años de abandono, en 2015, la empresa Carbine Resources completó un estudio de prefactibilidad que contempló la recuperación económica de oro, sulfato de cobre y pirita. El sulfato de cobre se utiliza en una variedad de aplicaciones domésticas, especialmente como reactivo en la industria minera, en la preservación de la madera o en la agricultura (Butterworth 2016). El concentrado de pirita se extraería con altas tasas de recuperación (alrededor del 90%), conteniendo alrededor del 50% de azufre, a partir del cual se puede producir ácido sulfúrico. Este se emplea principalmente en las aplicaciones agrícolas (Lèbre *et al.*, 2017).

Los relaves representan una preocupación para el entorno ambiental y social, por lo que incorporar los relaves en una cadena productiva es una opción que la EC invita a explorar al sector minero. Así, se encuentra en la técnica de vitrificación una opción para incorporar los relaves en la industria del vidrio que, a escala piloto y a nivel de investigación, se han preparado los relaves; en primer lugar, secando, triturando y enmendando la muestra según sea necesario; luego, fundidos; y, como resultado, se obtiene un vidrio no poroso de alta resistencia, que puede ser usado en la industria de la construcción. Sin embargo, esta tecnología tiene limitaciones al ser evaluadas en los aspectos económicos y ambientales, toda vez que la vitrificación requiere una significativa cantidad de energía. Por lo tanto, la tecnología suele ser limitada a sólidos secos (Alfonso *et al.*, 2020; Environmental Protection Agency, 1998).

Vidyadhar Gedam *et al.* (2021), en su estudio de análisis bibliográfico sobre la EC en la industria minera, suscriben que la adopción sistemática de la EC en la minería conducirá a un ecosistema sostenible y mejorará el desempeño de las empresas. De esta manera, identifican los desafíos del sector minero para transitar a la EC como la falta de gobernanza para su implementación, la falta de beneficios económicos y un alto costo de inversión, la falta de estímulos y cooperación, la falta de calidad y gestión de la cadena de valor, y la falta de aceptación social de productos elaborados a partir de residuos mineros.

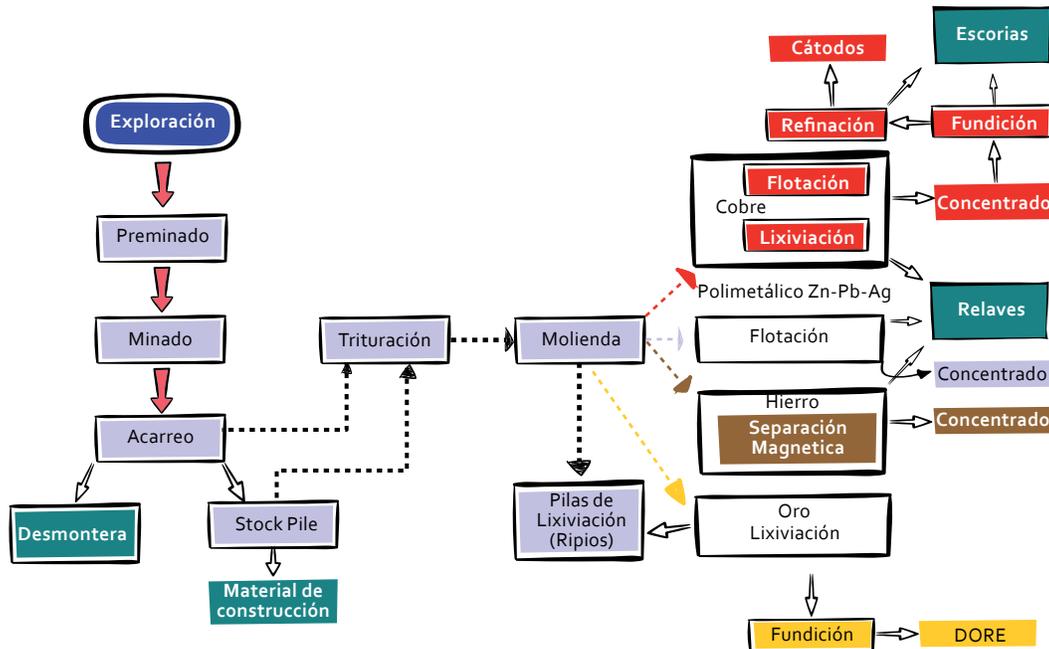
Hasta ahora, las fases de producción y consumo están completamente desconectadas con el fin del ciclo de vida de los materiales y productos. Por lo tanto, en la transición hacia la EC, se necesitarán cambios técnicos y socioeconómicos. Para ello, se apremia el uso de la industria 4.0 como facilitadora de la implementación de la EC, la cual permite digitalizar la información e integrar sistemas en todas las etapas de creación y uso de productos (incluida la logística y el suministro). Por ejemplo, el uso de aplicaciones de cadena de bloques (*blockchain*), la impresión en 3D, la automatización, la computación en la nube y el análisis de macrodatos (Wilts *et al.*, 2018). El término industria 4.0 se refiere a una disrupción radical hacia una industria inteligente con tecnologías de fabricación autónomas e interconectadas a internet, haciendo que las industrias sean más económicas, inteligentes y eficientes. (Yildiz, 2019).

En complemento al análisis expuesto, se amplían los nexos entre la EC y la industria 4.0 para el desarrollo de prácticas y soluciones sostenibles. En esa búsqueda, Tet Dantas *et al.* (2021) expresan que estos nexos convergen principalmente en la promoción integral de la sostenibilidad, afianzan la optimización de procesos y la implementación de tecnologías rentables, y reducen emisiones y el uso excesivo de recursos. Por lo tanto, contribuyen directamente a las metas establecidas por los ODS 7, 8, 9, 11, 12 y 13 (Dantas *et al.*, 2021).

1. Procesos mineros

En la presente sección, se muestra una breve descripción de los principales procesos para la producción de concentrados (cobre y polimetálico de zinc, plomo y plata), cátodos de cobre, doré (plata-oro), hierro, y el aprovechamiento no metálico de materiales de construcción. De esta manera, se diferencian los procesos de beneficio en función de las características mineralógicas del yacimiento.

Diagrama 7
Procesos mineros y de beneficio de cobre, polimetálico, hierro, doré y material de construcción



Fuente: Adaptado de *Economía minera*, por Dammert, 2021.

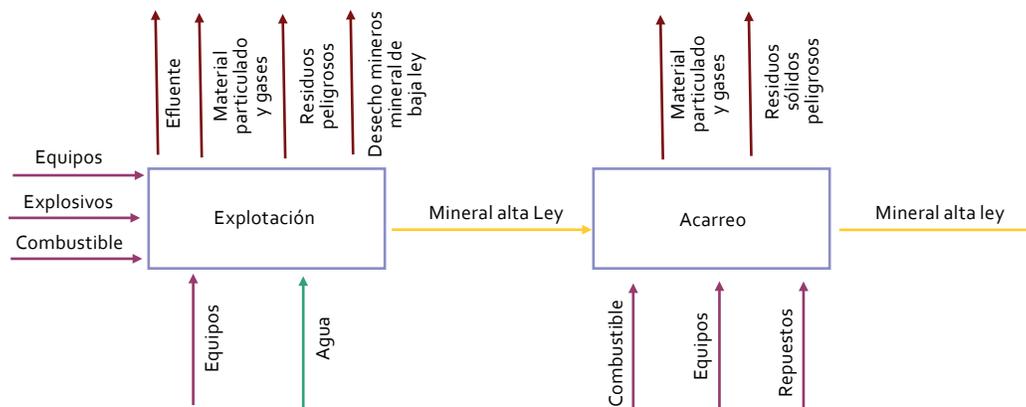
Exploración. Consiste en encontrar un yacimiento geológico con concentraciones anómalas de minerales comercialmente extraíbles, donde se estima el contenido porcentual de mineral y se determinan las impurezas. Asimismo, se evalúa el costo de minado, dependiendo de la forma del depósito y de la profundidad en la que se encuentra, junto con otras características como la infraestructura del área, las características del terreno, los costos del transporte a los posibles mercados, entre otros.

Explotación. Consiste en la extracción del mineral del yacimiento. En esta etapa, se define el método de minado, el volumen de mineral a extraer, las leyes de mineral, el plan de desarrollo y el minado en relación con las características del yacimiento. De acuerdo con el método de minado, se tiene las siguientes actividades:

- **Preminado.** En el método a tajo abierto corresponde al desbroce, que es la remoción de la capa no mineralizada, y se efectúa hasta llegar a la zona mineralizada. Respecto a la minería subterránea, corresponde a la preparación del portal de la bocamina y se extiende hasta interceptar el cuerpo mineralizado.
- **Minado.** En la minería a tajo abierto, como en la minería subterránea, el minado consiste en la perforación e inserción de explosivos; luego, se continúa con la voladura; y, a partir de ello, se extrae el mineral.
- **Transporte o acarreo.** Es el traslado de mineral de alta ley a una zona de trituración, el traslado del mineral de baja ley a una zona específica, y los materiales inertes se disponen en botaderos.

A continuación, el flujo de materiales en la etapa de explotación.

Diagrama 8
Flujo de materiales en la etapa de explotación



Fuente: Adaptado de Lottermoser, 2010, y Dammer, 2021.

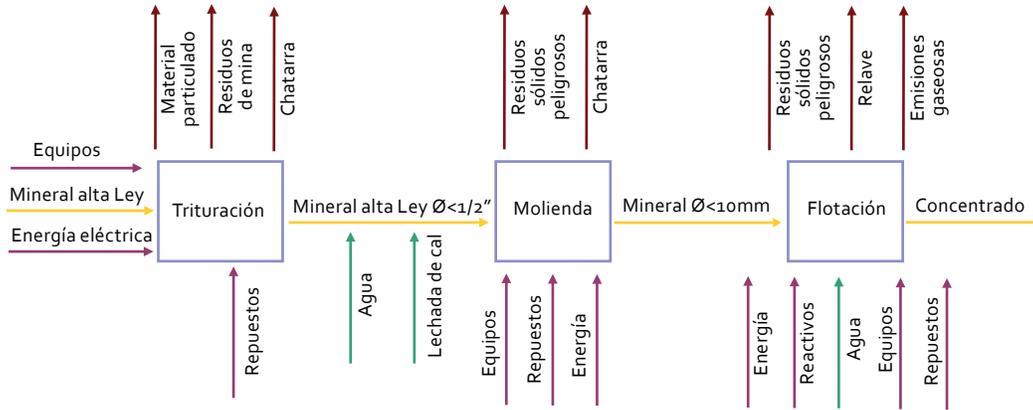
Nota: Se precisa que la explotación de minerales ferrosos, no ferrosos y no metálicos de manera típica siguen el flujo de materiales presentado en el diagrama 8, con énfasis en que la cadena productiva de la extracción de mineral no metálico finiquita con el transporte (acarreo) hacia la industria.

Beneficio. Una vez obtenido el mineral de la zona de mina, este se procesa en dos etapas:

- i) Reducción de tamaño para liberar el contenido valioso de la parte sin mayor valor. Ello se realiza por medio de procesos de trituración y molienda de la roca.
 - ii) Obtención de las partículas valiosas, separándolas de las partes de menor valor o sin valor a través de una serie de procesos denominados beneficio de mineral.
- **Conminución.** Es la reducción de tamaño de materiales sólidos (roca) para liberar las partículas de interés mediante los procesos de trituración y molienda. Esta etapa es muy importante, pues consume cerca del 50% de energía utilizada en el proceso de beneficio.
 - **Concentración de mineral.** Las partículas finas obtenidas en la molienda deben ser separadas en dos partes: el mineral valioso y el de escaso valor denominado ganga. Esta disposición se realiza aprovechando las propiedades físico-químicas del mineral.
 - **Flotación.** Consiste en utilizar las superficies de los minerales (composición y carga eléctrica) en conjunción con compuestos colectores, los cuales tienen un componente polar (carga eléctrica) y uno no polar para separar en forma selectiva los minerales. Por ejemplo, los xantatos —moléculas de carbono, hidrogeno y oxígeno— sirven para colectar los sulfuros de metales como cobre y zinc basados en que estos metales tienen carga positiva. Por otra parte, los xantatos carga negativa se añaden con otros elementos llamados espumantes —que ayudan a separar el xantato con sulfuro de cobre de la ganga— en formas de burbujas por medio de soluciones acuosas con mineral. Se utilizan otros compuestos que ayudan en el proceso como los activadores que aumentan el poder de los colectores, y depresores que ayudan a un mayor rechazo de la parte no metálica.
 - **Separación magnética.** Se usa para separar compuestos de alto grado de magnetismo como el trióxido ferroso de titanio, el carbonato de hierro y los minerales de manganeso de los materiales estériles. Los separadores magnéticos consisten, por ejemplo, en un tambor rotatorio que al rotar hace pasar la solución por una zona magnética, donde se atrapa el compuesto magnético y se separa del material estéril. Este proceso es complementado para el caso del hierro con procesos de filtración y peletización.
 - **Lixiviación de Cu.** En este proceso, los óxidos de cobre de baja ley no son económicamente rentables para ser tratados por métodos convencionales (flotación). Consiste en formar pilas de mineral de baja ley, las cuales son rociadas con ácido (ácido sulfúrico) que arrastra y concentra los metales al fondo de la pila.

A continuación, se presenta el flujo de materiales en la etapa de concentración:

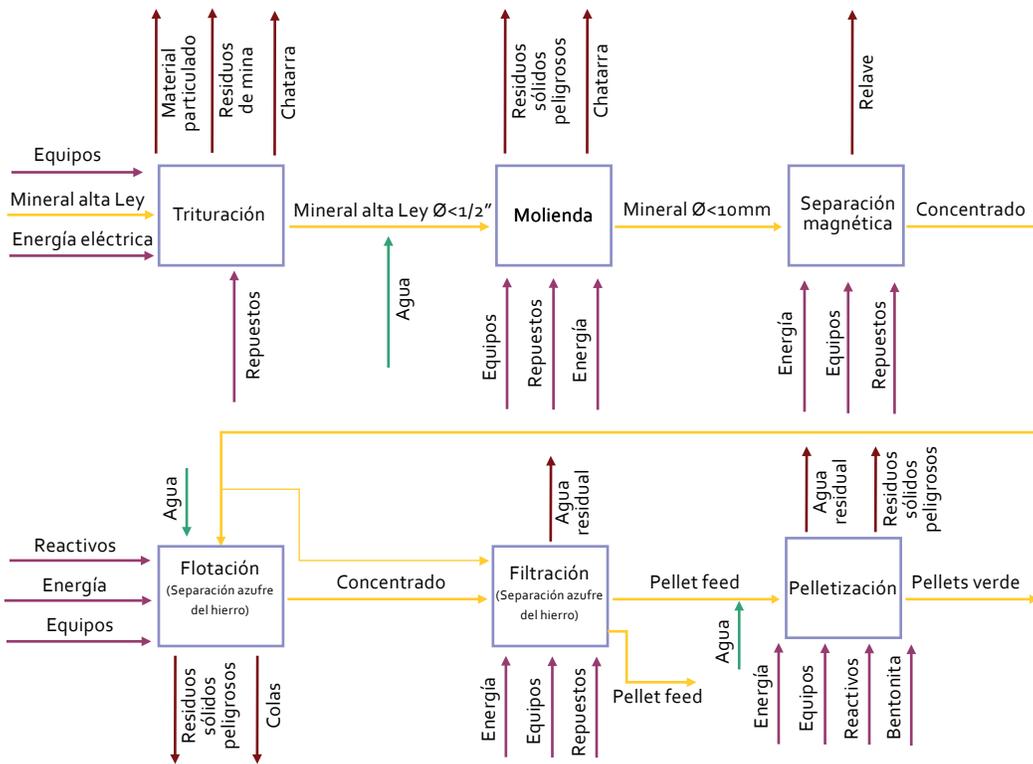
Diagrama 9
Flujo de materiales en la concentración de Cu



Fuente: Adaptado de Lottermoser, 2010, y Wills, 1994.

Pellets de hierro. El proceso de pelletización consta de una serie de etapas para transformar la materia prima del hierro. Su proceso consiste en el preconcentrado en pellets de ciertos tamaños y ley de hierro.

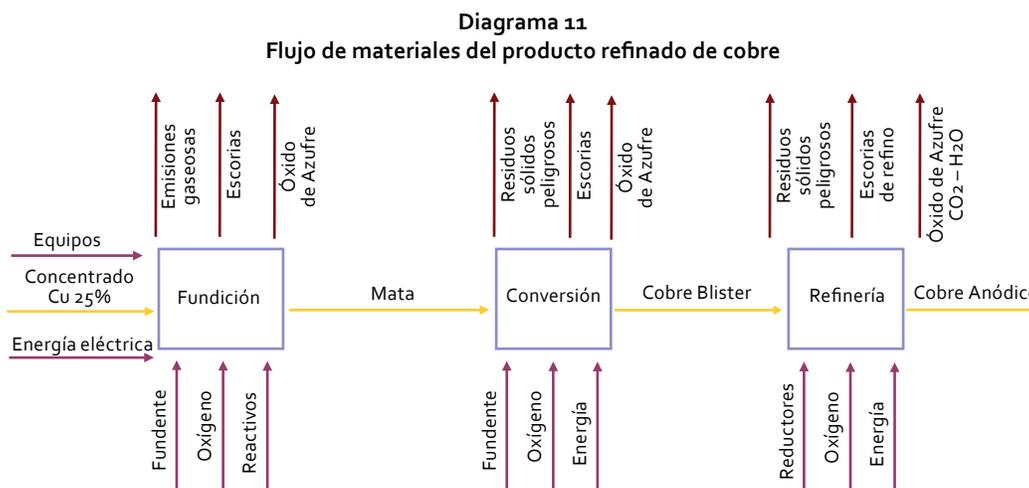
Diagrama 10
Flujo de materiales en la producción de pellets de hierro



Fuente: Adaptado de Lottermoser, 2010, y Wills, 1994.

Obtención de producto refinado. Los minerales obtenidos de la concentración y/o lixiviación requieren un procesamiento adicional. Para ello, es necesario considerar que los minerales metálicos son vendidos en el mercado internacional tanto como concentrados, con un contenido metálico de más del 25%, y como metales de pureza de más del 99%. A las diferencias en requerimiento de pureza del producto final también les corresponden diferentes tipos de procesamiento.

- **Fundición.** Consiste en alimentar el concentrado a un horno donde, por medio de la alta temperatura, el compuesto del metal (ejemplo Cu) se transforma químicamente en metal cobre, a la vez que aumenta su grado de pureza a muy alto grado del 97% al 99% para el caso del cobre. Sin embargo, aún es insuficiente para su uso final, dado que en el caso de estos metales la pureza requerida es del 99.9% o más, por lo cual el material obtenido de la fundición pasa por otro proceso llamado refinación.
- **Refinación.** Consiste en tomar el producto de la fundición con un contenido de metal de 97.99% a 99% para producir un metal casi puro al 99.99% de contenido. Existen dos tipos principales de refinación: (a) electrolítica, que consiste en el tratamiento del metal de fundición en celdas electrolíticas, donde el metal proveniente de la fundición moldeado en ánodos es introducido en un lado de la celda que contiene una solución y, a través de una corriente eléctrica, los átomos de cobre se desprenden del ánodo y atraviesan el líquido hacia el otro extremo de la celda, formando láminas de metal de alta pureza, normalmente al 99.99% de contenido metálico; y (b) pirometalurgia, por medio de hornos a alta temperatura, en los cuales se refina más el metal, aunque sin alcanzar la pureza de la refinación electrolítica (se llega a un 99.9% de pureza).



Fuente: Adaptado de Lottermoser, 2010, y Wills, 1994

Recuperación de oro cianurado. El oro cianurado se puede recuperar por dos métodos:

- Añadiendo polvo de zinc con sal de plomo o aluminio. Con ello, el oro se precipita de la solución. Bajo este método se debe recuperar el oro de zinc por refinación.
 - Otro método es la separación de oro con carbón activado, el cual es más económico. La pulpa de oro con cianuro es tratada en tanques a los cuales se les añade gránulos de carbón activado. El oro es absorbido por el carbón, mezcla que filtra del resto de la pulpa. Este mineral se recupera del carbón lavándolo con una solución caliente de hidróxido de sodio y cianuro de sodio.
- **Electrolisis.** La solución aurífera obtenida es tratada por un proceso de electrolisis por medio del cual se deposita sobre cátodos de lana de hierro. El oro recuperado se introduce en un horno, donde se funde y moldea en barras.

C. Economía circular en América Latina

La mayoría de las economías de los países de ALC depende en gran medida de las exportaciones de recursos naturales que, en la última década, aumentaron significativamente por el incremento de los precios. Sin embargo, muchos países de ALC no han podido traducir los beneficios de las exportaciones de recursos naturales en capital perdurable como capacidades productivas, I+D+i, agregación de valor, capital humano, educación, salud, entre otros. De hecho, algunos países enfrentan efectos negativos por la dependencia de las exportaciones de recursos básicos y las vulnerabilidades macroeconómicas generadas por los ciclos de precios de los productos básicos.

En esta variabilidad, la recuperación económica pos-COVID-19 se presenta en un contexto de fuertes cuestionamientos al modelo económico lineal, el cual ahora es dominante. El modelo de EC ofrece a los países de ALC una alternativa para contribuir al crecimiento económico sostenible, la diversificación intersectorial, la generación de valor agregado para maximizar el bienestar de las personas, del entorno ambiental y de las empresas. Entonces, la transición hacia una EC de los países de ALC debe enfocarse en sectores prioritarios como la “minería, gestión de residuos y bioeconomía” (Schröder *et al.*, 2020; Schröder & Raes, 2021).

Minería

Según el Banco Mundial, la transición a una economía baja en carbono demandará una amplia gama de metales básicos y preciosos, incluyendo cobalto, litio y tierras raras (*REE* por sus siglas en inglés), plata, níquel, plomo y zinc. En este sentido, la minería desempeñará un papel importante en la economía de muchos países de ALC, ocupando un lugar destacado en Chile, Perú, Colombia y —en una emergente representatividad— para Bolivia y Ecuador. No obstante, este sector debe atender las exigencias sociales y ambientales que limitan el acceso a los yacimientos mineros. Para ello, deberá adaptarse rápidamente a nuevas tendencias de sostenibilidad, adoptando el cambio y creando nuevos beneficios sostenibles (sociales, económicos y ambientales), así como innovar para capitalizar las oportunidades.

Un punto de partida para adoptar la EC en la minería es articular la participación proactiva del sector para “construir un ecosistema circular” a partir de una normativa que fomente la circularidad, se fije una hoja de ruta que extienda la vida útil del producto (mina) y conserve la propiedad, desarrolle estándares para validar la integridad de los bienes y servicios que faciliten un rápido remanufacturado. Asimismo, se debe procurar la reutilización y el reciclaje al final de su vida útil y seguidamente acelerar “operaciones circulares” que valoricen los residuos de extracción, y promuevan asociaciones con los proveedores para ampliar la vida de los bienes de capital. Además, incentivar el consumo para facilitar la reparación, el remanufacturado, la reutilización y el reciclaje al final de la vida útil de los bienes usados; por ejemplo, la maquinaria, los neumáticos, los equipos de procesamiento, los envases de reactivos, entre otros. También, se debe cocrear entre la cadena de suministro la demanda de nuevos productos y servicios basados en sistemas avanzados de predicción, seguimiento y localización (Bartels *et al.*, 2019).

El desarrollo de una EC en la minería tiene un potencial significativo para resolver los desafíos de escasez de recursos minerales, el desperdicio de recursos, la contaminación ambiental, así como minimizar los desechos mineros (los residuos pueden ser una oportunidad para recuperar materias primas y generar valor económico).

Existe una mezcla de factores que facilitan o dificultan la adopción de la EC, lo cual es propio del tipo de minería y los diversos materiales de desecho que se generan (desmonte, aguas de mina, lodos y relaves). Es importante señalar que, en las operaciones mineras de extracción de yacimientos de baja ley, durante el procesamiento de minerales, se producen cantidades significativas de desechos o relaves. Así, se calcula que por cada tonelada de metal extraído de los minerales se eliminan aproximadamente de 2 a 12 toneladas de materiales de desechos y/o relaves (Mohanty *et al.*, 2010, p. 29). Por ejemplo, en Chile se ha estimado que cada día generan 1.6 millones de toneladas de relaves (ACT Williams, 2017). Por su parte, Villachica *et al.* (2021) señalan que una mina de cobre en Perú que procesa 20 000 TM/día

de mineral con 0.5% Cu descarga 19 600 TM/día de relaves, lo cual ocupa un volumen de 14 400 m³/día en superficie y consume 10 ha/año para una presa de 50 m de profundidad.

La valorización de los desechos de la minería como la de los relaves está alineada con los ODS, y contribuye especialmente al ODS 11, “ciudades sostenibles y comunidades”, y al ODS 12, “consumo responsable y producción”, minimizando la producción de residuos (Columbia Center on Sustainable Investment, 2016).

Kinnunen y Kaksonen (2019) indican que la valorización de relaves por parte del sector minero a nivel mundial se encuentra en sus inicios, pero tiene un potencial que necesita del desarrollo tecnológico (probado y funcional) para abordar los bajos contenidos metálicos, la heterogeneidad y las impurezas en los relaves. En este sentido, se necesita que las pequeñas y medianas empresas (pyme) innovadoras y ágiles se incorporen a la cadena de valor de la minería, toda vez que la valorización de relaves no es el núcleo del negocio (*core business*) de las grandes empresas mineras. Asimismo, enfatiza en la necesidad de la influencia institucional para eliminar las barreras regulatorias en torno a la EC, y dilucida toda incertidumbre en cuanto a los permisos, regulaciones e impuestos. De esta manera, remarca que los vacíos de conocimiento sobre mineralogía, concentración de metales e impurezas en los relaves, así como el precio de mercado, son los retos y cuellos de botella que afrontará la minería para valorizar los relaves.

Una anotación relevante en la valorización de relaves entre los países andinos es el programa de investigación y desarrollo para la recuperación de elementos de valor desde relaves, impulsado por la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Esta es una agencia del Gobierno de Chile que apuntala a la minería chilena en la ruta del residuo cero y la EC, promoviendo que la minería se encargue de sus residuos al reciclarlos, reducirlos y reutilizarlos. El mencionado programa, como primer paso, ha identificado que la mineralogía frecuente en depósitos de relaves se compone de óxido de silicio (SiO₂), óxido de aluminio (Al₂O₃), óxido de titanio (TiO₂), óxido de hierro (Fe₂O₃), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), óxido de manganeso (MnO), óxido de sodio (Na₂O), óxido de potasio (K₂O) y óxido de fósforo (P₂O₅) (Consortio JRI – EcoMetales, 2019).

1. Ejemplos de iniciativas y/o casos de economía circular (EC) aplicados en la minería

En el cuadro 1, se presentan las diferentes iniciativas, investigaciones y/o modelos que acercan a la minería en su transición a la circularidad:

Cuadro 1
Investigación y/o aplicación de la EC en la minería

País	Valor	Iniciativa y/o caso
Minería secundaria - reaprovechamiento		
Perú	Relave	El proyecto B2 consiste en la recuperación de estaño de los relaves acumulados por décadas en la mina San Rafael (Puno) a través de diversos procesos metalúrgicos. Esto permitirá que Minsur (titular del proyecto) revierta la producción declinante de su mina San Rafael. De este modo, se añaden 5000 toneladas finas de estaño anuales durante un período de nueve años. Actualmente, dicho proyecto está en operación ^a .
	Relave	La minera Shouxin Perú desde 2014 procesa 20 000 TM/ día de los relaves de la mina Marcona (Ica) para concentrar el cobre y zinc. Asimismo, en 2020, suscribió la certificación ambiental para procesar relaves semisecos y en pulpa que serán adquiridos de terceros y, a partir de ello, concentrar cobre, zinc y hierro. El nuevo proyecto tiene planeado beneficiar 11,06 Mt de relave y se ha estimado que la etapa de operación propuesta será de 16 años (2022-2037) ^b .

Cuadro 1 (continuación)

País	Valor	Iniciativa y/o caso
Chile	Relave	Amerigo Resource, en su operación de la Minera Valle Central (MVC), produce concentrados de cobre mediante el procesamiento de 200 000 toneladas diarias de relaves frescos de la mina El teniente de Codelco (la mina subterránea de cobre más grande del mundo), y relaves históricos de Cauquenes y Colihues. La operación se extiende hasta 2037 aproximadamente ^c .
	Relave	La Planta Magnetita es una faena productora de concentrado de hierro (Pellet Feed) a partir de pasivos ambientales mineros, siendo la principal fuente de procesamiento los relaves provenientes de la planta concentradora de cobre de la Minera Candelaria. El proceso productivo recibe los relaves en forma de pulpa, los cuales son procesados en una etapa de concentración magnética Rougher. Posteriormente, el mineral es traspasado a la etapa de remolienda; luego, se procesa en la etapa de flotación de sílice, donde se eliminan impurezas y se logra la calidad requerida para el concentrado Pellet Feed, 66 % de Fe ^d .
Tránsito a un modelo de negocio circular		
Perú	Escoria de fundición	Fundición Ventanilla SA (Funvesa) funde hierro para producir piezas de acero para los sectores productivos de minería, cemento y otros. Uno de sus principales retos ha sido el alto consumo de energía para fundir grandes cantidades de desecho al momento de moldear las piezas. Ante ello, el desecho de escorias se orienta a un nuevo modelo de negocio enfocado en operacionalizar la recuperación de subproductos (escorias y arenas) para ser utilizados como materias primas secundarias para otras industrias (cemento y construcción de carreteras) ^e .
Chile	Activos	Neptuno Pumps es una empresa de diseño y fabricación de bombas centrífugas para el sector minero, el cual ha rediseñado sus productos. Así, permite un fácil mantenimiento y remanufactura, además de reutilizar y reciclar la chatarra para producir nuevos productos de alta ingeniería con bajo consumo de energía, contribuyendo a la máxima utilización de los recursos y a la reducción de los efectos del calentamiento global ^f .
Chile	Cadena de suministros	La Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (angloamericana) se convierte en una de las primeras mineras entre los países andinos en integrar los atributos de la EC en sus procesos de licitación y compras (es decir, la variable de circularidad tendrá un peso del 20 % al momento de valorar las ofertas de bienes y servicios requeridos). De esta manera, se orienta a potenciar la cadena de suministros con un diseño novedoso para un uso óptimo de los recursos y para la reducción de emisiones ^g .
Chile	Relave	La MVC, el Cbb, el Schwager Service SA y la Universidad Católica de la Santísima Concepción proponen la creación de un nuevo producto cementicio denominado Cemtail. Este busca reutilizar los relaves mineros en aplicaciones multiusos como pasta de relleno en minas, hormigón de baja resistencia, pavimentos, elementos estructurales prefabricados, impresoras de hormigón 3D, agregados de cemento, entre otros. Cabe destacar que Cemtail fue reconocido como uno de los diez proyectos preseleccionados en el desafío tecnológico BHP Tailings Challenge, gestionado por el Programa de Innovación Abierta en Minería ^h .
Chile	Neumáticos	Michelin iniciará en la región de Antofagasta la construcción de su primera planta de reciclaje de neumáticos mineros al final de su vida útil a través de un <i>joint venture</i> con la empresa sueca Enviro. "Esta planta, sin duda, viene a constituir un gran aporte en sustentabilidad para el país, la primera de este tipo en la industria, estando en línea con la Ley de Reciclaje y Responsabilidad Extendida del Productor (REP)" ⁱ .

Cuadro 1 (continuación)

País	Valor	Iniciativa y/o caso
Investigación		
Perú	Relaves	Carlos Villachica <i>et al.</i> (2021) señalan que la minería peruana consume más de 2.5 millones de toneladas de cal, lo cual genera 4 millones de toneladas de emisiones de CO ₂ , que son nocivas para el clima y no se utilizan. Como parte de su investigación, proponen la tecnología del horno eléctrico al vacío (HEVA) para producir cal y CO ₂ comercial a partir de los relaves neutros con alto contenido de carbonato (relaves neutrales de Cerro de Pasco). Como resultado del proceso, se descarga 0.71 t de CO ₂ por tonelada de cal. La cal producida al 61 % de CaO puede ser usada en el tratamiento de aguas ácidas (neutralización) y flotación del Zn. Además, el CO ₂ se usaría en la fertilización carbónica.
Perú	Relaves	La empresa Green Metallurgy Technologies SRL desarrolló un kit tecnológico para el tratamiento integral de relaves, con la finalidad de descontaminar de manera integrada su naturaleza oxidada y sulfurada a través de un método de remediación químico activo. Este se basa en el uso de agentes remediadores que logren la obtención de agregados de construcción (ladrillos) a partir de los relaves ¹ .
Chile	Relaves	En el documento inédito de Grecia Pérez de Arce y de propiedad de la CEPAL denominado <i>Economía circular en los relaves mineros mitigando impactos ambientales del uso de la arena como material de construcción</i> , citan investigaciones que proponen el uso de relaves de distinto origen: hierro, cobre y oro para sustituir áridos, o parte del <i>clinker</i> en las mezclas de hormigón. Utilización de relaves de minerales de hierro como agregados en la preparación de hormigón, dirigida por Francis Atta Kuranchie (Australia Occidental). – Uso de relaves como sustituto de materiales de construcción: El uso de residuos en hormigón compactado del investigador Renato Guiao Gopez (Filipinas). – El uso de relaves de metales base en hormigón: de Arushai Sheoran (India). – Factibilidad del reemplazo del agregado fino por arena de relave en el hormigón, de los investigadores G. A. Lira C. y R. H. Osses P. (Chile). – La incorporación de relaves de cobre a la producción de cemento para la reducción de la huella de carbono, investigación dirigida por el profesor Mauricio López Casanova y el profesor Felipe Vargas (Chile).
Bolivia (Estado Plurinacional de)	Relaves	Gerardo Zamora y Octavio Hinojosa (2019) presentan en su investigación la desulfuración ambiental de las colas (relaves) en la concentración de Zn-Ag y Pb-Ag, que son generadores de drenaje ácido de roca. La técnica de desulfuración permite la eliminación de sulfuros, lo cual produce un material (colas y/o relaves no generadores de acidez) que puede ser usado como coberturas secas en el cierre de minas.
Brasil	Relaves	Juliana de Carvalho <i>et al.</i> (2019) muestran la síntesis de zeolitas (minerales aluminosilicatos microporosos) a partir de relaves de minería de hierro para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales de la industria de la galvanoplastia. Los residuos mineros (relaves) están compuestos principalmente por silicio (SiO ₂ , 79.3 %) y hierro (Fe ₂ O ₃ , 19.3 %), corroborando que el uso de la zeolita sintetizada permite el tratamiento de efluentes de la industria de galvanoplastia, una remoción del zinc del 98 % en el primer uso y al 68 % después del cuarto uso.
India Sudáfrica	Drenaje de ácido de roca	A partir del drenaje ácido de roca, se pueden sintetizar pigmentos inorgánicos al 99 % de pureza (pigmentos de óxido de hierro / hematita y goethita) que son demandados en la industria textil y del cuero. Como subproducto se puede recuperar el agua como un coproducto que se usará en las operaciones mineras (Akinwekomi <i>et al.</i> , 2020; Singh <i>et al.</i> , 2020).

Cuadro 1 (conclusión)

País	Valor	Iniciativa y/o caso
España Sudáfrica	Relaves	A partir de un proceso de vitrificación (inmovilización, encapsulación de materiales radiactivos y otros tipos de materiales peligrosos a altas temperaturas), se investiga la factibilidad de la producción de vidrio utilizando relaves de minas de oro como materia prima principal. Con ello, se busca ayudar a disminuir el volumen de residuos expuestos a procesos atmosféricos para evitar la contaminación ecológica (Okereafor <i>et al.</i> , 2020). En concatenación con la investigación anterior, Alfonso Pura <i>et al.</i> (2020) presentan la investigación para la fabricación de vidrio y vitrocerámica del uso de relaves de fluorita, zinc y plomo de la mina de Osor (España). Concluyen que los vidrios obtenidos de los relaves retienen elementos potencialmente tóxicos en su estructura y previenen la contaminación ambiental.

Fuente: elaboración propia.

^a Recuperado de <<https://iimp.org.pe/noticias/proyecto-b2-y-el-proceso-de-desarrollo-de-proyectos-minsur-way>>.

^b Recuperado de <<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/501871/inf-DEAR-025-2020-RD-010.pdf>>.

^c Recuperado de <<http://www.amerigoresources.com/mvc/overview/>>.

^d Recuperado de <<https://www.cmp.cl/capmineria/planta-magnetita/2018-09-25/111131.html>>.

^e El Proyecto Ecoinnovación fue financiado por la Comisión Europea con el apoyo de la administración de la ONU Medio Ambiente y socios implementadores locales en Asia, África y América Latina. Recuperado de <<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/33506/Funvesa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

^f Recuperado de <<https://neptunopumps.com/economiacircular/>>.

^g Recuperado de <<https://www.collahuasi.cl/collahuasi-se-transforma-en-la-primera-minera-en-incorporar-la-economia-circular-en-la-compra-de-bienes-y-contratos-de-servicios/>>.

^h Recuperado de <<https://www.ucsc.cl/noticias/proyecto-reutilizara-relave-minero-en-aplicaciones-de-construccion-y-mineria/>>.

ⁱ Recuperado de <<http://www.lanacion.cl/michelin-construira-en-chile-su-primera-planta-de-reciclaje-de-neumaticos/>>.

^j Recuperado de <<https://ogeiee.produce.gob.pe/index.php/en/oficinageneral/noticias/item/490-produce-proyecto-de-ladrillos-eco-tecnologicos-cofinanciado-por-innovate-peru-es-premiado-en-concurso-de-la-snmpe>>.

Dejar atrás el actual modelo lineal y llevar a cabo la transición a una EC implica sumar todo tipo de esfuerzos de parte de las universidades, centros de investigación, Gobiernos y empresas relacionadas con el sector minero. El objetivo consiste en permitir una mayor captura del valor de los recursos naturales, reducir pérdidas al mantener dichos recursos en circulación durante más tiempo al interior de la economía y recapturar su valor al final de la vida útil de un producto. La actual pandemia de la COVID-19 está demostrando que la innovación y la colaboración son esenciales para responder ante crisis mundiales. En este sentido, la transformación es posible cuando se despliega un esfuerzo colectivo por encontrar soluciones, cuyo enfoque se puede aplicar a la transición a una EC. A continuación, en el cuadro 2, se presentan qué esfuerzos colectivos se desarrollan para acelerar la transición de la minería a la EC.

Cuadro 2
Esfuerzos colaborativos para la transición de la minería a la EC

Asociaciones internacionales	
País	Iniciativa
Canadá	El Canadian Mining Innovation Council (CMIC) ha desarrollado una estrategia de innovación para una Minería Cero Residuos (Zero Waste) que tiene como objetivo minimizar el desperdicio, mejorar la calidad del agua, aumentar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (CMIC, 2017). Además, en 2017, Canmet Mining, en colaboración con el Grupo de Trabajo Intergubernamental de Innovación en Minería Verde, lanzaron el proyecto piloto Valor Minero de los Residuos. Este se centra en recuperar materiales de relaves para aumentar el valor, y reducir los impactos ambientales, sociales y económicos de los desechos mineros. Su objetivo es transitar hacia la implementación de una EC con bajas emisiones de carbono (Gray, 2019).

Cuadro 2 (conclusión)

Asociaciones internacionales	
País	Iniciativa
Estados Unidos	En asociación con la industria, la academia y los laboratorios nacionales, el Instituto Remade tiene como enfoque acelerar la EC mediante soluciones tecnológicas basadas en cinco áreas claves de concentración (o nodos): (i) análisis e integración de sistemas; (ii) diseño para la optimización de materiales de fabricación; (iii) remanufactura; (iv) reutilización, reciclaje; y (v) recuperación. Este instituto cuenta actualmente con 61 proyectos de colaboración público-privada enfocados en reducir el costo de las tecnologías necesarias para reutilizar, reciclar y remanufacturar materiales como metales, fibras, polímeros y desechos electrónicos ^a .
Finlandia	El proyecto NEMO (<i>Near-zero-waste recycling of low-grade sulphidic mining waste for critical-metal, mineral and construcción raw-material production in a circular economy</i>) es uno de los proyectos EUH2020 Innovation Action. Este pretende desarrollar, mostrar y explotar nuevas formas de valorizar los residuos mineros sulfídicos de la producción de Cu, Pb, Zn y Ni. El NEMO se compone de cuatro paquetes de trabajo de ciencia y tecnología, en los que se desarrollan cuatro pilotos: biolixiviación innovadora, biolixiviación en tanque, recuperación de metales y minerales, y reciclaje de residuos minerales limpios ^b .
Chile - Australia	El Centro de Excelencia Internacional Sustainable Minerals Institute (SMI-ICE, Chile) de la UQ nace como una asociación entre esta y la Universidad de Concepción, con apoyo de la Corfo. Su objetivo es desarrollar soluciones con base en conocimientos para los complejos problemas que enfrenta la industria de recursos en la búsqueda por reducir su impacto en las comunidades y el medio ambiente. El SMI-ICE-CHILE apunta a una minería sin depósitos de relave. En ese marco, se encuentra desarrollando el proyecto Solar Tailings Transformation (STT), que combina (i) desaguar los relaves de manera sostenible y reconvertir los relaves en productos finales comercializables a través del solo uso de la energía solar térmica. Esta tecnología, impulsada por un consorcio conformado por SMI-ICE, Chile, Seenso, IMDEA Energy y Aiguasol, es una solución innovadora para transformar los relaves en materiales de valor con una baja huella de carbono. A su vez, busca virtualmente eliminar la necesidad de tener depósitos de relaves tradicionales en el futuro ^c .
Europa	La Asociación Internacional del Cobre y el Instituto Europeo del Cobre, junto con los fabricantes de cobre y otros socios, colaboran estrechamente con los responsables políticos mundiales para eliminar las barreras y crear incentivos de mercado para el uso de materias primas secundarias para cerrar el círculo.

Fuente: Elaboración propia.

^a Recuperado de <<https://remadeinstitute.org/projects>>.

^b Recuperado de <<https://h2020-nemo.eu/project-2/>>.

^c Recuperado de <<https://smiicechile.cl/hacia-una-gestion-sostenible-de-los-relaves-mineros-parte-2/>>.

2. Iniciativas de políticas públicas orientadas a la economía circular en los países andinos

Diseñar e implementar un marco normativo para transitar a la EC es la base para el desarrollo e innovación. Esto representa un gran desafío porque es el punto de partida para generar la disrupción respecto al modelo económico lineal. Asimismo, es la oportunidad para integrar esfuerzos entre la ciencia, el Gobierno y las inversiones. En el cuadro 3, se presentan los marcos normativos e iniciativas relacionados con la EC en los países andinos.

Cuadro 3
Marco normativo e iniciativas de EC relacionados con la minería en los países andinos

País	Iniciativa	Año	Objetivo
Bolivia (Estado Plurinacional de)	Ley 755 sobre Gestión Integral de Residuos	2015	La presente ley tiene por objeto establecer la política general y el régimen jurídico de la gestión integral de residuos en el Estado plurinacional de Bolivia, priorizando la prevención para la reducción de la generación de residuos, su aprovechamiento y disposición final sanitaria y ambientalmente segura, en el marco de los derechos de la madre tierra, así como el derecho a la salud, y a vivir en un ambiente sano y equilibrado.

Cuadro 3 (continuación)

País	Iniciativa	Año	Objetivo
Chile	Ley 20.920 Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje	2016	Tiene por objeto disminuir la generación de residuos, y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización, a través de la instauración de la responsabilidad extendida del productor y otros instrumentos de gestión de residuos, con el fin de proteger la salud de las personas y el medio ambiente.
	Creación del Centro Tecnológico de Economía Circular	2021	Inició actividades a mediados de 2021 como resultado de la convocatoria que lanzó la Corfo para crear el primer Centro Tecnológico para la Economía Circular para la Macrozona Norte del país en 2019. Su objetivo es "cerrar brechas tecnológicas para la circularidad" e impulsar el desarrollo de soluciones que aceleren la transición hacia la EC en tres sectores estratégicos: minería del cobre, energía solar y litio ^a .
	Instituto de tecnologías limpias para industria solar, minería verde y litio	2021	El 4 de enero de 2021, la Corfo adjudicó el mayor centro de Investigación y Desarrollo (I+D) al consorcio Associated Universities Inc (AUI), compuesto por cuatro universidades chilenas y dos extranjeras, quienes llevarán a cabo el cierre de brechas en cuanto a las tecnologías limpias, minería verde y litio.
	Centro Nacional de Pilotaje para la Minería	2015	El Centro Nacional de Pilotaje para la Minería es una corporación público-privada que, con apoyo de la Corfo, brinda una alta especialización técnica en pilotaje y validación industrial de tecnologías. Aplica metodologías de medición y protocolos de ejecución, con acceso a espacios de pruebas en operaciones y plantas reales.
Colombia	Pacto por la Sostenibilidad. Producir Conservando y Conservar Produciendo	2018	El pacto busca afianzar el compromiso de las actividades productivas con la sostenibilidad, la reducción de impactos ambientales y la mitigación del cambio climático. Asimismo, define acciones para convertir la riqueza y el capital natural en activos estratégicos. Además, se articula con la hoja de ruta para la EC, que ha sido planteada en las políticas de producción y consumo sostenible, gestión integral de residuos sólidos y crecimiento verde, acompañadas de instrumentos como el impuesto a las bolsas plásticas y diez planes de gestión de residuos posconsumo. Es la vinculación del sector privado y de la academia (Departamento Nacional de Planeación, 2019).
	Propuesta de <i>Lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de la actividad minera relacionados con presas de relaves</i>	2021	La Dirección Empresarial del Minem, en el marco del Contrato de Consultoría GGC-468-2020 celebrado con ATG Ltda., presenta la cartilla con los <i>Lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de la actividad minera relacionados con presas de relaves</i> , en la cual se exponen los lineamientos relacionados con la EC (Minem y Dirección de Minería Empresarial, 2021). <ul style="list-style-type: none"> – Generar medidas de reprocesamiento de relaves para la obtención de minerales de mena. – Utilizar relaves mediante el método de retrolenado para sellar labores subterráneas en etapa de cierre. – Evaluar, investigar e implementar procesos para el reúso de relaves como materiales de construcción. – Reutilización de aguas de laguna de decantación o la recolectada en los sistemas de drenaje e infiltración.

Cuadro 3 (conclusión)

País	Iniciativa	Año	Objetivo
Ecuador	Pacto por la Economía Circular	2019	El Pacto por la Economía Circular forma parte de los ejes de Desarrollo Sostenible y Cambio Climático y de la Competitividad, Empleo e Innovación. Su objetivo es dar continuidad a las acciones gubernamentales para encaminar a los diferentes actores de la sociedad hacia una estrategia nacional de EC. En dicho pacto, se promueve la industrialización de los residuos, el ecodiseño, la investigación académica y la aplicada, la optimización de los procesos productivos, y el uso de infraestructura de bajo impacto ambiental. Asimismo, se propone concientizar a la población sobre el consumo responsable, y el aprovechamiento e industrialización de los residuos industriales.
	Libro Blanco	2021	Contiene el marco conceptual y los lineamientos para elaborar una política pública que incentive la EC en el país. Específicamente en la minería, refiere las siguientes líneas de acción: <ul style="list-style-type: none"> – Reducir el uso de agua dulce y garantizar su tratamiento. – Creación de valor compartido mediante la minería urbana. – Promover una economía en torno a los equipos de segunda mano. – Caracterización de los metales remanentes en los residuos mineros y gestión de su disposición para su aprovechamiento posterior (GIZ y CIEC, 2021).
	Acuerdo Ministerial 042, Instructivo para la Aplicación de la Responsabilidad Extendida en la Gestión Integral de Aceites Lubricantes Usados y Envases Vacíos	2018	El Acuerdo Ministerial 042 emite un instructivo para la aplicación de la responsabilidad extendida en la gestión integral de aceites lubricantes usados y envases vacíos. La aplicación de la responsabilidad extendida incluye aceite base, aceite mineral de motores (vehículos y maquinarias industriales, fluidos hidráulicos y de transmisión), y aceites de corte y de transferencia de calor, los cuales después de su uso se convierten en peligrosos al igual que sus envases ^b .
Perú	Decreto Ley 1278, Gestión Integral de Residuos Sólidos ^c	2016	Establece los derechos, obligaciones, atribuciones y responsabilidades de la sociedad en su conjunto, con la finalidad de maximizar el uso de los materiales, y asegurar una gestión económica, sanitaria y ambientalmente adecuada, con sujeción a principios y lineamientos. Entre sus principios, están la EC, la valorización de residuos, el principio de protección del ambiente y la salud pública, y el principio de responsabilidad extendida y compartida. Esta ley fue reglamentada mediante el Decreto Supremo 014-2017-MINAM.
	Decreto Supremo 003-2020-PRODUCE, Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en Sector Industria ^d	2020	El Gobierno aprobó la Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en Sector Industria, iniciativa que fue elaborada en conjunto con el Ministerio de la Producción (Produce) y el Ministerio de Ambiente (Minam), a fin de impulsar el crecimiento económico, y el desarrollo industrial inclusivo y sostenible.
	Pacto Peruano por una Economía Circular	2021	El Pacto Peruano por una Economía Circular es una iniciativa multisectorial que se realiza como parte de la propuesta de intervención integral del Estado para impulsar la transición del país hacia ese nuevo modelo de producción y consumo responsable con el ambiente ^e .
	Visión de la minería en el Perú al 2030	2019	Al 2030, la minería en Perú es inclusiva; ya que está integrada social, ambiental y territorialmente en un marco de buena gobernanza y desarrollo sostenible. Su visión es promover la EC ^f .

Fuente: Elaboración propia.

^a Recuperado de <<https://www.guiaminera.cl/andree-henriquez-de-circulartec-el-aporte-de-la-mineria-es-indispensable-para-la-economia-circular/>>.

^b Recuperado de <<https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/05/Acuerdo-Ministerial-No.-042.pdf>>.

^c Recuperado de <<https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Decreto-Legislativo-N%C2%Bo-1278.pdf>>.

^d Recuperado de <<https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-supremo-que-aprueba-la-hoja-de-ruta-hacia-una-economia-decreto-supremo-n-003-2020-produce-1856966-1/>>.

^e Recuperado de <<https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/505494-gobierno-sector-privado-universidades-y-la-cooperacion-internacional-suscriben-el-pacto-peruano-por-una-economia-circular%20>>.

^f Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=9&idPublicacion=583>.

II. Diagnóstico de las iniciativas de la economía circular en la minería peruana

La balanza comercial de Perú es de un exportador neto de materias primas, siendo la minería una de las principales actividades económicas. Según el Minem, en la publicación del *Anuario minero* (2020), suscribe que “en los últimos diez años, la minería ha impulsado en promedio aproximadamente el 10% del PBI nacional y ha contribuido con el 60% de las exportaciones nacionales” (p. 1). De manera específica, para 2019, la contribución de la minería tributariamente fue de 2.2000 millones de dólares (Sunat, 2020).

Según el Mineral Commodity Summaries (2021) del United States Geological Survey (USGS) y el *Anuario minero* del Minem (2021), Perú ha obtenido una participación mundial en cuanto a la producción minera, tal como se observa en el cuadro 4.

Cuadro 4
Participación de la minería peruana a nivel mundial

Producto	Reporte minero 2020		Ranking mundial	Ranking Latinoamérica
	Producidas	Reservas		
Boro: boratos crudos	43 6000 de TM	4 millones de TM	6	3
Cobre	2,15 millones de TMF	92 millones de TMF	2	2
Diatomita	85 4000 de TM	ND	5	1
Oro	87,5 de TMF	2 700 TMF	8	1
Hierro	8,89 millones de TMF	1 500 millones de TM	14	2
Cianita (andalucita)	638 000 de TM	ND	3	1
Plomo	241 5000 de TMF	6 millones de TMF	4	1
Molibdeno	32 2000 TMF	2,8 millones de TMF	4	2
Roca fosfórica	8,6 millones de TM	210 millones de TM	10	2
Plata	2,7000 TMF	91 000 TMF	2	2

Cuadro 4 (conclusión)

Producto	Reporte minero 2020		Ranking mundial	Ranking Latinoamérica
	Producidas	Reservas		
Estaño	20 6000 TMF	140 000 TMF	4	1
Zinc	1,33 millones de TMF	20 millones de TMF	3	1

Fuente: La producción es extraída del *Anuario Minero 2020* del Ministerio de Energía y Minas. Las reservas son extraídas del USGS 2021. El ranking corresponde a producción. Tomado de Mineral Commodity Summaries 2021, por U.S. Geological Survey, 2021 y el *Anuario minero 2020* (p. 50–53), por Ministerio de Energía y Minas, 2020.

La minería peruana cumple un rol protagónico en la provisión de minerales básicos a nivel mundial. De igual manera, la producción industrial de fundición del cadmio, indio y selenio es relevante a nivel global. Por otra parte, Perú cuenta con reservas de renio que están asociadas al molibdeno, el cual se encuentra en depósitos de pórfido de cobre.

Se estima que la actividad minera en Perú se desarrolla en 10 728 739 hectáreas, lo cual representa el 8.35% del territorio nacional (Minem, 2020). Asimismo, el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinermin), en virtud de sus competencias de supervisión de la gran y mediana minería, reportó que en octubre de 2020 en Perú se identificaron 101 unidades mineras en operación (56 de gran minería y 45 de mediana minería), los cuales registran los componentes que se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 5
Componentes mineros listados en la gran y mediana minería peruana

Tipo de minería	Depósito de relaves	Tajos abiertos	Pilas de lixiviación	Depósito de desmonte	Total de componentes por tipo de minería
Gran minería	45	50	30	66	191
Mediana minería	50	9	0	27	86
Total de componentes por tipo	95	59	30	93	277

Fuente: Tomado de *Supervisión de la gestión y operación de los depósitos de relaves* (p. 03), por A. de la Vega, 2020, Osinermin. Asimismo, en el siguiente enlace, se referencia la ubicación de los componentes antes citados: <<http://gisem.osinermin.gob.pe/menergetico/>>.

Respecto a la minería pequeña, artesanal y sujetos en formalización, la presente investigación quedó sin abarcarla porque el acceso a la información pública está disponible en cada gobierno regional, quienes compilan la estadística de las operaciones mineras y sus componentes en su ámbito geográfico. Denotando, que para la presente investigación no ha tenido acceso a la información pública.

La relevancia de la minería para Perú y el contexto de reactivación económica pospandemia de la COVID-19 aparece como una oportunidad para vincularse a los impulsos globales de preocupación por el medio ambiente e instar a la minería peruana a adoptar estrategias hacia la sostenibilidad. Así, se estimulan los cambios fundamentales en los sistemas de consumo y producción para permitir un crecimiento económico y el bienestar de la población peruana, sin someter el medio ambiente a una presión insostenible.

Las prácticas de la EC ofrecen oportunidades para alcanzar procesos de desarrollo sostenible. Para ello, es importante dimensionar el alcance de esta actividad económica y sus actividades conexas, con el fin de generar conciencia sobre las ventajas de su implementación.

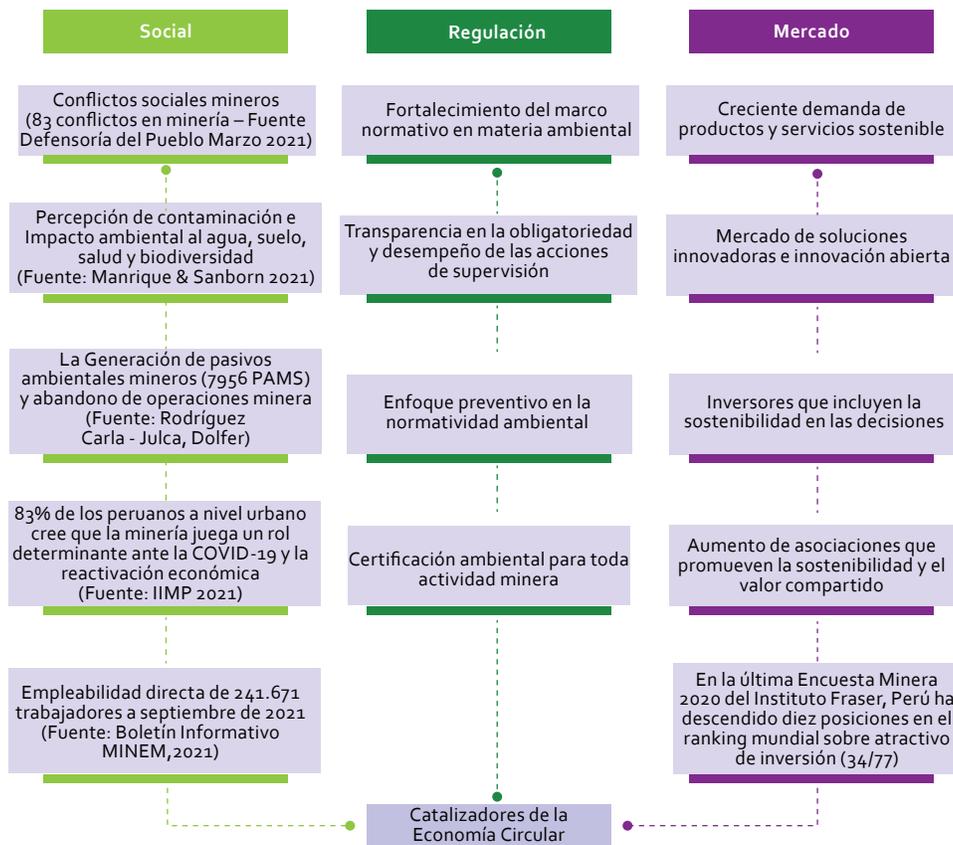
Según la revisión literaria, una EC se vuelve más efectiva en entornos colaborativos. Esto motiva a explorar el estado de situación de la estructura gubernamental e iniciativas acerca de las actividades y recursos clave (humanos y financieros) relacionados directamente con la transición de la minería a esta.

A. Escenario de la minería en Perú

En la última década, la minería peruana ha obtenido repercusión a nivel nacional en cuanto al desequilibrio entre la extracción, el medio ambiente, y la retención y contribución de riqueza. Esto ha conllevado un escenario reactivo hacia la minería y quizás con justa razón. En paralelo a la fricción social producto de la extracción, se encuentra la estrategia de los principales compradores de minerales, quienes buscan nuevas rutas comerciales para asegurar proactivamente el abastecimiento de materiales estratégicamente esenciales.

La pandemia de la COVID-19, la reactivación pospandemia y la atracción de la sociedad peruana a las redes sociales y sus tendencias marcan un escenario *sui generis* en el tránsito de la minería a una EC. Por lo tanto, una opinión y/o persuasión respecto a la coyuntura minera tiene una rápida repercusión de manera favorable o desfavorable. En el diagrama 12, se muestra el escenario minero que se deberá enfrentar a viejos problemas con nuevas soluciones.

Diagrama 12
Escenario de la minería peruana hacia una EC

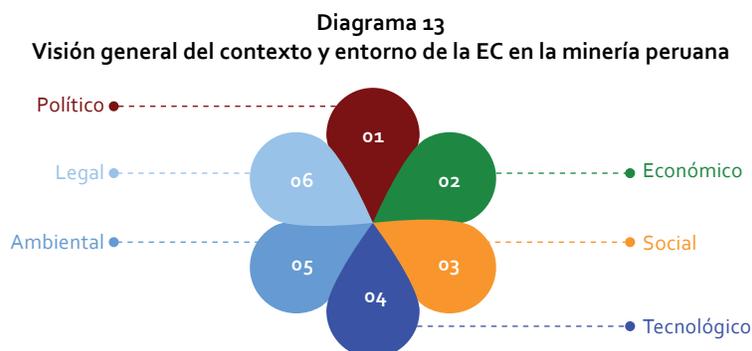


Fuente: Elaboración propia.

B. Ecosistema de la minería hacia la economía circular en Perú

La EC propicia una visión global para la sostenibilidad de un país y/o sector productivo, convirtiéndose en un factor clave en la toma de decisiones entre toda la cadena de valor (sociedad, Gobierno y empresa). Sus logros se obtienen a partir de una estrategia colaborativa, incorporando la EC en todas las actividades, procesos, enfoques de mercado, y las estructuras organizativas y gubernamentales. Ello con el fin de propiciar la creación de soluciones adaptadas a las demandas de la sostenibilidad.

A continuación, se muestra desde una perspectiva general el contexto y entorno en el cual se desarrolla el ecosistema de la EC en la minería peruana.



Fuente: Elaboración propia.

1. Diagnóstico político-legal

La transición a una escala sistémica y colaborativa como la que propone la EC ayudaría a superar los paradigmas vigentes sobre la minería, los cuales son en buena medida insostenibles en el marco de los retos ambientales y sociales contemporáneos. Se trata de un proceso estratégico, de arriba hacia abajo, impulsado por una visión que genera soluciones orientadas a largo plazo y de naturaleza radical. Es posible avanzar siempre y cuando el objetivo de la transición sistémica de la minería hacia una EC sea aceptada e impulsada por un liderazgo efectivo, así como que se incorpore en la agenda nacional de desarrollo.

En este sentido, el presente marco político-legal explora los cimientos de la EC con un énfasis especial en la minería, en lo concerniente a la regulación, la dotación de incentivos, la movilización de recursos, las facilidades productivas y de cooperación técnica. En el cuadro 6, se esbozan las principales políticas y directrices prácticas.

Cuadro 6
Marco normativo general entorno a la EC en Perú

Norma	Año	Alcance
Constitución Política del Perú	1993	En el artículo 2, se señala que toda persona tiene derecho "[...] a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida [...]".
Ley Orgánica para el Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales Ley 26821	1997	En el artículo 7, se señala lo siguiente: Es responsabilidad del Estado promover el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, a través de las Leyes especiales sobre la materia, las políticas del desarrollo sostenible, la generación de la infraestructura de apoyo a la producción, fomento del conocimiento científico tecnológico, la libre iniciativa y la innovación productiva. El Estado impulsa la transformación de los recursos naturales para el desarrollo sostenible.
Ley General del Ambiente Ley 28611 y sus Modificatorias	2005	En el artículo 1, se indica lo siguiente: Toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente [...] el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y el desarrollo sostenible del país. Según el artículo 119.2, la gestión de los residuos sólidos no municipales es "[...] responsabilidad del generador hasta su adecuada disposición final, bajo las condiciones de control y supervisión establecidas en la legislación vigente [...]".

Cuadro 6 (conclusión)

Norma	Año	Alcance
Modificación de Ley que Regula los Pasivos Ambientales de la Actividad Minera (Decreto Legislativo 1042)	2008	De acuerdo con los artículos 10 y 11, los pasivos ambientales podrán ser reutilizados por el titular de la concesión minera. Asimismo, los pasivos ambientales que formen parte del inventario y que pudieran contener valor económico podrán ser susceptibles de reaprovechamiento, todo ello “[...] siempre que se implementen medidas de manejo ambiental y aquellas destinadas a su mitigación, remediación y cierre, conforme al estudio ambiental correspondiente [...]”.
Ley que Modifica el Código Penal, Ley 29263	2008	Artículo 306, “Incumplimiento de las normas relativas al manejo de residuos sólidos”, y artículo 307, “Tráfico ilegal de residuos peligrosos”.
Decreto Legislativo 1078, que modifica la Ley 27446, Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental	2008	En el artículo 3, se manifiesta lo siguiente: “No podrá iniciarse la ejecución de proyectos ni actividades de servicios y comercio [...] si no cuentan previamente con la certificación ambiental (Instrumentos de gestión ambiental aprobado)”.
Ley de Recursos Hídricos, Ley 29338	2009	Ley que regula el uso y gestión de los recursos hídricos. En el artículo 19, se precisa con respecto al vertimiento de agua residual tratada; y, en el artículo 88, con respecto a la reutilización de agua residual.
Ley de Promoción de las Inversiones para el Crecimiento Económico y el Desarrollo Sostenible, Ley 30327	2015	En el artículo 15.2, se indica lo siguiente: Para aquellos titulares de proyectos que cuenten o deban contar con instrumentos de gestión ambiental aprobados en el marco del SEIA, cuya estrategia de manejo ambiental incorpore el plan de manejo de residuos sólidos, no es necesaria la presentación anual de este último, salvo cuando se modifique efectivamente las obligaciones ambientales que están incorporadas en dicho plan.
Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (Decreto Legislativo 1278) ^a	2016	En el artículo 5, se manifiesta lo siguiente: “Es de aplicación como principio la Economía circular, Valorización de residuos, Principio de protección del ambiente y la salud pública, y el Principio de responsabilidad extendida y compartida [...]”. En el artículo 8, se señala lo siguiente: La producción de bienes y servicios en todos los sectores productivos del país privilegia el uso eficiente de los insumos y materiales, buscando permanentemente una mayor productividad en el uso de los materiales y la prevención de la generación de residuos [...]. En el artículo 9, se indica lo siguiente: El aprovechamiento de material de descarte proveniente de actividades productivas que constituya insumos directamente aprovechables por la misma actividad, la investigación y desarrollo u otras actividades económicas similares o no, distintas a la valorización de residuos, puede ser transferido bajo cualquier modalidad desde su generador hacia las actividades que lo aprovecharán [...]. En el artículo 18, se menciona que las autoridades sectoriales ejercen funciones respecto a “regular la gestión y el manejo de los residuos de origen minero, energético, industrial, agropecuario, agroindustrial, de actividades de la construcción [...]”.
Ley del Cierre de Minas, Ley 28090, y su modificatoria, Ley 31347	2003 2021	La Ley de Cierre de Minas tiene por objeto regular las obligaciones y procedimientos que deben cumplir los titulares de la actividad minera para la elaboración, presentación e implementación del Plan de Cierre de Minas y la constitución de las garantías ambientales [...] con la finalidad de mitigar sus impactos negativos a la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad. Nota. La Ley 31347 a la fecha no está en vigencia, toda vez que no se han reglamentado sus alcances.

Fuente: Elaboración propia.

^a Modificado por el Decreto Legislativo 1501, el Decreto Legislativo 1451, la Ley 30552 y el Decreto Legislativo 1389.

Se enuncian algunas instituciones gubernamentales encargadas de asuntos técnicos, administrativos, de fiscalización y control de las iniciativas de la EC en la minería.

- Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles (Senace). Organismo público, técnico especializado, adscrito al Minam. Se encarga de evaluar los estudios de impacto ambiental detallados de los proyectos de inversión, y de emitir la certificación ambiental que garantiza que el proyecto se desarrolla en los estándares de protección ambiental y social.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). Órgano público técnico especializado, adscrito al Minam, encargado de impulsar y promover el cumplimiento de la normativa ambiental en los agentes económicos y la mejora del sistema nacional de gestión ambiental. Su finalidad es resguardar el equilibrio entre la inversión en actividades económicas y la protección ambiental.

a) Políticas públicas en torno a la EC

El Minam es el ente rector del sistema nacional de gestión ambiental sobre el cual se formulan las directrices transversales.

- Con base en la estructura legal, se formula la Política Nacional del Ambiente al 2030, que es de cumplimiento obligatorio para las entidades de la Administración pública, así como para las personas jurídicas de derecho privado y la sociedad civil en cuanto les sea aplicable. Dicha política está a cargo del Minam y ha sido aprobada mediante el Decreto Supremo 023-2021-MINAM (Minam, 2021).

En la Política Nacional del Ambiente al 2030, se establece como objetivo prioritario “mejorar el desempeño ambiental de las cadenas productivas y consumo de bienes y servicios aplicando la economía circular”, cuyo objetivo busca fortalecer las condiciones de sostenibilidad de las cadenas productivas y de consumo. Incluye variables económicas (reducción de costos), sociales (condiciones de vida y sostenibilidad de su proceso de consumo) y ambientales (mejor uso de los recursos naturales, reúso de los residuos sólidos y líquidos, y mejora de la calidad ambiental).

La Política Nacional del Ambiente, en referencia a este objetivo prioritario, plantea los siguientes lineamientos:

- Generar las condiciones en las entidades públicas y privadas para el tránsito hacia una economía circular.
- Incrementar la participación de las energías renovables en la matriz energética.
- Mejorar la sostenibilidad de los negocios y econegocios desarrollados por las comunidades nativas, comunidades campesinas y otras localidades de pueblos indígenas u originarios y población local.
- Mejorar la ecoeficiencia en la producción de bienes, y la provisión de servicios públicos y privados.
- El Minam, el 9 de julio de 2021, suscribe el Pacto Peruano por una Economía Circular, una iniciativa multisectorial que se lleva a cabo como parte de la propuesta de intervención integral del Estado para impulsar la transición hacia ese nuevo modelo de producción y consumo responsable con el ambiente. Esta iniciativa ha sido suscrita por instituciones públicas (Minam, Produce, Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (Midagri) y Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (Mincetur), sector privado (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE), Sociedad de Comercio Exterior del Perú (Comex), Cámara de Comercio de Lima (CCL), entre otros), universidades públicas y privadas, y cooperación internacional, cuyos acuerdos son los siguientes:
 - Incorporar criterios de ecodiseño.

- Generar condiciones que permitan el uso eficaz y eficiente de los insumos.
- Fortalecer las cadenas de valor del aprovechamiento de materiales.
- Generar investigación e innovación tecnológica.
- Fomentar el consumo sostenible y responsable en la ciudadanía.
- Promover el intercambio de información y experiencias.
- Implementar acciones de educación y sensibilización ambiental en la población.
- Según el Minam, en Perú, se generan 18 000 toneladas diarias de basura, de las cuales solo el 4,8% de la basura se deposita en rellenos sanitarios; y el resto, en botaderos y ríos. Un dato relevante es que solo en la capital (Lima) se recogen diariamente 8000 toneladas de desperdicios (45% de la basura total).
- En el marco del Acuerdo de París, Perú presenta las contribuciones determinadas a nivel nacional (CDN) de reducir las emisiones de GEI en un 20% al 2030.
- Un anuncio importante es lo señalado en el informe técnico de agosto y setiembre de 2021, elaborado por el INEI, en lo concerniente a la evolución de las exportaciones e importaciones:
 - Entre los principales productos de importación en el periodo de agosto a setiembre de 2021, predominaron los neumáticos para vehículos, y máquinas de la construcción y minería procedente de Estados Unidos. Asimismo, especifica la importación de desperdicios y desechos de hierro o acero que se han incrementado en 241.1 %, cuya procedencia es de Estados Unidos y Chile (INEI, 2021a, 2021b).

b) Iniciativas sectoriales e institucionalidad

Produce

La EC para el Produce representa un tema prioritario en sus ejes de trabajo, por lo que viene ejecutando programas y proyectos que tienen como objetivo incrementar la competitividad y productividad de la industria. Por esta razón, se promulga el Decreto Supremo 003-2020-Produce, el cual aprueba la hoja de ruta hacia una EC en el sector industria, y contiene las acciones que desarrollará el Estado para impulsar y promover la transición de un modelo económico lineal a uno circular.

- La hoja de ruta contempla metas de corto, mediano y largo plazo, e involucra la participación de varias instituciones adscritas al Produce como las siguientes:
 - Instituto Nacional de Calidad (Inacal). Entidad técnica que desarrolla normas técnicas que establezcan requisitos de envases y embalajes que minimicen el impacto ambiental.
 - Instituto Tecnológico de la Producción (ITP). Mediante los servicios de los Centros de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica (CITE), brinda asistencia técnica con enfoque de EC. Una cuestión relevante es que el CITE es la articulación del Estado, la academia y el sector privado.
- Uno de los programas de relevancia sobre investigación, desarrollo, innovación y emprendimiento (I+D+i+e) es el **Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad (Innovate Perú)** creado en 2014, el cual cuenta con autonomía económica, administrativa, financiera y técnica. Entre sus ejes de funcionamiento, cofinancia proyectos de innovación empresarial, desarrollo productivo, emprendimiento e instituciones del ecosistema mediante concursos nacionales agrupados en los siguientes portafolios:
 - *Startup*. Busca fortalecer el ecosistema de emprendimiento e innovación, cofinanciando capital semilla e incubadoras de negocio.
 - Innovación empresarial. Brinda instrumentos a las empresas para desarrollar una innovación, ya sea en producto, proceso, modelo de organización y/o comercialización.

- Programa de Desarrollo de Proveedores (PDP). Orientado a facilitar la articulación vertical entre empresas y proveedores mediante la mejora de las capacidades.
- Programa de Apoyo a Clúster (PAC). Orientado a fortalecer las interrelaciones entre empresas de una misma zona geográfica y/o cadena de valor. Su finalidad consiste en incrementar la productividad y competitividad de las empresas— especialmente las micro, pequeñas y medianas empresas— y contribuir al desarrollo sostenible de las regiones del Perú.
- Financiamiento para emprendimientos e instituciones innovadoras.
- El programa Innóvate Perú es abierto a todos los sectores productivos, por lo cual ha participado en proyectos de innovación ligados a la minería, entre ellos los siguientes:
 - Proyecto tecnosoles (suelos mejorados para el cierre de minas) enfocado a reducir cerca del 10% del total de residuos generados a diario en la ciudad de Cajamarca (operación minera la zanja).
 - Ecoladrillos propone la fabricación de ladrillos ecotecnológicos y a bajo costo a partir de relaves mineros (Green Metallurgy Technologies SRL).
 - TOFD ultrasónico (*time of flight diffraction*) es un sistema que detecta las fallas de soldaduras que presentan las tuberías a presión (Non Destructive Testing Services SAC).
 - Inteligencia artificial para determinar la pureza del oro. Esta iniciativa busca sustituir los estudios de laboratorio (ensayos químicos al fuego) usados para determinar los valores económicos de estos metales, los cuales son nocivos para el medio ambiente y los trabajadores.

Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo (MTPE)

El MTPE, con el apoyo de la Alianza para la Acción hacia una Economía Verde (PAGE, por sus siglas en inglés), liderada por la OIT, han formulado los “**criterios para definir y evaluar los empleos verdes**” como un primer paso para la construcción del Plan Nacional de Empleos Verdes, la cual a la fecha está en elaboración.

El concepto de empleo verde se ubica en la intersección de dos dimensiones: ambiente y trabajo decente. Estos son empleos que contribuyen a preservar y restaurar el ambiente, guardando una relación directa con aumentar la eficiencia del consumo de energía y materias primas; limitar las emisiones del GEI; minimizar los residuos y la contaminación; proteger y restaurar los ecosistemas; y contribuir a la adaptación al cambio climático, ya sea en los sectores tradicionales o en nuevos sectores emergentes. El empleo en el sector ambiental puede ser un indicador importante del progreso hacia un crecimiento verde (PAGE, 2021).

- En el citado documento se precisa que la minería puede enverdecer mediante la utilización de tecnologías limpias, la mejora del uso de recursos naturales como el agua, la minimización y/o erradicación de insumos perjudiciales para la salud y el ambiente, y la promoción del trabajo decente, ello también abarca los casos de la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) mediante la capacitación en buenas prácticas ambientales, optimización del uso de insumos, transferencia de tecnologías, mejora de las condiciones de seguridad y salud en el trabajo, acceso a mercados internacionales de compra de oro responsable, entre otras (PAGE, 2021, p.).
- Asimismo, se prioriza la minería sostenible entre los sectores verdes para construir indicadores por ser importante en la reducción de las emisiones de GEI y el uso de recursos naturales, y porque produce beneficios en toda la economía al desplazarse a actividades más verdes, utiliza menos energía e insumos, y aumenta el bienestar de la población al producir menos emisiones y contaminación.

MINEM

El Minem, integrante del Grupo de Trabajo Multisectorial para las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (GTM-NDC), creado mediante la Resolución Suprema 005-2016-MINAM, tentativamente planteó desarrollar 18 medidas de mitigación ante el cambio climático, entre las que se destacan las siguientes (Ministerio de Energía y Minas, 2018):

- Combinación de energías renovables. La medida de mitigación propone la diversificación de la matriz energética aumentando la participación de los recursos energéticos renovables (RER) como biomasa, eólico, solar, geotérmico y mareomotriz.
- Etiquetado de eficiencia energética. Promover el etiquetado, cuya medida está alineada al Decreto Supremo 009-2017-EMg referente al *Reglamento técnico sobre el etiquetado de eficiencia energética para equipos energéticos* (motores eléctricos trifásicos asíncronos o de inducción con rotor de jaula de ardilla, entre otros).
- Promoción del uso de combustibles más limpios. La medida de mitigación contempla la prohibición en la comercialización y el uso del diésel B5 con un contenido de azufre mayor a 50 ppm, y regulación en contenido de azufre no mayor a 50 ppm de gasolinas y gasoholes de alto octanaje (95, 97 y 98).
- Eficiencia energética en el sector industrial. La medida propone la aplicación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial y minero. Así, fomenta la competitividad de la economía nacional, y reduce el impacto ambiental negativo del uso y consumo de los energéticos mediante la Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía, Ley 27345 y su reglamento, aprobado por el Decreto Supremo 053-2007-EM, en concordancia con la Política Energética Nacional 2010-2040, aprobada mediante el Decreto Supremo 064-2010-EM.
- Promoción de vehículos eléctricos a nivel nacional. La medida contempla reemplazar la matriz energética utilizada de manera predominante en el transporte (gasolina, diésel, GLP, GNV) a vehículos eléctricos. Esto mediante acciones que eliminen las principales barreras de penetración de vehículos eléctricos, implementando cambios normativos de promoción e incentivos a mediano plazo, y promoviendo un aumento rápido de ómnibus eléctricos.

En el Plan Estratégico Sectorial Multianual (Pesem) del Sector Energía y Minas a 2025, aprobado por la Resolución Ministerial 163-2020-MEM, el sector minería, después de analizar el contexto minero, las principales tendencias para el sector y los cambios que se presentarían por los eventos futuros, establece varios objetivos estratégicos, entre ellos:

- Promover las actividades mineras y energéticas.
- Promover y consolidar la formalización de la minería.
- Incrementar la utilización de las aplicaciones nucleares en los sectores productivos, servicios e investigaciones del país.
- Fomentar que las operaciones mineras se [sic] realicen cumpliendo con los estándares ambientales.
- Mejorar la remediación de pasivos ambientales mineros.
- Impulsar la energía nuclear para la conservación del medio ambiente.
- Mejorar la gestión social en las áreas de influencia de las actividades mineras y energéticas.
- Modernizar la gestión sectorial.

Cabe destacar que en el plan estratégico no se contextualizan las tendencias globales y/o se formula como variable estratégica la transición del sector hacia una EC.

- El Minem, mediante la Resolución Ministerial 302-2019-MINEM/DM, constituye el Centro de Convergencia y Buenas Prácticas Minero-Energéticas (Rimay). Su objetivo es:

[...] proponer, compartir y promover el ejercicio de buenas prácticas en el sector energía y minas, así como constituir una plataforma de diálogo y discusión técnica de alto nivel para arribar a consensos en procura de un mejor aprovechamiento de los recursos minero energéticos en favor del desarrollo sostenible del país, con la participación del Estado, el sector privado, la sociedad civil y la academia.

Entre las principales acciones de la Rimay a la fecha están las siguientes:

- Elaboró la *Visión de la minería al 2030*, en la cual se plantea que la minería peruana debe ser inclusiva, así como estar integrada social, ambiental y territorialmente en un marco de buena gobernanza y desarrollo sostenible. Su visión consiste en promover la EC (Grupo Visión Minería 2030, 2019).
- En el marco del Rimay, el 7 de abril de 2021, se instauró el Grupo Técnico Multiactor para la Promoción de Mejores Prácticas en la Gestión de Recursos Hídricos en Minería. Este grupo está conformado por representantes del Estado, del sector privado, de la sociedad civil, la academia y cooperación internacional, destacando en este último la participación del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), los representantes del proyecto MinSus (BGR- GIZ), la CEPAL y la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (Usaid).

Sectorialmente, el Minem ha dispuesto la siguiente normativa:

- Reglamento de Protección y Gestión Ambiental para las Actividades de Explotación, Beneficio, Labor General, Transporte y Almacenamiento Minero (Decreto Supremo 040-2014-EM). Según este, todo

[...] titular de la actividad minera es responsable por las emisiones, efluentes, vertimientos, residuos sólidos, ruido, vibraciones y cualquier otro aspecto de sus operaciones, así como de los impactos ambientales que pudieran generarse durante todas las etapas de desarrollo del proyecto, en particular de aquellos impactos y riesgos que excedan los Límites Máximos Permisibles y afecten los Estándares de Calidad Ambiental, que les sean aplicables o afecten al ambiente y la salud de las personas [...].

- Reglamento de la Ley de Cierre de Pasivos Mineros (Decreto Supremo 059-2005-EM, modificado por el Decreto Supremo 0037-2009-EM).
- Reglamento de la Ley de Cierre de Minas (Decreto Supremo 033-2005-EM y sus modificatorias).
- Lineamientos para la elaboración de planes de contingencia a emplearse en actividades minero-metalúrgicas relacionadas con la manipulación de cianuro y otras sustancias tóxicas o peligrosas (R. D. 134-2000-EM-DGM).
- Reglamento de Procedimientos Mineros (Decreto Supremo 020-2020-EM).

Sectorialmente, no se ha identificado lineamientos, directrices y/o reglamentación con respecto a la EC.

c) **Ministerio de Economía y Finanzas (MEF)**

El MEF, mediante el Decreto Supremo 237-2019-EF, de fecha 28 de julio de 2019, aprobó el Plan Nacional de Competitividad y Productividad. En este se fijan nueve objetivos prioritarios, los cuales se presentan con relación al objetivo del presente estudio:

Objetivo prioritario 3. Innovación

[...] establece acciones estratégicas para fortalecer la gobernanza del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (SINACYT) como base para el desarrollo de capacidades, el incremento de la eficacia de la inversión pública y del aceleramiento de los procesos de innovación, absorción tecnológica y digitalización [...].

Entre sus principales lineamientos, están los siguientes:

- Fortalecer el entorno del ecosistema de innovación a través de mejoras normativas; del fomento de la cultura de investigación, innovación, absorción tecnológica y digitalización; y del fortalecimiento de la gobernanza y de sus actores, incluyendo los mecanismos que permitan conocer, utilizar y aprovechar los instrumentos de protección de la propiedad intelectual.

Entre las principales medidas de políticas que se desencadenarían en torno a este objetivo prioritario, se encuentran las siguientes:

- Aplicar incentivos tributarios para I+D, buscando prorrogar la vigencia de la Ley 30309, “Ley que promueve la investigación científica, el desarrollo e innovación tecnológicos en aras de simplificar procedimientos e incrementar la inversión privada en I+D”.
- Instrumentos financieros verdes, que comprenden la estructuración y emisión de instrumentos de renta fija que permitan al Estado financiar proyectos vinculados a la sostenibilidad ambiental, desarrollar instrumentos financieros verdes especializados que direccionen flujos de capital al desarrollo de tecnologías limpias menos contaminantes y el relanzamiento del protocolo verde, el cual tiene como finalidad considerar, en los análisis de riesgo de crédito e inversión, los impactos y costos ambientales y sociales que se generan en las actividades y proyectos a ser financiados.

Objetivo prioritario 6. Generar las condiciones para desarrollar un ambiente de negocios productivo

“[...] está orientado a impulsar herramientas y condiciones que permitan lograr un ambiente de negocios productivo”. Entre las principales medidas de políticas que se desencadenarían en torno a este objetivo prioritario, destacan las siguientes:

- La homologación de proveedores de la micro, pequeña y mediana empresa (mipyme) en nuevos sectores como la minería, metalmecánica, entre otros, se orienta al fortalecimiento de la actividad empresarial. Así, puedan insertarse, de manera articulada y colectiva, en las cadenas de valor requeridas por empresas de mayor tamaño, conocidas como empresas tractoras, compradoras o clientes.

Objetivo prioritario 8. Fortalecer la institucionalidad el país.

“[...] una estructura institucional bien definida coadyuva al cumplimiento de los contratos a bajo costo, facilita las soluciones de controversias asociadas a fallas de mercado y fomenta la cooperación y coordinación económica para el proceso de intercambio [...]”

Entre las principales medidas de políticas que se desencadenarían en torno a este objetivo prioritario, se encuentran las siguientes:

- Plataformas de gestión agroclimática (PGA). Uno de los temas relevantes para la gestión sostenible del territorio es la de los recursos hídricos. En ese sentido, el uso y aprovechamiento de la tecnología para integrar información hidrológica, meteorológica y agrícola de diferentes instituciones públicas es importante para mitigar los efectos de los eventos naturales, y promover medidas de prevención.
- Estrategias para la gestión de conflictos sociales. Se propone definir una estrategia para gestionar conflictos y alertas de conflictividad que deriven de una plataforma informática. Esta permitirá mapear, identificar y prevenir potenciales conflictos sociales, así como monitorear el cumplimiento de los compromisos que asumen los actores públicos y privados en los espacios y procesos de diálogo.

Objetivo prioritario 9. Promover la sostenibilidad ambiental. Concentra medidas de política orientadas a desarrollar las condiciones para el crecimiento verde, reducir la vulnerabilidad del Perú frente a los efectos del cambio climático, promover el enfoque de la EC y poner en valor los recursos naturales. Los principales lineamientos son los siguientes:

- Generar las condiciones para el tránsito hacia una economía circular y ecoeficiente.
- Crear capacidades e instrumentos para la gestión de la puesta en valor de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos; para la promoción de nuevos mercados.
- Generar soluciones sostenibles y más limpias para el desarrollo productivo en sectores de alto impacto de la economía nacional.

Entre las principales medidas de políticas que se desencadenarían en torno a este objetivo prioritario, se encuentran las siguientes:

- La estrategia de financiamiento de medidas frente al cambio climático partirá precisamente de las potenciales fuentes identificadas en el informe final del GTM-NDC, y se espera reducir un 20 % de los GEI a 2030.
- La gestión integral de residuos sólidos se plantea implementar una estrategia de integración de los recicladores en la cadena de valor de reciclaje, y la puesta en marcha de una estrategia de educación y comunicación sobre consumo responsable, valorización y manejo de residuos sólidos.
- La EC y acuerdos de producción limpia en los sectores industria, pesca y agricultura. Se impulsará la suscripción e implementación de los APL, que corresponden a convenios voluntarios de cooperación y colaboración entre el sector público y privado. Asimismo, se incorporarán las hojas de ruta de la EC para estos sectores.
- La estrategia de energía renovable, electromovilidad y combustibles limpios propone implementar un paquete de instrumentos normativos que fomente la electrificación del sector transporte, así como promover el uso de combustibles limpios y el proceso de mitigación de la huella de carbono con el objetivo de cuidar la calidad del aire y la salud pública.
- El bono del chatarreo sugiere la creación de un programa que consiste, por un lado, en el establecimiento de incentivos económicos y no económicos que incentiven la adquisición de vehículos nuevos que cumplan estándares de emisiones adecuados.

El Plan Nacional de Competitividad y Productividad no especifica medidas de política para transitar la minería hacia la EC. Además, entre las medidas sectoriales y/o mesas ejecutivas para la implementación del citado plan, la participación del Minem solo se circunscribe a construir un instrumento para promover inversiones en plantaciones y reforestar áreas degradadas por la minería.

Mediante la Resolución Ministerial 337-2021-EF/10, publicada el 24 de noviembre de 2021, se conforma la Mesa Ejecutiva para el Desarrollo del Sector de Proveedores Mineros. Esta tiene como objetivo identificar los problemas y cuellos de botella en el citado sector, así como coordinar, proponer soluciones, facilitar e impulsar las acciones que contribuyan a mejorar la productividad y competitividad del sector de proveedores mineros. Este grupo de trabajo es de carácter temporal y está conformado por el representante del Minem, del MEF, del Produce y del Midagri. Asimismo, lo integran representantes del Banco de Desarrollo del Perú (Cofide), la SNMPE, la Sociedad Nacional de Industrias (SIN), el Instituto de Ingenieros de Minas del Perú (IIMP), el Clúster Minero Andino (Sammi), el Colegio de Ingenieros del Perú (CIP), y el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Concytec).

A continuación, en el diagrama 14, se muestra la institucionalidad política legal de la EC ligada a la minería.

Diagrama 14
Institucionalidad política legal de la EC en la minería peruana



Fuente: Elaboración propia.

2. Diagnóstico económico

En el contexto de la pandemia, originada por la COVID-19, la economía peruana para 2020 ha presentado una contracción del PBI de 11.1%, frente a un crecimiento del 2.2% en 2019. Esta contracción se suscita luego de 21 años consecutivos de crecimiento (Banco Central de Reserva del Perú, 2021). Asimismo, según proyecciones de recuperación económica de la CEPAL, el país para 2021 tendrá un rebote de crecimiento de 9.0%. Sin embargo, este dinamismo será insuficiente para recuperar los niveles de PIB y de producción previos a la crisis originado por la pandemia (CEPAL, 2020).

De acuerdo con el Banco Mundial, la transición a las energías limpias y su rápido despliegue de las energías renovables requerirá una disponibilidad constante de minerales, lo cual conducirá a una demanda de mineras. Se proyecta que la demanda de minerales básicos para las tecnologías en energía se incremente hacia 2050, entre los que resalta el cobre, el aluminio, el cromo, el manganeso, el molibdeno y el níquel como minerales transversales y necesarios para una gama de tecnologías bajas en carbono. Esto los convierte en elementos críticos para lograr un futuro con bajas emisiones de carbono. Asimismo, destaca una demanda absoluta de plata, zinc, plomo, grafito y litio (Hund *et al.*, 2020).

Benjamín Jones *et al.* (B. Jones, 2021) estiman que la demanda de cobre entre 2022 y 2030 se incrementará en 4.8 millones de toneladas de cobre refinado (de 22.5 a 27.3 millones entre 2020 y 2030). Asimismo, señalan que el sector de la construcción civil y de edificios seguirá siendo el sector de mayor consumo de cobre de uso final (29% del total). No obstante, el máximo crecimiento en la demanda de cobre provendrá del sector del transporte, impulsado por el desarrollo y adopción global de los vehículos eléctricos que está fuertemente respaldado por la transición en China y la Unión Europea (UE). Adicionalmente, se suscribe que, a pesar de los efectos de la COVID-19 en un escenario de visión positiva para la región andina,

“[...] la demanda del cobre en un escenario optimista está guiada por la adopción acelerada de vehículos eléctricos y por el desempeño económico de India y China, ocasionando un aumento en la demanda total de cobre refinado en 873 mil toneladas [...]”

Con respecto a la minería peruana, durante el Foro Económico 2021, “Confianza para el desarrollo económico - gestionando el cambio”, la presidencia del BCR de Perú proyectó que para 2022 la inversión minera será de 8% asociado a proyectos en marcha. Del mismo modo, no se estiman inversiones por nuevos proyectos mineros⁹.

Después de contextualizar el panorama minero y sus tendencias, a continuación, se explorará el presupuesto público asignado para 2022 en el marco de la Ley 31365, Ley de Presupuesto del Sector Público para el Año Fiscal 2022, con énfasis en los principales presupuestos de los entes públicos que fungirán como catalizadores para la transición a una EC.

Como parte del diagnóstico, se enuncian algunos presupuestos donde ciertas asignaciones pueden no necesariamente estar destinadas para una transición hacia la EC.

a) Ciencia, Tecnología e Innovación

Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Concytec)

- La ciencia, tecnología e innovación del Perú está liderada por el Concytec, el cual tiene un presupuesto para 2022 de 127 096 501 soles (que a un tipo de cambio referencial de 4 soles / cada dólar americano sería 31.8 millones de dólares americanos).
- Excepcionalmente, se autoriza al Minem a transferir de su presupuesto al Concytec la suma de 4 200 000 soles (que a un tipo de cambio referencial de 4 soles / cada dólar americano sería 1.1 millones de dólares americanos) exclusivos para proyectos de investigación en el ámbito del subsector electricidad.

Universidades

Presupuesto para 2022 asignado para el desarrollo de investigación en las principales universidades nacionales del Perú, siendo las universidades de las regiones mineras del sur las que concentran un mayor presupuesto ascendente a 17 millones de dólares americanos.

- Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco: 16 016 437 soles (4 millones de dólares americanos a tipo de cambio 4 soles / cada dólar americano).
- Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Arequipa: 45 100 743 soles (11.3 millones de dólares americanos a tipo de cambio 4 soles / cada dólar americano).
- Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua: 6 768 945 soles (1.7 millones de dólares americanos a tipo de cambio 4 soles / cada dólar americano).

Innovate Perú- Proinnóvate

- Presupuesto para 2022 asignado para el programa es de 82 752 248 soles (41.5 millones de dólares americanos a tipo de cambio 4 soles / cada dólar americano).

En el marco de Ley 34366, Ley de Equilibrio Financiero del Presupuesto del Sector Público para el Año Fiscal 2022, el Minem precisa como parte de sus saldos de balance a utilizar los recursos en los siguientes ámbitos:

b) Remediación de pasivos ambientales mineros y cierre de minas

- Financiar la ejecución directa o mediante transferencias acciones de remediación ambiental en los subsectores de minería e hidrocarburos hasta por un monto de 66 873 535 soles (16.7 millones de dólares americanos a tipo de cambio 4 soles / cada dólar americano); específicamente, transferencias a la empresa estatal Activos Mineros SAC de 48.8 millones de soles (12.2 millones de dólares); fondo nacional del ambiente o universidades públicas, 12.00 millones de soles (3 millones de dólares); y ejecución directa de 8 millones de soles (4 millones de dólares).

⁹ Recuperado de <<https://www.bloomberglinea.com.mx/2021/09/22/julio-velarde-sin-inversion-minera-el-2022-la-inversion-privada-en-peru-caeria/>>.

- Transferir a favor de Activos Mineros SAC (AMSAC) hasta por la suma de 30 000 000 soles (15 millones de dólares) para la ejecución de los planes de cierre de minas de las unidades mineras Florencia-Tucari, Arasi y Quiruvilca.
- En el financiamiento destinado para la remediación de pasivos ambientales mineros y/o cierre, no se contempla la valoración de los residuos mineros (reaprovechamiento), la generación de conocimientos para incorporar los residuos en nuevas cadenas de valor y menos regenerar los sitios para fines productivos futuros.

3. Diagnósticos colaborativos de la sociedad civil y las empresas mineras

La EC se basa en un proceso participativo entre los distintos actores de la cadena de valor. Por ello, un espacio de intercambio abierto y creativo sopesado por la colaboración entre las partes interesadas en una minería sostenible es esencial para proporcionar conocimientos y movilizar las competencias necesarias hacia una transición sistémica. La participación activa de las partes interesadas es fundamental para facilitar la aceptación social de los cambios y amplificar la sucesión en la cadena de valor entre múltiples sectores productivos. A continuación, se presenta la participación de la sociedad civil y del sector minero en construir espacios que fomenten la innovación y desarrollo hacia la transición sostenible y circular:

a) Innovación

Hub de Innovación Minera

Es liderado por la SNMPE, el cual busca facilitar la innovación, fomentar el aprendizaje, y promover el trabajo colaborativo para abordar retos y desafíos comunes en el sector. El *hub* mediante la innovación abierta ha encabezado varias iniciativas, entre las que destaca el Reto Ágil. Este se lanzó a mediados de 2021, y se refiere a la valorización de relaves y lodos productos del tratamiento de aguas industriales de las minas. Dicho *hub* lo integran principales empresas mineras de Perú, proveedores, y socios estratégicos nacionales e internacionales.

Perúmin Hub

Es liderado por el IIMP, el cual tiene como objetivo buscar soluciones a los grandes desafíos del sector minero a través de la innovación colaborativo. Entre sus principales retos, resaltan los ejes temáticos de minería y medio ambiente, recursos hídricos y minería 4.0:

- Minería cero efluentes: ¿cómo reducir relaves y tratar aguas en relaves y bocaminas con efluentes?
- Tecnologías y/o modelos de negocios: ¿cómo optimizar la disposición, uso y reúso de relaves?
- Tecnología en coberturas para el cierre de minas: ¿cómo incorporar en los cierres de mina, tecnologías y modelos que generen valor para la mina y comunidades?

Linkminers

Es una plataforma tecnológica que articula innovación entre los funcionarios de las empresas mineras y los proveedores interesados en ofrecer distintas soluciones al sector minero.

Conservation X Labs

Ha lanzado el Gran Reto de la Minería Artesanal: la Amazonía, la cual es una convocatoria global y alberga la minería en la selva peruana. Este reto busca soluciones para conservar la Amazonía, proteger sus comunidades, y transformar la minería de oro artesanal y en pequeña escala en la selva. El financiamiento es otorgado por la USAID, la Fundación Gordon y Betty Moore, Microsoft y ESRI.

b) Clústeres mineros

Clúster minero SAMMI

Es una iniciativa conjunta entre el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF) y la Cámara de Comercio e Industria de Arequipa. Su propósito es impulsar una nueva minería innovadora, inclusiva y sostenible para Perú. Entre sus principales programas, resalta la innovación abierta. Sus primordiales retos son los siguientes:

- Métodos sostenibles de tratamiento de agua (2021).
- Manejo eficiente y disposición y manejo de neumáticos usados en camiones de acarreo (2019).

De acuerdo con la Resolución Ministerial 337-2021-EF/10, se crea la Mesa Ejecutiva para el Desarrollo del Sector de Proveedores Mineros. Su objetivo es identificar los problemas y cuellos de botella en el citado sector, así como coordinar, proponer soluciones, facilitar e impulsar las acciones que contribuyan a mejorar la productividad y competitividad del sector de proveedores mineros. Este grupo de trabajo, de carácter temporal, estará conformado por el titular o un representante del Minem, del MEF, de la Produce, del Midagri, de la Cofide, de la SNMPE, del IIMP, del Sammi, del CIP y del Concytec.

c) Proyectos de investigación entre la academia, instituciones públicos y privados

Tecnología de extracción sostenible de oro en la selva

La Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC)—en colaboración con la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (Unamad) y el Imperial College London— está trabajando en el desarrollo de estrategias de minería limpia para mejorar el aprovechamiento de los recursos en la región de Madre de Dios (oro). El proyecto es impulsado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico e Innovación Tecnológica del Concytec, y del Banco Mundial. Las estrategias de minería limpia están enfocadas en proveer tecnología para el tratamiento de este material concentrado, donde no se utiliza mercurio ni cianuro, comunes en la minería informal actual. Además, se están estudiando métodos de tratamiento de los residuos generados por estos procesos.

Colaboración de asistencia técnica entre BGR y la empresa SMRL Acumulación Los Rosales

La colaboración de asistencia técnica se enmarca en el desarrollo de conocimiento para el reaprovechamiento de pasivos ambientales mineros, específicamente el reaprovechamiento de relaves.

d) Academia

Centro de Minería Sostenible

El Colorado School of Mines (Mines) y la UNSA en Arequipa han desarrollado una asociación para crear el Centro de Minería Sostenible. Su finalidad consiste en abordar uno de los problemas sociales y ambientales más importantes que enfrenta el sur de Perú: gestionar la extracción de los recursos naturales de manera sostenible que apoye a las economías locales y minimice los impactos ambientales. Este centro opera desde 2019 y, entre sus proyectos de investigación, se listan los siguientes:

- Prototipo para neutralizar iones de cianuro en los efluentes de la minería de oro.
- Transformación de los pasivos mineros en beneficios para la región de Arequipa.
- Desarrollo de soluciones sostenibles e innovadoras para el reúso de relaves mineros en Arequipa como materiales de construcción.
- Caracterización y evaluación para la recuperación y la producción de metales secundarios en la escoria de fundición y los desechos de refinación.
- Sistemas de humedales de ingeniería híbrida para tratar contaminantes del agua provenientes de metales y nutrientes en las aguas de los ríos de la región Arequipa.

El Centro de Estudios sobre Minería y Sostenibilidad (CEMS)

Es un centro de investigación aplicada que conecta las dimensiones económicas, ambientales, políticas y sociales de la minería. Entre sus líneas de investigación, buscan informar el debate público, y contribuir al desarrollo económico, social y ambiental de las regiones y el país en gobernanza, los encadenamientos productivos e innovación, la medición de impactos y los resultados locales para el desarrollo, y los aspectos sociales del cierre de minas.

Fundación Konrad Adenauer (KAS), Perú

Estudios ligados a fortalecer las políticas públicas en torno a la EC y promocionar un uso responsable de las nuevas tecnologías, aprovechando las oportunidades comunicativas de la digitalización para lograr una democracia más participativa y cercana al ciudadano.

e) Organismos no gubernamentales (ONG)

Grupo GEA - Centro de Ecoeficiencia

Es una organización que propone un enfoque holístico basado en el ciclo de vida, estableciendo puentes para el compromiso activo de actores públicos, privados y académicos. Entre sus principales proyectos ligados a la minería, resalta: Ecoinnovación para la Recuperación y Reaprovechamiento de los Residuos Sólidos en el Sector Minero en el Perú. Este proyecto es financiado por la Organización de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (ONU Ambiente) y la Comisión Europea.

Ciudad Saludable

Promueve la articulación y participación del Estado, empresas, y sociedad civil en soluciones integrales para la adaptación y la mitigación frente al cambio climático a través de iniciativas de gestión, educación y comunicación. De esta manera, influye en políticas públicas para el desarrollo social, económico y ambiental.



Fuente: Elaboración propia.

4. Diagnóstico tecnológico-ambiental

Perú es uno de los países de Latinoamérica con una brecha digital significativa que está trabajando para crear las oportunidades para prosperar no solo en lo económico, sino también en áreas ligadas a la calidad

de vida, acceso a mejores trabajos, educación, salud y comunicación. Las diferencias en la conectividad entre las zonas urbana y rural son significativas. En la región andina, el 67% de los hogares urbanos está conectado a internet, en tanto que en las zonas rurales solo el 23%. En Perú, más del 90% de los hogares rurales no cuenta con conexión a internet (Ziegler *et al.*, 2020, p. 8). Complementariamente, el INEI indicó que, hasta el primer trimestre de 2020, el 40.1% de hogares peruanos tuvo acceso a internet, mientras que la cifra en las zonas rurales se reduce hasta un 5.9%. En Lima Metropolitana, el 62.9% de hogares dispone de este servicio.

La relación de la minería con la tecnología es histórica y dicotómica. Por un lado, la minería peruana ha sido muy conservadora al momento de incorporar nuevas soluciones tecnológicas en sus operaciones. Por otro lado, este ha desempeñado un rol protagónico en el soporte para la atención de la COVID-19, por lo que la penetración de la tecnología 4.0 se relaciona con el conocimiento de su aplicabilidad.

C. Percepción de la economía circular en la minería peruana

En esta sección, se presentan las percepciones de los principales líderes de opinión con respecto al transitar de la minería peruana hacia la EC, sus oportunidades y desafíos, así como sus opiniones sobre una hoja de ruta para encausar la minería a las tendencias de EC. Dichas percepciones son recogidas mediante entrevistas.

Consejo de Minería - Ministerio de Energía y Minas (Minem)¹⁰

“El transitar de la minería peruana hacia una economía circular depende en gran medida de las tecnologías que se desarrolle a nivel mundial, así como también de la investigación, desarrollo e innovación que se despliegue paralelamente en nuestro país, tanto para la competitividad minera como para el desarrollo de una minería secundaria y valorización de residuos mineros, tecnología e investigación que sea técnica y económicamente viables. En particular se debe consensuar una agenda para el corto, mediano y largo plazo que integre al gremio minero, estado, academia y sociedad en aras de priorizar los principales desafíos de los residuos mineros, siendo indispensable un marco normativo que promueva y agilice los proyectos enfocados en la economía circular e incentive tributariamente tanto a las empresas mineras como a empresas terceras a canalizar esfuerzos para valorizar los residuos [...] finalmente, los proyectos Brownfield tienen una gran oportunidad de potenciar esta transición incorporando en las actualizaciones de planes de cierre de minas la valorización de sus residuos mineros”.

Grupo GEA - CER¹¹

“La economía circular en la minería será posible si se piensa de manera global y se integra en toda su cadena de valor, teniendo la minería peruana un rol muy importante por ser el primer eslabón en la cadena de valor de la industria mundial, sin embargo, en la actualidad la gran minería está enfrascado en conflictos sociales que se hace latente y puede representar un riesgo a las operaciones mineras. El reto de la economía circular en la minería estará en la capacidad que tenga el país y las empresas mineras para articular las operaciones mineras a las cadenas globales de negocios, porque no será suficiente hacer una economía circular solo con la minería de Perú, integrar por ejemplo, la trazabilidad de los metales y a modo de ejemplo, una iniciativa que se viene trabajando actualmente en el país con los pequeños productores mineros del oro es la Iniciativa Oro Responsable (*Better Gold Initiative*), entre

¹⁰ Entrevista celebrada el 7 de diciembre de 2021, en la cual se recogen las percepciones del presidente del Consejo de Minería (Sr. Fernando Gala Soldevilla).

¹¹ Entrevista celebrada el 2 de diciembre de 2021, en la cual se recogen las percepciones del presidente del grupo GEA (Sr. Marcos Alegre Chang).

sus objetivos están fortalecer la responsabilidad compartida de los distintos actores de las cadenas de valor del oro. Asimismo, en paralelo a nivel nacional se debe impulsar la valorización de residuos mineros y minería secundaria, finalmente para cerrar los ciclos de los metales debe impulsarse la industria sostenible de la minería. Particularmente, en nuestro país se debe desprender los cuellos de botella y las barreras legales para promover una economía circular en la minería e integrar la responsabilidad extendida del productor a las rutas internacionales de la cadena de valor y con ello articular una hoja de ruta que atienda la demanda del sector minero por una producción más limpia, integre a todos los que participan en la cadena de valor en la minería y la investigación e innovación”.

Universidad Nacional San Agustín (UNSA), Arequipa¹²

“La minería juega un rol muy importante para el desarrollo del país y el transitar hacia una economía circular para una minería sostenible conlleva hacer frente a los desafíos que representan los residuos mineros (relaves, desmontes) que hoy genera la gran, mediana y pequeña minería, por lo que el rol de la academia es trascendental para generar conocimiento y tecnología que ayude en ese transitar, en un especial énfasis en la pequeña y artesanal minería que tiene el país. Desde el centro de minería sostenible de la UNSA se impulsa investigación con fondos concursables y co-investigación [sic] con universidades referentes del exterior para potenciar el conocimiento en favor de una minería sostenible, creo que la circularidad en la minería si es posible y escalable a todo nivel de la minería peruana en un ambiente colaborativo de todas las partes, donde el eje central para conducir la transición es la voluntad política del gobierno nacional, regional y local, articulado a la academia y las empresas mineras. Una hoja de ruta para una economía circular debe estar alineada a políticas de industrialización, fortalecer alianzas estratégicas para avanzar en investigación en aras de valorizar los residuos mineros para reducir la carga ambiental de los mismo”.

SNMPE - Hub de Innovación¹³

“El transitar hacia una economía circular en la minería, necesita del soporte de la innovación y el desarrollo tecnológico, asimismo, en nuestro país urge integrar una estrategia prioritaria de concatenación de todo el desarrollo científico e innovador que a la actualidad se genera en relación con la minería, ello con el fin de generar continuidad y sinergias para la solución de los desafíos que afronta la minería. El desarrollar una hoja de ruta debe contemplar un proceso escalonado y sistémico, se cree las condiciones para una colaboración conjunta (empresa, estado, sociedad), denotando que todo esfuerzo será en pro de lograr una minería sostenible”.

¹² Entrevista celebrada el 7 de diciembre de 2021, en el cual se recoge las percepciones del vicerrector de investigación de la UNSA (Sr. Henry Polanco Cornejo).

¹³ Entrevista celebrada el 23 de diciembre de 2021, en la cual se recogen las percepciones de la gerente de Innovación de la SNMPE (Sra. Pamela Antonioli de Rutté).

III. Generación de valor para una minería sostenible

La minería juega un papel fundamental en el desarrollo económico y social en la región andina y en Perú. Este sector está entrelazado con procesos de recursos naturales, persiguiendo una transición hacia la gestión ambiental sostenible en los últimos años. Sin embargo, las tendencias globales de desacoplamiento, la escasez de recursos y el deterioro del ambiente están ejerciendo presión sobre el sector minero para acelerar la sostenibilidad en sus operaciones.

El sector minero peruano necesita adoptar enfoques y métodos emergentes de producción y consumo responsable, ya que los minerales son finitos y no renovables. Entre esos enfoques se avizora la adopción de los principios de la EC. No obstante, para implementar los principios, el sector minero necesita dedicar grandes esfuerzos para desvincularse de su modo de producción lineal tradicional, afrontar desafíos de soluciones técnicas, de recursos financieros, y estar inmerso en un mercado restringido que evita la adopción de la EC en diversas industrias.

El concepto integrado en el presente documento (Item I.A.1) (ello según la configuración final remitida) busca transformar el sistema rediseñando los patrones de producción y consumo, emergiendo la EC como un modelo de crecimiento esencial para la consecución del desarrollo sostenible. En este un trabajo colaborativo mejora la inversión, fomenta la construcción de capacidades y fortalece la institucionalidad.

En el presente capítulo, con ayuda de la técnica de análisis del ciclo de vida según las normas internacionales ISO 14040, se evaluarán los impactos ambientales asociados a la cadena de valor de los productos mineros (concentrados de Cu, polimetálico de Pb, Zn-Ag y doré), que comprenden desde la extracción de la materia prima, el procesamiento hasta el embarque (*cradle to port*). Asimismo, se analizan los desafíos críticos para una transición de la minería peruana hacia la circularidad y se pretende identificar oportunidades para alinear a la minería a los principios de la EC.

A. Análisis de ciclo de vida de los principales productos mineros

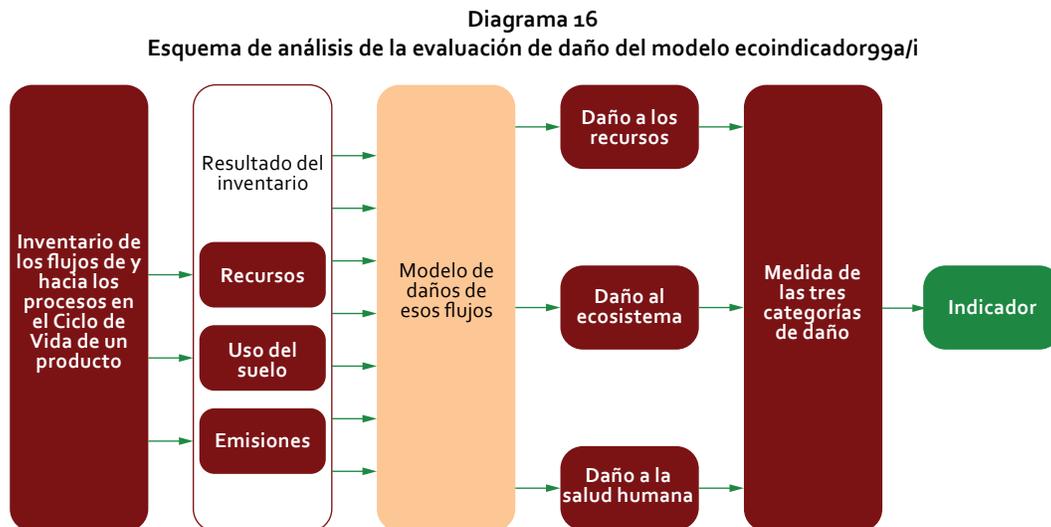
Uno de los principales enfoques de la EC es la restauración de flujos de materiales a nivel de producto y empresa. Ello se logra mediante la combinación de un mejor diseño de productos y modelos de negocio que minimicen el impacto ambiental, así como la disposición de los recursos renovables y no renovables. De igual manera, el ACV es una herramienta integral para evaluar el impacto en el entorno ambiental

de los productos, los tratamientos al final de su vida útil y a nivel de la sociedad. Así, permite identificar los denominados puntos calientes y brindar oportunidades para reducir los impactos ambientales. Por lo tanto, reducir los impactos ambientales es un propósito común entre el ACV y la EC.

Metodología

La cuantificación de los impactos ambientales en la cadena de valor de los principales productos mineros se ajusta a la metodología ACV de acuerdo con las directrices 14040 y 14044 de la ISO. Para el presente estudio, el límite del ACV se restringe a una parte del ciclo de vida completo; es decir, de la cuna al puerto (*cradle to port*). El estudio inicia con la recopilación de datos secundarios y/o los incluidos en la base de datos de Ecoinvent 3.0 para procesos unitarios relevantes en la producción minera; luego, evalúa el ciclo de vida del producto (concentrados).

Para el análisis y evaluación del ciclo de vida de los productos mineros, en el presente estudio, se ha utilizado el método denominado Ecoindicador 99, el cual toma en cuenta tres áreas de impacto ambiental fundamentales: el uso y conversión de la tierra, la extracción y agotamiento de las materias primas usadas en los procesos industriales, y las emisiones industriales que resultan en todo el ciclo de vida de un producto conforme se muestra en el diagrama 16. Este método se encuentra integrado en el *software* SimaPro 9.2, el cual fue desarrollado por la empresa holandesa PRE Consultants bv (PRE, 2012) y permite ser ajustado para múltiples regiones. Además, su base de datos pertenece a Ecoinvent Center y está integrada al *software* SimaPro 9.2, que mantiene actualizada la base de datos Ecoinvent 3.0.



Fuente: Tomado de *Análisis de diversas metodologías de evaluación del impacto del ciclo de vida*, por (Vivancos Bono et al., 2005).

A continuación, se presenta de manera referencial el ACV de tres de los principales productos que posee la minería peruana (concentrado de Pb-Zn, concentrado de cobre y doré). Adicionalmente, el análisis es de muy alto nivel, dado que cada operación minera es *sui generis* en cuanto al tipo de yacimiento minero, el método de explotación, la tecnología, la capacidad de procesamiento, la infraestructura y la estrategia comercial. Asimismo, en la recopilación de datos para el inventario de flujos de materiales, se ha usado bibliografía, y el análisis está en función de procesos ya desarrollados en el *software* SimaPro para Perú y/o complementados con procesos mineros a nivel global.

El objetivo de esta sección es ilustrar los principales flujos de materiales basados en el ciclo de vida en las operaciones mineras (extracción y beneficio), y ayudar en la identificación de áreas potenciales para la mejora del desempeño ambiental en la minería y elementos para la transición hacia la EC.

Escenario

- Para el ACV del concentrado *bulk* de plomo-zinc, se ha considerado como unidad funcional el análisis de un kilogramo de concentrado *bulk* (59% de contenido de zinc). El caso base de análisis considera una operación minera subterránea, con un yacimiento de una calidad del 5% de Zn- eq , una capacidad de procesamiento de 3000 TMD y un consumo estimado de energía de 4.5 Mwh/TMF. Ello conforme al flujo típico que contemplan los procesos de extracción, acarreo, trituración, molienda y flotación presentados en el anexo 1.
- Para el ACV de doré (lingote de oro y plata), se consideró como unidad funcional del análisis una onza (0.0283 kg) de doré (plata y oro). El caso base de análisis estima la operación minera subterránea, con un yacimiento de una calidad de 5 g Au/ TM, una capacidad de procesamiento de 1000 TMD y un consumo estimado de energía de 6.5Mwh/TMF. Ello según el flujo típico que contempla los procesos de extracción, acarreo, trituración, molienda, cianuración, desorción y absorción de carbón activado, planta *merrill crowe* y refinería (ver el anexo 2).
- Para el ACV del concentrado de cobre, se ha considerado como unidad funcional el análisis de una tonelada métrica fina de concentrado de Cu (29% de contenido). El escenario de análisis analiza la operación minera a tajo abierto, con un yacimiento mineralizado de tipo sulfuros con una calidad de 0.7% de Cu $_{eq}$, una capacidad de procesamiento de 100 000 TMD y un consumo estimado de energía de 3.5 Mwh/TMF. Ello conforme al flujo típico que contempla los procesos de extracción, acarreo, trituración, molienda y flotación.

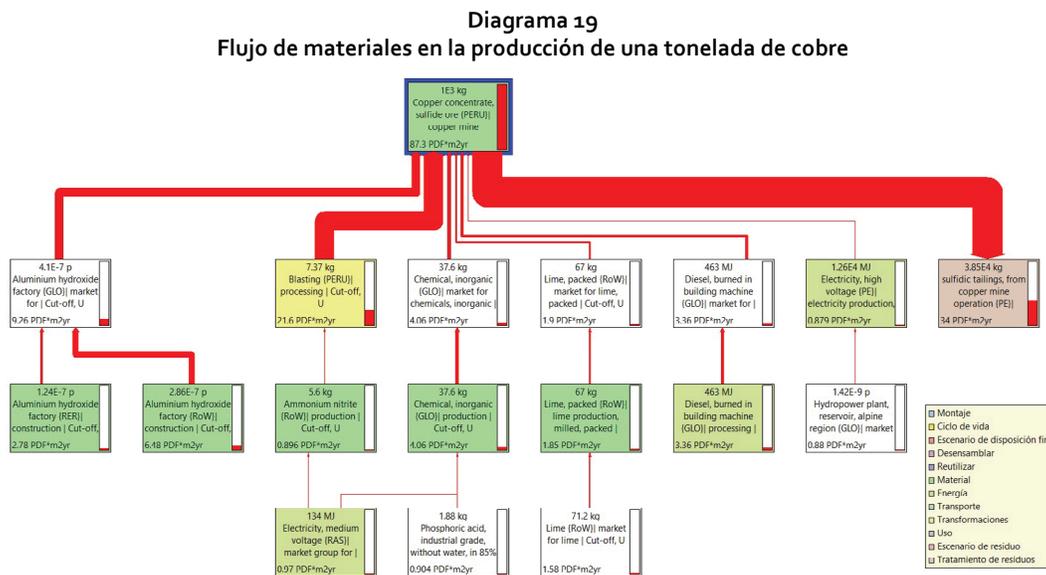
1. Flujo de materiales en la producción minera

- De acuerdo con los resultados de red del flujo de materiales, los puntos calientes en la producción de una tonelada métrica de concentrado *bulk* de plomo-zinc se circunscriben a la cantidad de residuos depositado en las relaveras, el uso de la energía eléctrica, el uso de sulfato de cobre y el uso de explosivos (ver diagrama 17). Asimismo, con respecto a la producción de una onza de doré (plata-oro fundido), los puntos calientes son la cantidad de residuos depositado en las relaveras, el uso de diésel, el uso de cianuro de sodio, cal, y el uso de explosivos (ver el diagrama 18). En la producción de una tonelada de concentrado de Cu, los puntos calientes son la cantidad de residuos depositado en las relaveras, el uso de diésel, el uso del hidróxido de aluminio, los reactivos y el uso de explosivos (ver el diagrama 19). Todo considerando las características de la minería peruana.
- Con relación a la evaluación de la carga ambiental en el ecosistema, está influenciada principalmente por el proceso de producción (explotación y beneficio). En los anexos 1, 2 y 3, se presenta la evaluación de los efectos de la producción del concentrado *bulk*, doré y cobre.

El análisis de los puntos calientes brinda orientaciones técnicas para mejorar el desempeño ambiental de la minería, principalmente en la gestión de los depósitos de relaves, el uso de la energía eléctrica, los insumos de voladura, diésel y reactivos químicos, los cuales se pueden integrar a los principios de la EC. Es importante remarcar las limitaciones que hay en la construcción de los flujos de materiales porque, para el caso de la minería, son *sui generis*.

Una oportunidad latente es repensar y/o diseñar los procesos de beneficio minero al punto de reducir la carga ambiental de los desechos mineros. Así, se incorporan procesos de desulfuración para volverlos inertes y valorizar los depósitos de residuos mineros en nuevas cadenas productivas. El diseño y/o rediseño se extiende a toda la cadena de proveedores de bienes y servicios de la minería peruana para ofertar productos con alto porcentaje de materiales reciclados, reducir material en el ensamblaje, y fabricar productos compatibles y de fácil remanufactura.

Otra oportunidad para la gestión de los residuos de los reactivos químicos usados es la extensión de programas de equilibrio de responsabilidades entre los fabricantes, los distribuidores de bienes de consumo y los consumidores en referencia a la gestión de residuo.



Fuente: Elaborado en el software SimaProg.2, versión DEMO (incluye base de datos de inventario y procesos).

2. Análisis del flujo de materiales en la producción minera

En línea al escenario planteado para cada uno de los productos analizados (unidades funcionales) y a la identificación de los principales puntos calientes suscritos en el numeral 4.1.1. En la presente sección, se amplían las siguientes anotaciones:

- Del diagrama 17, correspondiente al flujo de materiales en la producción de un kg de concentrado *bulk* de plomo-zinc, se puede denotar que para ello se dispone de 10.3 kg de relave. Este es uno de los puntos más urgentes a ser gestionado para mejorar el desempeño ambiental.
- Del diagrama 18, correspondiente al flujo de materiales en la producción de una onza de doré, se puede denotar que para ello se dispone de 1390 kg de relave. Asimismo, cabe indicar que otro de los puntos importantes es el consumo de diésel. Ello debido a que el modelo contempla que todo el acarreo de mineral y desmonte transita desde el interior de la mina subterránea hasta la superficie. Del mismo modo, es relevante el uso del nitrato de amonio, componente esencial de los explosivos y utilizado en el proceso de voladura.
- Del diagrama 19, correspondiente al flujo de materiales en la producción de una TM de concentrado de cobre, se advierte que para ello (29%) se dispone de 38.5TM de relave. Esto es uno de los puntos más necesarios que se debe gestionar para mejorar el desempeño ambiental, ya que estima también la baja calidad del yacimiento (baja ley). Otro es el uso de nitrato de amonio en el proceso de voladura y de insumos químicos en los procesos de flotación.
- Finalmente, de la evaluación del daño (del anexo 1 al 3), se puede deducir que la producción de concentrados y doré tiene una relevancia por sus impactos perdurables en la calidad de los ecosistemas, la salud humana y el agotamiento de los recursos.

B. Desafíos en el tránsito de la minería peruana hacia la economía circular (EC)

Para transitar hacia una EC en la minería, en principio, se debería orientar a la implementación de “operaciones circulares” que valoricen los residuos de extracción y los residuos sólidos. Sin embargo,

existe una mezcla de factores que facilitan o dificultan la adopción de la EC por el tipo de mineral que se extrae, el tipo de explotación (ya sea a cielo abierto, subterránea o mixta), los diversos materiales de desecho que se generan (la cantidad de desmonte, aguas de mina, lodos y relaves) y el contenido de sustancias presentes en los desechos mineros.

A partir de la revisión literaria, de las percepciones de los líderes de opinión, y del análisis de inducción y deducción de todo lo actuado en el presente documento, se identifican y sintetizan los principales desafíos de la minería peruana para transitar la EC.

- **Legislación y políticas.** Se debe contextualizar el marco legal que rige actualmente para el sector minería en torno al concepto y principios de la EC, actualizar medidas legislativas (Ley y Reglamento del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental), modificar reglamentos (Reglamento de Protección Ambiental para Actividades de Explotación Minera, Reglamento de la Ley de Cierre de Minas), restablecer los procedimientos y/o permisos ambientales para la valorización y/o reúso de desechos mineros en otros sectores productivos, así como establecer un marco legal para beneficios fiscales, incentivos y subvenciones que promuevan la circularidad de los flujos de desecho generados por la minería. Finalmente, se requieren una visión a largo plazo, voluntad política y liderazgo para formular lineamientos que prioricen la circularidad en la minería.
- **Gobernanza e incentivos.** Las soluciones para los residuos mineros necesitarán la cooperación de todos los interesados (sociedad, empresa y Gobierno), el estímulo político, los acuerdos multinivel con participación local y nacional, e incentivos fiscales para la adopción de nuevas tecnologías. Asimismo, requerirán tiempo para incorporarse en los mercados, y modificar paulatinamente los nuevos procesos, productos y modelos de negocios. Es una transición que se efectuará en el mediano y largo plazo. Los aspectos relevantes son asegurar la transferencia de conocimiento, la gestión de la información (medida y reporte), la implementación de medidas de gobernanza, la aplicación de ideas, e iniciativas de fomento y adopción de la EC entre las partes interesadas. De igual manera, serán desafiantes los incentivos y el cambio cultural necesarios para que la sociedad logre la aceptación de productos elaborados a partir de residuos mineros.
 - La adopción de la EC en la minería peruana se encuentra todavía en la etapa inicial, dominada por el reciclaje de los residuos sólidos en lugar del diseño de operaciones circulares y/o en la valorización de los residuos mineros. Iniciar la transición a una EC requerirá un enfoque transversal de doble flujo (de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo) para mantener el interés y la participación de todos los interesados, y canalizar la innovación.
- **Gestión preventiva de los desechos mineros.** La generación de desechos mineros y drenaje ácido durante las operaciones mineras plantea un desafío sustancial para los reguladores, empresas mineras y otras partes interesadas. El costo de tratamiento de los drenajes y cierre de los depósitos de relaves y/o desmonte son altos, siendo crucial en el diseño de las nuevas operaciones mineras y/o el rediseño de operaciones en curso un plan de gestión preventivo. Este debe incorporar en el análisis de alternativas y/o factibilidad del proyecto los principios de la EC. Este desafío se enmarca en uno de los principales pilares de esta como es el **diseño y/o rediseño**:
 - Existe una predominancia en el sector minero de encontrar recursos mineros para desarrollar proyectos de clase mundial a bajo costo y una alta producción. No obstante, en la realidad peruana, todo proyecto minero está inmerso directa o indirectamente en conflictos socioambientales, por lo que el concepto de EC debe tomar relevancia en estudios de *trade off* (análisis de alternativas), y en definiciones de procesos mineros al momento de evaluar la operación y cierre.
 - Una medida de lo antes suscrito es considerar en la etapa de factibilidad de un proyecto nuevo (podría también considerarse una operación minera en curso), y la valorización y/o inertización de los desechos mineros. Es decir, que a partir del diseño (o rediseño)

de las operaciones mineras se prevea producir desechos mineros inertes o plausibles de integrarse a una cadena de valor. Ello incluye un análisis de riesgo y estimación de costos para una operación sostenible que interiorice los costos de ejecutar las medidas de cierre progresivo, cierre final, poscierre y el gasto financiero. En este último, incurre toda empresa al mantener una carta fianza hasta alcanzar un nivel aceptable de calidad ambiental.

- Este desafío también involucra fortalecer el Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y la institucionalidad de la certificación ambiental de proyectos mineros liderado por el Senace. La finalidad es incorporar en el proceso de certificación un análisis de alternativas bajo un enfoque de EC, además de agregar la adopción de la circularidad de los flujos de desecho minero en el Reglamento de Protección y Gestión Ambiental para las actividades de explotación, beneficio, labor general, transporte y almacenamiento minero (Decreto Supremo 040-2014-EM), y, finalmente, actualizar el alcance de la Ley de Cierre de Minas y su reglamento en cuanto a las adopciones preventivas de inertización y/o valorización de desechos mineros hasta incluso después del cierre.
- **Gestión socioambiental.** Actualmente, la licencia social es de gran relevancia; sin embargo, legalmente no está instaurada como un título habilitante para desarrollar minería en Perú. En este sentido, las comunidades aledañas y la sociedad ejercen presión en la aceptación y/o rechazo de un proyecto mediante protestas y conflictos para ser escuchados en sus demandas. En buenos términos, la licencia o aceptación social de un proyecto minero no solo está asociado a la extracción de los recursos mineros, sino también a la aceptación de que los residuos que se depositen en sus territorios a lo largo del tiempo tengan un certero análisis de los riesgos que conlleva. Las operaciones mineras y su cierre pueden alterar la vida social de las comunidades, lo cual genera problemas y/o conflictos (empresa-comunidad). Por lo tanto, una adopción de EC será un desafío para la empresa minera y los responsables de la formulación de políticas para identificar, evaluar y gestionar los problemas sociales relacionados con la operatividad y cierre de las operaciones mineras.
- **Desarrollo tecnológico.** La minería peruana tiene dos brechas importantes en torno al desarrollo tecnológico que se deben atender. La primera es la brecha entre los procesos y el desarrollo de productos (concentrados y desechos mineros); y la segunda, entre la innovación y la producción de tecnología. Por ello, disminuir estas brechas será determinante para el éxito de la transición hacia la circularidad de las operaciones mineras. La falta de avance en el desarrollo de tecnología e innovación adecuada rezaga la valorización de los desechos mineros, a la vez que la minería secundaria está limitada por la gran heterogeneidad que existe en los desechos mineros. Es un desafío de largo aliento que debe sumar la participación del Estado, la empresa, la cooperación internacional y la academia para priorizar una minería sostenible como eje principal del desarrollo del Perú.
 - Operativamente, se debe innovar y/o generar conocimiento para atenuar la disolución de mineral (pérdida de mineral) al momento de la extracción. A partir de ello, reducir grandes volúmenes de material que se beneficiarán (uso de energía, relaves, insumos, etcétera).
 - Maximizar la vida útil de los bienes de capital (sin perder su eficiencia) con la remanufactura, la reutilización y el reciclaje.
 - Valorizar los relaves como insumos para una minería secundaria y/o como materia prima para otros sectores productivos (construcción, cemento, vidrio).
- **Promoción y articulación de conocimiento.** El conocimiento sobre los contenidos importes de los desechos de la mina conllevarán una utilización y/o valorización de los flujos de desecho minero. Actualmente, estos se encuentran en sus inicios y pendientes de ser integrados en una base de datos para generar oportunidades comerciales y/o simbiosis industrial.

- **Valorización de los residuos mineros.** La concentración de material recuperable en los desechos de la mina y/o su potencial uso en nuevas cadenas productivas (insumo para otras industrias) son un desafío al momento de valorizarlos; toda vez que la valorización de los residuos mineros en relación con la extracción primaria requiere innovación e inversión disruptiva a los patrones de producción. Adicionalmente, es necesario tener en cuenta que cada sitio minero es distinto, por lo cual existe una importante heterogeneidad y contenidos de diferentes impurezas. A este desafío se aúna la distribución geográfica de las operaciones mineras y las distancias considerables para su integración a la simbiosis industrial con otros sectores.

Para que un nuevo proyecto u operación minera incorpore el conocimiento de los elementos presentes en los relaves, sería posible repensar la disposición tradicional del relave (espesadores) para adherir líneas que concentren los elementos necesarios para otras industrias (vidrio, cemento, construcción, etcétera). Finalmente, en el entendido de que el volumen de relave generado será mucho menor que el caso base utilizado en la actualidad, que es enviar a los espesadores para su posterior disposición en las relaveras. **Esta adición de nuevas líneas conlleva ejecutar un análisis de *trade off* sobre los costos de capital y operación de mantener concesiones de territorio para depositar los relaves. Además, su mantención y posterior cierre versus las nuevas líneas antes indicadas podrían generar valor económico y la disminución del impacto ambiental.**

- **Cadena de valor y suministros.** La gestión y la calidad de toda la cadena de valor de la minería peruana son requisitos fundamentales para la valorización exitosa de los flujos de residuos mineros. Sin embargo, las cadenas de valor para la valorización los residuos mineros (desmontes y relaves) por parte de las pequeñas y medianas empresas (pymes) son muy limitadas. Así, quedan brechas por disminuir como la especialización, la asistencia técnica y las formas de financiamiento acordes a la escala de la empresa al momento de emprender cualquier iniciativa.

La cadena de valor debe ser capaz de capturar los desechos y reintroducir el subproducto como recursos. La valorización de los residuos mineros es incompleta sin una oferta diversificada y responsable, donde todas las partes interesadas de la cadena de suministro están involucradas.

IV. Responsabilidad extendida y/o compartida del productor

La responsabilidad extendida del productor (REP) es un concepto que fue introducido formalmente en 1990, el cual hace hincapié en lograr una influencia en el diseño de los productos. Es definido como:

“Una estrategia de protección ambiental para alcanzar un objetivo de disminución del impacto ambiental total de un producto, al hacer que el fabricante sea responsable de todo el ciclo de vida, especialmente de la devolución, el reciclaje y disposición final del producto”.

La REP se implementa mediante instrumentos administrativos, económicos e informativos, cuya composición determina la forma precisa de su aplicación. Asimismo, se considera que un modelo exitoso de política REP debe ofrecer un fuerte incentivo para desarrollar un producto que minimice el impacto ambiental en todo el ciclo de vida (Lindhqvist, 2000).

La OCDE define la REP como:

“un enfoque de política ambiental bajo el cual los productores tienen responsabilidad extendida por sus productos y el empaque de los mismos, que internaliza los costos sociales de la gestión de residuos, e incluye el impacto medioambiental de la eliminación de los residuos (OECD & Walls, 2006)”.

La REP trasciende la venta y distribución de un producto. Según el diagrama 20, la REP está inmersa en las fases ascendentes¹⁴ (*upstream*) y descendentes¹⁵ (*downstream*) del ciclo de vida de un producto. Su aplicación se propicia mediante el cumplimiento de la legislación o de manera voluntaria. En este sentido, pretende internalizar los costos ambientales en todo el ciclo de vida del producto e incentiva a los productores a diseñar y/o rediseñar los productos para ser amigables con el medio ambiente (McKerlie *et al.*, 2006).

¹⁴ Incluye el proceso de extracción de la materia prima y manufactura del producto.

¹⁵ Considera la recolección, el procesamiento, el reúso, el reciclaje del residuo y el ingreso de este a la fabricación de nuevos productos.

Diagrama 20
Ciclos de vida del producto y la REP



Fuente: Adaptado de, por McKerlie *et al.*, 2006.

Nota: Las etapas en verde corresponden a la participación de la REP en el ciclo de vida.

La REP es una herramienta económica y una versión moderna del principio de que quien contamina paga. Tiene como objetivo mejorar la circularidad de productos y materiales. Este principio establece que los costos de eliminación y recuperación deben transferirse a los productores, quienes tendrán un fuerte incentivo para reutilizar, reciclar o eliminar los materiales de desecho.

Connett *et al.* (2011) argumentan que, si un producto no se puede reutilizar, reciclar o convertir en abono, la industria no debería producir tal producto ni los consumidores comprarlo. Ante la divergencia manifestada por los autores, se destaca la necesidad de una responsabilidad compartida entre todas las partes interesadas (incluye a los consumidores) para lograr resultados más ambiciosos en términos de recolección de residuos para su reutilización o reciclaje (Ghisellini *et al.*, 2016).

El concepto de la REP fue aplicado por primera vez en 1991 en la legislación alemana sobre envases, la cual ha sido replicada en muchos países desarrollados como en Canadá (gestión de aceites usados), Reino Unido (programa de residuos de empaques), Países Bajos (gestión de los electrodomésticos de línea blanca y marrón), Japón (programa de electrodomésticos y aparatos eléctricos como computadoras), China (gestión de equipos eléctricos y electrónicos domésticos), Suecia (desmantelamiento de automóviles), Portugal (gestión de los neumáticos), Suiza (gestión de residuos eléctricos), Bélgica (gestión de neumáticos usados), Corea del Sur (gestión de aparatos eléctricos y electrónicos), Estados Unidos (solo en el estado de California la gestión de aceites usados de motor). También ha sido desarrollado de manera pionera en países en vías de desarrollo como Brasil (gestión de neumáticos usados) y Colombia (gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos) (Gupt y Sahay, 2015).

A. Implementación de la responsabilidad extendida del productor (REP)

Según el manual para la implementación de la REP en los países miembros de la OCDE, existen tres categorías de instrumentos básicos que se pueden aplicar (a) requerimientos de recuperación¹⁶,

¹⁶ Políticas que requieren al productor y/o vendedor para la gestión del producto y empaque después del uso.

(b) instrumentos económicos¹⁷ y (c) estándares de desempeño¹⁸. Uno de los pasos más importantes para diseñar un esquema efectivo de REP es el establecimiento de los objetivos en la formulación de las políticas y programas. Estos se tienen que determinar de manera transparente y relacionar con una mejora específica en el entorno ambiental (biodiversidad, la preservación o conservación de recursos naturales y conservación de la energía). De este modo, conlleva formular políticas proporcionales y precisas para el impacto que se quiere evitar mediante la internalización de costos ambientales. Asimismo, en el citado manual, se señala que una combinación entre los instrumentos económicos y los estándares de desempeño mejoran el potencial de innovación y diseño en los productos (OECD, 2021)¹⁹.

Teóricamente, la internalización de los costos ambientales se reflejará en el precio final del producto. Este, en consecuencia, debería repercutir en el cambio de comportamiento del consumidor, de tal manera que los costos de gestión de los residuos sean transferidos del sistema de recolección público, que es totalmente cubierto con recursos de los contribuyentes, hacia el sector privado y los consumidores. De este modo, se cumple el principio de que quien contamina paga. Asimismo, la responsabilidad de la gestión final del producto debería impulsar a los productores a examinar la estrategia de producción, la reducción de residuos y repensarlos como un recurso necesario para recuperar (McKerlie *et al.*, 2006).

La investigación de Margaret Wall para la OECD (2006) suscribe que la REP se puede lograr utilizando varios instrumentos de política y sus variantes. Entre los instrumentos más comunes, se encuentran los enfoques de devolución obligatoria de productos e instrumentos económicos, como los impuestos por reciclaje anticipado en combinación con un subsidio para el reciclaje.

Gupt y Sahay (2015) resumen los principales instrumentos de política empleados para implementar la REP:

- **Instrumentos administrativos.** Entre los más usados, son los programas de recolección y/o devolución obligatoria de los productos posconsumo, el establecimiento de objetivos de reutilización y reciclaje de los productos posconsumo, el establecimiento de límites de emisión de productos nuevos, la obligación de recuperación y el establecimiento de estándares técnicos.
- **Instrumentos económicos.** Alude a los impuestos sobre materiales y productos, subsidios, sistema de tarifa de eliminación anticipada, sistema de depósito y reembolso, y subvenciones/ impuestos combinados para la fase descendente del ciclo de vida del producto.
- **Instrumentos informativos.** Evocan la persuasión social hacia el consumidor como el etiquetado, el reporte medioambiental, el suministro de información a recicladores y la consulta con autoridades sobre la red de recolección.
- **Convenios.** Son acuerdos de buena fe de parte del productor y de los reguladores para la gestión posconsumo, los cuales se reflejan en contratos sociales o acuerdos de caballeros.

Asimismo, los citados autores concluyen que el éxito de la implementación de la REP depende de la gestión en fase ascendente (producción de materias primas y manufactura), así como del marco regulatorio eficaz que destaque el rol de los diferentes actores (productores y consumidores), y de pautas y/o estándares adecuados para los productores. Además, identificaron que en la mayoría de casos de éxito de REP implementados el papel de los productores se limita a llevar a cabo la responsabilidad financiera del pago de las tasas a las entidades responsables, y/o subcontratar la recolección y reciclaje. La implementación del esquema REP requiere un monitoreo constante de la efectividad de las regulaciones, especialmente en los países en desarrollo, donde los esquemas son vulnerables debido a la presencia del sector informal.

¹⁷ Esquemas de devolución, tarifas de disposición anticipada, impuestos y/o subsidios.

¹⁸ Establecimiento de contenido mínimo de material reciclado en la fabricación de un nuevo producto.

¹⁹ Web OCDE revisada en octubre de 2021. Recuperado de <https://read.oecd-ilibrary.org/environment/extended-producer-responsibility_9789264189867-en#page45>.

1. Implementación de la REP en minería de la región andina

La minería es una actividad económica que extrae los recursos minerales del suelo y subsuelo para proveer los minerales y metales que los distintos tipos de industria demandan. Por ello, la aplicación de la REP en las fases de exploración, extracción y procesamiento está más ligada a la responsabilidad como consumidor de productos (insumos, materiales y equipos requeridos para desarrollar la actividad). Sin embargo, la principal contribución de la actividad sería en la fase de fundición y refinado, donde se cumpliría un rol primordial reprocesando los residuos y metales secundarios (ICMM, 2016).

El principio de REP en los países de la región andina ha sido incorporado inicialmente en Colombia (2007), Ecuador (2012), Bolivia (2015), Chile (2016) y Perú (2017). En el caso de Ecuador, Colombia y Perú, el alcance de la responsabilidad extendida prioriza los residuos de aparatos eléctricos (RAE); Bolivia, plásticos de polietileno (PET), bolsas de polietileno, llantas, baterías o pilas y envases de plaguicidas; y Chile, los RAE, envases y embalajes, llantas o neumáticos, pilas o baterías y aceites, siendo el único país de la región donde la REP tiene alcance para la actividad minera.

Diagrama 21
Normativa REP en los países andinos

	Perú	Chile	Colombia	Bolivia (Estado Plurinacional de)	Ecuador
Alcance normativo	Decreto Legislativo N°1278 – 2017, que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos.	Ley marco N°20.920 para la gestión de residuos la responsabilidad extendida al productor y fomento al reciclaje.	la ley 1672 del 2013 Obligaciones para productores, distribuidores y comercializadores, consumidores y entidades de Gobierno entorno a la gestión de los residuos de aparatos RAEE.	Ley N° 755, 28 de octubre de 2015: Ley de gestión integral de residuos.	Acuerdo Ministerial No. 161 publicado en el Registro Oficial No. 631 del 01 de
Ley REP Aplicable a Minería					
Alcance – Residuos Priorizados	RAE	Llantas o neumáticos, pilas o baterías y aceites.	RAE	La presente disposición se aplica inicialmente a botellas PET, bolsas de polietileno, llantas o neumáticos, pilas o baterías y envases de plaguicidas.	RAE

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Marco normativo de la legislación de residuos en los países andinos.

Considerando que, en general, las ubicaciones de las operaciones de extracción se encuentran alejadas de las ciudades, implementar la obligatoriedad del productor a recuperar el producto será todo un desafío para cumplir el propósito. Por ello, el esquema de implementación de la REP debe orientarse a la responsabilidad compartida entre los productores y el consumidor, a fin de asegurar que los residuos gestionados por la actividad minera posconsumo se integren en la cadena del productor. Un paso importante

será el traslado de los residuos desde la operación hasta la industria del productor (proveedor de bienes). Una alternativa consiste en realizar contratos cada vez que se adquieran nuevos insumos, materiales y equipos, donde el operador minero deberá devolver el insumo, el material o el equipo usado a manera de intercambio y recibir un descuento (considerar el flete o la materia prima del residuo entregado) en la adquisición del nuevo producto. Para el caso de los minerales refinados, el productor deberá asegurar una cuota de material reciclado en cada nuevo lote de producción. Además, este debe tener una infografía en la cual se indique la forma de reciclaje del producto y la ubicación de los desechos, así como el porcentaje de material reciclado para su producción. El enfoque REP deberá considerar responsabilidad financiera por parte del productor para recuperar el producto desde los puntos de ventas, y por parte del consumidor para devolver los productos hasta el punto donde será responsable el productor.

Finalmente, el Estado cumple un rol preponderante en sus diferentes niveles porque tiene que ser el responsable de fiscalizar la implementación y la aplicación de penalidades e incentivos.

B. Aplicación de la REP en la minería peruana

El Decreto Legislativo 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, considera como uno de los principios de la gestión de residuos sólidos la REP, señalando que

“[...] los fabricantes, importadores, distribuidores y comercializadores fabriquen o utilicen productos o envases con criterios de ecoeficiencia que minimicen la generación de residuos y/o faciliten su valorización, aprovechando los recursos en forma sostenible y reduciendo al mínimo su impacto sobre el ambiente. Asimismo, son responsables de participar en las etapas del ciclo de vida”.

Asimismo, en artículo 55, se precisa la responsabilidad del manejo y disposición final de los residuos sólidos no municipales:

“El generador, operador y cualquier persona que intervenga en el manejo de residuos no comprendidos en el ámbito de la gestión municipal, es responsable por su manejo seguro, sanitario y ambientalmente adecuado, así como por las áreas degradadas por residuos, de acuerdo a lo establecido en el presente Decreto Legislativo, su Reglamento, normas complementarias y las normas técnicas correspondientes”.

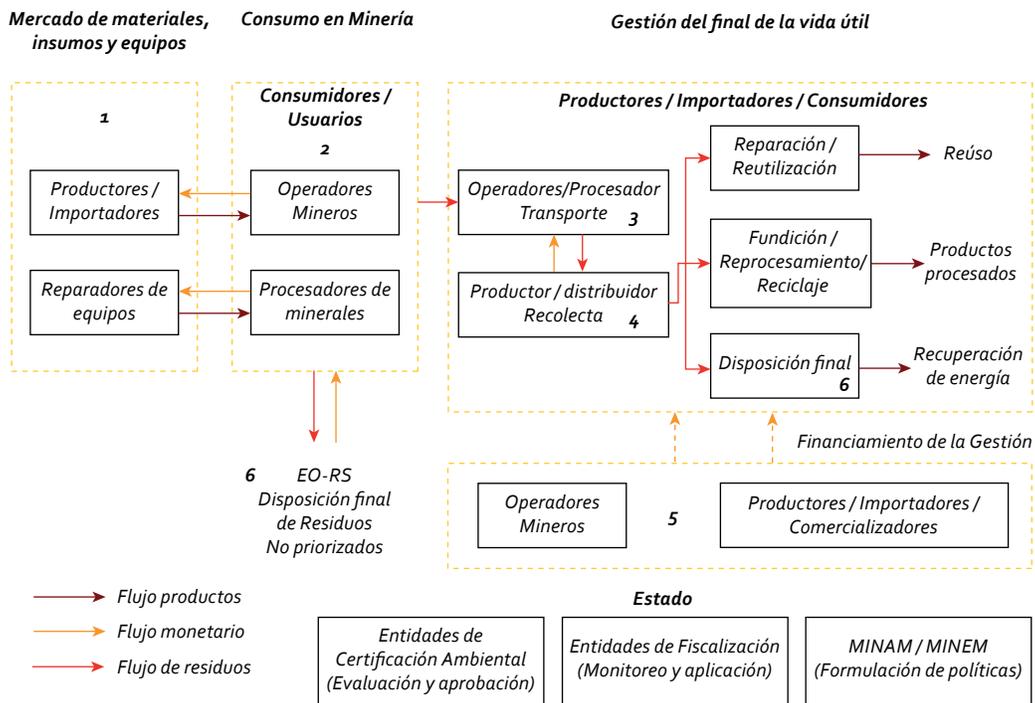
Con base en los alcances del Decreto Legislativo 1278 (principios y responsabilidades), y considerando la revisión bibliográfica expuesta en el numeral 5.1, se propone el siguiente esquema de gestión de implementación de REP, donde se considera una responsabilidad compartida entre el productor/importador/comercializador y el usuario final, que en este caso es el operador minero.

El esquema de implementación REP propuesto para la minería en Perú esboza una gestión de los bienes de capital (equipos, vehículos y neumáticos) e insumos (explosivos, aceites, grasas y reactivos químicos), conforme a la siguiente descripción:

- La responsabilidad del productor inicia con el suministro de productos y empaques diseñados y fabricados, considerando la maximización de su vida útil con criterios técnicos que permitan una eficiente remanufactura, reutilización, reúso y reciclaje. Luego, serán utilizados por los operadores mineros, las plantas de beneficio, las fundiciones y las refinerías.
- Los operadores mineros y procesadores de mineral mantendrán un registro de los productos adquiridos para establecer una trazabilidad de los flujos de materiales (ingresos y salidas). Asimismo, al final de la vida útil de los insumos, tiene la responsabilidad de gestionar adecuadamente los residuos generados posconsumo según el marco legal y las especificaciones técnicas provistas por el productor. En lo referente a los bienes de capital, los operadores mineros deben asegurar un adecuado mantenimiento preventivo conforme a las especificaciones del productor en aras de maximizar la vida útil.

- El operador minero y/o procesador de mineral deben entregar al productor en instalaciones convenidas (incluye importador y/o comercializador) los residuos y/o bienes en desuso gestionados a modo de intercambio cada vez que se requieran nuevos bienes e insumos, o al finalizar la vida útil del producto.
- El productor debe recibir los bienes en desuso e insumos entregados en instalaciones convenidas con el operador minero y/o procesador de minerales. Así, garantiza que los flujos de materiales entregados serán valorizados e integrados a la cadena de valor mediante la reparación, la reutilización, la fundición, el reprocesamiento y el reciclaje según corresponda al tipo de material entregado, y en último escenario la disposición final.
- Los operadores mineros y/o procesadores de mineral, de manera conjunta con el productor (incluye importador y/o comercializador), son los responsables de la gestión final de vida útil del producto posconsumo.
- Finalmente, los residuos que no puedan ser valorizados serán dispuestos por los operadores de residuos sólidos hacia su disposición final.

Diagrama 22
Esquema de responsabilidad compartida en la minería peruana



Fuente: Adaptado de Park, Díaz, Mejía, 2017 e ICMM, 2016.

En el esquema propuesto, el rol del Estado es trascendental en todo el proceso, por lo que se amplían algunas ideas:

El Estado. En el esquema propuesto, el Estado tiene un rol promotor de inversiones de la EC y el REP en la minería. Asimismo, es el responsable de la formulación de políticas, de la evaluación y fiscalización, que en principio es quien determinará el alcance de la REP, y los instrumentos administrativos y económicos aplicables. Estos previamente deben ser consensuados con el sector minero y su cadena de suministro.

Como parte de los instrumentos administrativos, se deben precisar los objetivos de recuperación y reciclaje (obligatorios), la periodicidad con la que se revisarán y actualizarán los objetivos, la obligación

de recuperación, y los estándares técnicos que deben cumplir los productos. De esta manera, se asegura la mayor vida útil, y se definen los criterios de aceptación de productos remanufacturados o reparados. También se deben detallar los instrumentos económicos, los cuales se relacionarían con los impuestos y penalidades por incumplimientos de los objetivos de recolección y reciclaje, y para productos que no cumplan los requisitos técnicos establecidos previamente.

El rol del Estado se articula con las entidades de fiscalización para monitorear y asegurar la correcta aplicación de la REP.

Productores, importadores y comercializadores. Los insumos, materiales y equipos deben ser adquiridos de productores, importadores y/o comercializadores que aseguren una infraestructura para la recuperación y reciclaje de sus bienes. Asimismo, entre los consumidores y los productores, determinarán un precio al flujo de materiales posconsumo, el cual permitirá sustentar —en parte o en su totalidad— el costo de gestión del final de la vida útil del producto posconsumo.

Para la implementación de la REP en minería, debe considerar un registro de los principales proveedores de bienes de capital e insumos, toda vez que son el primer eslabón para la eficacia de una política de REP. En el cuadro 7, se expone un ejemplo de los principales proveedores:

Cuadro 7
Ejemplo de algunos de los principales proveedores del sector minero

Proveedor	Rubro de atención
Ferreyros SA	Repuestos y suministros para maquinarias y equipos. Tiene presencia en las principales regiones mineras como Lima, Trujillo, Arequipa, Cusco, Cajamarca, Piura y Huaraz.
Komatsu - Mitusi Maquinaria Perú	Repuestos y suministros para maquinarias y equipos. Tiene presencia en las principales regiones mineras como Lima, Trujillo, Arequipa, Tumbes, Cajamarca, Piura y Moquegua.
Neuma Perú	Neumáticos, camiones mineros y equipos de carguío
Exxon Mobil del Perú	Lubricantes
Noexo Lubricantes	Lubricantes
Tire Sol SAC	Neumáticos, volquetes y equipos menores
Fundición Central	Elementos de desgaste - GETS
Metalurgia Peruana	Elementos de desgaste - GETS
Funvesa	Elementos de desgaste
Sandivk del Perú	Repuestos y elementos de perforación
Cytec Perú (proveedor Solvay)	Insumos químicos para flotación y tratamiento de aguas
Chemsupply (Cytec, Norbright)	
Estec (SNF Flomin)	
Reactivos nacionales	
Diamond (Qingdao Jiahua)	
BASF	
Royal Chemical del Perú (Wenda)	
Mercantil (Flottec, Labufloc)	
Portland (Shell Chemicals)	
Perú Químicos (Huntsman)	
Oxiquim	

Fuente: Tomado de Fong-Saldarriaga.

La implementación de la REP, por parte del Estado peruano hacia la minería, es un trabajo progresivo que deberá consensuar sus objetivos con los operadores mineros y su cadena de suministros. Para ello, se debe fortalecer un marco normativo que defina claramente los roles de los actores (productores y consumidores), se fijen objetivos posibles de cumplir y se prioricen residuos de acuerdo con el avance tecnológico. Por ello, es muy importante el rol de la I+D+i+e, que —en primera instancia— debe ser respaldado por políticas públicas para cerrar el ciclo del uso de materiales. Indudablemente, la eficacia de la implementación estará limitada al grado de participación de las partes interesadas.

Dada la trascendencia comercial de los principales productores de bienes de capital e insumos químicos que sopesa en las actividades mineras, las iniciativas del REP que se pretendan implementar deben tener una visión regional y/o global para trazar los flujos de materiales, y cerrar los ciclos de producción.

V. Lineamientos de política pública de la economía circular en la minería peruana

Para el transitar de la minería peruana hacia la EC, es necesaria la participación e intervención del Estado, el sector minero, la academia, las organizaciones no gubernamentales y la cooperación internacional. Ello con la finalidad de que de manera articulada se identifiquen y prioricen las temáticas de intervención, y se definan los objetivos en el corto, mediano y largo plazo que se espera obtener en cada uno de los temas priorizados por el sector. Asimismo, se deben identificar las barreras, los riesgos, las limitaciones y las incertidumbres que existen, las cuales restringen el tránsito hacia la EC con la finalidad de determinar una política pública que aborde las causas subyacentes de las barreras del sector minero.

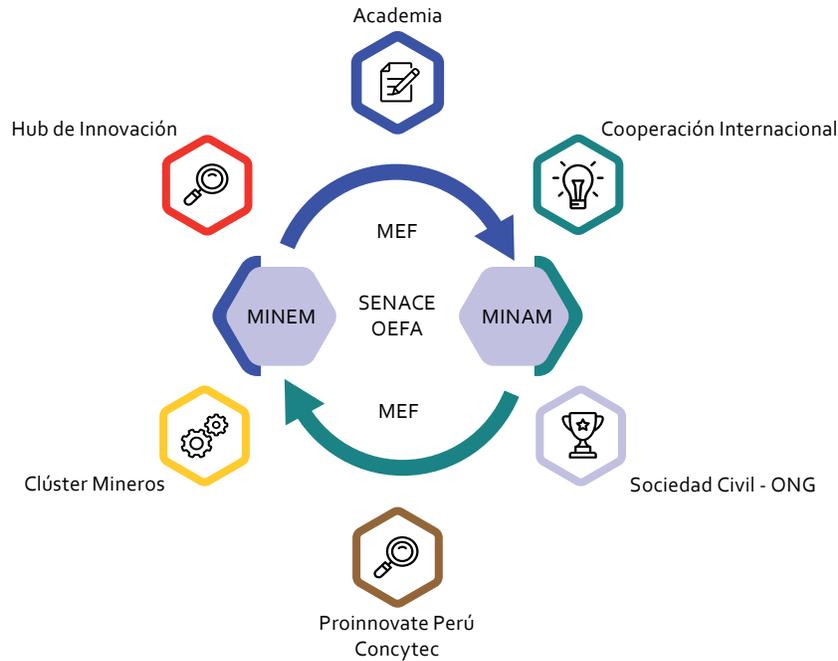
Es importante denotar que el tránsito hacia la EC debe ser gradual y progresivo asegurando un alto grado de participación de las partes interesadas, impulsado con la innovación y desarrollo tecnológico en ambientes colaborativos.

A. Formación del ecosistema de la interrelación colaborativa

La adopción de la EC en la minería peruana requiere la interacción de múltiples actores en un ecosistema colaborativo, el cual debe ser promovido por el Estado mediante el Minem y el Minam, con el respaldo del MEF. De este modo, se pretende articular una agenda consensuada y/o priorizada con las partes interesadas (las empresas del sector minero, la academia, los hubs de innovación, los clústeres mineros, la sociedad civil y la cooperación técnica internacional) y promover la I+D+i+e.

En el diagrama 23, se presenta un esquema de interacción colaborativa para promover el tránsito de la minería peruana hacia la EC, el cual no pretende ser cerrado ni limitado, sino que está abierto a la incorporación de otros interesados. Esto se debe a que todos los actores interesados en el desarrollo sostenible son los llamados para construir una política pública consensuada en un ecosistema innovador y colaborativo.

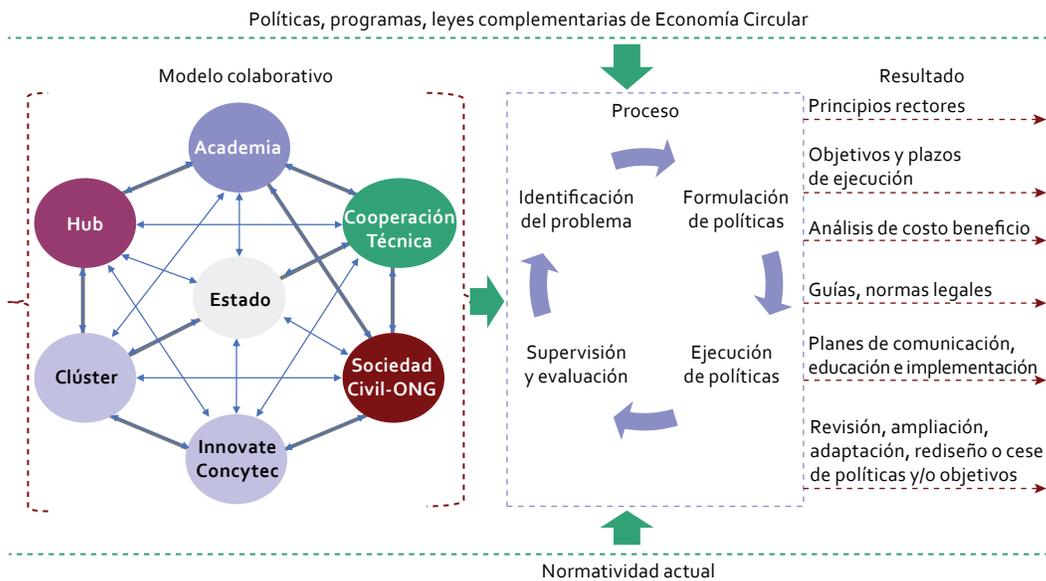
Diagrama 23
Ecosistema colaborativo para el tránsito hacia la EC



Fuente: Elaboración propia.

A partir de la construcción de un ecosistema colaborativo con las partes interesadas, se plantea un modelo de implementación de la EC basado en la normativa existente, así como en el desarrollo de políticas, programas y leyes complementarias aplicables al sector minero en su tránsito hacia la EC. El modelo propuesto se presenta en el diagrama 24.

Diagrama 24
Modelo para la implementación de políticas públicas en EC en minería peruana



Fuente: Elaboración propia.

El modelo propuesto en el presente estudio considera que la implementación de una política pública para el transitar de la minería hacia la EC debe ser gradual y mejorada continuamente con base a la investigación, experiencias de implementación, cumplimiento de objetivos y análisis de costo-beneficio.

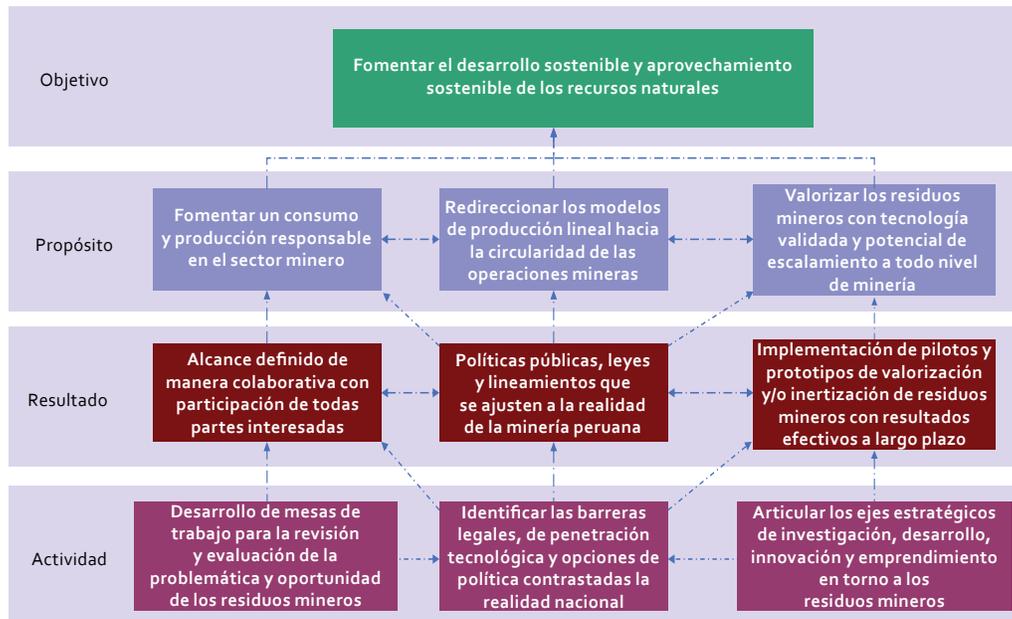
- El proceso de implementación de la política pública considera como ingreso el resultado del trabajo colaborativo entre las partes interesadas para identificar la problemática y las oportunidades en los residuos mineros (valorización y/o inertización).
- Conocidas la problemática y las oportunidades en torno a los residuos mineros, y siempre en un ecosistema colaborativo, se deberán establecer ejes temáticos prioritarios y objetivos a corto, mediano y largo plazo, junto con un exhaustivo diagnóstico respecto a la disponibilidad tecnológica regional y mundial, la disponibilidad de recursos, el dimensionamiento del involucramiento de las partes interesadas, las barreras legales, los incentivos y otros factores que pueden representar un cuello de botella en la circularidad de la minería.
- La formulación de las políticas públicas orientadas al tránsito de la EC debe recoger los distintos niveles de la minería peruana (gran, mediana y pequeña minería), y el ambiente geográfico y social en el cual se desarrolla. En principio, se deberá incorporar la circularidad en las operaciones mineras en el Plan Estratégico Sectorial del Minem, en la Política Nacional Ambiental al 2030, y en el Plan Nacional de Competitividad y Productividad. En esta fase, se debe conceptualizar la visión estratégica que se busca alcanzar con las nuevas políticas públicas en torno a la EC en la minería. Esta será sopesada con la emisión de un marco legal complementario que incentive proyectos circulares tanto por los operadores mineros como por empresas con propósito ambiental.
- El cumplimiento de las políticas en el modelo propuesto conlleva que el Estado deberá acompañar su implementación en todo momento. De esta manera, brinda un soporte técnico e incentivos económicos como son los tributarios, los créditos blandos, las transferencias financieras concursables u otros. Ello con el propósito de desarrollar proyectos y/o investigaciones en el marco de la circularidad, los cuales se deben orientar tanto a los operadores mineros como a empresas conexas a la cadena de valor. Una anotación importante es la facilitación de financiamiento del Estado a las empresas con el propósito de desarrollar proyectos relacionados con la valorización y/o inertización de los residuos mineros.
- Finalmente, el seguimiento a la implementación y sus avances debe contemplar métricas de desempeño que permitan evaluar la efectividad de las políticas implementadas en torno a la circularidad en la minería. Asimismo, de manera complementaria, deberá proveer información para la toma de decisiones con respecto a la ampliación de los ejes temáticos priorizados, y/o rediseño de la política y sus objetivos.

B. Planificación estratégica

La planificación de las políticas públicas es uno de los aspectos más importantes que involucra la formulación y selección de propuestas bajo un enfoque estratégico, el cual considera la problemática, la realidad nacional y los logros que se pretenden alcanzar.

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica, el análisis Pestel, el diagnóstico preliminar de los flujos de materiales en la minería y la REP, a continuación, se esboza un diagrama con las principales consideraciones para la planificación estratégica de la formulación de política pública en torno a la EC en la minería peruana.

Diagrama 25
Lineamientos generales para la planificación estratégica de política pública



Fuente: Elaboración propia.

C. Lineamientos para la implementación de la economía circular en la minería peruana

- El enfoque de la adopción de la EC en la minería peruana debe promover cambios en la cadena de generación de valor y potenciar la I+D+i+e para superar los paradigmas vigentes en la minería.
- La formulación de políticas públicas para el tránsito de la minería peruana hacia la EC debe estar articulada en la consecución de los ODS de la Agenda 2030.
- Las políticas en torno a la circularidad en la minería peruana deben considerar enfoques globales, y abordar las dificultades en la valorización y/o inertización de los residuos mineros; es decir, de lo simple a lo complejo, “nuevas soluciones a viejos problemas”. De este modo, la política debe ser adaptable para una implementación progresiva.
- La formulación de políticas debe centrarse en asegurar que en el desarrollo de nuevos proyectos mineros no se invierta en tecnologías a punto de ser desfasadas, sino más bien en la generación de tecnologías eficientes que permitan el diseño de procesos de minado y beneficio capaces de generar residuos mineros (relaves y/o desmontes) fáciles de ser integrados a nuevas cadenas productivas.
- La formulación de políticas públicas debe prestar atención a los ciclos de inversión en los sectores de industria (cemento) y construcción para incorporar los residuos mineros en estas cadenas productivas. Por lo tanto, es importante el impulso de la investigación en este campo. El desarrollo de nuevos proyectos mineros de gran envergadura, extensión de vida útil o ampliación de mina necesitará cantidades relevantes de hormigón. En este sentido, es una oportunidad de I+D+i+e para potenciar relaves-hormigones, desmontes-agregados pétreos u otros.

- Las políticas públicas deben promover la adopción de la circularidad en la minería mediante la reingeniería de incentivos económicos *ad hoc*, penalizando las prácticas productivas lineales (extraer, producir, consumir y desechar) e incentivando los procesos de producción circular (valorización de los residuos mineros, maximización de la vida útil de los bienes e insumos, y uso de energías renovables).
- La política pública debe estimar mecanismos de comunicación e impulso para persuadir a la sociedad en la aceptación de productos elaborados a partir de residuos mineros.

A continuación, se presenta una propuesta de hoja de ruta preliminar dirigida a la implementación de políticas públicas para el tránsito de la minería peruana hacia la circularidad. Se considera como base el involucramiento de las partes interesadas desde el inicio de la planificación, la cual se sustenta en la información revisada en el presente documento.

Cuadro 8
Hoja de ruta para la ejecución de políticas de la EC en la minería

Estrategia de implementación	Periodo de ejecución		
	Corto plazo	Mediano plazo	Lago plazo
	(< 2 años)	(2 – 4 años)	(> 5 años)
Interrelación entre las partes interesadas mediante ecosistema colaborativo: Estado, sector minero, academia, hubs de innovación minera, clústeres mineros, centros de investigación, proinnovate Perú, Concytec, ONG y cooperación técnica internacional			
Diagnóstico situacional de las problemáticas y oportunidades asociadas a los residuos mineros, incluyendo el contexto político, normativo, tecnológico, programas de investigación nacional			
Definición de objetivos para la implementación de economía circular en minería			
Establecimiento de principios rectores para incluir la economía circular en la concepción de nuevos proyectos mineros y operaciones en curso			
Lanzamiento de fondos concursables para la innovación abierta, respecto a la valorización y/o inertización de los residuos mineros			
Fortalecer el marco normativo de la economía circular en la minería en las leyes y reglamentos			
Crear un sistema de incentivos y penalidades para promover la economía circular entre las partes interesadas			
Implementación de pilotos y prototipos de valorización y/o inertización de residuos mineros			

Fuente: Elaboración propia.

VI. Conclusiones y recomendaciones

- La EC es un modelo de desarrollo que opera a todo nivel e integra el crecimiento económico con la sostenibilidad ambiental y social, cuyo funcionamiento es regenerativo y restaurador en un sistema cerrado. Es decir, busca el desarrollo del sistema económico (mercado de bienes y servicios), reduciendo la presión que este produce en el entorno natural a causa de las demandas crecientes de materias primas vírgenes, la generación de residuos y consumo de energía. Para el funcionamiento de la EC, es fundamental el diseño y la fabricación de productos que maximicen su vida útil, y que se integren sus residuos posconsumo y/o posproducción como recursos para el desarrollo de nuevos productos.
- Orientar la economía de los países andinos en la dirección de la EC requerirá un conjunto deliberado de medidas políticas que combinen regulación e incentivos económicos que sean convenientes para propiciar el tránsito hacia este modelo. Asimismo, demandará importantes inversiones en investigación, infraestructura, construcción y fabricación de nuevos productos que atenúen los desafíos de reducir el consumo de energía, la generación de residuos y el consumo de materias primas.
- El cambio sistémico hacia una EC en los países de la región andina, y en especial en Perú, tiene el potencial de contribuir de manera significativa en la resolución de los conflictos relacionados con los recursos naturales (agua y minerales). Asimismo, las prácticas de la EC ofrecen una oportunidad para lograr la consecución de los ODS, en específico con las metas del ODS 6 (agua limpia y saneamiento), ODS 7 (energía asequible y limpia), ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico), ODS 12 (consumo y producciones responsables), ODS 13 (acción por el clima) y ODS 15 (vida en tierra).
- La transición a las energías limpias y la electromovilidad tendrá una intensa demanda de minerales, por lo que la competitividad y sostenibilidad del sector minero en los países andinos, y específicamente en Perú, debe internalizar los impactos socioambientales. Su finalidad es garantizar que el refugio de la riqueza natural que representa los minerales se pueda convertir en capital perdurable. Resaltando, de manera particular, lo suscrito por Allwood (2013), Sillanpää y Ncibi (2019), y el Banco Mundial (2019), quienes refieren que, a pesar de los grandes avances en el reciclaje de metales, la minería secundaria y urbana no suplirá la actividad minera primaria.

- De la revisión de casos de la EC en la minería, se concluye que el tránsito de las operaciones mineras hacia la circularidad a nivel mundial y en los países andinos se encuentra limitado por la disponibilidad tecnológica para valorizar los residuos mineros. No obstante, el reaprovechamiento de relaves (minería secundaria) es la que más avances a escala industrial ha conseguido. Asimismo, lograr “operaciones mineras circulares” dependerá del grado de inversión que disponen los países y los operadores mineros para desplegar I+D+i.
- Transitar a una EC se vuelve más efectivo en entornos colaborativos, con el uso de innovación abierta y plataformas digitales. En el caso de la minería, estos entornos no solo deben quedarse en un país, sino también integrarse a una cooperación macro subregional (América del Sur), considerando que Chile y Perú tienen una alta participación en la producción de cobre de mina a nivel mundial.
- Al cierre del presente estudio, la adopción de la EC en la minería peruana no forma parte prioritaria de las políticas públicas y los planes estratégicos sectoriales. A pesar de ello, se identificaron iniciativas de parte del Estado como el programa Proinnóvate Perú y del gremio minero (hubs de innovación y clúster minero) que promueven la innovación abierta para solucionar desafíos en torno a los residuos mineros, y de manera resaltante lo desarrollado por el centro de investigación de la UNSA —como ente académico— al priorizar la investigación en minería. Transitar de la minería peruana hacia la circularidad demandará formular un marco legal complementario, el cual promueva e incentive las prácticas circulares. Esto se debe a que el marco legal en la actualidad representaría una barrera para el fomento de la circularidad.
- La incorporación del ACV en la gestión ambiental de la producción minera permitirá el desarrollo de estrategias para utilizar de manera eficiente los recursos, además de implementar una gestión proactiva y preventiva de los residuos mineros. Los resultados de flujo de materiales muestran que el concepto de EC se puede aplicar de manera práctica a una operación minera, cuyo fin es reducir la carga ambiental y generar valor a partir de los residuos mineros. En este contexto, se recomienda construir y mantener una base de datos de la cantidad de relave que se genera, y los flujos de materiales e insumos requeridos en la minería, en aras de identificar la trazabilidad de los materiales. De igual manera, se sugiere sopesar cuantitativamente toda iniciativa de políticas públicas en relación con la EC, responsabilidad extendida y/o competitividad minera.
- La aplicación de REP en la minería peruana debe tomar en cuenta un enfoque de aplicación progresiva, con responsabilidad compartida entre los consumidores (operadores mineros y procesadores de minerales) y los proveedores (productores, importadores y/o comercializadores). Así, estos últimos son los responsables de la gestión final de la vida útil de los bienes de capital e insumos. El rol del Estado es determinante para establecer acciones administrativas, económicas e informáticas en un marco normativo que defina claramente los roles de los actores (productores y consumidores). La implementación progresiva de la REP en la minería peruana debe estar acorde al avance tecnológico y, dada la trascendencia comercial de los principales productores de bienes de capital e insumos químicos que proveen a la minería, las iniciativas de la REP que se pretendan implementar deben mostrar una visión regional y global.
- La implementación de políticas públicas, en referencia a la circularidad de las operaciones mineras, requerirá la interrelación en un ecosistema colaborativo entre todas las partes interesadas. Este deberá ser liderado por el Estado mediante el Minem y el Minam, con el respaldo del MEF. El enfoque de las políticas circulares tiene que orientarse a promover cambios en la cadena de valor de la minería, abordando la valorización y/o inertización de los residuos mineros como ejes estratégicos para la I+D+i+e. Ello sin dejar de lado la articulación de la minería con los sectores de industria y construcción para incorporar los residuos mineros en su cadena productiva.

- La minería en el Perú representa una de las actividades principales que sopesan el desarrollo económico del país, por lo que la adopción de los principios de circularidad debe ser priorizada en el planeamiento estratégico del Estado. Esto con el propósito de fomentar el consumo y producción responsable en el sector minero, redireccionar los modelos de producción lineal de las operaciones mineras hacia la circularidad, y valorizar los residuos con tecnología validada.
- Los principios rectores de las políticas públicas para la circularidad de las operaciones mineras deben asegurar que, desde la concepción hasta el cierre de nuevos proyectos mineros, se adoptará un diseño de productos y residuos circulares (concentrados, cátodos, doré, pellets, relaves, desmontes). Asimismo, se utilizarán tecnologías eficientes y se incentivará la adecuación de las operaciones en curso a nuevos patrones de producción. Los cambios hacia la circularidad se deben promocionar mediante el establecimiento de incentivos para los procesos de producción circular y penalización de las prácticas productivas lineales. Finalmente, las políticas públicas deben estar articuladas con la Agenda 2030.

Bibliografía

- Alfonso, P., Tomasa, O., Domenech, L. M., Garcia-Valles, M., Martinez, S., & Roca, N. (2020), The use of tailings to make glass as an alternative for sustainable environmental remediation: The case of Osor, Catalonia, Spain. *Minerals*, 10(9), 1–14. <https://doi.org/10.3390/min10090819>.
- Allwood, J. M. (2014), Squaring the Circular Economy: The Role of Recycling within a Hierarchy of Material Management Strategies. In *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00030-1>.
- Aranda-Usón, A., Portillo-Tarragona, P., Marín-Vinuesa, L. M., & Scarpellini, S. (2019), Financial resources for the circular economy: A perspective from businesses. *Sustainability (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/su11030888>.
- B. Jones, F. A. y V. R. (2021), Cambios en la demanda de minerales. *Repositorio*, 1–15.
- Banco Central de Reserva del Perú. (2021), MEMORIA 2020. *Society*, 6, 3654–3654.
- Bar-Cohen, Y. (2006), Biomimetics - Using nature to inspire human innovation. *Bioinspiration and Biomimetics*, 1(1). <https://doi.org/10.1088/1748-3182/1/1/P01>.
- Bartels, R., Drewell, Q., & Morrison, H. (2019), *Mining New Value from the Circular Economy*. https://www.accenture.com/_acnmedia/pdf-%0A98/accenture-circular-economy-in-mining.pdf.
- Baumann, H., Lindahl, M., Scandelius, C., Schmidt, K., & Sonnemann, G. (2018), Preface: Recognizing management in LCM. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(7), 1351–1356. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1368-x>.
- Berger, M., Sonderegger, T., Alvarenga, R., Bach, V., Cimprich, A., Dewulf, J., Frischknecht, R., Guinée, J., Helbig, C., Huppertz, T., Jolliet, O., Motoshita, M., Northey, S., Peña, C. A., Rugani, B., Sahnoune, A., Schrijvers, D., Schulze, R., Sonnemann, G., ... Young, S. B. (2020), Mineral resources in life cycle impact assessment: part II – recommendations on application-dependent use of existing methods and on future method development needs. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(4), 798–813. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01737-5>.
- Beylot, A., Ardente, F., Sala, S., & Zampori, L. (2021), Mineral resource dissipation in life cycle inventories. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(3), 497–510. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01875-4>.
- Bilitewski, B. (2012), The Circular Economy and its Risks. *Waste Management*, 32(1), 1–2. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2011.10.004>.
- Blomsma, F., & Brennan, G. (2017), The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. In *Journal of Industrial Ecology* (Vol. 21, Issue 3, pp. 603–614). <https://doi.org/10.1111/jiec.12603>.

- Bocken, N. M. P., Olivetti, E. A., Cullen, J. M., Potting, J., & Lifset, R. (2017), Taking the Circularity to the Next Level: A Special Issue on the Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 476–482. <https://doi.org/10.1111/jiec.12606>.
- Cecere, G., & Mazzanti, M. (2017). Green jobs and eco-innovations in European SMEs. *Resource and Energy Economics*, 49, 86–98. <https://doi.org/10.1016/J.RESENEECO.2017.03.003>.
- Centro de Innovación y Economía Circular, C. (2019). *Acelerando la transición hacia una Economía Circular en América Latina*. <http://ciecircular.com/>.
- CEPAL. (2020), *Balance Preliminar de las Economías de América Latina y el Caribe*. Cepal, 102.
- Charonis, G.-K. (2010), *Degrowth, steady state economics and the circular economy: three distinct yet increasingly converging alternative discourses to economic growth for achieving environmental sustainability and social equity*. 2005, 1–12. [https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Degrowth%2C steady state economics and the circular economy %3A three distinct yet increasingly converging alternative discourses to economic growth for achieving environmental sustainability and social equi](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Degrowth%2C%20steady%20state%20economics%20and%20the%20circular%20economy%3A%20three%20distinct%20yet%20increasingly%20converging%20alternative%20discourses%20to%20economic%20growth%20for%20achieving%20environmental%20sustainability%20and%20social%20equity.2005,1-12).
- CIEC, C. de I. y E. C., Martínez, L., Andree Henríquez Aravena, A., Freire Castello, N., & CIEC, C. de I. y E. C. (2019), *Economía circular y políticas públicas*. 76. [https://ciecircular.com/%0Ahttps://eafit.sharepoint.com/sites/Tesis267/Documentos compartidos/General/General/economia_circular_y_politicas_publicas.pdf?CT=1592859418975&OR=ItemsView](https://ciecircular.com/%0Ahttps://eafit.sharepoint.com/sites/Tesis267/Documentos%20compartidos/General/General/economia_circular_y_politicas_publicas.pdf?CT=1592859418975&OR=ItemsView).
- Club of Roma. (2016), *The Circular Economy and Benefits for Society. A Study Report at the Request of the Club of Rome with Support from the MAVA Foundation*, 1–59. <https://www.clubofrome.org/wp-content/uploads/2016/03/The-Circular-Economy-and-Benefits-for-Society.pdf>.
- Columbia Center on Sustainable Investment. (2016), Cartografía de la minería en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible : un atlas. *World Economic Forum*, 1–88. [http://www.undp.org/content/dam/undp/library/Sustainable Development/Extractives/Mapping_Mining_SDGs_An_Atlas_SP.pdf](http://www.undp.org/content/dam/undp/library/Sustainable%20Development/Extractives/Mapping_Mining_SDGs_An_Atlas_SP.pdf).
- Consorcio JRI – EcoMetales, M. de uso público. (2019), *Técnicas de perforación , muestreo y caracterización para la recuperación de elementos de valor desde relaves*.
- Dantas, T. E. T., de-Souza, E. D., Destro, I. R., Hammes, G., Rodriguez, C. M. T., & Soares, S. R. (2021), How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.005>.
- Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D. M., & Moran, C. J. (2014), Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, 84(1), 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079>.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013), *Towards the Economy*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>.
- Environmental Protection Agency. (1998), *SITE Technology Capsule. Geotech Development Corporation Cold Top Ex-Situ Vitrification Technology*.
- Erkman, S. (1997), Ecology : an historical view. *Journal of Cleaner Production*, 5(1), 1–10.
- Felix Preston. (2012), *A_global_redesign_-_shaping_the_circular_economy-with-cover-page-v2*. *Energy, Environment and Resource Governance*, 5–6. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32547802/A_global_redesign_-_shaping_the_circular_economy-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1632167725&Signature=A5XZicNg2Pmkl6seQcBePipoUlgCaKUpV6hkVmVMAd4zDpQJX6FG2KX-sGKmouy9jbyzslW4l15hv89ixvcvEJgQGkcv4Hly9NwCB8a3Z8.
- Fernandes, A. G. (2016), Closing the Loop. *Electronics & Wireless World*, 93(1622), 1222–1224.
- Fong-saldarriaga, J. G. J. (2017), *Plan de negocio para la distribución y comercialización de reactivos químicos en la industria minera del Perú*. 2016.
- Frosch, R. A. (1992), Industrial ecology: A philosophical introduction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 89(3), 800–803. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.3.800>.
- Galarza, E. (2010), *Economía de los Recursos Naturales* (pp. 1–264). <http://hdl.handle.net/11354/725>.
- Gedam, V. V., Raut, R. D., Lopes de Sousa Jabbour, A. B., & Agrawal, N. (2021), Moving the circular economy forward in the mining industry: Challenges to closed-loop in an emerging economy. *Resources Policy*, 74(August), 102279. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102279>.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017), The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.048>.

- Geng, Y., & Doberstein, B. (2008), Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving "leapfrog development." *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 15(3), 231–239. <https://doi.org/10.3843/SusDev.15.3.6>.
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016), A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.
- Gower, R., & Schröder, P. (2016), Virtuous circle: How the circular economy can create jobs and save lives in low and middle-income countries. *Tearfund*, August, 28.
- Green Alliance. (2013), *Resource resilient UK: A report from the Circular Economy Task Force*.
- Gregson, N., Crang, M., Fuller, S., & Holmes, H. (2015). Interrogating the circular economy: the moral economy of resource recovery in the EU. *Economy and Society*, 44(2), 218–243. <https://doi.org/10.1080/03085147.2015.1013353>.
- Grupo Visión Minería 2030. (2019), *Visión de la Minería en el Perú al 2030*. 1–5.
- Guin, J. (2001), Announcing a New LCA Guide Editorial : Announcing a New LCA Guide Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards. *International Journal*, 6(1992), 86899. <http://link.springer.com/10.1007/BF02978784>.
- Gupt, Y., & Sahay, S. (2015), Review of extended producer responsibility: A case study approach. *Waste Management and Research*, 33(7), 595–611. <https://doi.org/10.1177/0734242X15592275>.
- Gutiérrez, J. M. V. (2016), Retroalimentando la etapa de terminación: Análisis de casos de políticas públicas. *Estudios Políticos*, 38, 163–189. <https://doi.org/10.1016/j.espol.2016.06.007>.
- Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Heinz, M. (2015), How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European union and the world in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), 765–777. <https://doi.org/10.1111/jiec.12244>.
- Haupt, M., & Zschokke, M. (2017), How can LCA support the circular economy?—63rd discussion forum on life cycle assessment, Zurich, Switzerland, November 30, 2016. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(5), 832–837. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1267-1>.
- Henríquez-Aravena, A., Martínez-Cerna, L., & Venegas-Cifuentes, A. (2021), *Transitando hacia la economía circular: Oportunidades y pasos para América Latina Informe Final*. www.kas.de/energie-klima-lateinamerika.
- Herrera Almanza, A. M., & Corona, B. (2020), Using Social Life Cycle Assessment to analyze the contribution of products to the Sustainable Development Goals: a case study in the textile sector. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(9), 1833–1845. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01789-7>.
- Heshmati, A. (2015), A review of the circular economy and its implementation. *International Journal of Green Economics*, 11(3/4), 251. <https://doi.org/10.1504/ijge.2017.10010876>.
- Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T., Laing, T., & Drexhage, J. (2020), Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. *Climate Smart Mining Initiative - The World Bank Group*, 110 pp. <http://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf>.
- ICMM. (2016), *Mining and metals and the circular economy*. 24. <http://www.icmm.com>.
- INECC. (2016), *Metodologías de cálculo de empleos verdes, derivadas de las medidas no condicionadas de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (CND) en los sectores forestal y agrícola*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/199525/4_CGCV_2016_Empleos_Verdes_CDMEX.pdf.
- INEI. (2021a), *Exportaciones e Importaciones Agosto 2021*. 1–55. <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/03-informe-tecnico-evol-de-expor-e-impor-ene-2021.pdf>.
- _____. (2021b), *Exportaciones e Importaciones Setiembre 2021*. 1–55. <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/03-informe-tecnico-evol-de-expor-e-impor-ene-2021.pdf>.
- International Panel Resource. (2020), Global Resources Outlook 2019. In *Global Resources Outlook 2019*. <https://doi.org/10.18356/689a1a17-en>.
- ISO 14044:2006. (2006), *De Normas Técnicas Pu Unit- Iso 14044 : 2006*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>.
- Kapp, W. (1994), El carácter de sistema abierto de la economía y sus implicaciones. *De La Economía Ambiental a La Economía Ecológica*, 199–212. <https://www.fuhem.es/media/ecosocial/File/Actualidad/2011/Kapp.pdf>.

- Kinnunen, P. H. M., & Kaksonen, A. H. (2019), Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. *Journal of Cleaner Production*, 228, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171>.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017), Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127(September), 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- Läpple, F. (2007), *Abfall- und kreislaufwirtschaftlicher Transformationsprozess in Deutschland und in China: Analyse – Vergleich – Übertragbarkeit*. http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/volltexte/2009/9373/pdf/Dissertation_Fang_Laepfle_zur_Veroeffentlichung.pdf.
- Lèbre, É., Corder, G. D., & Golev, A. (2017), Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*, 107, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.12.004>.
- Lehmann, L. (2019), Economía circular, el cambio cultural: El modelo sostenible para la reactivación. In *Luis Lehmann. - 2a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Prosa y Poesía American Editores, 2020. 160 p.; 23 x 15 cm*. https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/2021-07/2021-07-16-inclusive-circular-economy-schroder-raes_o.pdf.
- Lindhqvist, T. (2000), *Extended Producer Responsibility in Cleaner Production - Policy Principle to Promote Environmental Improvements of Product Systems: Vol. Doctoral D. c:%5CDocuments and Settings%5CADrianaB%5CMy Documents%5CMy Documents%5CLibrary%5CEN-1%5CThomasLindhqvist.pdf*.
- Lottermoser, B. G. (2010), Mine Wastes (third edition): Characterization, treatment and environmental impacts. In *Mine Wastes (Third Edition): Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>.
- Ma, S. H., Wen, Z. G., Chen, J. N., & Wen, Z. C. (2014), Mode of circular economy in China's iron and steel industry: a case study in Wu'an city. *Journal of Cleaner Production*, 64, 505–512. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2013.10.008>.
- Macarthur, E., SUN, & Mckensey. (2015), Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe. *Ellen MacArthur Foundation*, 100.
- Martínez, J., Roca, J., & Sánchez, J. (1998), Módulo VIII. Economía ecológica, ecología política e inconmensurabilidad. In *Curso de economía ecológica*. https://drive.google.com/drive/u/o/folders/1Qlr0ie7Lxr3dDw5qy7Hza1y4Tkc_6L1J.
- McCarney, G. (2021), *Primary Materials in the Emerging Circular Economy: July*.
- McKerlie, K., Knight, N., & Thorpe, B. (2006), Advancing Extended Producer Responsibility in Canada. *Journal of Cleaner Production*, 14(6–7), 616–628. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.08.001>.
- Minan. (2021), *Política nacional del ambiente al 2030.pdf.pdf*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2037169/Política nacional del ambiente al 2030.pdf.pdf>.
- Ministerio de Energía y Minas. (2018), *Programación Tentativa Sectorial – Mitigación*. 316.
- Mirzaie, S., Thuring, M., & Allacker, K. (2020), End-of-life modelling of buildings to support more informed decisions towards achieving circular economy targets. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(11), 2122–2139. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01807-8>.
- Mohanty, M., Dhal, N. K., Patra, P., Das, B., & Reddy, P. S. R. (2010), Phytoremediation: A novel approach for utilization of iron-ore wastes. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 206, 29–47. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6260-7_2.
- Moreno-Mondéjar, L., Triguero, Á., & Cuerva, M. C. (2021), Exploring the association between circular economy strategies and green jobs in European companies. *Journal of Environmental Management*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113437>.
- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017), The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>.
- Naghedi, R., Alavi Moghaddam, M. R., & Piadeh, F. (2020), Creating functional group alternatives in integrated industrial wastewater recycling system: A case study of Toos Industrial Park (Iran). *Journal of Cleaner Production*, 257, 120464. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120464>.
- Ness, D. (2008), Sustainable urban infrastructure in China: Towards a Factor 10 improvement in resource productivity through integrated infrastructure systems. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 15(4), 288–301. <https://doi.org/10.3843/SusDev.15.4:2a>.

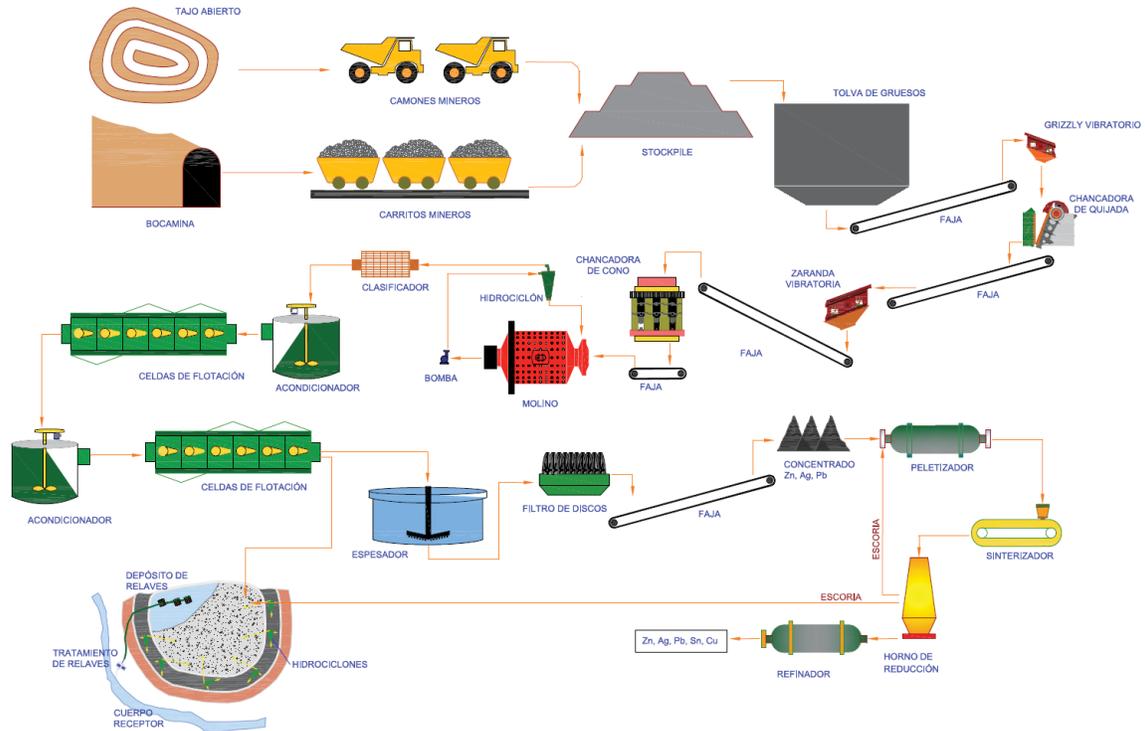
- OECD. (2018), RE-CIRCLE Resource Efficiency & Circular Economy Project. *Policy Highlights*, 16. <https://www.oecd.org/environment/waste/policy-highlights-international-trade-and-the-transition-to-a-circular-economy.pdf>.
- OECD, & Walls, M. (2006), EPR Policies and Product Design: Economic Theory and Selected Case Studies. *Prevention*, 33(2005), 1–40. [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?docLanguage=en&cote=env/epoc/wgwp\(2005\)9/final](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?docLanguage=en&cote=env/epoc/wgwp(2005)9/final).
- PAGE. (2021), *Conceptualización de empleos verdes en Perú*.
- Park, J., Sarkis, J., & Wu, Z. (2010), Creating integrated business and environmental value within the context of China's circular economy and ecological modernization. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1494–1501. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2010.06.001>.
- Pauliuk, S. (2018), Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001:2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations. *Resources, Conservation and Recycling*, 129(September 2017), 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.019>.
- Pearce, D., & Turner, R. (1989), *Economics of Natural Resources and the Environment* (Edición it). https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=ex8vaG6m4RMC&oi=fnd&pg=PR11&ots=IA5NYDSJgG&sig=qKoPw29uqvWStzAlF2PtF-G64cw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
- Prendeville, S., Sanders, C., Sherry, J., & Costa, F. (2014), *Circular Economy: Is it enough? May 2016*, 1–18. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1473.1128>.
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2018), Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 179, 605–615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>.
- Ramani, K., Ramanujan, D., Bernstein, W. Z., Zhao, F., Sutherland, J., Handwerker, C., Choi, J. K., Kim, H., & Thurston, D. (2010), Integrated sustainable life cycle design: A Review. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 132(9), 0910041–09100415. <https://doi.org/10.1115/1.4002308>.
- Rangel, R. (2014), *Biomimética de la naturaleza a la creación humana Redalyc Rocha Rangel, Enrique. October, 4–8*. https://www.researchgate.net/publication/49588261_Biomimetica_de_la_naturaleza_a_la_creacion_humana.
- Saavedra, Y. M. B., Iritani, D. R., Pavan, A. L. R., & Ometto, A. R. (2018), Theoretical contribution of industrial ecology to circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1514–1522. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.260>.
- Santero, N., & Hendry, J. (2016), Harmonization of LCA methodologies for the metal and mining industry. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(11), 1543–1553. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-1022-4>.
- Schröder, P., Albaladejo, M., Ribas, A., Macewen, M., & Tilkanen, J. (2020), *The circular economy in Latin America and the Caribbean Opportunities for building resilience*. 1–65.
- Schröder, P., & Raes, J. (2021), *Financing an inclusive circular economy De-risking investments. July*.
- Schroeder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2019), The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 77–95. <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>.
- Sillanpää, M., & Ncibi, C. (2019), Circular economy in action. In *The Circular Economy*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815267-6.00004-9>.
- Sonderegger, T., Berger, M., Alvarenga, R., Bach, V., Cimprich, A., Dewulf, J., Frischknecht, R., Guinée, J., Helbig, C., Huppertz, T., Jolliet, O., Motoshita, M., Northey, S., Rugani, B., Schrijvers, D., Schulze, R., Sonnemann, G., Valero, A., Weidema, B. P., & Young, S. B. (2020), Mineral resources in life cycle impact assessment—part I: a critical review of existing methods. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(4), 784–797. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01736-6>.
- Stahel, W. R. (2016), Circular Economy. *Sustainable Innovation Strategy*, 6–9. <https://doi.org/10.1057/9781137352613.0008>.
- Tayebi-Khorami, M., Edraki, M., Corder, G., & Golev, A. (2019), Re-thinking mining waste through an integrative. *Minerals*, 9(5)(2019), 286.
- Teah, H. Y., & Onuki, M. (2017), Support phosphorus recycling policy with social life cycle assessment: A case of Japan. *Sustainability (Switzerland)*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/su9071223>.
- Tukker, A. (2015), Product services for a resource-efficient and circular economy - A review. *Journal of Cleaner Production*, 97, 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.049>.
- United Nations Environmental Program (UNEP). (2006), *Circular Economy*. www.unep.org.

- United Nations Environmental Program (UNEP). (2011), *Note 12: Towards a Life Cycle Sustainability Assessment*. <https://doi.org/DTI/1412/PA>.
- Van Doorselaer, K. (2021), The role of ecodesign in the circular economy. *Circular Economy and Sustainability*, 189–205. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819817-9.00018-1>.
- Van Genderen, E., Wildnauer, M., Santero, N., & Sidi, N. (2016), A global life cycle assessment for primary zinc production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(11), 1580–1593. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1131-8>.
- Villachica, C., Clemente-Jul, C., Villachica, J., Villachica, L., & Llamosas, J. (2021), Circular Economy in Tailings Management. *Mine Water and the Environment*, 40(1), 23–35. <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00740-4>.
- Vivancos Bono, J. L., Collado Ruiz, D., Bastante Ceca, M. J., Gómez Navarro, T., & Capuz Rizo, S. (2005), *Análisis de Diversas Metodologías de Evaluación del Impactos del Ciclo de Vida*. 46022, 16.
- Wilts, H., Lah, O., & Galinski, L. (2018), *The evolution of industry 4.0 and its impact on the knowledge base for the circular economy*. *October*, 106–126.
- World Economic Forum. (2015), Mining & Metals in a Sustainable World 2050. *World Economic Forum*, September, 1–44. http://www3.weforum.org/docs/WEF_MM_Sustainable_World_2050_report_2015.pdf.
- Yildiz, T. (2019), Examining the Concept of Industry 4.0 Studies Using Text Mining and Scientific Mapping Method. *Procedia Computer Science*, 158, 498–507. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.081>.
- Zanforlin, G. da M., Fadel, A. L. C., Costa, W. S., & CEPAL. (2020), Economía Circular em Distritos Industriais de Minas Gerais (BR). *Ecovisões Projetuais: Pesquisas Em Design e Sustentabilidade No Brasil – Volume 2*, 63–72. <https://doi.org/10.5151/9786555500493-04>.
- Ziegler, S., Arias-Segura, J., Bosio, M., & Camacho, K. (2020), *Conectividad Rural en América Latina y el Caribe*. 1–120. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/12896/BVE20108887e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Zink, T., & Geyer, R. (2017), Circular Economy Rebound. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 593–602. <https://doi.org/10.1111/jiec.12545>.

Anexos

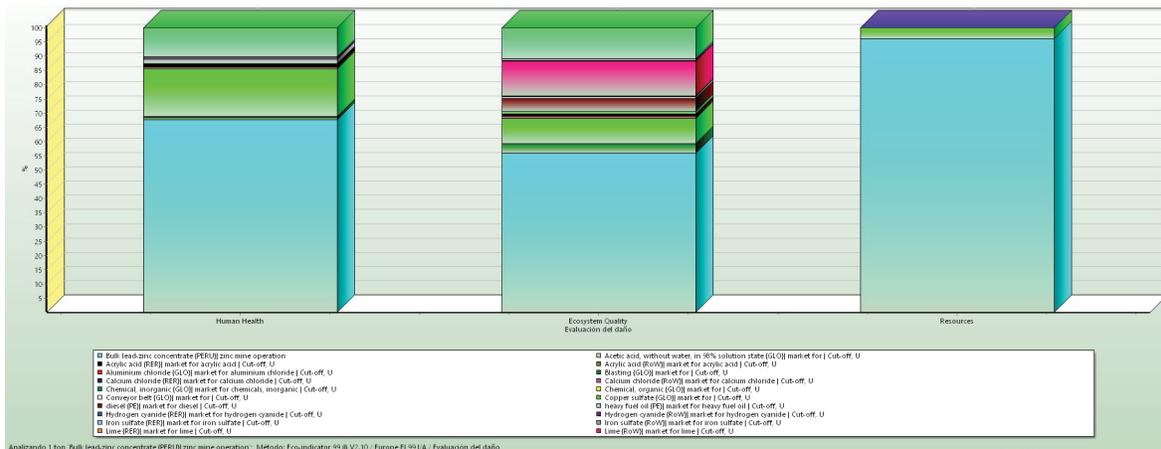
Anexo 1

Diagrama A1
Flujo típico de concentración de plomo-zinc



Fuente: Elaboración propia.

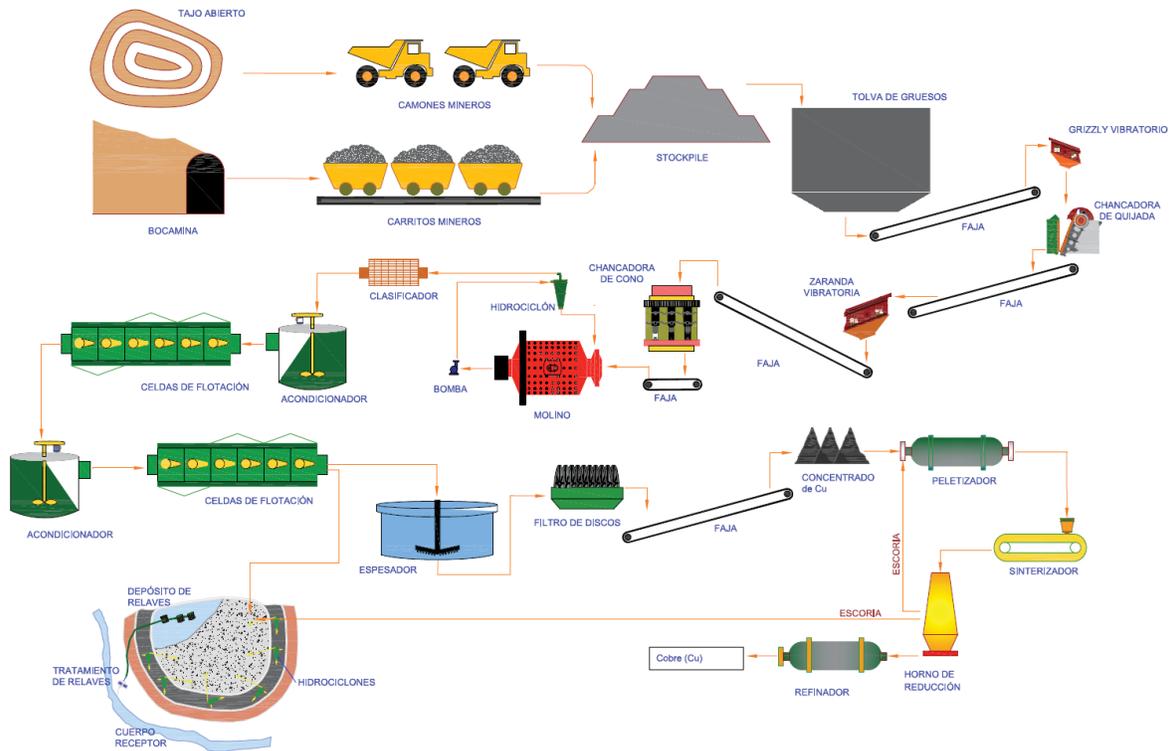
Imagen A1
Evaluación de los efectos de la producción de TMF de concentrado *Bulk* de plomo-zinc



Fuente: Imagen extraída de la evaluación realizada en el SimaProg.2, versión DEMO.

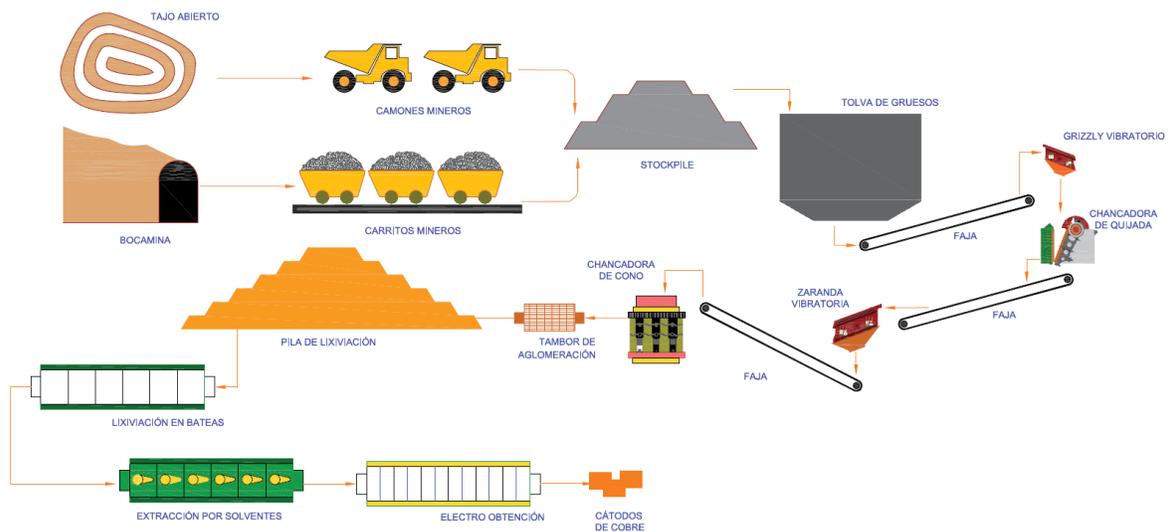
Anexo 3

Diagrama A3
Flujo típico de producción de cobre-flotación (sulfuros)



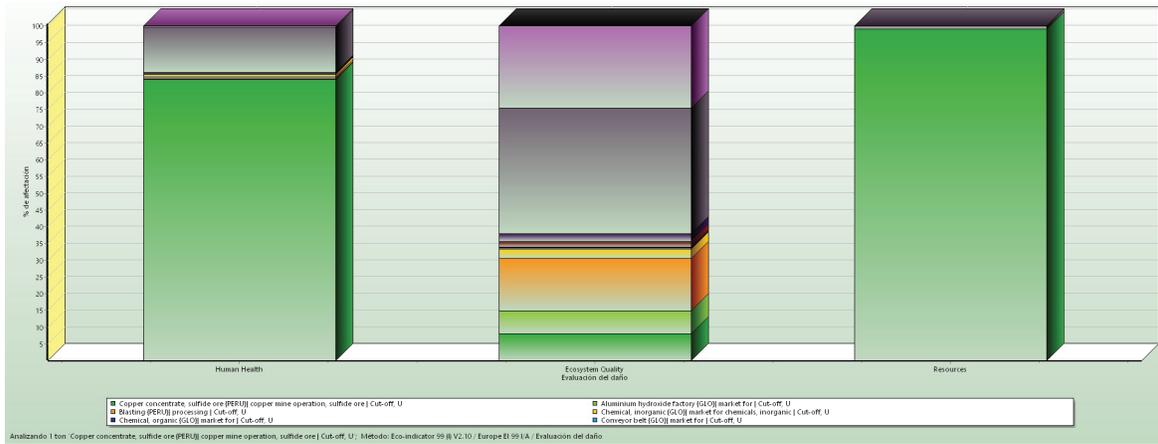
Fuente: Elaboración propia.

Diagrama A4
Flujo típico de producción de cobre-lixiviación (óxidos)



Fuente: Elaboración propia.

Imagen A3
Evaluación de los efectos de la producción de TMF de cobre



Fuente: Imagen extraída de la evaluación realizada en el SimaProg.2, versión DEMO.

Ante una economía lineal globalizada que se basa en “tomar, fabricar y desechar”, surge la tendencia de la economía circular, un modelo que opera en todos los niveles organizacionales, evita la contaminación, protege el medio ambiente, ofrece un camino hacia la sostenibilidad y funciona como un sistema cerrado, regenerativo y restaurador. Su objetivo es desarrollar el sistema económico y, a la vez, reducir la presión que este genera sobre el entorno natural. Las prácticas de la economía circular no son ajenas a las operaciones mineras, pues ofrecen oportunidades para minimizar y otorgar valor a los residuos, mejorar la eficiencia de dichas operaciones (extracción y beneficio) y recuperar los sitios mineros con fines productivos futuros. Para adoptar la economía circular en la minería peruana, es necesaria la interacción de múltiples actores en un ecosistema colaborativo, en que se aborden las dificultades para la valorización o inertización de los residuos mineros según la capacidad de la minería peruana y el ambiente geográfico y social en el cual se desarrollan las actividades. El tránsito hacia la economía circular ha de ser gradual; deben brindarse “nuevas soluciones a viejos problemas” y alinearse dichas soluciones a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.