

Las materias primas minerales en la transición energética y en la digitalización

El papel de la minería y la metalurgia



COORDINADORES
Eloy Álvarez Pelegrý
Francisco Blanco Álvarez

AUTORES
Elena Alonso Prieto
Eloy Álvarez Pelegrý
Francisco Blanco Álvarez
José Antonio Espí Rodríguez
Juan Herrera Herbert
Macarena Larrea Basterra
Carlos López Jimeno
Antonio Luis Marqués Sierra
Luis de la Torre Palacios

LAS MATERIAS PRIMAS MINERALES EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA Y EN LA DIGITALIZACIÓN EL PAPEL DE LA MINERÍA Y LA METALURGIA

Real Academia de Ingeniería de España - CODEIME

COORDINADORES

Eloy Álvarez Pelegry, Francisco Blanco Álvarez

AUTORES

Elena Alonso Prieto, Eloy Álvarez Pelegry, Francisco Blanco Álvarez, José Antonio Espí Rodríguez, Juan Herrera Herbert, Macarena Larrea Basterra, Carlos López Jimeno, Antonio Luis Marqués Sierra, Luis de la Torre Palacios



Real
Academia
de Ingeniería



CODEIME
Comisión de Estudios de Energía de Minería y Energía



Real
Academia
de Ingeniería



Las materias primas minerales en la transición energética y en la digitalización.

El papel de la minería y la metalurgia

Obra producida en el ámbito de la subvención concedida a la Real Academia de Ingeniería por el Ministerio de Ciencia e Innovación

EDITA:

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA DE ESPAÑA
www.raing.es

Primera edición: mayo de 2023.
Edición no venal.

COORDINADORES

Eloy Álvarez Pelegrý, Francisco Blanco Álvarez.

AUTORES

Elena Alonso Prieto, Eloy Álvarez Pelegrý, Francisco Blanco Álvarez, José Antonio Espí Rodríguez, Juan Herrera Herbert, Macarena Larrea Basterra, Carlos López Jimeno, Antonio Luis Marqués Sierra, Luis de la Torre Palacios.

Esta publicación ha sido presentada en la sede de la Real Academia de Ingeniería de España el día 23 de mayo de 2023.

Esta publicación ha sido revisada por los académicos César Dopazo García, José Ignacio Pérez Arriaga, José Manuel Sanjurjo Jul y Juan Zufiría Zatarain.

El contenido, los análisis y recomendaciones recogidos en este documento son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente de las instituciones a las que pertenecen.

El presente libro no es un informe de asesoría. Las decisiones de carácter teórico, económico y estratégico o comercial de las empresas son responsabilidad exclusiva de sus gestores.

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org), si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

© De los textos: sus autores.

© De las imágenes y gráficos: sus autores.

DEPÓSITO LEGAL: M-16459-2023

ISBN: 978-84-95662-88-0

Diseño y maquetación de la colección: mgráfico
Impreso en España por Imprenta DOCECALLES



Real
Academia
de Ingeniería

La Real Academia de Ingeniería de España

La Real Academia de Ingeniería, creada en 1994, tiene como fines promover la calidad y la competencia de la Ingeniería española y fomentar el estudio, la investigación, la discusión y la difusión de sus técnicas y de sus fundamentos científicos y sociales. Para cumplir estos objetivos, entre otras actividades, realiza estudios y emite informes y dictámenes. Su ámbito territorial es el Reino de España, sin perjuicio de la posibilidad de realizar actividades en el exterior o establecer relaciones de colaboración con entidades extranjeras de carácter análogo o complementario.



CODEIME
Conferencia de Directores/as de Escuelas de Minas y Energía

CODEIME

La Conferencia de Directores/as de Escuelas de Ingeniería de Minas y Energía (CODEIME) se constituye como una asociación de carácter privado y derecho público sin ánimo de lucro que tiene entre sus fines promover la constante mejora de la calidad de los estudios de ingeniería de minas y energía, impulsar la difusión del interés social de la ingeniería de minas y energía, fomentar la actividad investigadora en los diversos campos de dichas ingenierías y poner en valor ante la sociedad la actividad profesional de la ingeniería de minas y energía.



Presentación del Presidente de la Real Academia de Ingeniería

Transición energética y digitalización son dos realidades con fuerza creciente. Si bien su despliegue global es y será desigual según las regiones; en Europa la penetración de renovables y la electrificación, con el objetivo de lograr la neutralidad climática a mediados de este siglo, marcan una pauta clara de intensificación de la transición energética en el contexto de una sociedad y una economía más digitalizada en todos los aspectos.

Por otra parte, los riesgos en las cadenas de suministro de materias primas, productos intermedios y equipos hacen que los principios y los instrumentos para la implementación de la soberanía energética, estén cada vez más presentes en el debate comunitario e incluso a nivel mundial.

En este contexto, el libro que el lector tiene en sus manos examina las implicaciones de la doble transición (energética y digitalización) sobre la demanda de minerales y metales y llega a la conclusión de que serán necesarios más minerales y metales; y que la demanda de estos se incrementará sustancialmente.

Con un enfoque que podemos considerar novedoso, el estudio aborda la cadena de suministro desde sus orígenes, es decir desde la investigación minera, para analizar la minería con sus técnicas de ingeniería, así como la concentración de menas para llegar a la metalurgia. Procesos que permiten extraer los metales, que son la base de la fabricación de los componentes y equipos necesarios para abordar los retos.

Los autores tienen presente los principios y las necesidades de avanzar hacia una economía más circular y, en ese marco, analizan la cadena de suministro, profundizando en los aspectos económicos e industriales de la misma. Un capítulo está dedicado a España, de tal manera que la realidad y las posibilidades de nuestro país quedan reflejadas en el mismo.

No menos importante es el capítulo inicial de mensajes clave y recomendaciones, en el que los autores sintetizan los puntos más relevantes de su trabajo y proponen una serie de medidas y actuaciones.

La Real Academia de Ingeniería (RAI) tiene como fin promover la calidad y la competencia de la ingeniería española, así como fomentar el estudio, la investigación, la discusión y la difusión de las técnicas y de sus fundamentos científicos y sociales. Para cumplir esos fines, entre otras actividades, la Academia publica libros para potenciar el debate técnico multidisciplinar entre la academia y la sociedad.

Esta publicación ve la luz poco después de que la Comisión Europea haya publicado la propuesta de Reglamento para establecer un marco que permita asegurar un suministro de materias críticas fiables y sostenibles; y que, en agosto del pasado año, el Gobierno de España haya aprobado la hoja de ruta para la gestión sostenible de materias primas minerales. Por ello este trabajo puede suponer una aportación significativa, para que los desarrollos que tengan lugar en estos campos tengan referencias con una base ingenieril y técnica; de tal suerte que ayude a los agentes que tienen que proponer políticas o tomar decisiones.

Por otra parte, este libro es el resultado del acuerdo marco de colaboración entre nuestra academia y la Conferencia de Directores/as de Escuelas de Ingeniería de Minas y Energía (CODEIME) y nos sentimos muy satisfechos de que el acuerdo haya dado como resultado el excelente trabajo que tengo el honor de presentar.

Estamos convencidos que el mismo contribuirá a la promoción y difusión de la ingeniería, particularmente la relacionada con la minería y la metalurgia, en nuestra sociedad; y por tanto sirviendo a los fines de nuestra Academia, mostrando el papel que la ingeniería sigue teniendo en la sociedad actual.

La calidad es un elemento clave para las publicaciones de la RAI, motivo por el cual pasan por un proceso de revisión. En este caso han sido varios los académicos que han participado en el mismo. Por ello quiero agradecer a los evaluadores de la RAI y por supuesto, a los autores-profesores e investigadores universitarios, bien conocidos en sus ámbitos de actuación-, al igual que a los revisores, de otras instancias, que han participado en este trabajo.

Antonio Colino Martínez
Presidente de la Real Academia de Ingeniería de España



Presentación del Presidente CODEIME

La ingeniería de Minas, rama de la tecnología dedicada a asegurar el suministro de las materias primas minerales energéticas y no energéticas que necesita nuestra sociedad para su desarrollo humano y económico, tiene en España ya más de 245 años de historia desde su creación en 1777. Durante ese ya largo periodo de tiempo, los profesionales de esta especialidad han sido, y siguen siendo en nuestro país los principales responsables de la prospección e inventario de los yacimientos minerales, de su explotación responsable, del procesado y transformación de las rocas y minerales extraídos en materias primas para la industria, la construcción, la producción de energía, etc., y, finalmente, del cierre y la restauración ambiental de las explotaciones e industrias mineras.

En la incierta coyuntura nacional e internacional actual, definida por los crecientes retos científicos y tecnológicos asociados a la deseada sostenibilidad energética y, también, por crecientes dificultades para asegurar el suministro internacional de las materias primas necesarias para mediante tecnologías limpias poder desarrollar la transición energética, la ingeniería de Minas se hace imprescindible para asegurar la cadena de suministro que necesita el desarrollo económico sostenible de nuestro país.

Con esta publicación se pretende poner al alcance de la comunidad técnica y científica, así como del público en general, el estado actual de los principales métodos y técnicas con los que cuenta esta rama de la ingeniería para lograr superar los retos antes citados. Está escrita por un elenco de profesionales, muchos de ellos profesores universitarios, reconocidos en la materia, que han sido elegidos, además, por su amplia experiencia en la escritura de textos técnicos o docentes sobre las distintas áreas de su especialidad. En ella se describe de una manera clara, pero a la vez rigurosa y exhaustivamente documentada, cada una de las tecnologías aplicables en las diferentes fases de la cadena de actividades que van desde la prospección e investigación minera hasta la entrega de las materias primas a la industria finalista, y todo ello dentro de un marco de la máxima sostenibilidad desde un punto de vista económico y medioambiental.

Evidentemente, a la velocidad a la que están evolucionando la ciencia y la tecnología, es seguro que en pocos años muchas de las técnicas aquí descritas estarán obsoletas, por lo que se tendrá necesariamente que actualizar lo aquí descrito, pero sin embargo también estoy seguro de que su vigencia desde el punto de vista documental seguirá siendo muy alta y se mantendrá su utilidad como obra de referencia de nuestros tiempos.

Tengo que agradecer a los autores el excelente trabajo que han realizado junto con el equipo revisor de la RAI, lo que ha provocado que el nivel científico-técnico alcanzado en esta publicación sea el más actual, detallado y completo posible. Creo que se ha logrado mostrar el papel fundamental de las diferentes ramas de la industria minera (prospección, explotación / rehabilitación, mineralurgia y metalurgia) en la cadena de valor de las materias primas minerales; analizándose, además, las oportunidades de futuro que pueden aportar en el contexto de la descarbonización, la sostenibilidad y la economía circular, y, todo ello, tanto a escala internacional como en nuestro país. Además, se tratan y discuten las actuales iniciativas en digitalización e innovación en las citadas ramas de la minería. Por ello estoy seguro resultara de utilidad en muchas situaciones, desde servir de texto de iniciación a la materia, a servir de referencia u orientación a otros documentos científicos o técnicos más detallados, pero, quizás, complejos.

Quiero finalmente agradecer de manera explícita a la RAI y a su equipo editor el apoyo y el impulso continuado ejercido durante el largo periodo de creación de la obra; la constante búsqueda de la excelencia, en el contenido y en la forma, ha servido como motivador acicate a los autores, lo que, sin duda, ha beneficiado muy considerablemente la calidad y profundidad alcanzada en esta publicación.

¡Enhorabuena y muchas gracias a todos!

Francisco Javier Elorza Tenreiro

Presidente de la Conferencia de Directores/as
de Escuelas de Ingeniería de Minas y Energía (CODEIME)



Agradecimientos

Los coordinadores y autores estamos muy agradecidos con la labor de los revisores, quienes han trasladado numerosos comentarios y que, a buen seguro, proporcionan mayor calidad y rigor al trabajo. Si bien como es habitual los errores, que puedan subsistir, son únicamente atribuibles a los autores. Los análisis y comentarios reflejan exclusivamente su opinión y no necesariamente las de las instituciones a las que pertenecen o de aquellas en cuyo marco de colaboración se ha desarrollado este trabajo.

Nuestro agradecimiento va dirigido en especial a Mónica Barrero Bouza, Manuel Bravo López, Juan José del Campo Gorostidi, Vicente Gutiérrez Peinador, Alberto Lavandeira Adán, Juan Luis López

Cardenete, Emilio López Jimeno, Juan José López Muñoz, Pedro Antonio Merino García, Fernando Pedrazuela González y José Luis Tejera Oliver, y a los Académicos de la RAI que han ejercido de revisores, por su dedicación, por leer, revisar y comentar todo o parte del trabajo; así como por sus valiosos comentarios y sugerencias.

Teniendo en cuenta el método de trabajo, las labores de coordinación y revisión del texto, de incorporación de comentarios y las propias de edición supusieron un trabajo notable. En esta labor los coordinadores hemos contado con la valiosa y eficaz ayuda de una de las autoras, Macarena Larrea Basterra, a la que queremos manifestar nuestro expreso reconocimiento.



Prólogo

A finales del año 2020 se formalizó un acuerdo marco de colaboración entre la Real Academia de Ingeniería (RAI) y la Conferencia de Directores/as de Escuelas de Ingeniería de Minas y Energía (CODEIME) cuyo ámbito territorial es España. En el contexto de dicho acuerdo se constituyó una comisión de seguimiento formada actualmente por los académicos Ignacio Romagosa Clariana, José Manuel Sanjurjo Jul y Eloy Álvarez Pelegry, en representación de la RAI, y por Francisco Javier Elorza Tenreiro, Elena Alonso Prieto y Javier Mulas Pérez, en representación de CODEIME.

Dicha comisión consideró y acordó que se llevase a cabo un proyecto concreto. Valorados diferentes temas y posibles enfoques, y teniendo en cuenta la relevancia de la transición energética y la digitalización como realidades ingenieriles y sociales y la relación de aquellas con la minería y la metalurgia, se decidió llevar a cabo un estudio de investigación sobre este tema.

En cuanto al método de trabajo se acordó constituir un grupo de autores/as formado por personal docente e investigador de las escuelas con interés en la materia, contando también con las aportaciones de otras personas expertas en los temas a tratar. Igualmente, se decidió que hubiese dos personas coordinadoras del estudio, una por parte de CODEIME y otra por parte de la RAI, asignándoles a los que esto escriben tal función.

El resultado del trabajo es un informe para publicar en el que los autores, si bien han contribuido en mayor o menor medida a la elaboración de determinados capítulos, han participado en el estudio de forma conjunta. No se trata pues de un libro de capítulos con autorías aisladas. Este método ha requerido un esfuerzo y tiempo de coordinación e integración considerable, pero se prefirió por considerarlo más idóneo, coherente y enriquecedor.

Un elemento muy relevante es que este estudio ha estado sujeto a una revisión por terceros. Por una parte, por académicos de la RAI, cumpliendo así con los criterios de la Academia en las publicaciones que llevan su sello; y por otra por personas expertas y profesionales relacionados con el contenido que se trata en el estudio: transición energética, digitalización, minería, metalurgia, economía circular, sostenibilidad y economía.

Los coordinadores y autores estamos muy agradecidos con la labor de los revisores, quienes han trasladado numerosos comentarios y que, a buen seguro, proporcionan mayor calidad y rigor al trabajo, si bien como es habitual los errores, que puedan subsistir, son únicamente atribuibles a los/las autores/as. Los análisis y comentarios reflejan exclusivamente su opinión y no necesariamente las de las instituciones a las que pertenecen o de aquellas en cuyo marco de colaboración se ha desarrollado este trabajo.

Nuestro agradecimiento va dirigido en especial a Mónica Barrero Bouza, Manuel Bravo López, Juan José del Campo Gorostidi, Vicente Gutiérrez Peinador, Alberto Lavandeira Adán, Juan Luis López Cardenete, Emilio López Jimeno, Juan José López Muñoz, Pedro Antonio Merino García, Fernando Pedrazuela González, José Luis Tejera Oliver, así como a los académicos de la RAI, que han revisado este libro, por su dedicación, por leer, revisar y comentar todo o parte del trabajo; por sus valiosos comentarios y sugerencias.

Teniendo en cuenta el método de trabajo, las labores de coordinación y revisión del texto, de incorporación de comentarios y las propias de edición supusieron un trabajo notable. En esta labor los coordinadores hemos contado con la valiosa y eficaz ayuda de una de las autoras, Macarena Larrea Basterra, a la que queremos manifestar nuestro expreso reconocimiento.

El trabajo aborda aspectos relativos al papel de la minería y la metalurgia en la transición energética y la digitalización; por lo que comienza por examinar y describir estos procesos, poniendo de relieve que se necesitan materias primas minerales y, en algunos casos, metales que en la actualidad no tienen una gran demanda pero que aumentará en los próximos años, a medida que se vaya desarrollando el nuevo modelo industrial hacia una economía descarbonizada y digitalizada. Dada la relación de la demanda con la utilización de materias primas secundarias se aborda el tema de la economía circular junto con la sostenibilidad incluyendo, en este caso, expresamente la minería.

En dos capítulos se presentan, por un lado, la minería y mineralurgia y por otro la metalurgia, con la intención de describir los procesos que permitan al lector adquirir un conocimiento básico de los métodos y técnicas que se utilizan. Estos capítulos se complementan con otro dedicado a la digitalización e innovación en ambos campos.

Otros dos temas que nos han parecido fundamentales han sido el de la cadena de valor (desde la investigación y exploración minera a la elaboración de metales para los componentes y equipos) y la situación de España. En el capítulo correspondiente a España, se indican las instalaciones mineras y metalúrgicas en operación y los proyectos existentes, así como los aspectos económicos de las actividades mineras y metalúrgicas que contribuyen a la creación de riqueza y al empleo de calidad del país.

Si bien se va haciendo referencia a cuestiones normativas relevantes, no se realiza un análisis sistemático y detallado de la regulación aplicable a las actividades que se examinan. No obstante, las referencias que se incluyen se considera que permiten apreciar el marco normativo general relevante para los temas que se tratan y, en algunos casos, se relaciona con detalle la normativa medioambiental aplicable.

Queremos indicar que, en el proceso de revisión de este trabajo, a finales de agosto de 2022, se aprobó por el Consejo de ministros la "Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales" en el marco de la cual se ha puesto en marcha la modificación de la Ley 22/1973 de minas.

Igualmente, en septiembre de 2022, la presidenta de la Comisión Europea anunció la iniciativa de una nueva propuesta legislativa para una Ley de materias primas críticas (Critical Raw Material Act). Entre sus objetivos se encuentra el de asegurar un suministro sostenible de materias primas críticas para apoyar las transiciones, verde y digital.

Entre los pilares de dicha iniciativa (en la actualidad en proceso de elaboración), se señala el de reforzar la cadena de valor de las materias primas críticas, desde la minería al reciclaje, en un contexto global, contribuyendo a una mayor resiliencia, agilidad y resistencia, de acuerdo con los estándares y valores europeos. Además, se plantea la necesidad de generar unas condiciones de competencia equitativas, sólidas y sostenibles, así como racionalizar y consolidar normas y esquemas de funcionamiento para ser también líderes en calidad.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, entendemos que el alcance y estructura de este trabajo aborda los temas que, tanto desde la óptica comunitaria como de nuestro país, son pertinentes; y esperamos que este estudio sirva como instrumento de pedagogía, así como para promover el debate y las propuestas para el suministro de materias primas minerales de forma sostenible, creando valor en España en las cadenas de suministro; para un mejor desarrollo de la transición energética y la digitalización.

Eloy Álvarez Pelegrí y Francisco Blanco Álvarez

Coordinadores

Febrero de 2023

MENSAJES CLAVE Y RECOMENDACIONES

El estudio “Las materias primas minerales en la transición energética y en la digitalización. El papel de la minería y la metalurgia” consta de introducción, siete capítulos y anexos que amplían la información de algunos capítulos. Tras las presentaciones, el prólogo y la introducción (capítulo primero), el capítulo segundo versa sobre el papel de las materias primas para la descarbonización y la digitalización, tendencias que están empujando la demanda de aquellas al alza. En el tercer capítulo, se realiza una descripción de los procesos tecnológicos en la minería y en el cuarto los de la metalurgia, para presentar, a continuación, las principales herramientas digitales que se están desplegando en ambos sectores en el capítulo quinto.

Teniendo en cuenta las estrategias comunitarias y nacionales, el contexto geopolítico y los crecientes riesgos de ruptura de las cadenas de suministro, el capítulo sexto aborda el tema de la circularidad como herramienta de apoyo para el suministro (la recuperación de las materias primas secundarias, el rol de la metalurgia en el reciclaje y la simbiosis industrial) enmarcada en el concepto de sostenibilidad desde el triple pilar (económico, social y medioambiental). En el capítulo séptimo se tratan los aspectos económicos e industriales de la minería y la metalurgia, describiendo primero las etapas de las cadenas de valor y haciendo, en el capítulo octavo, un análisis de la situación en España de ambas actividades. Lo anterior se completa con las referencias bibliográficas, cinco anexos, un glosario y un listado de acrónimos al final del estudio.

A continuación, se presentan las principales reflexiones fruto del trabajo realizado. Dichas reflexiones se organizan entorno a dos subsecciones a saber, **Mensajes Clave (M.C.)** y **Recomendaciones (R.)**.

MENSAJES CLAVE

M.C.1. La transición energética y la digitalización suponen una demanda creciente de materias primas minerales

La transición energética supone un fuerte desarrollo de las energías renovables, la electrificación de la economía y el despliegue de una importante flota de vehículos eléctricos y de almacenamiento en baterías eléctricas. Las primeras requieren, por potencia específica, mayores cantidades y una mayor variedad de minerales y metales que las instalaciones de generación con gas, carbón o nuclear. El almacenamiento de baterías también necesita una gran variedad de materiales y van a verse incrementos en su demanda.

En España, el Plan Nacional Integrado Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC) prevé para el año 2030 una potencia total instalada en el sector eléctrico de 161 GW de los que 50 GW serán energía eólica, lo que representa un aumento del 117 %; 39 GW de solar fotovoltaica, con un incremento del 722 %; 9,5 GW de bombeo, lo que supone un crecimiento del 179 %; 7 GW de solar termoeléctrica, es decir un aumento del 204 % y 6 GW de almacenamiento (entre bombeo y otras tecnologías de almacenamiento).

A nivel mundial, los estudios de la Agencia Internacional de la Energía y otras organizaciones internacionales concluyen que, para facilitar las transiciones energéticas y la digitalización, las materias primas minerales tienen y tendrán un papel clave, y que se incrementará la demanda de los minerales y metales, en un contexto en el que es necesario impulsar la economía circular.

Como consecuencia, si bien, por una parte, el fuerte desarrollo de renovables, redes eléctricas, baterías y vehículos eléctricos conlleva una mayor independencia energética al evitar o disminuir las importaciones de gas, carbón o productos petrolíferos, por otra, refuerza la necesidad de la extracción de minerales que, procesados, permiten obtener metales para los componentes y los equipos necesarios para la transición energética.

A modo de ejemplo, de acuerdo con datos de la Comisión de Europea de 2020, en 2030, la Unión Europea (UE) necesitaría para cubrir la demanda de baterías para los vehículos eléctricos y el almacenamiento de la energía, hasta 18 veces más litio y 5 veces más cobalto y, en 2050, una cantidad casi 60 veces mayor de litio y 15 veces mayor de cobalto que en la actualidad. La demanda de tierras raras utilizadas en imanes permanentes, por ejemplo, para vehículos eléctricos, tecnologías digitales o generadores eólicos, podría multiplicarse por 10 de aquí a 2050.

El desarrollo de tecnologías digitales, en particular, supone un incremento de la demanda de metales como del galio, germanio, indio, tierras raras (disprosio, praseodimio, neodimio), selenio, tántalo y telurio. Las pantallas electrónicas (incluidas las planas y táctiles) han impulsado el consumo de platino, indio y estaño. El almacenamiento de la datáfera mundial prevista para 2025 requeriría hasta 80.000 toneladas de neodimio (lo que sería del orden de unas 120 veces la demanda anual de este material en la UE), y el uso de tecnologías emergentes como la RAM ferroeléctrica (o memoria de acceso aleatorio ferroeléctrica) hasta 40.000 toneladas de platino (unas 600 veces la demanda anual actual de la UE).

M.C.2. La vulnerabilidad europea por la dependencia excesiva de terceros países no se ha solventado con el desarrollo de las iniciativas actuales

La UE lanzó el Plan de Acción en Materias Primas Críticas (en la actualidad se está desarrollando la Ley Europea de Materias Primas Críticas), encaminado, entre otros aspectos, a potenciar la minería autóctona y aumentar así la resiliencia y autonomía estratégica. Como resultado, se adoptaron medidas para mejorar la base de conocimiento de los yacimientos actuales y futuros de muchas materias primas y promover que la industria extractiva desarrolle productos destinados a cubrir nuevas necesidades.

Además, la UE ha definido unos principios para armonizar el conocimiento sobre la extracción de materias primas (desde la etapa inicial de investigación minera, hasta el período posterior al cierre de la mina) y las operaciones de transformación en la UE, así como redefinir la orientación hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Sin embargo, por el momento, el éxito de sus iniciativas ha sido modesto en lo que se refiere al desarrollo de proyectos de abastecimiento de materias primas fundamentales para la transición energética y la digitalización. Para avanzar en esto conviene contar con un sistema de información nacional, con la desagregación económico-industrial más relevante.

La producción de materias primas minerales en la UE no cubre las necesidades propias. De hecho, en la actualidad a nivel comunitario se depende, en gran medida, para el suministro de materias primas críticas, de países como China (tierras raras pesadas, 98 %; tierras raras ligeras, 99 %, magnesio, 93 %, etc.) y la República Democrática del Congo (cobalto, 68 %).

M.C.3. Es importante potenciar el uso de materias primas minerales secundarias, pero se necesitarán nuevas materias primas minerales

La propuesta de Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050 y la Estrategia Española de Economía Circular, España Circular 2030, establecen la reutilización y el reciclado como primera opción para suministrar los procesos productivos. Para ello es fundamental la fase de diseño de los componentes, equipos y productos para poder optimizar el aprovechamiento y gestión de residuos y el reciclaje.

En este marco, la reutilización y el reciclaje de materias primas primarias y las secundarias (MPS), en ocasiones denominada minería urbana, son clave. La tasa de recuperación de estas irá en aumento, en particular para ciertos metales cuyas tasas actuales son muy reducidas (por ejemplo, Nd, Pr y Dy). Como consecuencia, se incrementará el uso de las MPS. No obstante, para incrementar la utilización de MPS y que las prácticas mineras y metalúrgicas sean más circulares se requiere un esfuerzo continuado para que el progreso sea constante.

La transición energética y la digitalización implicarán tales incrementos de demanda, que serán necesarias también materias primas primarias y, por lo tanto, de la minería para la extracción de más minerales; y de la metalurgia para el procesado de estos.

En cada una de las etapas desde la investigación minera a la fabricación de equipos, se añade valor en el proceso, bien por el descubrimiento de recursos o reservas, bien por el valor de los minerales extraídos o de los metales que se producen. Además, en los procesos anteriores se desarrolla conocimiento, tecnología, ingeniería, así como industrias relacionadas.

M.C.4. Actividades mineras y metalúrgicas sostenibles y digitalizadas

La minería y la metalurgia se enfrentan a importantes retos y oportunidades para avanzar en materia de sostenibilidad. Esta descansa sobre un equilibrio de tres pilares: la sostenibilidad económica (desarrollo económico), la social (equidad social) y la ecológica (protección ambiental), donde la importancia de cada principio dependerá de la singularidad de la zona donde se quiera aplicar y siempre entendiendo la sostenibilidad como viabilidad a largo plazo de la actividad industrial y su medio social y ambiental.

La necesidad de acompañar la obtención de materias primas y metales con la seguridad, con la protección y la conservación de la naturaleza y con el desarrollo económico y social, ha llevado a una creciente reglamentación y a diferentes normativas. En este sentido, las autorizaciones medioambientales y administrativas y los procesos de rehabilitación minera y post minería llevan a enmarcar estas actividades en los conceptos de sostenibilidad y de contribución a los ODS a medio y largo plazo.

Se está avanzando en el desarrollo de la mina Inteligente con la utilización de tecnología informática, instrumentos de medida, sistemas de comunicación y de control remoto, en actividades de la cadena de valor, desde la localización del yacimiento hasta la clausura de la explotación.

Igualmente, el empleo de las herramientas digitales está penetrando en la actividad metalúrgica. Ello convierte a la minería y la metalurgia en actividades modernas, adaptadas al nuevo contexto de la digitalización, herramienta fundamental para avanzar y contribuir a su sostenibilidad. De hecho, el propio avance de la digitalización en la minería y la metalurgia está haciendo de estas, actividades más sostenibles desde el punto de vista social, económico y medioambiental.

M.C.5. Integración de la cadena de valor de la minería y la metalurgia

La cadena de valor de los recursos minerales, de la minería y la metalurgia, para la fabricación de bienes y componentes, se inicia con la investigación minera, que se define como el conjunto de técnicas (geológicas, geoquímicas y geofísicas) empleadas para identificar y evaluar aquellos lugares de la corteza terrestre donde la concentración de un elemento es superior a los valores medios.

En siguiente lugar se encuentra el proceso minero (arranque, carga y transporte). Es decir, una vez evaluado, técnica y económicamente el yacimiento y decidida la viabilidad de la inversión, contando con las autorizaciones administrativas y ambientales pertinentes, se extrae la roca o mineral mediante el método de explotación más adecuado (minería a cielo abierto y/o minería subterránea).

La siguiente etapa es el paso de la producción de la mina al concentrado, lo que se realiza mediante la mineralurgia de preparación y concentración de menas, un conjunto de técnicas de tratamiento orientadas a obtener productos con valor comercial y transformables por la metalurgia.

La siguiente etapa, para la obtención de los metales que interesen, es la metalurgia extractiva, que incluye los procesos y técnicas para extraer, desarrollar, dar forma y tratar metales y sus aleaciones a partir de los concentrados obtenidos en la planta mineralúrgica.

En paralelo se abren nuevas oportunidades, base para nuevas cadenas de valor y, tras la rehabilitación del espacio minero, se puede aprovechar el terreno para uso industrial o de infraestructuras energéticas, tratamiento de residuos, explotaciones agroganaderas, reservorios de agua dulce o proyectos de captura y almacenamiento de carbono.

M.C.6. Cambios estructurales y oportunidades industriales y tecnológicas

La transición energética y la digitalización no solo modifican la estructura energética y el modo de vida; también implican cambios en la estructura económica, en particular, con la creación e implantación de nuevas actividades ingenieriles, industriales y tecnológicas.

No hay que perder de vista que el estímulo de la demanda de materias primas minerales proviene de los usos finales. Esta nueva economía presenta grandes oportunidades en el ámbito industrial (manufactura y fabricación de equipos y componentes, metalurgia, mineralurgia y minería) y una mejora de la autonomía estratégica.

En este sentido, el desarrollo de clústeres o ecosistemas industriales que integran la actividad minera y la metalurgia en las cadenas de valor es un elemento clave para el desarrollo industrial, minero y metalúrgico, con la necesaria adecuación de la formación para los profesionales, el estímulo y orientación de la innovación, la ingeniería y la tecnología. Todo ello, con el fin de contribuir a una economía sostenible y a un empleo de calidad a largo plazo.

Ligado a las cadenas de valor, potenciando la circularidad e integrando actividades como el reciclaje o reproceso de residuos (minería urbana), en ocasiones, un adecuado diseño puede llevar a la creación de industrias, bajo la concepción de clústeres o de simbiosis industriales y una perspectiva más circular lleva a la creación de nuevas industrias y modelos de negocio.

M.C.7. España debe desarrollar su potencial y aprovechar las oportunidades

España cuenta con capacidades industriales, ingenieriles, tecnológicas y de conocimiento para desarrollar, en su territorio, cadenas de valor para la transición energética y la digitalización (i.e., fabricación de aerogeneradores, plantas fotovoltaicas, baterías, etc.).

En 2019, en España, cerca de 3.000 empresas trabajaban en los sectores de la minería y la metalurgia. La producción minera nacional supuso del orden de 3.000 millones de euros en

2020. En el año 2020, el empleo en el sector minero fue del orden de 30.000 empleos directos, si bien la mayoría lo fue en la extracción de rocas y minerales no metálicos. Desde el año 2005, se ha perdido aproximadamente la mitad del empleo que generaba, habiendo llegado a suponer el 0,75 % del empleo industrial

La metalurgia (incluyendo la siderurgia) tiene una gran importancia económica e industrial. Produce alrededor de 16 millones de toneladas de metales y aleaciones, factura unos 28.000 millones de euros y genera cerca de 32.000 empleos directos y 100.000 indirectos.

España tiene una gran tradición minera y metalúrgica. La aportación de metales producidos en España a la UE es muy relevante para asegurar el suministro que afecta tanto a proyectos de cobre, zinc y plomo (Faja Pirítica Ibérica) como a metales como el estaño, wolframio, tántalo y niobio. Tiene también producción y experiencia en metales preciosos como el oro y la plata.

España cuenta también con potencial en otros minerales y metales relacionados con la transición energética y la digitalización, habiéndose identificado en el territorio nacional trece minerales útiles para la descarbonización, existiendo indicios suficientes para considerar de máximo interés la exploración y producción de recursos de litio, cobalto-níquel, tierras raras, grafito y vanadio.

A pesar del potencial del país, en julio de 2022, había proyectos paralizados en España, debido, en gran medida, a que las diferentes normativas en diversas instancias hacen que su tramitación tenga una duración que difícilmente es asumible por los promotores. Su puesta en funcionamiento, cumpliendo con los requisitos marcados por la normativa vigente, supondría una reducción de la dependencia del exterior y contribuiría a reforzar la balanza comercial de España.

Asimismo, si se considera que la normativa medioambiental y laboral en España es más exigente que la existente en muchos de los países de donde se importan ciertas materias primas minerales para la transición energética y la digitalización; la extracción y procesado de estas en España conllevaría beneficios medioambientales y laborales en el contexto global.

RECOMENDACIONES

R.1. Desarrollo de la cadena de valor de la minería y la metalurgia y su integración en las cadenas de valor productivas

España debe potenciar el desarrollo y la integración de las cadenas de valor industriales de los equipos y componentes necesarios para la transición energética y la digitalización, mediante la inversión, entre otros, en ingeniería e innovación tecnológica.

Para ello, debe aprovechar las oportunidades en los diferentes eslabones de las cadenas de valor, desde la minería y la metalurgia a la fabricación de componentes y equipos y debería participar en todas las etapas de la cadena de valor, en particular cuando se cuenta con recursos minerales.

En este sentido, se debería conocer mejor el potencial de recursos de materias primas, actualizando el conocimiento de estos y promoviendo la investigación minera para obtener una valoración prospectiva actualizada de los recursos potenciales.

Por otra parte, donde haya indicios de recursos, se debería disponer de la mejor información posible sobre las características técnicas y económicas de los yacimientos autóctonos y conocer mejor así los recursos de que dispone el país, tanto de litio y tierras raras como de cobre, zinc, plomo, estaño o wolframio, entre otros.

En caso de no poder abordar toda la cadena de valor en el propio territorio, se requerirá de la cooperación internacional, especialmente en el ámbito europeo (con el fin de evitar posibles rupturas de suministro), así como de países económica y políticamente estables o afines.

Es necesario, incorporar en la cadena de valor el ecodiseño de los productos para la transición energética y la digitalización, y desarrollar el empleo de herramientas de economía circular como reutilizar, refabricar o reciclar. Una recuperación eficiente de recursos secundarios contribuirá a que la demanda de recursos primarios pueda modular su crecimiento y promover la simbiosis industrial, creando industrias relacionadas con la misma.

R.2. Potenciar el desarrollo de la ingeniería y la industria en el país y los clústeres ligados al territorio

En la cadena de valor es muy relevante destacar el papel de la ingeniería y la tecnología para el desarrollo de los recursos propios, tratando de incentivar la creación de empresas nacionales en ese tipo de actividades.

El desarrollo industrial asociado a la cadena de valor de la minería y metalurgia debe realizarse aprovechando el potencial existente y tratando de fomentar el desarrollo de clústeres relacionados con cadenas de valor productivas ligados al territorio, que sobrevivan a la actividad minera. Para ello es necesaria la involucración de todas las partes interesadas (Universidad, Administraciones, Gobierno, empresas, inversores y sociedad). Se trata de un reto, pero también de una oportunidad para España y sus Comunidades Autónomas en términos de desarrollo industrial y tecnológico, empleo de calidad y conocimiento.

En este sentido, se deberían examinar la posibilidades normativas de generar incentivos para los territorios promoviendo la creación, entre otros, de centros tecnológicos con objetivos a medio plazo.

R.3. Adecuar la formación y atraer el talento a los estudios de ingeniería y tecnología

Se recomienda la actualización de los contenidos y de los procesos de formación y educación para incorporar el conocimiento y las habilidades necesarias en las cadenas de valor desde la ingeniería, la minería y la metalurgia hasta la fabricación de equipos necesarios para la transición energética y la digitalización. Sería también necesario establecer herramientas y campañas

de comunicación que muestren a los jóvenes que la ingeniería, en general, y la gestión integral de las materias primas para la transición energética y la digitalización, en particular, son estudios con un futuro profesional durante las próximas décadas.

R.4. Promover políticas favorables para aprovechar las oportunidades y facilitar la aceptación social

Se requiere un compromiso de los agentes que promueven las políticas y/o toman decisiones para liderar los cambios; con el fin de que España no pierda las oportunidades que la transición energética y la digitalización abren en términos de reindustrialización y mejora de la resiliencia de la economía.

Este compromiso podría materializarse en la agilización de los procesos de autorización administrativa, siempre en cumplimiento de la legislación medioambiental y laboral existente (se estima que la entrada en funcionamiento de un proyecto minero puede rondar los siete/diez años). Para ello, un elemento que contribuiría a la misma sería reforzar la dotación de la Administración minera, es decir, adecuar el personal a las necesidades actuales y futuras y reforzar sus competencias y capacidades.

Un examen detallado de las barreras u obstáculos a la producción de materias primas minerales y metales podría ayudar a identificar propuestas concretas para facilitar el desarrollo y la aceptación social. En este sentido, conviene aclarar las competencias relacionadas con los diferentes niveles de la Administración pública, así como de las diferentes normas que pueden concurrir en una autorización. Lo anterior contribuiría a agilizar los procesos de autorización. De esta manera, se deben desarrollar los reglamentos para determinar procedimientos y unificar criterios.

Asimismo, resultaría imprescindible transmitir y concienciar a la sociedad de la necesidad de materias primas minerales (de hecho, Europa consume alrededor de un tercio de las materias primas producidas en el mundo), lo que probablemente requiera pedagogía y un cambio cultural, que haga más visibles la minería y la metalurgia, así como su contribución al desarrollo y bienestar de la sociedad. De esta manera, la necesaria licencia social para el desarrollo de proyectos estaría más imbricada en el territorio, logrando la implicación de los habitantes y el desarrollo económico y social. Igualmente, conviene integrar los proyectos mineros en la estrategia industrial y desarrollar incentivos para los territorios donde se lleva a cabo la actividad minera

Esto puede plantearse sobre la base de los diferentes informes técnicos de evaluación que deben desarrollarse fundamentalmente en la fase de evaluación de un yacimiento minero, pero que son en muchas ocasiones necesarios para actividades como la implantación de plantas metalúrgicas.

Parece necesario transmitir a la sociedad que el desarrollo de los procesos mineros y metalúrgicos son elementos consustanciales con la transición energética y la digitalización. Esto es especialmente relevante en las fases de investigación minera y desarrollo, que suelen ser las que mayor oposición generan.

Esta aceptación social y política debería alcanzarse preferiblemente mediante un pacto de Estado, teniendo en cuenta la base de una normativa, estable en el tiempo, y estándares

europas medioambientales, laborales y económicos, que no siempre se aplican fuera de la UE, de donde procede gran parte de las materias primas minerales que se consumen en territorio comunitario. La actual coyuntura económica, social, geoestratégica, etc. deberían impulsar el mencionado pacto de Estado.

R.5. Atraer inversiones solventes en el ámbito nacional y de entornos geopolíticos favorables y dar prioridad a la seguridad de abastecimiento con recursos propios

Siendo los procesos de transición energética y de digitalización una cuestión a nivel mundial, y teniendo en consideración la complejidad del actual contexto geopolítico, es necesario que el marco normativo y los procesos de autorización permitan atraer la financiación e inversiones solventes, en primer lugar, del ámbito nacional y de entornos geopolíticos favorables.

Una mayor visibilidad de las actividades de la minería y la metalurgia sostenibles en la cadena de valor junto con una mayor concienciación sobre sus características económicas (por ejemplo, largos períodos de retorno) facilitarían el interés y el acercamiento para la atracción de recursos económicos por parte de diferentes tipos de inversores y de modalidades de financiación.

La relevancia estratégica de la seguridad de abastecimiento y el desarrollo de materias primas autóctonas lleva a que las consideraciones geoestratégicas y de seguridad deberían tener un papel prioritario en la agenda política y en la toma de decisiones.

R.6. Realizar estudios detallados sobre determinadas cuestiones

Los cambios globales, en particular desde 2008 y más recientemente con la crisis sanitaria y la invasión de Ucrania, por parte de Rusia, están provocando cambios en la geopolítica, de manera que se plantea la necesidad de profundizar en el conocimiento de la vulnerabilidad española ante problemas de suministro de materias primas. Como consecuencia, se abren nuevas líneas de trabajo, que deberían abordarse por diferentes tipos de agentes, con el fin de apoyar la toma de decisiones en el desarrollo de políticas y en la inversión empresarial.

Entre las posibles líneas de trabajo futuro se encuentran i) estimación del grado de autoabastecimiento de materias primas minerales y de las necesidades, tanto para el consumo interno del país, como para la exportación de productos semielaborados o finales, incluyendo la cuantificación de las inversiones futuras en minería y metalurgia, ii) análisis de las actividades de minería y metalurgia en España (i.e., DAFO, estructura y propiedad), iii) análisis de las cadenas de suministro y de su resiliencia ante posibles cortes del suministro, iv) evaluación de la huella medioambiental o de carbono y de los consumos energéticos de los procesos mineros e industriales para la producción de las materias primas minerales necesarias para la transición energética y la digitalización y v) obstáculos y barreras al desarrollo y a la producción de las materias primas minerales y metales (sociológicas, efecto NIMBY¹; legales y burocráticas).

1 "Not In My Back Yard" ("no en mi patio trasero"). Equivalente a "Sí, pero aquí no".

ÍNDICE

Las materias primas minerales en la transición energética y en la digitalización. El papel de la minería y la metalurgia	I
CARTA DE PRESENTACIÓN RAI	X
CARTA DE PRESENTACIÓN CODEIME	XII
AGRADECIMIENTOS	XV
PRÓLOGO	XVII
MENSAJES CLAVE Y RECOMENDACIONES	XIX
ÍNDICE	XXIX
1. INTRODUCCIÓN Y ALCANCE	1
1 La vulnerabilidad europea	3
1.1 <i>El planteamiento de la Comisión Europea: resiliencia, seguridad, sostenibilidad</i>	5
1.2 <i>El potencial de Europa en materias primas minerales</i>	8
2 Objetivo y alcance	11
2. DESCARBONIZACIÓN Y DIGITALIZACIÓN DE LA ECONOMÍA. EL PAPEL DE LAS MATERIAS PRIMAS MINERALES	13
1 Introducción	15
2 Descarbonización y digitalización	17
2.1 <i>Descarbonización. La transición energética</i>	17
2.1.1 Objetivos de descarbonización	19
2.2 <i>Digitalización de la economía</i>	21
2.2.1 Objetivos de digitalización	23
3 El papel de las materias primas minerales en la descarbonización y la digitalización	25
3.1 <i>El papel de las materias primas minerales en la transición energética hacia la descarbonización</i>	25
3.1.1 El papel del reciclaje en la descarbonización	32
3.2 <i>El papel de las materias primas minerales en la digitalización</i>	33
3.2.1 El papel del reciclaje en la digitalización	37
4 Conclusiones	37
3. TECNOLOGÍA Y MINERÍA. PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE MINERALES	39
1 Introducción	41
2 Proyecto minero	43
2.1 <i>Exploración - Investigación minera</i>	44
2.2 <i>Evaluación del yacimiento</i>	49
2.3 <i>Explotación minera</i>	55
3 Tecnologías mineralúrgicas	58

4	Rehabilitación de espacios mineros	61
5	Conclusiones	65
4.	METALURGIA. TÉCNICAS Y PROCESOS	67
1	Introducción	69
2	Procesos metalúrgicos: la hidrometalurgia y la pirometalurgia	70
	2.1 <i>Hidrometalurgia</i>	70
	2.2 <i>Pirometalurgia</i>	72
3	Ejemplos de procesos metalúrgicos	73
	3.1 <i>Metalurgia del cobre</i>	73
	3.1.1 Proceso pirometalúrgico	74
	3.1.2 Proceso hidrometalúrgico	77
	3.2 <i>Metalurgia del litio</i>	78
	3.2.1 Procesos a partir de minerales (espodumena)	80
	3.2.2 Obtención de litio a partir de salmueras	82
	3.2.3 Obtención de hidróxido de litio	84
	3.2.4 Obtención de litio metálico	85
	3.3 <i>Metalurgia de las tierras raras</i>	86
	3.4 <i>Metalurgia del zinc</i>	89
4	Conclusiones	92
5.	DIGITALIZACIÓN E INNOVACIÓN EN MINERÍA Y METALURGIA	95
1	Introducción	97
2	Mina inteligente (Smart mine) y mina del futuro	97
3	Iniciativas de digitalización de la minería	99
	3.1 <i>Paquetes de software para modelización de yacimientos</i> <i>y diseño de explotaciones</i>	99
	3.2 <i>Equipos de perforación</i>	100
	3.2.1 Cielo abierto	100
	3.2.2 Subterráneo	100
	3.3 <i>Volquetes autónomos</i>	101
	3.4 <i>Volquetes eléctricos</i>	102
	3.5 <i>Gestión de flotas de volquetes (Dispatching)</i>	103
	3.6 <i>Sistemas de iniciación inalámbrico</i>	104
	3.7 <i>Otras tecnologías</i>	105
4	Iniciativas de digitalización de la metalurgia	106
	4.1 <i>Modelización microestructural y propiedades mecánicas</i>	107
	4.2 <i>Internet de las cosas</i>	107
	4.3 <i>Gemelos digitales</i>	108
	4.4 <i>Data mining, big data y análisis de datos</i>	108
	4.5 <i>Inteligencia artificial</i>	109
	4.6 <i>Otras tecnologías</i>	109
5	Conclusiones	110
6.	SOSTENIBILIDAD Y ECONOMÍA CIRCULAR EN EL ABASTECIMIENTO DE MATERIAS PRIMAS MINERALES	111
1	Introducción	113
2	Sobre el concepto de sostenibilidad	114

2.1	<i>Gestión minero-metalúrgica sostenible. Normas UNE 22480 y 22470</i>	118
2.2	<i>Economía circular y sostenibilidad</i>	122
2.3	<i>Modelo lineal vs. economía circular</i>	123
3	Sobre la economía circular en el ámbito europeo	125
4	La estrategia española de economía circular	127
5	Economía circular en la cadena de valor: minería y metalurgia	128
5.1	<i>Recuperación de materias primas secundarias</i>	130
5.2	<i>El papel de la metalurgia en el reciclaje de las materias primas secundarias</i>	132
5.3	<i>La simbiosis industrial como enfoque para la gestión de los residuos de las actividades mineras</i>	134
6	Retos y oportunidades de una mayor integración en la economía circular	137
7	Conclusiones	138
7.	ASPECTOS ECONÓMICOS E INDUSTRIALES DE LA CADENA DE VALOR DE LAS MATERIAS PRIMAS MINERALES	139
1	Introducción	141
1.1	<i>El valor de la actividad minera y la metalurgia en general</i>	142
2	Etapas de la cadena de valor de la minería y la metalurgia: valor económico	143
2.1	<i>Actividades previas y exploración: investigación minera</i>	145
2.1.1	Primera etapa: la exploración o investigación minera	145
2.1.2	Segunda etapa: la explotación	151
2.1.3	La tercera etapa: cierre y valores finales	158
2.2	<i>Cadena de valor de la metalurgia</i>	160
3	Polos, clústeres o ecosistemas industriales	161
3.1	<i>Clústeres europeos y otras referencias internacionales</i>	162
4	Conclusiones	164
8.	SOBRE LA MINERÍA Y LA METALURGIA EN ESPAÑA	167
1	Introducción	169
2	Sobre la producción minera	171
2.1	<i>Proyectos mineros en España. Situación actual</i>	174
3	Sobre la metalurgia española en 2021	178
4	Aspectos económicos de la cadena de valor de la minería y la metalurgia en España. principales variables económicas	180
4.1	<i>Empleo</i>	181
4.2	<i>Productividad laboral</i>	182
4.3	<i>Costes laborales por asalariado y costes laborales unitarios</i>	183
4.4	<i>Inversiones</i>	184
4.5	<i>Ventas/Exportaciones</i>	185
5	Conclusiones	186
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	187
	ANEXO 1. MINERALES CRÍTICOS DE LA UE	197
	ANEXO 2. TECNOLOGÍAS HABILITADORAS PARA LA DIGITALIZACIÓN	201

ANEXO 3. DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN MINERA	205
Métodos de explotación a cielo abierto.....	208
Métodos de explotación subterráneos.....	210
Minería submarina.....	214
ANEXO 4. NORMATIVA MEDIOAMBIENTAL	219
ANEXO 5. DESCRIPCIÓN DE PROCESOS METALÚRGICOS	229
Metalurgia del aluminio.....	231
Metalurgia del cobalto.....	235
Metalurgia del uranio.....	238
GLOSARIO DE TÉRMINOS	241
SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	255
AUTORES	262

1

INTRODUCCIÓN Y ALCANCE



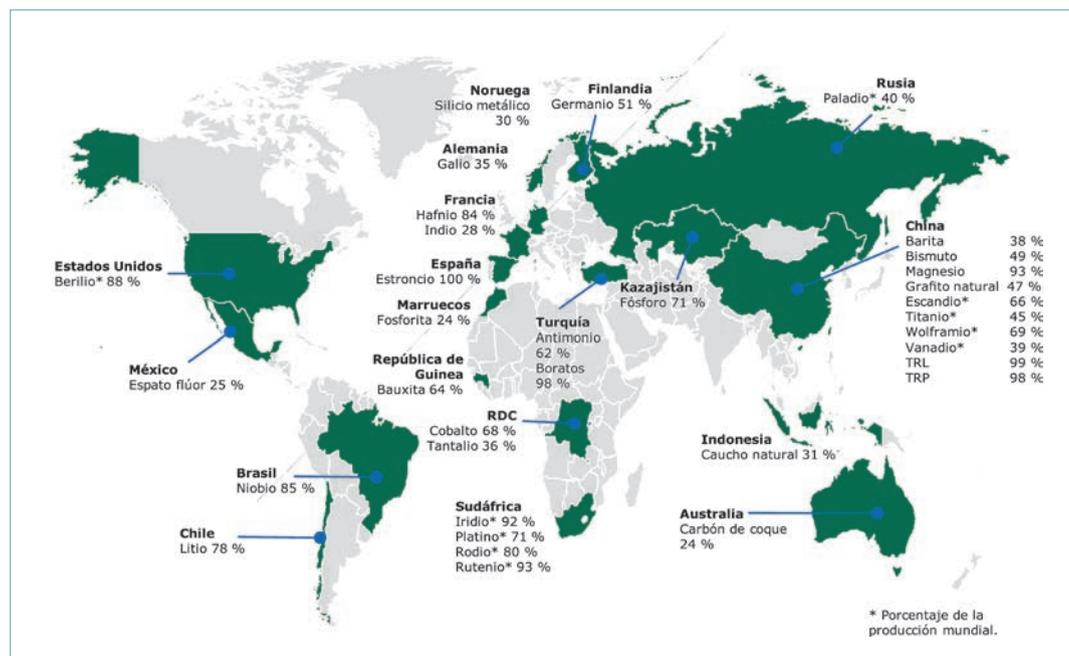
1 La vulnerabilidad europea

La actual crisis energética y de las cadenas globales de suministro han puesto de manifiesto el motivo por el que la industria y el conjunto de la economía europea se han vuelto vulnerables, debido a su dependencia de las importaciones de determinadas materias primas minerales. Según datos de Eurostat, cada ciudadano europeo consumió en 2019 el equivalente a 14 toneladas de materias primas, de las cuales algo más de 0,7 toneladas correspondían a metales y 7,2 a materias primas minerales no metálicas (Vicepresidencia Tercera del Gobierno, Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2022).

Esta dependencia podría agravarse debido a la invasión de Ucrania por Rusia y a los cambios geopolíticos resultantes, ya que algunas de estas materias primas son críticas¹ para la digitalización y fabricación de equipos relacionados con la producción de energía y su almacenamiento (p.ej., Pt, Pd, Ni) y, por otro lado, el conflicto está introduciendo tensiones en los precios de las materias primas minerales.

Asimismo, el auge de las materias primas ha conllevado un resurgimiento del proteccionismo conforme los países ricos en minerales intentan obtener una mayor participación de los beneficios del resultante del aumento de los precios de algunas materias primas minerales y mayores controles sobre el desarrollo de la industria local (Adánez, 2022). Este proteccionismo ha tomado diferentes formas como tasas e impuestos, restricciones a la propiedad, participaciones obligatorias en nuevos proyectos o bloqueo de empresas extranjeras entre otros.

Todo ello ha hecho que Europa se haya vuelto más vulnerable, que como se puede observar en el Mapa 1, existe una elevada dependencia de terceros países en lo que a suministro de materias primas críticas se refiere.



Mapa 1. Principal dependencia de la UE de materias primas críticas por país. Fuente: (European Commission, 2020a).

¹ Para más información sobre el listado de materias primas críticas de la UE ver Anexo 1.

Para afrontar esta situación, será clave comprender cómo la demanda global de minerales crecerá con diferentes intensidades, afectada por la concentración tecnológica de cada mineral o el aumento en el crecimiento de las tecnologías energéticas en comparación con las cifras de producción actuales (Álvarez, 2023).

Conscientes de esta vulnerabilidad, la Comisión Europea lanzó un Plan de Acción en Materias Primas Críticas, encaminado a potenciar la minería y aumentar así la resiliencia y autonomía. Este punto es especialmente relevante para las regiones mineras europeas, que convendría valorasen si existen oportunidades para extraer materias primas minerales en sus territorios. Esta es, sin duda, una buena noticia para España, que tiene un gran potencial minero (es el tercer país de Europa con más recursos mineros, algunos de los cuales identificados como críticos y estratégicos), y en minería metálica.

El desarrollo de estas nuevas explotaciones exige la elaboración de una estrategia nacional que permita la identificación y puesta en marcha de estos proyectos, un proceso que el Gobierno de España ya ha comenzado con la aprobación en el Consejo de Ministros del 30 de agosto de 2022 de la "Hoja de ruta para la gestión sostenible de las Materias Primas Minerales", que refuerza la autonomía estratégica del país y prioriza la eficiencia y la economía circular para aportar seguridad de abastecimiento de suministros clave para la transición energética. Dicha Hoja de ruta se alinea con políticas europeas y nacionales, como el reciente Plan REPowerEU o la Estrategia de Seguridad Nacional (aprobada en 2021), e incluye 46 actuaciones de medio y largo plazo de corte regulatorio, sectorial, de impulso a la I+D+i y otros instrumentos transversales.

La Hoja de ruta contempla cinco orientaciones estratégicas. La primera, lograr la máxima eficiencia e implantación de la economía circular en las cadenas de valor del suministro de materias primas minerales, integrando y concretando para la industria extractiva los objetivos y líneas de actuación de la Estrategia España Circular 2030. En segundo lugar, impulsar y consolidar la gestión sostenible y responsable de las materias primas minerales en la industria extractiva española. La tercera orientación consiste en garantizar la seguridad de suministro y el cumplimiento de los requisitos medioambientales, geoestratégicos y de justicia social en la importación de materias primas minerales. En cuarto lugar, la diversificación del suministro mediante un abastecimiento sostenible y responsable desde terceros países. En quinto lugar, fomentar la industria de materias primas minerales de carácter estratégico para la transición energética y digital.

En este contexto se ha despertado un notable interés, en el marco de las propuestas de la Comisión Europea, que ha instado a los Estados miembros a identificar proyectos de extracción, procesamiento de recursos mineros y revalorización de residuos de materias primas que puedan estar operativos en 2025. El objetivo es garantizar la seguridad de recursos ante el cambio de modelo energético. El comisario europeo de Mercado Interior, Thierry Breton, hizo un llamamiento para impulsar lo que se denomina minería sostenible, la minería del siglo XXI.

El reto es asegurar el suministro de materias primas críticas para cumplir los objetivos del Pacto Verde Europeo y la transición ecológica, (i) promoviendo la cadena de valor completa, desde la extracción de materias primas necesarias para el proceso productivo, hasta el producto final, (ii) impulsando la economía circular como estrategia para reducir la entrada de materias primas primarias en el ciclo productivo, así como el reciclado cuando es técnica y económicamente posible y (iii) incitando la innovación en los procesos tecnológicos industriales (Moratilla, n.d.).

1.1. El planteamiento de la Comisión Europea: resiliencia, seguridad, sostenibilidad

Promovida por la Comisión Europea en 2015 se creó la iniciativa tecnológica para las materias primas EIT Raw Materials en el marco del Instituto Europeo de Innovación y Tecnología (EIT, por sus siglas en inglés) (European Institute of Innovation and Technology, 2021).

La UE ha apoyado al sector minero a través del 7º Programa Marco, Horizonte 2020, financiando proyectos de corte técnico, social, político y de gobernanza en materias primas. El proyecto STRADE² 2018 (Schüler et al., 2018), resume el plan estratégico europeo en los dos puntos siguientes: (i) reducir la dependencia de las importaciones y promover la producción propia, diversificando el suministro de materias primas, mejorando la eficiencia de los recursos (incluido el reciclaje) y encontrando materias primas minerales alternativas y (ii) mitigar los impactos ambientales, sociales y sobre la salud.

En el marco europeo es muy relevante la comunicación de la Comisión COM (2020) 474 final³, donde se recuerda que la Comisión revisa la lista de materias primas fundamentales para la UE cada tres años. Publicó su primera lista en el año 2011, actualizándola en 2014, 2017 y 2020, siendo la importancia económica y el riesgo de suministro las dos variables fundamentales para determinar la criticidad de las materias primas. La lista de la UE para el año 2020 contiene treinta materias primas frente a las catorce de 2011, las veinte de 2014 y las veintisiete de 2017. En la última revisión se incorporaron la bauxita, el titanio y el estroncio.

Menos del 5 % de las materias primas fundamentales de todo el mundo se obtienen o producen en la UE, mientras que su industria representa alrededor del 20 % del consumo mundial de estas materias primas. Un suministro seguro y fiable de las materias primas fundamentales es vital para la industria europea, en especial, en sectores como el automóvil, el acero y la sanidad, que emplean a millones de ciudadanos europeos. La UE depende especialmente de las importaciones de materias primas fundamentales que son componentes clave de las tecnologías del futuro, como las baterías o las fuentes de energía renovables.

El suministro de muchas materias primas minerales fundamentales presenta un alto grado de concentración. Por ejemplo, *"el 98 % de las tierras raras que importa la UE proviene de China, el 98 % del borato procede de Turquía y Sudáfrica suministra el 71 % del platino que necesita la UE y un porcentaje aún mayor de iridio, rodio, rutenio y metales del grupo del platino"* (Mundo GEO, 2021). Un 68 % del cobalto viene del Congo. Se espera que el problema de los suministros sea cada vez mayor.

Ante esta situación de dependencia y vulnerabilidad, que podría deberse a razones medioambientales, económicas y políticas entre otras, y no a la inexistencia de recursos minerales en el propio territorio, la Comisión Europea propone mejorar la resiliencia de la UE, existiendo un desafío en el suministro y la sostenibilidad ya que, recogiendo datos, entre otros del Banco Mundial y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), el porcentaje de dependencia de la UE con respecto a las importaciones de la mayoría de los metales varía entre el 75 % y el 100 %. El nivel de dependencia es tan elevado que, en términos de suministro de la UE, el autoabastecimiento global de las veinte materias primas minerales más críticas, que se necesitan para la descarbonización de la

² *Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe.*

³ (Comisión Europea, 2020).

economía, puede estimarse en menos del 3 %, con más de la mitad sin producción o con una producción europea muy limitada (EU Commission, 2017). En esta línea, países como China, Estados Unidos y Japón trabajan para garantizar el suministro a sus países.

Para ello, la Comisión estableció un plan de acción sobre materias primas fundamentales y como primer elemento básico considera el desarrollo de cadenas de valor resilientes; al respecto señala la relevancia de incorporar las materias primas minerales y, en particular, ha propuesto la puesta en marcha de una alianza europea sobre materias primas, impulsada por la industria.

No obstante, a pesar de lo anterior y del potencial europeo, el éxito es modesto, debido entre otros a la falta de inversión en exploración y minería, a los procedimientos diversos y dilatados en el tiempo para la obtención de permisos, así como a los reducidos niveles de aceptación por parte de la ciudadanía de este tipo de actividades⁴.

Sin embargo, tal y como indica la Comisión Europea (2020), la UE y sus Estados miembros cuentan con un marco legislativo para garantizar que la actividad minera se desarrolle en condiciones adecuadas, tanto desde el punto de vista social como ambiental. De hecho, resulta muy complicado lograr que los nuevos proyectos relacionados con las materias primas fundamentales alcancen rápidamente la fase operativa, lo que se debe en parte al riesgo y al coste, pero también a la falta de incentivos, así como a las razones apuntadas anteriormente, a destacar los largos períodos de tramitación de los proyectos. Además, la tecnología innovadora y la digitalización están transformando la extracción y el tratamiento de las materias primas fundamentales (como se verá en el capítulo quinto).

La UE cuenta con una normativa estricta en materia de concesión de derechos mineros (investigación, exploración y explotación de yacimientos), por lo que, en términos ambientales y sociales, puede resultar más apropiado extraer estos recursos que los localizados en otros territorios con normativas menos exigentes. No obstante, habría que optimizar los procesos de autorización del proyecto minero, dado que la exploración del yacimiento y la puesta en explotación de una mina puede llevar 10 años o más en España (por encima del promedio europeo de 8-9 años). La minería española es un sector muy regulado, con gran densidad de normativa que afecta a la actividad extractiva. De hecho, se trata del país de la UE en el que mayor presión legal existe, existiendo 103 Administraciones distintas y más de 112 leyes relacionadas directa o indirectamente con la actividad (Cámara Oficial Mineira de Galicia, n.d.).

Países del entorno como Francia, con 69 leyes; Portugal, con 25; Alemania, con 46; o el Reino Unido, con 69, tienen una "ventanilla única" y entornos normativos mucho menos complejos, pero igual de exigentes que los españoles. En materia de razones económicas, explotar los recursos en la UE resulta más costoso que hacerlo en terceros países tanto por la normativa laboral como por la normativa medioambiental. En estas circunstancias, obtener la financiación necesaria es más complicado, lo que hace a Europa más vulnerable frente al resto del mundo.

La Comisión aboga por la identificación de proyectos y las necesidades de inversión en el ámbito de la minería y el procesamiento de minerales, y de las oportunidades de financiación necesarias para el desarrollo de las materias primas fundamentales en la UE, que puedan estar operativas a más tardar en 2025, dando prioridad a las cuencas mineras.

⁴ Para más detalle ver INFACT Project (2018).

El segundo elemento básico es el uso circular de recursos, tema que se aborda en el capítulo sobre economía circular de este estudio. Al respecto, la Comisión señala que la UE está a la vanguardia de la economía circular, habiendo incrementado la utilización de materias primas secundarias. Por ejemplo, más del 50 % de algunos metales como el hierro, el zinc o el platino, se recicla y con ello se cubre más del 25 % del consumo de la UE. Sin embargo, en otros casos, como las tierras raras, la contribución de la producción secundaria es marginal.

El tercer elemento del plan consiste en aprovechar el potencial europeo, para lo que se recuerda la larga tradición europea en actividades mineras y extractivas. En lo referente al potencial interno de la UE; también se señala la importancia de desarrollar, desde 2022, conocimientos y capacidades en los ámbitos de la minería, la extracción y las tecnologías de transformación (léase, entre otras, la mineralurgia y metalurgia).

El cuarto elemento básico del plan de acción de la UE es la diversificación del suministro de terceros países. En esta línea, la UE debería entablar asociaciones estratégicas con países ricos en recursos, haciendo uso de todos los instrumentos de política exterior y respetando sus obligaciones internacionales.

Para reforzar la autonomía estratégica de la UE, tras una primera versión presentada en 2021, el 21 de marzo de 2022, se aprobó en la sesión del Consejo de la UE la Brújula Estratégica para la Seguridad y la Defensa de la UE, en el contexto de la invasión de Ucrania por Rusia, en la que se establece un ambicioso plan de acción para reforzar la política de seguridad y defensa de la UE de aquí a 2030. El fin es asegurar las cadenas de suministro de materiales críticos, la soberanía energética y la independencia tecnológica de los potenciales competidores.

Para ello, se ofrece una evaluación del entorno estratégico de la UE y de las amenazas y retos a los que se enfrenta. La Brújula abarca todos los aspectos de la política de seguridad y defensa y se articula en torno a cuatro pilares: (i) actuar (capacidad de despliegue rápido de militares y refuerzo de misiones y operaciones), (ii) invertir (incrementar sustancialmente el gasto en defensa para que se corresponda con la ambición colectiva de reducir las carencias esenciales en materia de capacidades militares y civiles y reforzar la base tecnológica e industrial de la defensa europea), (iii) trabajar de manera asociativa (reforzando la cooperación con socios estratégicos como la OTAN, la ONU y los socios regionales, como la OSCE-Organización para la Seguridad y la Cooperación en Europa, la Unión Africana y la ASEAN-Asociación de Naciones de Asia Sudoriental) y (iv) garantizar la seguridad (impulsando la capacidad de análisis de inteligencia y el desarrollo de mecanismos y equipos de respuesta contra las amenazas).

En este contexto, parece claro que el refuerzo de la base tecnológica e industrial debería contar con un suministro fiable de materias primas minerales y un desarrollo e integración de las cadenas de valor desde la minería hasta la fabricación de componentes y equipos.

En septiembre de 2022, se anunció la Ley Europea de Materias Primas Críticas (*European Critical Raw Materials Act*), cuya propuesta se publicó en marzo de 2023 y entre cuyos objetivos se encuentran (Breton, 2022): (i) asegurar suministros estables diversificándolos e intensificando los esfuerzos por reciclar, (ii) impulsar la autonomía estratégica de la UE con producción nacional, recuperando la actividad industrial a lo largo de la cadena de valor y (iii) disminuir la dependencia de las importaciones. Por lo tanto, se ocupará de asegurar las cadenas de suministro, desde la extracción hasta el refinado, desde el procesamiento hasta el reciclaje.

En paralelo y como consecuencia del actual contexto geopolítico, en especial de la Inflation Reduction Act de Estados Unidos y del anuncio de inversiones masivas en tecnologías limpias por parte de China, la UE publicó en febrero de 2023 el documento "A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age", donde

se indica que la Comisión seguirá impulsando la red de acuerdos de libre comercio de la UE, así como nuevas iniciativas con socios de ideas afines (e.g., Australia, Chile, Nueva Zelanda, India) para establecer un Club de Materias Primas Críticas para reunir a los consumidores de materias primas y a los países ricos en recursos para garantizar la seguridad global del suministro a través de una base industrial competitiva y diversificada (European Commission, 2023a).

La propuesta de Reglamento para el desarrollo de un marco para garantizar un suministro seguro y sostenible de materias primas críticas, mediante el cual se materializa la Ley Europea de Materias Primas Críticas, establece como objetivos mejorar el funcionamiento del mercado interior, estableciendo un marco que garantice el acceso a un suministro de materias primas críticas seguro y sostenible (European Commission, 2023b).

Para ello establece que la UE produzca al menos el 10 % de los minerales o concentrados que consume de las materias primas que define como estratégicas. Asimismo, plantea que la capacidad de procesamiento debe cubrir al menos el 40 % de su consumo anual y, finalmente, contempla que la capacidad de reciclaje ascienda al menos al 15 % del consumo de materias primas estratégicas. También busca la diversificación de orígenes, la mejora de la capacidad de monitorizar y mitigar el riesgo asociado a las materias primas críticas y garantizar el libre movimiento de estas en el mercado de la UE.

Los elementos clave que se recoge son (i) el fortalecimiento de la cadena de valor de las materias primas a nivel UE (donde se identifica el concepto de proyecto estratégico, junto con el procedimiento de obtención de esta distinción y los beneficios asociados), (ii) la monitorización y mitigación del riesgo (donde se incluye el desarrollo de un mecanismo de monitorización de la información sobre los flujos de las materias primas críticas y otro para la realización de operaciones de compra conjunta), (iii) la sostenibilidad y la huella medioambiental (centradas entre otros en la promoción de la circularidad de las materias primas críticas, la recuperación de los residuos mineros y en el seguimiento exhaustivo de los imanes permanentes) y (iv) la colaboración estratégica.

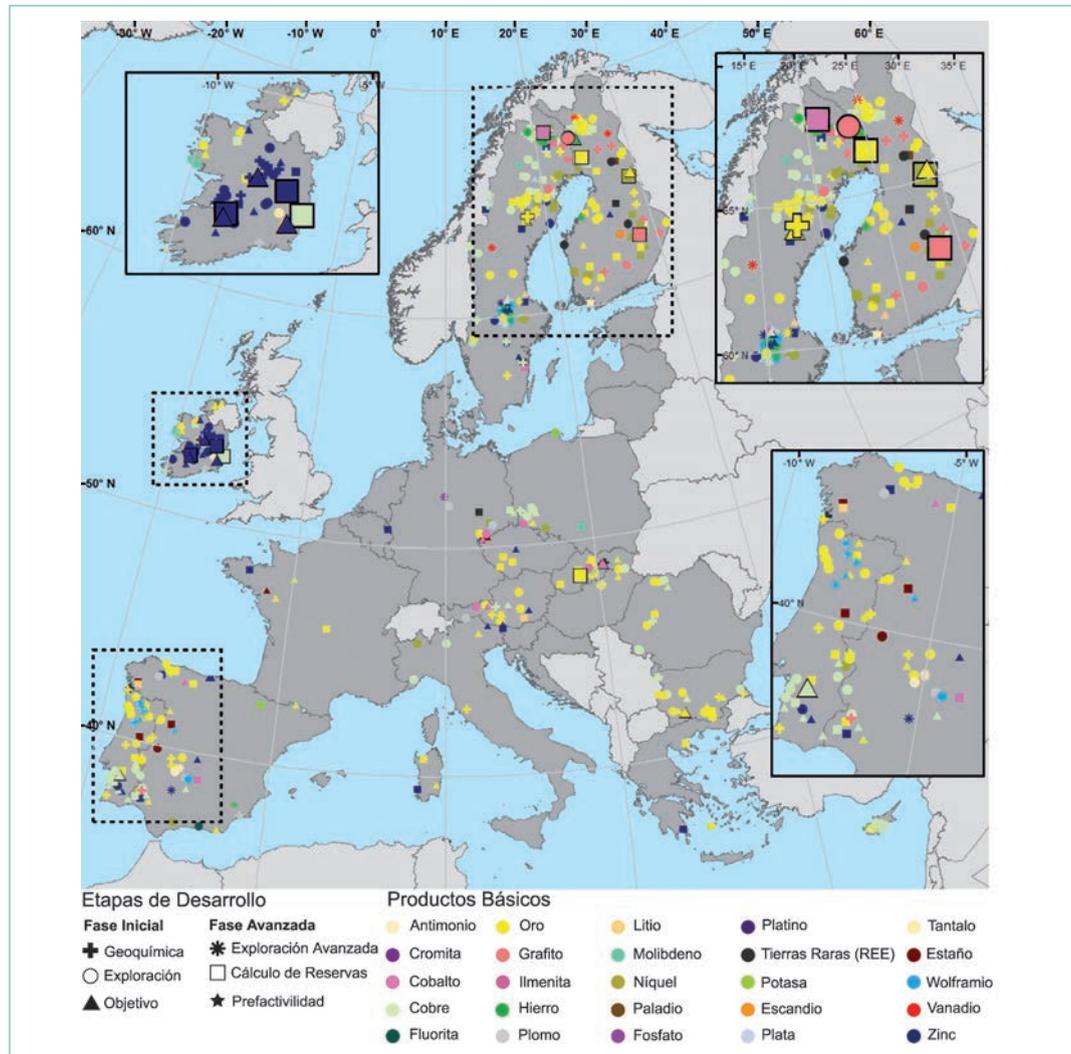
1.2. El potencial de Europa en materias primas minerales

Desde hace ya más de 20 años, los Servicios Geológicos de los países de la UE están coordinando esfuerzos y actualmente existe GeoERA (European Geological Surveys Research Area) que engloba a 32 países europeos y que ha integrado una base de datos informatizada (Mineral4EU) en el marco del European Geological Data Infrastructure (EGDI) (Geera, 2023).

Entre otros proyectos han desarrollado el Mineral Intelligence for Europe (Mintell4EU, 2020), en el que se pueden visualizar los mapas con los recursos de las diferentes materias primas minerales. Si se observan dichos mapas es fácil apreciar que existen recursos propios en la UE y que muchos de ellos están en territorio español. Otra herramienta pública, poco conocida, es el Mapa Geoquímico Nacional realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y que permite integrar fácilmente los datos geoquímicos en Google Earth (Llamas, 2020).

En septiembre de 2020, impulsada por el comisario europeo de Mercado Interior (Thierry Breton) y el vicepresidente de la Comisión Europea de Relaciones Interinstitucionales y Prospectiva (Maroš Šefčovič) se lanzó la alianza europea para las materias primas (ERMA, por sus siglas en inglés). Esta iniciativa está

Mapa 2. Actividades de exploración minera en la UE-27 en 2019. Nota: El tamaño del círculo es un indicador del avance del proyecto (a mayor tamaño, más avance). Fuente: (European Innovation Partnership on Raw Materials, 2021).



muy imbricada con las políticas de la Comisión Europea sobre las materias primas minerales y los metales para el futuro de la Unión. La ERMA ha identificado 28 oportunidades de inversión hasta el año 2023 que ascienden a unos 10.000 millones de euros (M€) (Schäfer, 2022). La iniciativa pone énfasis no solo en la minería y la metalurgia, sino también en toda la cadena de valor, de ahí que pueda hablarse de una competencia entre países europeos para tener en su territorio conocimiento, investigación, minería, industria y empleo. En este sentido, conviene mencionar iniciativas concretas en tierras raras para la fabricación de imanes permanentes, o de litio para la fabricación de baterías.

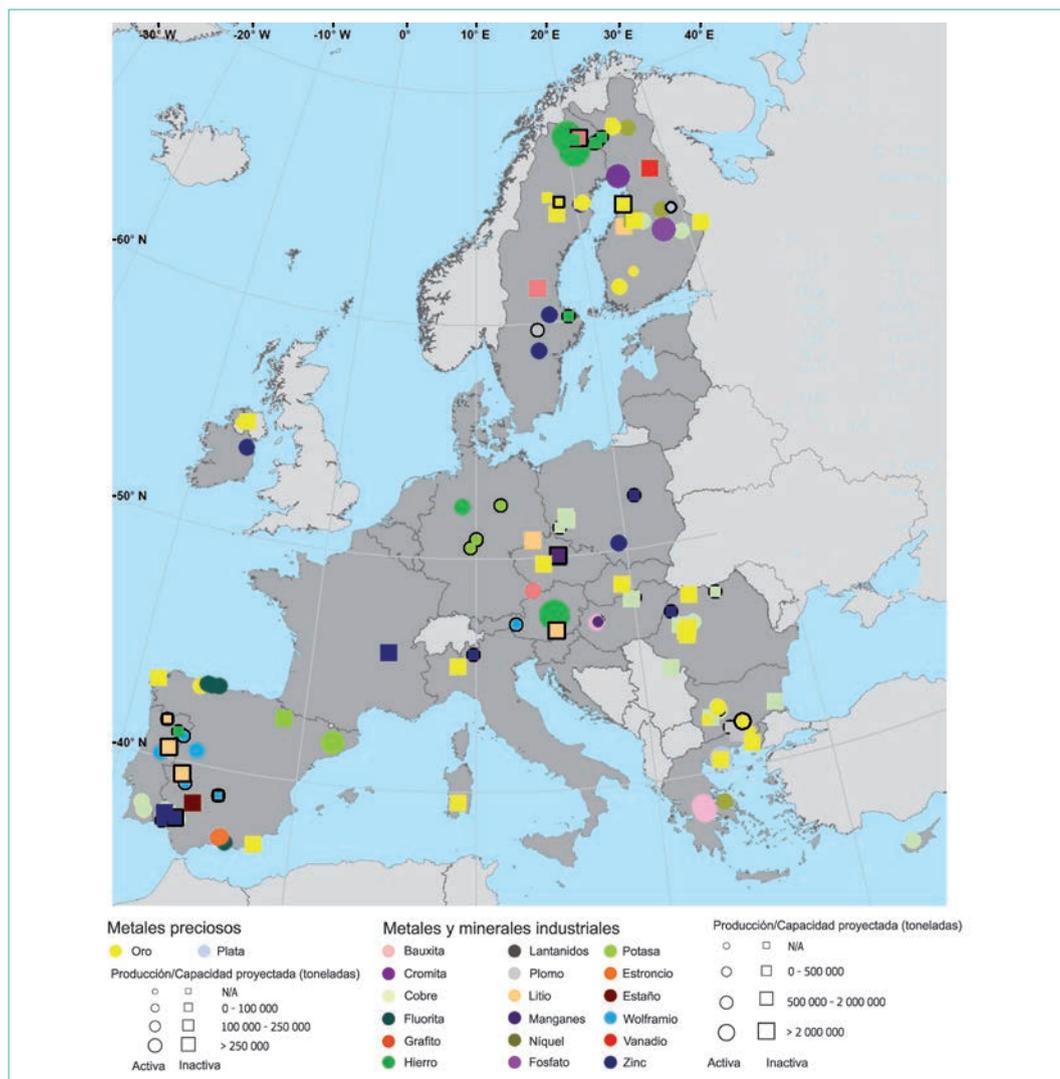
El Mapa 2 del JRC (Joint Research Centre) sintetiza la situación de la exploración y de proyectos de exploración o investigación de minerales y metales activos; siguiendo para ello los "Raw Materials Monitoring Indicators" del año 2019.

En cuanto a la exploración, la Comisión señala que los nuevos proyectos de exploración de minerales, o al menos el mantenimiento de los niveles actuales, son clave, existiendo notables diferencias entre los Estados miembro.

A este respecto es pertinente destacar el caso de Suecia. SveMin (2021) plantea la necesidad de los metales para la transición ecológica y señala que la demanda de minerales se espera que aumente

significativamente hasta el año 2050. Asimismo, resalta cómo Europa tiene más necesidades de metales que otras regiones del entorno, dadas sus grandes ambiciones en la lucha contra el cambio climático. El documento también señala que el reciclaje es importante, pero que no será suficiente para satisfacer los incrementos de demanda y que siendo Europa muy dependiente de las importaciones de muchos metales y minerales la industria minera sueca tiene un papel importante que jugar en la transición hacia una sociedad más sostenible, añadiendo que el subsuelo sueco no está suficientemente explorado.

Volviendo a la Comisión, esta señala que, respecto a 2018, ha habido más proyectos de exploración. En cuanto a las minas en operación, el Mapa 3 refleja la situación en 2019, donde hubo 13 nuevas minas respecto a la revisión de 2017. Los proyectos de litio de ese año son ahora proyectos en activo.



La producción de minerales de la UE corresponde a un puñado reducido de Estados miembros (Regueiro y Alonso-Jiménez, 2021). Polonia representa el 56 % de la producción de cobre de la UE, Suecia el 90 % de la producción de mineral de hierro y Grecia y Finlandia cerca de la mitad, cada uno, de la producción de níquel. Suecia además supone el 43 % e Irlanda el 32 % de la producción de plomo y zinc de la UE respectivamente.

Los compromisos de la UE entre los que destacan los objetivos para el desarrollo sostenible o la propia política energética encaminada a las energías renovables y la disminución de los efectos del cambio climático hacen que resulte necesario más que cuadruplicar la producción de determinados minerales que tienen la consideración de estratégicos. Como consecuencia, se espera un auge del sector extractivo.

En cómputo global, Europa es el tercer productor a nivel mundial de minerales industriales y produce la cuarta parte de los minerales de construcción que requiere. Se extraen anualmente, alrededor de 3.350 millones de toneladas de materias primas minerales. 3.000 millones son materiales de construcción, 200 millones de minerales metálicos, 150 de minerales industriales (Vicepresidencia Tercera del Gobierno, Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2022).

2 Objetivo y alcance

La transición energética y la digitalización son tendencias manifiestas en la economía global y en particular en la europea y española. La necesidad de materias primas minerales y el incremento de su demanda son hechos que hay que abordar. Europa es muy dependiente de las materias primas minerales importadas para ambos procesos. Ello supone una vulnerabilidad y un riesgo para que la transición energética y la digitalización logren sus objetivos. En este sentido, la minería y la metalurgia, como eslabones iniciales de las cadenas de valor son muy necesarios, al igual que la fabricación de componentes y equipos.

En este contexto, y teniendo en cuenta la relevancia de las actividades minera y metalúrgica en la creación de empleo de calidad, actividad industrial y riqueza para la economía, el presente documento trata de examinar, analizar y responder a la pregunta ¿Qué papel tienen las materias primas minerales y, por ende, la minería y la metalurgia, en el escenario de transición energética y digital al que nos dirigimos?

Para ello el grupo de trabajo CODEIME-RAI creado para este estudio definió el alcance de este trabajo, que, en primer lugar, define y describe lo que se entiende por descarbonización y digitalización; y una vez fijado el escenario analiza el papel de las materias primas minerales en el mismo.

Para tratar de entender ese papel se describe la cadena de valor desde los minerales hasta los componentes y los equipos necesarios en el nuevo contexto y, en particular, las fases de la minería y la metalurgia, que como se verá son elementos claves. Tras ello, se analiza la digitalización y la innovación tecnológica en ambas actividades.

Se aborda, a continuación, el papel de la economía circular en el abastecimiento de materias primas minerales, dado que hoy no se puede concebir un futuro sin incorporar los conceptos y las aplicaciones relacionadas. La creación de valor desde la investigación minera hasta la fabricación de equipos que se realiza desde la industria y aporta beneficios económicos, se examina en el siguiente capítulo de este estudio. El documento termina con un capítulo que trata de exponer los principales datos de la minería y la metalurgia en España.

El informe va acompañado de un conjunto de anexos donde se aporta información de detalle sobre métodos de explotación, normativa medioambiental y diferentes procesos metalúrgicos. El documento finaliza con un glosario y un apartado de siglas, acrónimos y abreviaturas.

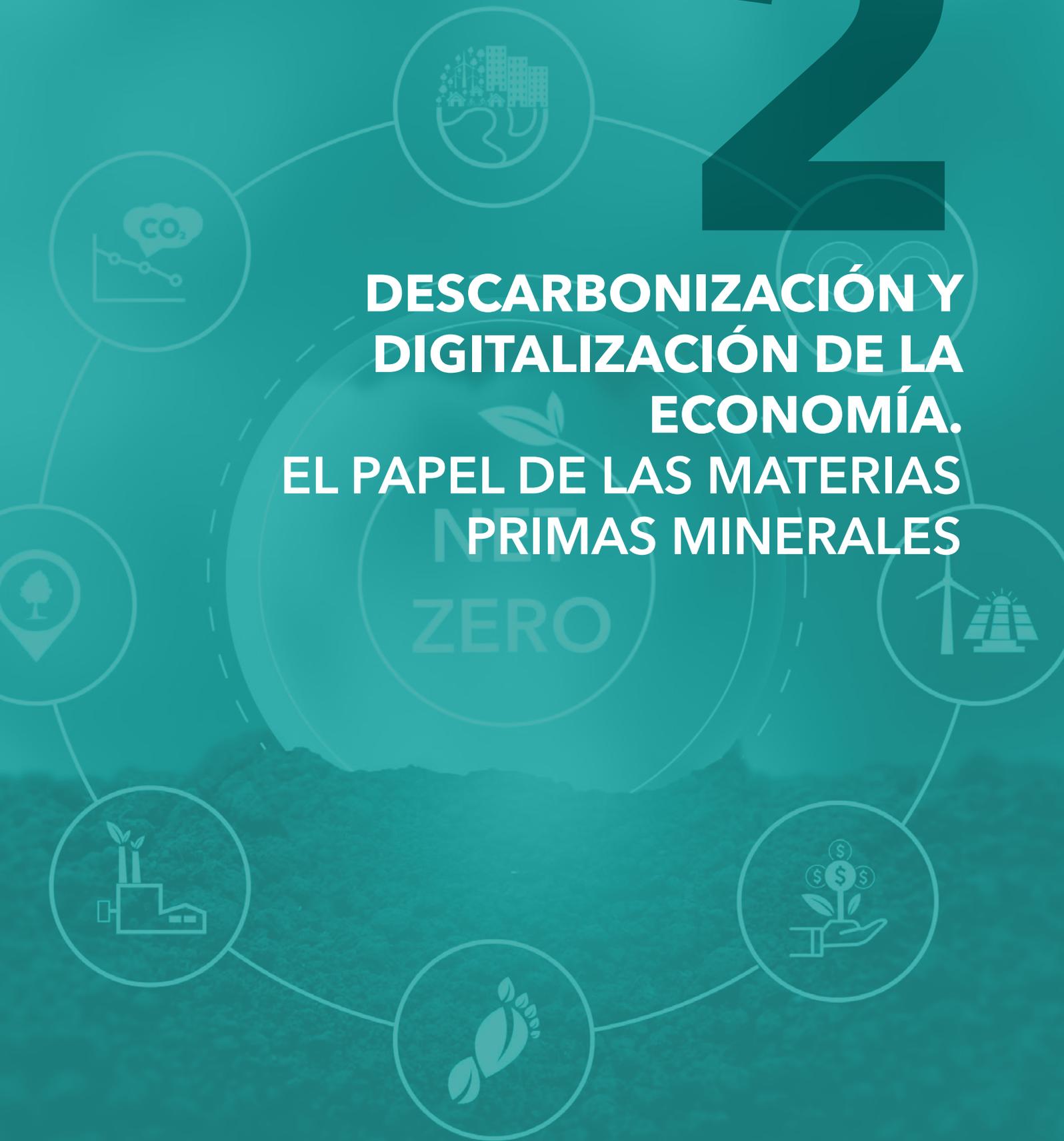
Si bien no se ha dedicado un capítulo específico a las cuestiones medioambientales, estas se van tratando a lo largo del documento, en particular, en lo referente a la normativa medioambiental en España relativa a la minería y a la economía circular. En el Anexo 4 se recoge una relación detallada de esta.

Fruto del trabajo realizado, se han detectado posibles líneas de trabajo futuro que tampoco han sido objeto de este documento como la cuantificación de las inversiones futuras de capital nacional y extranjero en minería y metalurgia, el análisis de las cadenas de suministro y de su resiliencia ante posibles cortes del suministro, la estimación del consumo energético necesario para la extracción de materias primas minerales y su huella de carbono, o el impacto del aumento de los precios de la energía en la minería y la metalurgia.

2

DESCARBONIZACIÓN Y DIGITALIZACIÓN DE LA ECONOMÍA. EL PAPEL DE LAS MATERIAS PRIMAS MINERALES

NET
ZERO



1. Introducción

La descarbonización es, en sentido amplio, el proceso de reducción de las emisiones a la atmósfera de Gases de Efecto Invernadero⁵ (GEI en adelante); en particular, las de dióxido de carbono (CO₂), con el objetivo de alcanzar la neutralidad climática. La neutralidad climática (neutralidad de carbono, huella cero de carbono), se alcanza cuando los niveles de CO₂ emitidos a la atmósfera son iguales a los niveles de CO₂ retirados por diversas vías, resultando emisiones netas nulas o dejando que el balance sea cero. Lo ideal sería no emitir más CO₂ del que pueden absorber los sumideros naturales (bosques, plantas, suelos, océanos).

Cabe, por tanto, en primer término, identificar la procedencia de las emisiones de GEI, para adoptar las medidas necesarias y reducir estas emisiones en origen. En relación con este punto, se estima (Ritchie y Roser, 2020) que el 73,5 % de las emisiones de GEI a nivel mundial proceden de la generación y consumo de energía (en actividades industriales, en el transporte o en el sector doméstico y comercial).

El acceso universal a la energía es un elemento fundamental para el progreso humano, siendo uno de los objetivos que figuran en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible "*Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos*". Alcanzar una solución de compromiso, de equilibrio, entre garantizar el acceso universal a la energía a todas las personas y acotar los efectos que sobre el clima tienen la producción y uso de energía es un reto de tal magnitud que justifica que el sistema energético constituya una de las prioridades de las agendas científica, tecnológica, política, económica y social de un país.

Al objetivo anteriormente mencionado de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible van vinculadas, entre otras, tres metas a alcanzar en 2030: (i) garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos, (ii) aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas y (iii) duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética. Estas metas deberían constituir el marco de actuación en la toma de decisiones del diseño del sistema energético de un país. A esto hay que añadir que la invasión de Ucrania por Rusia está generando cambios en la posición europea frente a Rusia. Ello está implicando cortar de manera abrupta la dependencia energética de este país y la necesidad de reestructurar las cadenas de suministro de materias primas (críticas) procedentes del mismo.

Es en este contexto en el que se concibe la descarbonización de la economía, cuyo objetivo es reducir las emisiones de GEI vinculadas a la generación y consumo de energía. Los cambios vinculados a la descarbonización son de tal magnitud y alcance que configuran lo que se conoce como transición energética. Las claves de esta transición energética en términos tecnológicos son: (i) incremento de generación de energías renovables y uso de tecnologías no emisoras o de bajas emisiones de GEI, (ii) desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía, (iii) electrificación del consumo donde sea factible, (iv) mejora de la eficiencia energética y, (v) incorporación de nuevos vectores energéticos (por ejemplo, el hidrógeno verde).

En este escenario de descarbonización y en relación con el papel de las materias primas minerales, el

⁵ Los gases de efecto invernadero directo que se estiman en el Inventario de GEI son: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) (Vicepresidencia tercera del Gobierno, Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, n.d.).

informe del Banco Mundial (The World Bank, 2020) presenta una estimación de la demanda⁶ media anual mundial de minerales en función de diferentes objetivos de descarbonización para 2050. De este informe cabe destacar las siguientes conclusiones: (i) cuanto más ambiciosos son los objetivos de descarbonización, mayor será la demanda de materias primas minerales, (ii) la demanda de materias primas minerales específicas aumentará sustancialmente, tanto en términos absolutos como relativos dependiendo, en último término, del tipo e intensidad de uso de la tecnología asociada y (iii) aunque el reciclaje de materiales tiene un papel determinante en este escenario, será necesario recurrir a la producción primaria de materias primas minerales (industria extractiva).

En paralelo cabe identificar el escenario actual de los procesos productivos. Industria 4.0⁷ es el término que describe la organización de los procesos de producción basada en dispositivos que se comunican entre sí de forma autónoma a lo largo de la cadena de valor y supone un cambio de tal envergadura que constituye lo que se denomina cuarta revolución industrial. La Industria 4.0 se basa en emplear las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), tecnologías que permiten vincular el mundo físico (dispositivos, materiales, productos, maquinaria e instalaciones) con el digital (sistemas) y aumentar la productividad y eficiencia de los procesos de producción.

Este fenómeno, que también se denomina digitalización, consiste básicamente en la aplicación masiva de las nuevas tecnologías, a todas las fases de los procesos productivos para lograr una mayor eficiencia. Otros términos que podrían considerarse sinónimos, para la gran mayoría de las instalaciones industriales, son los siguientes: *Smart Factory* (Fábrica inteligente), *Digital Factory* (Fábrica digital) y *Connected Factory* (Fábrica conectada), entre otros.

Desde el punto de vista de las materias primas minerales en relación con la digitalización, cabe destacar las conclusiones recogidas en el informe elaborado por la Unión Europea (European Commission, 2020b), que señala que las TIC se caracterizan por: (i) la necesidad de una amplia y creciente variedad de materiales con propiedades específicas (electrónicas, ópticas, magnéticas, mecánicas) para fabricar circuitos integrados y dispositivos, (ii) un aumento sustancial de la demanda de estas materias respecto a la producción actual para fabricar la enorme cantidad de circuitos integrados y dispositivos que se prevé sean necesarios y (iii) la velocidad de desarrollo de nuevas tecnologías TIC, que puede superar las escalas de tiempo de las cadenas de suministro de las materias primas.

Por lo tanto, para avanzar en la descarbonización y digitalización de la economía es necesario disponer de materias primas minerales, en cantidad, variedad y calidad determinadas, materias indispensables para la generación y almacenamiento de energía, la fabricación de innumerables dispositivos consumidores de electricidad y de tecnologías TIC (aerogeneradores, placas fotovoltaicas, vehículos eléctricos, pilas de combustible, circuitos integrados, microchips, móviles y ordenadores, por citar algunos ejemplos ilustrativos).

Por otra parte, la descarbonización y la digitalización deben enmarcarse en el modelo de economía circular (EC), que tiene como objetivos, frente al modelo de economía lineal: (i) mantener el valor de los productos, los materiales y los recursos (agua, energía) en la economía el mayor tiempo posible, (ii)

⁶ En este trabajo se recogen estimaciones de la demanda de materias primas minerales procedentes de diferentes fuentes (i.e., Banco Mundial, IEA o Comisión Europea), cuyo alcance y metodología no coinciden necesariamente, por lo que estos datos de demanda varían según las fuentes. En el texto se ha tratado de indicar con precisión las fuentes empleadas en cada caso.

En el caso del modelo del Banco Mundial (The World Bank, 2020) los supuestos clave incluyen, entre otros, escenarios de mitigación de emisiones basados en las perspectivas de la Agencia Internacional de la Energía e IRENA, sobre tecnología y subtecnologías necesarias para alcanzar esos escenarios y los minerales necesarios para instalar un megavatio de electricidad o un megavatio-hora de almacenamiento para cada tecnología incluida en el modelo.

⁷ El término Industria 4.0 fue acuñado por el presidente de la Academia Alemana de Ciencias e Ingeniería (ACATECH), Henning Kagermann, y presentado por primera vez en la Feria de Hannover en el año 2011.

reducir al máximo la generación de residuos en todo el proceso productivo y (iii) convertir los residuos en un recurso. Cabe señalar que el modelo de economía circular se extiende a lo largo del ciclo de vida del producto y de las materias primas con que se produce (desde la extracción y transformación de la materia prima con la que se fabrica cada producto hasta el consumo y gestión de los residuos una vez terminada su vida útil), aspecto este que cobra especial relevancia en el caso de la actividad extractiva de materias primas minerales y que se tratará más adelante, en particular, en el capítulo sexto.

Finalmente, pero no por ello menos importante, los procesos de elaboración de componentes y equipos para la descarbonización y digitalización deben realizarse, ya desde la extracción de materias primas minerales, en términos de sostenibilidad (compatibilidad con el medio ambiente, crecimiento económico y beneficio social).

Teniendo en cuenta que una economía descarbonizada y digitalizada plantea importantes diferencias frente a la situación actual en términos de necesidades de materias primas minerales, en especial de minerales metálicos, el fin de este capítulo es, analizar el papel que tienen las materias primas minerales en relación con los objetivos de descarbonización y digitalización de la economía. En capítulos posteriores se abordarán los aspectos relativos a la producción de estas materias primas minerales, así como los elementos clave del modelo de economía circular y digitalización para la cadena de valor de la minería y la metalurgia.

2. Descarbonización y digitalización

2.1. Descarbonización. La transición energética

Como se ha comentado previamente, debido a que actualmente la producción y el consumo de energía son responsables del 73,5 % de las emisiones de GEI, es imprescindible modificar el actual modelo energético y adaptarlo a los nuevos objetivos de descarbonización.

El Gráfico 1 recoge el origen de las emisiones de GEI por sectores. Centrándose en las emisiones de GEI vinculadas a la generación y consumo de energía cabe destacar: (i) en el sector de transporte el principal emisor es el transporte por carretera, (ii) en relación con la edificación, la emisión de GEI se encuentra repartida entre el sector residencial y el comercial y (iii) en la industria, la fabricación de hierro y acero, junto con la industria petroquímica y del cemento, son los principales agentes emisores.

La necesidad de descarbonizar la economía implica modificar, profunda y estructuralmente, el sistema energético actual, en las dimensiones de generación y consumo, lo cual da lugar a lo que se conoce como transición energética. De acuerdo con Smil (2010) no existe una definición única del término transición energética, aunque, en general, se emplea para describir el cambio en la composición en la estructura del suministro de energía primaria o el cambio gradual de un modelo de aprovisionamiento. Según O'Connor (2010) sería un conjunto significativo de cambios en los patrones de uso de la energía en una sociedad, con implicaciones en los recursos, los vectores energéticos, los sistemas o equipos de conversión de la energía y los servicios.

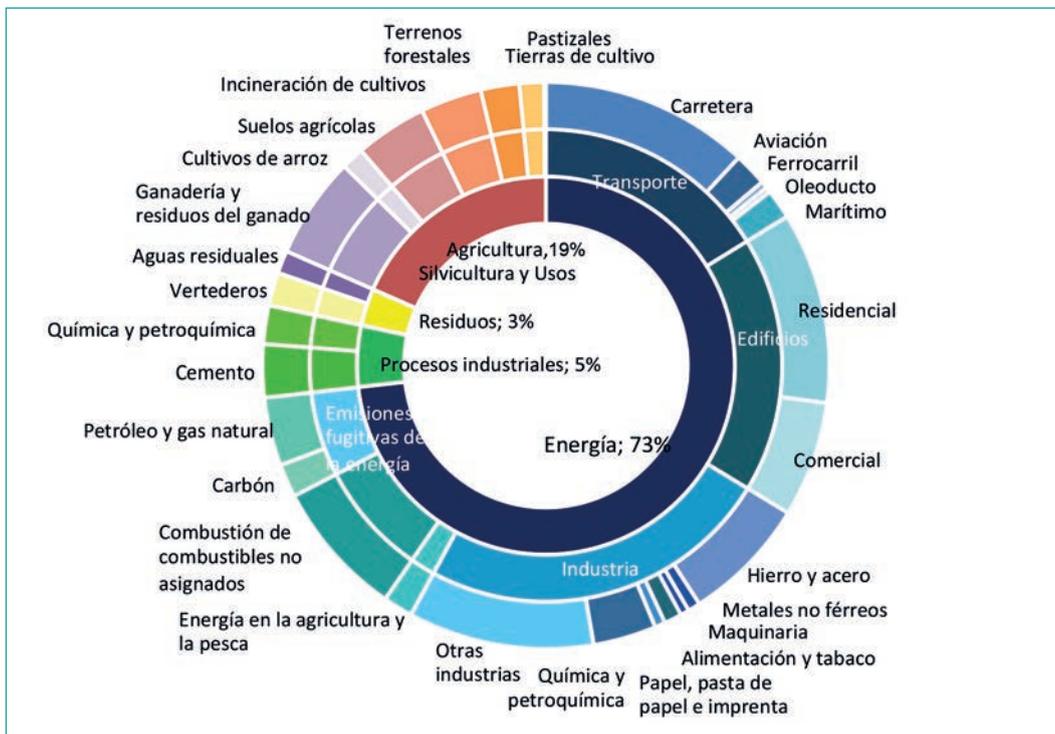


Gráfico 1. Origen de las emisiones internacionales de GEI por sector. Fuente: traducido y reelaborado por los autores a partir de (Ritchie, 2020).

Siguiendo esta concepción, Hirsh y Jones (2014) y Nordensvärd y Urban (2015) consideran que las transiciones suponen un cambio en el uso de los combustibles (Miller et al., 2015) e incluyen en la definición de transición energética no solo el cambio en las fuentes energéticas para la producción de energía, sino también en las tecnologías empleadas para su explotación.

Algunos estudios adoptan un punto de vista más amplio, abarcando los cambios en la tecnología, así como la resultante interrelación entre proveedores, distribuidores y usuarios finales, junto con los reguladores, los comercializadores, etc. (Araújo, 2014); de manera que resulta claro junto con el papel de las tecnologías para acelerar el proceso, la necesidad de combinar el mercado con los desarrollos técnicos o energéticos asociados (Álvarez y Ortiz, 2016).

Todos estos cambios orientados hacia la descarbonización requieren esfuerzos políticos estratégicos (Rogge, et al., 2017); y se necesita una multiplicidad de instrumentos para fomentar transiciones exitosas (Hood, 2011). En este sentido, el actual proceso de transición energética tiene una serie de características propias y que, en cierta medida, la diferencian de las transiciones energéticas pasadas.

La transición energética, en primer lugar, está siendo promovida de forma especialmente activa por acuerdos internacionales promovidos por la Organización de Naciones Unidas (ONU), los Gobiernos de los Estados e instituciones públicas. En segundo lugar, las transiciones energéticas que tienen lugar en las economías grandes y a escala mundial, como es el caso, han sido inherentemente prolongadas en el tiempo (Smil, 2010). Habitualmente han tardado décadas en completarse y conforme mayor ha sido el grado de dependencia de una fuente de energía, mayor ha sido la duración en el uso de las fuentes preexistentes y, por tanto, mayor tiempo ha llevado su sustitución. Ello se ha debido, entre otros factores, al tiempo que transcurre desde el descubrimiento de una nueva fuente de energía y su aplicación industrial comercialmente viable. Sin embargo, el

reto al que se enfrenta el mundo en la actualidad es transitar hacia una economía baja en carbono o con emisiones netas nulas, en un plazo de aproximadamente 30 años, cuando todavía no se ha producido el desarrollo de algunas alternativas tecnológicas o energéticas a escala industrial o comercial o no son todavía competitivas. En tercer lugar, hasta ahora, las transiciones energéticas no pretendían suprimir totalmente aquellas energías con precios o costes reducidos u otras ventajas (Álvarez y Ortiz, 2016).

Tras las consideraciones anteriores, la cuestión ahora es cómo se va a abordar el tránsito a un sistema energético con neutralidad climática y el coste que ello va a tener en términos de necesidades de materias primas minerales (convencionales, de uso habitual, o nuevas), dado que las nuevas tecnologías de energías renovables requieren materias primas minerales que suponen una parte importante de su estructura de costes (IEA, 2021).

2.1.1. Objetivos de descarbonización

El cambio climático requiere aplicar tanto soluciones coordinadas a todos los niveles como una intensa cooperación internacional que permita a los países avanzar hacia una economía con bajas emisiones de carbono. Con el fin de abordar el cambio climático y sus efectos negativos, 197 países adoptaron el Acuerdo de París en la COP21, el 12 de diciembre de 2015 (Naciones Unidas, 2021).

Este acuerdo es el primero de carácter universal y jurídicamente vinculante sobre el cambio climático para aquellos Estados Parte que lo ratifican, y establece un marco global para reducir de forma sustancial las emisiones mundiales de GEI, con el objetivo de limitar el calentamiento global por debajo de los 2 °C y prosiguiendo los esfuerzos para preferiblemente limitarlo a 1,5 °C, tomando como referencia los datos de niveles preindustriales. También aspira a reforzar la capacidad de los países para hacer frente a los efectos del cambio climático y a apoyarlos en sus esfuerzos. El tratado entró en vigor menos de un año después y, a febrero de 2023, 194 partes (193 países más la Unión Europea) lo habían firmado.

El Acuerdo de París tiende un puente entre las políticas actuales y la neutralidad climática, para lo que se deben realizar reducciones de acuerdo con los mejores conocimientos científicos disponibles, lo antes posible, de las emisiones de GEI. Además, se reconoce la necesidad de lograr un equilibrio en la segunda mitad del siglo entre las emisiones y las absorciones⁸. Como contribución a los objetivos del acuerdo, los países han presentado planes nacionales integrados de acción por el clima. Aunque los planes no bastarán para alcanzar los objetivos de temperatura acordados, el Acuerdo traza el camino para acciones futuras (Naciones Unidas, 2021).

El Código normativo de Katowice, que fue adoptado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Clima (COP24) en diciembre de 2018, recoge el conjunto de normas, directrices y procedimientos comunes detallados que ponen en práctica el Acuerdo de París. Abarca todos los ámbitos clave, incluidos la transparencia, la financiación, la mitigación y la adaptación, y ofrece flexibilidad a las Partes que la necesitan a la luz de sus capacidades, al tiempo que les permite aplicar e informar sobre sus compromisos de manera transparente, completa, comparable y coherente.

La Cumbre del Clima de Chile en Madrid (COP25) de 2019, concluyó con la adopción de un acuerdo, denominado "Chile-Madrid Tiempo de Actuar", que sienta las bases para que, en 2020, los países presen-

⁸ Es decir, la retirada de CO₂, por ejemplo, mediante la captura o los sumideros naturales.

taran sus compromisos más ambiciosos de reducción de emisiones (NDC, por sus siglas en inglés) con el fin de responder a la emergencia climática. La COP 26 de Glasgow, que se celebró un año más tarde como consecuencia de la pandemia, se cerró con una serie de acuerdos entre ellos, (i) reducir las emisiones de GEI para contener el aumento de temperatura en 1,5 °C, (ii) la revisión de los planes de reducción de emisiones de los países en 2022 (adelantando en tres años lo planteado), (iii) la reducción de manera progresiva y gradual del carbón y las subvenciones ineficientes a los combustibles fósiles, (iv) aumento de la ayuda financiera a los países en desarrollo para la adaptación al cambio climático y (v) reducción de las emisiones de metano en un 30 % hasta 2030.

La COP 27, que se celebró en Egipto, cerró un acuerdo mundial para proporcionar financiación por pérdidas y daños a los países vulnerables duramente afectados por los desastres climáticos. Asimismo, se produjeron avances en materia de adaptación, para avanzar en el Objetivo Mundial de Adaptación.

La Unión Europea se ha mantenido a la vanguardia de los esfuerzos internacionales por combatir el cambio climático, habiendo sido sus Estados miembro de los primeros países en firmar el Protocolo de Kioto, jugando un papel fundamental para alcanzar el Acuerdo de París y para seguir desempeñando un papel de liderazgo mundial con posterioridad.

En 2019, la Comisión Europea publicó el Pacto Verde Europeo (European Commission, 2019), un documento que contempla un plan de acción concreto y ejecutivo para impulsar un uso eficiente de los recursos mediante el paso a una economía limpia y circular, restaurar la biodiversidad y reducir la contaminación. El Pacto Verde Europeo se convierte así en la Hoja de ruta para dotar a la UE de una economía realmente sostenible, que transforme los retos climáticos y medioambientales en oportunidades reales.

En diciembre de 2020, la UE presentó sus contribuciones a nivel de cada Estado miembro, actualizadas y mejoradas, con el objetivo de reducir las emisiones de GEI al menos un 55 % de aquí a 2030 respecto a los niveles de 1990, así como información para facilitar la claridad, la transparencia y la comprensión de las contribuciones determinadas a nivel nacional. Con esto, la UE se fija unos objetivos aún más ambiciosos con arreglo a su marco más amplio en materia de clima y energía para 2030 (Consejo de la UE, 2020), porque la contribución determinada a nivel nacional inicial de la UE en virtud del Acuerdo de París consistía en el compromiso de reducir las emisiones de GEI al menos un 40 % para 2030 con respecto a las de 1990.

Debido al impacto que el cambio climático tendrá sobre la sociedad, la economía y el medio ambiente (Wade, 2016), una gran parte de los Gobiernos de todo el mundo están fijando objetivos ambiciosos de descarbonización (emisiones netas nulas en 2050 a más tardar⁹, salvo en el caso de China, que lo establece en 2060 e India en 2070), con el fin de alcanzar la meta del Acuerdo de París.

A modo de resumen, la Tabla 1 recoge los principales objetivos en materia de descarbonización indicados en los párrafos previos, incluyéndose los objetivos marcados en España, recogidos en el Plan Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC) (Miteco, 2020), y la Ley de Cambio Climático y Transición energética.

⁹ El presidente surcoreano Moon y el primer ministro japonés Yoshihide Suga afirmaron que sus países también se comprometían con el objetivo de cero emisiones netas para 2050 (Agenda Pública, 2020). En abril de 2021, el presidente de los Estados Unidos se comprometió a reincorporar a su país al Acuerdo de París tras su salida años antes, así como a reducir las emisiones de GEI del país para el año 2030 entre un 50 % y un 52 % respecto a los niveles de 2005 (Global Energy, 2021). En total, los países que representan más del 70 % del producto interior bruto (PIB) mundial se han comprometido a alcanzar emisiones netas nulas en 2050 (IEA, 2021). Estos suponen, además, el 55 % de las emisiones de GEI totales (Agenda Pública, 2020).

Ámbito	Reducción de emisiones GEI (respecto a 1990)		Mejora de la eficiencia energética	Cuota de energías renovables en consumo final		Edificios de consumo casi nulo	
	2030	2050	2030	2030	2050	Dic. 2018	Dic. 2020
UE	55 %	80 % ¹⁰	32,5 %	45 %		Edificios nuevos públicos	Todos los edificios nuevos
España, PNIEC	23 %		39,5 %	42 % 74 % en el mix eléctrico		Mejora de la eficiencia energética (envolvente térmica) de 1.200.000 viviendas a 2030	
España. Ley de Cambio Climático y Transición energética	23 %		35 %	35 %	100 % del sistema eléctrico		

Tabla 1. Principales objetivos de energía y clima en Europa y España. Fuente: elaboración propia de los autores.

2.2. Digitalización de la economía

Como se ha indicado previamente Industria 4.0 es uno de los términos empleados para referirse al proceso de digitalización de los procesos productivos, empleando para ello las tecnologías de información y comunicación. En la Figura 1 se recoge la relación de las TIC más relevantes en la actualidad y las funciones que tiene cada tecnología en los procesos productivos.



Figura 1. Funciones en los procesos productivos de diferentes TIC. Fuente: traducido por los autores de (European Commission, 2020b).

La digitalización es, como la transición energética, un proceso de cambio con repercusión a nivel mundial, aunque con diferente nivel de desarrollo en cada país. La importancia que tiene la digitalización en la economía de un país es determinante para su crecimiento económico, como se puede observar en el Gráfico 2 que correlaciona el índice de digitalización y el PIB per cápita para diferentes países. Tal como se observa en dicho gráfico, España se encuentra por detrás de países como Alemania, Francia, Suecia, el Reino Unido o Estados Unidos, entre otros, en cuanto a la implantación de la tecnología digital.

¹⁰ El objetivo de descarbonización implica alcanzar neutralidad climática en 2050.

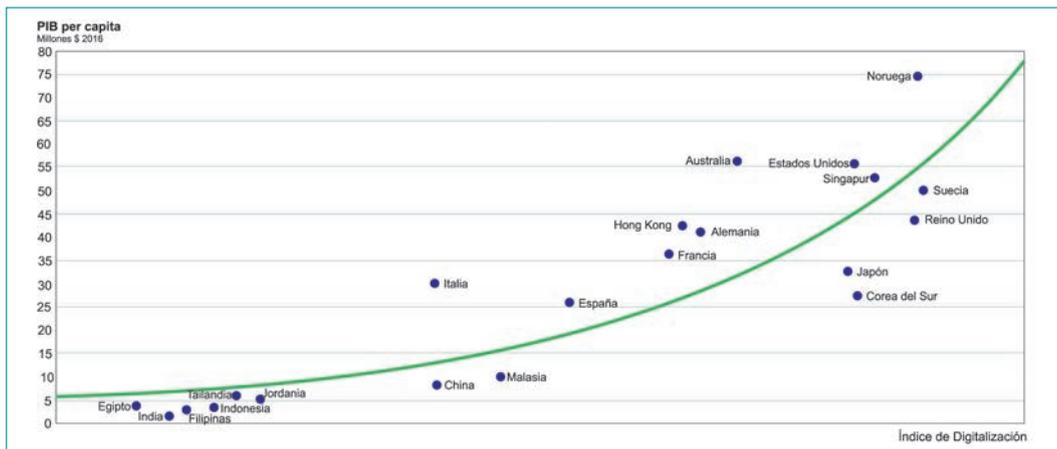


Gráfico 2. Correlación entre el grado de digitalización y el PIB per cápita de diferentes países. Fuente: (INCOTEC, 2020).

En relación con la digitalización en España y su situación en el contexto de la Unión Europea se presenta en el Gráfico 3 el Índice de Economía y Sociedad Digital 2020 (*Digital Economy Society Index, DESI*). Este indicador es un índice compuesto, que analiza el avance digital en las cinco dimensiones que lo componen, y que permite un seguimiento de la evolución de los Estados miembros de la Unión Europea en la competitividad digital. Estos cinco indicadores son: (i) conectividad, (ii) capital humano, (iii) uso de internet, (iv) integración de la tecnología digital y (v) servicios públicos digitales. En 2021, las dimensiones se redujeron a cuatro, desapareciendo la de uso de internet (European Commission, 2022a). Sobre la base del índice estimado en 2022, España ocupaba la séptima posición de los Estados miembros de la UE.

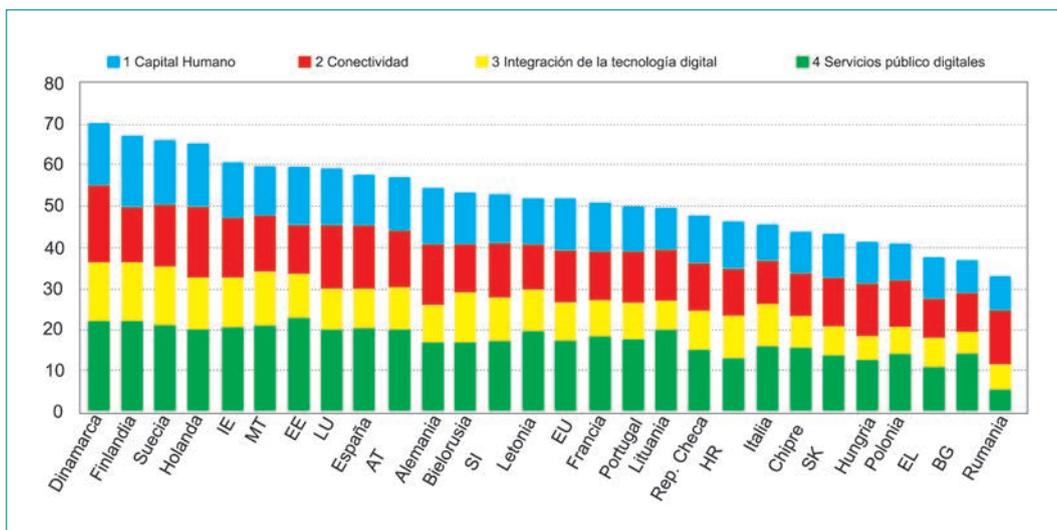


Gráfico 3. Índice de Economía y Sociedad Digital de los países de la UE en 2022. Fuente: traducido y reelaborado por los autores de (European Commission, 2022a).

La Unión Europea ha apostado decididamente por el proceso de transformación digital de la industria. Como evidencias se puede citar la comunicación de la Comisión Europea, de abril de 2016, titulada "Digitalización de la Unión Europea. Aprovechar todas las ventajas de un mercado único digital" o el informe del Parlamento Europeo, de mayo de 2017, sobre la digitalización de la Unión Europea, entre otros. Estos informes identifican los beneficios que tiene la digitalización para las personas (contribuye a que la tecnología mejore su vida cotidiana), para las empresas (capacitándolas para nacer, crecer, innovar y competir de forma justa) y para el medio ambiente (al contribuir con las tecnologías digitales a alcanzar la neutralidad climática). En relación con el potencial económico de la digitalización de la industria se estima que será globalmente del orden de 3 a 4 billones de euros (millones de

millones) hasta el año 2025, mientras que a nivel europeo alcanzaría una cifra anual de entre 375 y 415 mil millones de euros.

Sin embargo, cabe indicar que la digitalización también entraña riesgos. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), en España el 25 % de personas trabajadoras adultas carece de competencias digitales, frente al 15 % del conjunto de la OCDE, de ahí la importancia de la formación para adecuar la capacitación profesional a la demanda futura del mercado de trabajo y transformar la digitalización en una oportunidad en lugar de ser percibida exclusivamente como un riesgo. Por otra parte, este mismo organismo estima que el 12 % de los puestos de trabajo en España estarían en riesgo alto por automatización y otro 20 % sufriría cambios considerables debido a esta.

Asimismo, los problemas en la cadena de suministro de circuitos electrónicos semiconductores (chips) a escala mundial ha forzado el cierre temporal de fábricas de diferentes sectores (por ejemplo, del automóvil) y una caída de la oferta de sus productos. Ello ha puesto de manifiesto tanto la importancia de los semiconductores para la industria como la gran dependencia en un reducido grupo de fabricantes de chips.

Para garantizar el liderazgo digital en 2022 la Comisión propuso un conjunto de medidas para garantizar la seguridad de suministro, la resiliencia y el liderazgo tecnológico del territorio en las tecnologías y aplicaciones de semiconductores. Como resultado, se está desarrollando una Ley Europea de Chips que reforzará la competitividad y la resiliencia de Europa y contribuirá a la transición digital y ecológica.

2.2.1. Objetivos de digitalización

Los objetivos que se plantea la UE para 2030 en términos de digitalización (Unión Europea, 2021) se recogen en la Tabla 2. Estos están relacionados con: (i) capacidades de la ciudadanía, (ii) infraestructuras digitales, (iii) empresas y (iv) servicios públicos.

Temática	Objetivos
Capacidades digitales de la ciudadanía	<ul style="list-style-type: none"> - Contar con 20 millones de personas especialistas en TIC con inclusión de convergencia de género - Como mínimo un 80 % de la población adquiere competencias digitales básicas
Infraestructuras digitales seguras y sostenibles	<ul style="list-style-type: none"> - Conectividad: Gigabit para todas las personas - Duplicar la proporción de semiconductores de vanguardia de la UE en la producción mundial - Datos. Computación de borde y la nube: 10.000 nodos frontera de alta seguridad y neutros desde el punto de vista climático - Desarrollar el primer ordenador con aceleración cuántica
Transformación digital de las empresas	<ul style="list-style-type: none"> - Asimilación de la tecnología: utilización de la nube, la Inteligencia Artificial (IA) y los macrodatos por el 75 % de las empresas de la UE - Innovadores: aumento de las empresas emergentes en expansión y la financiación para duplicar los unicornios¹¹ en la UE - Usuarios tardíos: más del 90 % de las pymes alcanzan al menos un nivel básico de intensidad digital
Digitalización de los servicios públicos	<ul style="list-style-type: none"> - Servicios públicos clave: 100 % en línea - Salud electrónica: el 100 % de los ciudadanos tienen acceso a los historiales médicos - Identidad digital: el 80 % de los ciudadanos tienen acceso a la identificación digital

Tabla 2. *Objetivos de la Unión Europea en materia de digitalización. Fuente: (Unión Europea, 2021).*

¹¹ Compañía tecnológica que alcanza un valor de 1.000 millones de dólares en algún momento de su proceso de levantamiento de capital sin cotizar en la bolsa.

En España, España Digital 2026 es la actualización de 2022 de la estrategia lanzada en julio de 2020 como Hoja de ruta de transformación digital del país. La agenda cuenta con diez ejes estratégicos más dos ejes transversales, agrupados en cuatro bloques temáticos, para impulsar proyectos de gran impacto a través de la colaboración público-privada y la cogobernanza del Estado y las Comunidades Autónomas (Tabla 3).

Temática	Objetivos
Infraestructura y tecnología	<ul style="list-style-type: none"> - Conectividad digital: 100 % de la población con cobertura de 100 Mbps en 2025. - Impulso a la Tecnología 5G: En 2026 el 100 % del espectro radioeléctrico esté preparado para el 5G. - Ciberseguridad: incrementar las capacidades de ciberseguridad en España, fomentar el desarrollo del ecosistema empresarial en este sector (industria, I+D+i y talento), y potenciar el liderazgo internacional del país en materia de ciberseguridad. - Economía del dato e Inteligencia Artificial: al menos, el 25 % de empresas usen Inteligencia Artificial y <i>Big Data</i> dentro de cinco años.
Economía	<ul style="list-style-type: none"> - Transformación digital del sector público: impulsar la digitalización de las Administraciones Públicas (Administración General del Estado, Comunidades Autónomas y Entidades Locales), particularmente en ámbitos clave como el Empleo, la Justicia, o las Políticas Sociales, mediante la actualización de las infraestructuras tecnológicas. - Transformación digital de la empresa y emprendimiento digital: acelerar la digitalización de las empresas con especial atención a pymes, micropymes y <i>start-ups</i> y crear las condiciones favorables para el surgimiento y maduración de empresas emergentes de base tecnológica. - Transformación digital sectorial y sostenible: impulsar la transformación digital en sectores estratégicos como el agroalimentario, salud, movilidad, turismo y comercio. A 2026, acelerar la doble transición verde y digital a través de los PERTE y consolidar transformaciones estructurales, sostenibles y perdurables. - España, <i>hub</i> audiovisual: mejorar el atractivo de España como plataforma europea de negocio, trabajo e inversión en el ámbito audiovisual, e impulsar el crecimiento en los diferentes subsectores de la industria.
Personas	<ul style="list-style-type: none"> - Competencias digitales: reforzar las competencias digitales de la fuerza laboral y del conjunto de la ciudadanía, reduciendo las brechas digitales; completar la transformación digital de la educación; garantizar la formación en competencias digitales a lo largo de la vida laboral; y aumentar el porcentaje de especialistas digitales. - Derechos digitales: garantizar los derechos en el nuevo entorno digital, y en particular, los derechos laborales, de los consumidores, de la ciudadanía y de las empresas.
Ejes transversales	<ul style="list-style-type: none"> - PERTE (Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica): impulsar grandes proyectos con capacidad de arrastre para el crecimiento económico, el empleo y la competitividad de la economía española. - RETECH (Redes Territoriales de Especialización Tecnológica): en coordinación con las Comunidades Autónomas se identifican proyectos de alto impacto territorial y económico.

Tabla 3. *Objetivos de España Digital 2026.*
Fuente: (Vicepresidencia Primera del Gobierno; Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, 2022).

Para ello se cuenta con una serie de planes y estrategias: (i) Plan para la conectividad y las infraestructuras digitales, (ii) Estrategia de impulso de la tecnología 5G, (iii) Plan Nacional de competencias digitales, (iv) Plan Nacional de Ciberseguridad, (v) Plan de Digitalización de las Administraciones Públicas, (vi) Plan de Impulso a la Digitalización de pymes, (vii) Plan España Hub Audiovisual de Europa y (viii) Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial.

3. El papel de las materias primas minerales en la descarbonización y la digitalización

Como se ha adelantado en párrafos previos, los cambios tecnológicos planteados por la descarbonización y la digitalización de la economía plantean importantes retos para el abastecimiento de materias primas minerales. Las nuevas fuentes de energía requieren una mayor diversidad de materias primas que las fuentes de energía tradicionales (Valero et al., 2021). Se presenta a continuación qué materias primas minerales se necesitan para diferentes tecnologías y qué cantidades se estiman necesarias para alcanzar la descarbonización y digitalización anteriormente mencionadas¹².

3.1. El papel de las materias primas minerales en la transición energética hacia la descarbonización

En la Figura 2 se presenta una relación de las tecnologías relevantes asociadas a la generación de energía, transporte, distribución y almacenamiento, así como a su consumo. No se trata de una lista exhaustiva, y el análisis se focaliza fundamentalmente en las materias primas minerales para las energías renovables y el almacenamiento eléctrico. De esta manera no contemplan aquellas tecnologías que todavía no tienen suficiente grado de desarrollo (por ejemplo, energía marina como la undimotriz o diseño de cascos de buques especiales para reducir el rozamiento y minimizar el consumo energético). Tampoco se consideran aquellas tecnologías que no se prevé tengan un grado de desarrollo que suponga un cambio en el paradigma energético (por ejemplo, nuevas redes eléctricas).

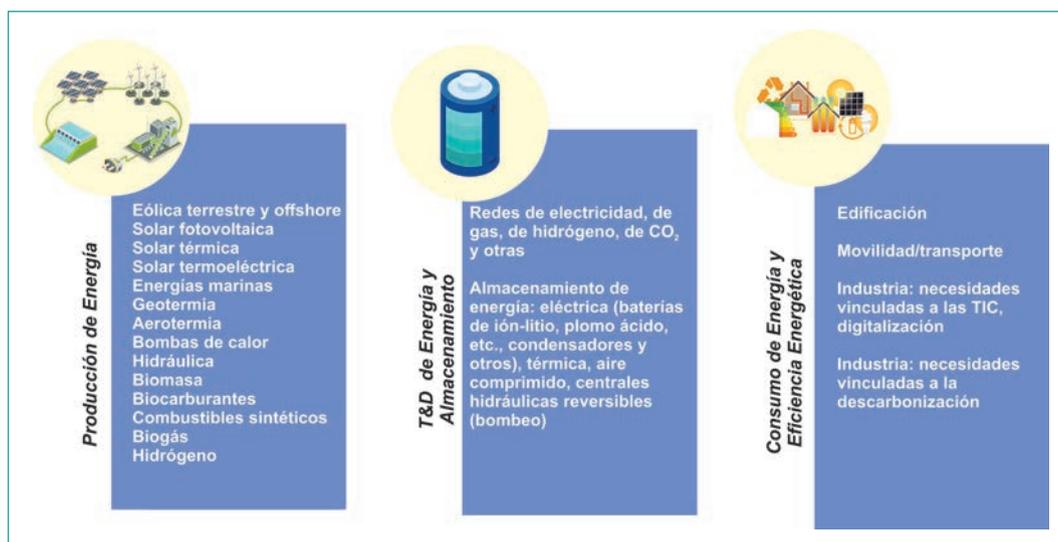


Figura 2. Relación de las principales tecnologías energéticas, transporte y distribución (T&D) y almacenamiento de energía, consumo de energía y eficiencia energética. Fuente: elaboración propia de los autores.

¹² Además de los estudios o informes previamente referidos en este capítulo y otros, un estudio de interés relacionado con la demanda de materias primas minerales ante los cambios tecnológicos actuales es (DERA, 2021). Su alcance es mayor que el de este trabajo, dado que las 33 tecnologías que analiza se presentan según los siguientes clústeres: "movilidad y aeroespacial", "digitalización e Industria 4.0", "tecnologías energéticas y descarbonización", "reciclaje y gestión del agua" y "redes eléctricas y de datos". Estas agrupaciones examinan también tecnologías que no son emergentes, pero que son esenciales, como las redes eléctricas.

A continuación, se identifican, en la Tabla 4, los principales componentes y las materias primas minerales más relevantes necesarias para la fabricación de dichos componentes y equipos asociados a cada tecnología.

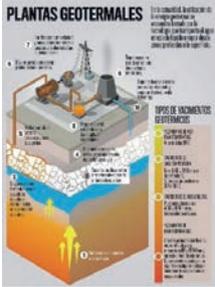
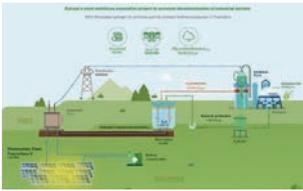
Tecnología	Principales componentes	Principales materias de origen mineral	
Eólica	Buje, rotor, palas, góndola, torre, eje de baja velocidad, multiplicador, eje de alta velocidad, generador, controlador, unidad de refrigeración	Acero (aleación hierro-carbono), acero inoxidable (cromo-níquel), zinc, cobre y aluminio (86 % peso de la turbina), tierras raras (neodimio, disprosio y praseodimio), poliéster y epoxy (palas)	 <p>Fuente: Plataforma Minería Sostenible https://minariasostible.gal/es/inicio/</p>
Infraestructura eólica offshore	Cimentación fija (<i>jackets</i> , tripodes, monopilotes, etc.) Plataforma flotante (monopilar flotante o "spar", plataforma semisumergible, plataforma de apoyo en tensión)	Hormigón, acero	
Solar fotovoltaica	Células fotovoltaicas, inversores de corriente, seguidores solares, cableado eléctrico, estructura	Silicio, aluminio, hierro, acero, acero inoxidable, indio, selenio, galio, cobre, plata, cadmio, telurio (teluro de cadmio, seleniuro de cobre indio y galio)	
Solar térmica	Conector solar, acumulador solar, intercambiador de calor, concentrador solar,	Silicio, cobre, molibdeno, berilio, germanio, indio, galio	 <p>Fuente: (OVACEN, 2013).</p>
Hidráulica	Tubería forzada, presa, turbina hidráulica, generador eléctrico, transformador, líneas eléctricas, compuertas y válvulas hidráulicas, embalse, turbina	Hormigón, acero, cobre	 <p>Fuente: (OVACEN, 2013).</p>
Geotermia	Sondas, colectores, pilotes geotérmicos	Polímeros, acero, hormigón, arenas, cobre, aceros de alta calidad, (níquel, cromo, molibdeno, titanio y manganeso)	 <p>Fuente: (OVACEN, 2013).</p>

Tabla 4. Tecnologías de generación de algunas energías renovables, principales componentes y materias primas minerales empleados en su fabricación y/o construcción. Fuente: elaboración propia a partir de diferentes fuentes.

Biomasa	Sistema de alimentación, cámara de combustión (caldera), intercambiador, sistema de limpieza, unidad de control, silo, chimenea, sistema hidráulico	Acero, acero galvanizado, acero inoxidable, cobre, hormigón	 Fuente: (OVACEN, 2013).
Biocarburantes (bioetanol, biodiésel, biogás, etc.)	Tanques para almacenamiento, bombas de alimentación, de transferencia, digestores, turbina, tuberías	Acero, acero inoxidable, cobre, hormigón	 Fuente: (Campos et al., 2020).
Hidrógeno	Electrolizadores, bombas, tanques	Acero, titanio, hidróxido de potasio o hidróxido de sodio	 Fuente: (Iberdrola, 2021).

En la Tabla 5 se presenta el desglose para diferentes tipos de baterías, componente fundamental de la transición energética y donde el diseño definirá las necesidades de las principales materias primas minerales necesarias¹³.

Tabla 5. Principales tecnologías de almacenamiento de energía, componentes y materiales y materias primas minerales empleados en su fabricación y/o construcción. Fuente: elaboración propia a partir de diferentes fuentes.

Tecnología	Principales materias de origen mineral	
Batería de móvil y ordenador	Litio, cobalto, carbono	 <p>LA MINERÍA Y LAS BATERÍAS</p> <p>La transición hacia una economía verde requiere grandes dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica para su uso en dispositivos móviles, movilidad eléctrica y todo tipo de aplicaciones. Por ello SE HA DISPARADO LA DEMANDA DE METALES ESCASOS como el cobalto, el níquel y el litio.</p> <p>4 Baterías de móvil y ordenador Li Co C</p> <p>5 Baterías de coche eléctrico Co Ni Mn Li Al</p> <p>6 Pilas Alcalinas Zn Mn K</p> <p>7 Pilas de Botón Zn K Ag</p> <p>8 Baterías de almacenamiento industrial Zn V</p> <p>Fuente: Plataforma Minería Sostenible https://minariasostible.gal/es/inicio/</p>
Pilas alcalinas	Zinc, manganeso, potasio	
Batería de coche eléctrico	Cobalto, níquel, manganeso, litio, grafito y aluminio	
Pilas de botón	Zinc, potasio, plata	
Baterías de almacenamiento industrial	Zinc, vanadio	
Baterías LFP (Lithium Ferrum Phosphate)	Litio, fósforo, hierro, aluminio, grafito	

La Tabla 6 recoge los principales componentes y materias primas minerales de algunos medios de transporte (terrestre, marino y aéreo).

Una vez identificadas las materias primas minerales necesarias para la fabricación de las diferentes tecnologías se presentan los aspectos que caracterizan el abastecimiento de estas sustancias.

¹³ Para más detalle sobre el estado actual de las tecnologías de almacenamiento ver (McKinsey & Company, 2021) y (DERA, 2016).

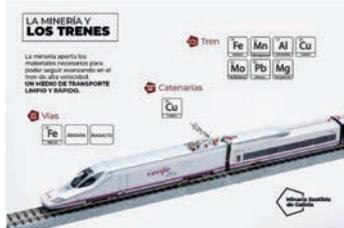
Transporte	Componentes principales	Principales materias de origen mineral	
Vehículo eléctrico + Infraestructura de recarga	Chasis y carrocería, motor, cableado, batería + Contador, estación de recarga, cable de alimentación	Hierro, manganeso, aluminio, magnesio, vanadio, cobre, neptunio, disprosio, litio, cobalto, níquel	 <p>Fuente: Plataforma Minería Sostenible https://minariasostible.gal/es/inicio/</p>
Vehículo híbrido	Cobre, manganeso, magnesio, litio, molibdeno, neodimio, disprosio, niobio, cobalto, plata, terbio, tántalo, lantano, oro, platino A modo de ejemplo ilustrativo para un modelo particular: 60 kg de Cu, 14 kg de Mn, 9 kg de Mg, 6 kg de Li, 630 g de Mo, 530 g de Nd, 130 g de Dy, 110 g de Nb, 70 g de Co, 50 g de Ag, 20 g de Tb, 12 g de Ta, 8 g de La, 7 g de Au, 5 g de Pt (Cullbrand y Magnusson, 2011).		 <p>Fuente: (Cullbrand y Magnusson, 2011).</p>
Carreteras	Asfalto, infraestructura, refuerzos	Sílice, arcilla, áridos, acero, petróleo	 <p>Fuente: Plataforma Minería Sostenible https://minariasostible.gal/es/inicio/</p>
Aviación	Motores, barras y piezas forjadas, alas, caja negra	Titanio, aluminio, vanadio, hierro, cromo, níquel, carbono, magnesio, zinc, aluminio, cobre	 <p>Fuente: Plataforma Minería Sostenible https://minariasostible.gal/es/inicio/</p>
Transporte ferroviario	Vías, catenarias, máquinas, vagones	Hierro, acero, áridos, balasto, cobre, manganeso, aluminio, molibdeno, plomo	 <p>Fuente: Plataforma Minería Sostenible. https://minariasostible.gal/es/inicio/</p>

Tabla 6. Tecnologías de transporte, principales componentes y materiales y materias primas minerales empleados en su fabricación y/o construcción. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de diferentes fuentes.

Con el objeto de tener la base para cuantificar la demanda de materias primas minerales se presenta en la Figura 3 un resumen de los elementos necesarios para la fabricación de las principales tecnologías de generación y almacenamiento de energía. Como se observa, hay elementos que son necesarios en la fabri-

Elementos	Tecnología														
	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar Térmica	Hidráulica	Geotermia	Hidrogeno (Electrolizadores)	Baterías de Móvil y ordenadores	Pilas alcalinas	Batería de coche eléctrico	Pilas de boton	Vehículo eléctrico	Vehículo híbrido	Aviación	Transporte ferroviario	Carreteras
Aluminio	■	■						■			■		■	■	
Plata		■	■						■			■			
Oro												■			
Berilio			■												
Carbono Grafito							■	■					■		■
Cadmio		■													
Cobalto						■	■	■			■	■			
Cromo	■			■	■	■		■			■	■		■	
Cobre	■	■	■	■	■	■		■			■	■		■	■
Disproseo	■										■	■			
Hierro	■	■				■		■			■		■	■	■
Galio		■	■												
Germanio			■												
Indio		■	■												
Iridio						■									
Potasio								■	■						
Lantano						■									
Litio						■	■	■			■	■			
Magnesio											■	■	■		
Manganeso	■			■	■			■	■		■	■		■	
Molibdeno	■	■	■	■	■							■		■	
Niobio												■			
Neodimio	■											■			
Niquel	■	■						■			■		■		
Neptunio											■				
Plomo	■	■		■				■							
Paladio						■									
Praseodimio	■														
Platino								■				■			
Selenio		■													
Silicio		■	■												■
Tantalo												■			
Terbio		■													
Titanio				■	■	■							■		
Vanadio								■		■	■		■		
Zinc	■	■		■		■		■	■	■	■		■		
Zirconio						■									

Figura 3. Elementos necesarios en la fabricación de las principales tecnologías de generación y almacenamiento de energía. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (The World Bank, 2020).

cación de una amplia gama de tecnologías, elementos conocidos como “cross-cut” (transversales), siendo el mejor ejemplo de este grupo el cobre. En el otro extremo hay elementos (grafito y litio, por ejemplo) que se emplean en la fabricación de un número muy reducido de tecnologías y, en particular, de almacenamiento de energía. En este último caso, la demanda de estas sustancias dependerá directamente del grado de desarrollo de la tecnología en cuestión y del grado de intensidad de los minerales o metales de esta.

Además, algunas de estas materias primas minerales son esenciales, aunque no excluyentes, para determinadas tecnologías y tienen en general carácter transversal. Es el caso del Al para la tecnología solar fotovoltaica, las redes eléctricas y las tecnologías de almacenamiento, las tierras raras y el Zn para la tecnología eólica, el Ni y el Cr para geotermia, y el Cu, Co y Ni también para las tecnologías de almacenamiento.

Ahora bien, surge plantear en qué cantidades se necesitarán los elementos anteriores. En este sentido es muy ilustrativa la estimación recogida en el informe del Banco Mundial (World Bank, 2020). Tal como se observa en el Gráfico 4 cuanto más ambicioso es el escenario de descarbonización, en mayor medida crece la demanda de minerales.

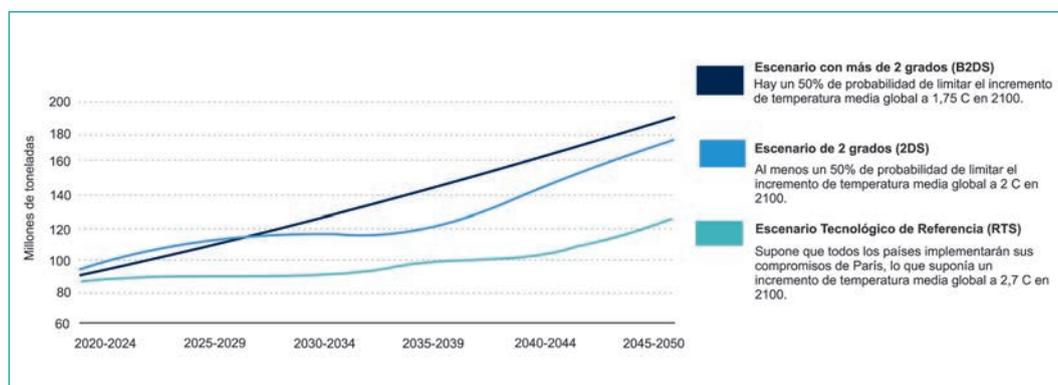


Gráfico 4. Estimación de la demanda media anual de minerales para 2050 para diferentes escenarios de descarbonización propuestos por la Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency, IEA). La estimación de la demanda se realiza considerando la selección de los elementos que se recogen en la Figura 3. Fuente: traducido por los autores de (The World Bank, 2021).

En la Tabla 7 se presenta una estimación de la demanda anual para 2050 de 17 elementos necesarios para tecnologías de la energía y su relación frente a la producción anual en 2018 de cada uno de ellos.

Mineral	Producción anual 2018 (miles t)	Estimación de demanda anual para tecnologías de la energía para 2050 (miles t)	Estimación de la demanda anual proyectada de las tecnologías energéticas en 2050 como porcentaje de la producción de 2018
Aluminio	60.000	5.583	9 %
Cromo	36.000	366	1 %
Cobalto	140	644	460 %
Cobre	21.000	1.378	7 %
Grafito	930	4.590	494 %
Indio	0.75	1.73	231 %
Hierro	1.200.000	7.584	1 %
Plomo	4.400	781	18 %
Litio	85	415	488 %
Manganeso	18.000	694	4 %

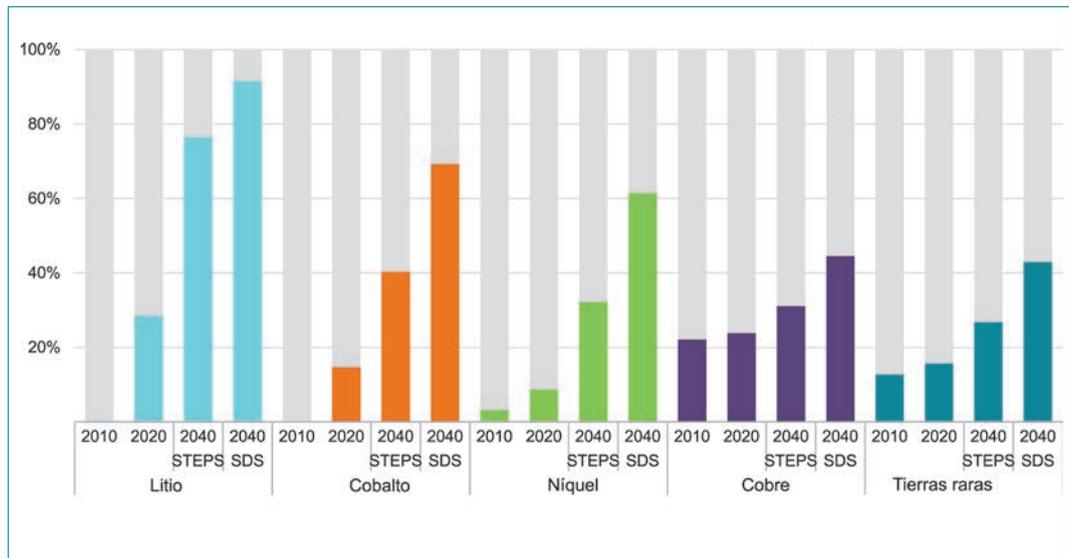
Tabla 7. Estimación de la demanda anual para 2050 de 17 elementos en un escenario 2DS. Fuente: (The World Bank, 2020).

Molibdeno	300	33	11 %
Neodimio	23	8.4	37 %
Níquel	2.300	2.268	99 %
Plata	27	15	56 %
Titanio	6.100	3.44	0 %
Vanadio	73	138	189 %

Como se observa, la demanda anual en el caso de algunas sustancias podría aumentar, en relación con la producción anual de 2018, en casi un 500 % (caso del Co, grafito y Li). En otros casos (Al, Cu, Fe) el porcentaje de demanda anual en 2050 frente a la producción anual en 2018 será reducido, pero la demanda absoluta en 2050 será elevada.

Por su parte, la IEA (2020) estima el porcentaje de demanda de determinadas materias primas minerales para la fabricación de tecnologías de generación de energía limpias respecto a la demanda total de cada materia prima. Como se observa en el Gráfico 5, en los cinco casos (litio, cobalto, níquel, cobre y tierras raras) la demanda relativa, en 2040, aumentaría sustancialmente respecto a los niveles de 2020. El Gráfico 5 recoge la estimación para diferentes escenarios (STEPS, *Stated Policies Scenario* y SDS, *Sustainable Development Scenario*).

Gráfico 5. Porcentaje de demanda de minerales para energías limpias respecto a la demanda total. Las energías limpias consideradas son: solar fotovoltaica, eólica (onshore y offshore), hidráulica, solar térmica, geotermia, bioenergía, nuclear, redes eléctricas, vehículos eléctricos y baterías. Los escenarios se corresponden con STEPS y SDS. Fuente: traducido y reelaborado por los autores de (IEA, 2021).



En el ámbito de la Unión Europea el informe *“Critical materials for strategic technologies and sectors in the UE, a foresight”* (European Commission, 2020b) identifica como críticas un conjunto de materias primas minerales necesarias para la fabricación de tecnologías estratégicas para la UE. En particular, señala como tecnologías estratégicas, las relacionadas con el sector energético (energía eléctrica, térmica y transporte): baterías de ión-Li, células de combustible, eólica, fotovoltaica y vehículos eléctricos (Figura 4).

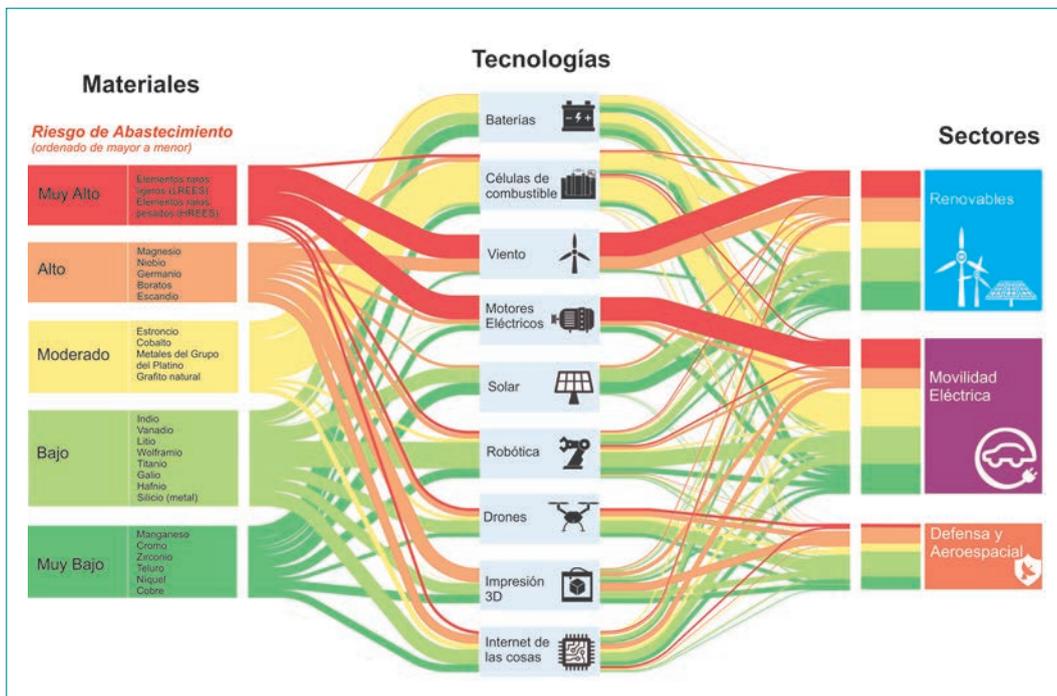


Figura 4. Flujos de materias primas minerales y riesgos de suministro para la UE para las nueve tecnologías identificadas como críticas. Fuente: (European Commission, 2020b).

3.1.1. El papel del reciclaje en la descarbonización

El reciclaje de materiales desempeña un papel necesario para contribuir a que los materiales estén en la economía el mayor tiempo posible, reducir los residuos en el proceso de producción y las emisiones de GEI, siendo uno de los elementos clave del modelo de producción de economía circular¹⁴.

No obstante, cabe señalar algunos aspectos que no están todavía resueltos en relación con el reciclaje; y que justifican la necesidad de seguir extrayendo materias primas minerales (denominadas también materias primas minerales primarias, para distinguirlas de las provenientes del reciclaje o materias primas minerales secundarias) en determinadas cantidades para satisfacer la demanda vinculada a la descarbonización; que se indican a continuación: (i) algunos procesos tecnológicos de reciclaje son demasiado costosos para garantizar su viabilidad económica en la actualidad, (ii) para determinadas sustancias no están desarrolladas las tecnologías de reciclaje o los procesos son muy complejos (por ejemplo cabe citar el reciclaje de la fibra de vidrio de las palas de los aerogeneradores), (iii) algunos productos necesitan fabricarse con materias primas minerales de pureza extrema y no puede emplearse material reciclado (por ejemplo, el cobalto empleado para fabricar baterías), (iv) en algunos procesos de reciclaje hay pérdida de material y no se puede técnica o económicamente recuperar el 100 % del material (por ejemplo, el litio de las baterías ión-litio) y (v) la disponibilidad de chatarra no es suficiente para cubrir toda la demanda de aluminio.

En la Tabla 8 se presentan los datos (a nivel mundial) del porcentaje de materiales que se reciclan al final de su vida útil y de material reciclado (secundario) con respecto a la cantidad total de material que se emplea como materia prima (conjunto de material primario y secundario). Como se observa, aun cuando se pudiera reciclar el 100 % de material al final de su vida útil, rara vez se alcanzaría el 100 % de fabricación de un producto nuevo a partir solo de material reciclado. Este es el motivo por el que seguirá siendo necesario extraer determinadas cantidades de materias primas minerales *primarias*.

¹⁴ Para más detalle ver capítulo 6.

Metal	Porcentaje material reciclado al fin da vida útil (End Of Life)	Porcentaje de material reciclado sobre el total
Aluminio	42 %-70 %	34 %-36 %
Cobalto	68 %	32 %
Cobre	43 %-53 %	20 %-37 %
Litio	<1%	<1 %
Níquel	57 %-63 %	29 %-41 %
Oro	80 %-85 %	
Platino/Paladio	60 %	
Plata	50 %	
Cromo	30 %-40 %	
Zinc	30 %-40 %	

Tabla 8. Algunos datos sobre reciclaje. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (IEA, 2021) y (The World Bank, 2020).

3.2. El papel de las materias primas minerales en la digitalización

Se presenta a continuación el papel y la relevancia que tienen las materias primas minerales en la fabricación de los equipos y sistemas que constituyen las tecnologías habilitadoras de la digitalización¹⁵ (entre ellas sensores, IoT, sistemas ciberfísicos, conectividad, realidad aumentada, simulación y robótica colaborativa). La Tabla 9 recoge los principales elementos que se necesitan para fabricar las TIC.

Tabla 9. Principales elementos necesarios para fabricar TIC. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (European Commission, 2020b) y (UNCTAD, 2020).

Elemento	Uso en TIC
Antimonio (Sb)	Componente para aleación en baterías de plomo, retardante de llama
Berilio (Be)	Contactos eléctricos, satélites de comunicación
Boro (B)	Dopante en semiconductores, imanes permanentes para discos duros
Bromo (Br)	Retardante de llama en cajas de plástico para teléfonos
Cesio (Cs)	Componente de células fotoeléctricas
Cromo (Cr)	Aleaciones
Cobalto (Co)	Baterías recargables, discos duros, semiconductores, circuitos integrados
Cobre (Cu)	Conexiones eléctricas (cables, conectores, circuitos impresos)
Galio (Ga)	Circuitos integrados, LED, células fotovoltaicas, semiconductores
Germanio (Ge)	Vidrio de fibra óptica, tecnologías de infrarrojos
Oro (Au)	Contactos eléctricos (relés, interruptores), juntas de soldadura, conexiones

¹⁵ Para más detalle sobre las tecnologías habilitadoras de la digitalización consultar el Anexo 2.

Grafito (C)	Baterías recargables, producción de grafeno
Helio (He)	Gas de protección
Indio (In)	Pantallas
Tierras raras	Imanes para micrófonos, altavoces y discos duros, pantallas, LED, láser, placas de circuitos, tecnologías de almacenamiento de memoria
Plomo (Pb)	Soldadura
Litio (Li)	Baterías recargables
Magnesio (Mg)	Aleaciones para móviles
Manganeso (Mn)	Baterías recargables, tecnologías de almacenamiento de memoria
Níquel (Ni)	Micrófonos, protección de conexiones eléctricas
Niobio (Nb)	Aleaciones
Paladio (Pd), Platino (Pt), Rodio (Rh), Osmio (Os) e Iridio (Ir)	Aleaciones, condensadores cerámicos multicapa, pantallas
Selenio (Se)	Células fotovoltaicas
Silicio (Si)	Circuitos integrados y componentes electrónicos en general
Plata (Ag)	Componentes microelectrónicos, aleaciones para soldaduras, contactos eléctricos, circuitos impresos
Tántalo (Ta)	Condensadores
Telurio/Teluro (Te)	Células fotovoltaicas
Estaño (Sn)	Soldaduras
Tungsteno/Wolframio (W)	Materiales dieléctricos, filamentos
Vanadio (V)	Baterías de flujo

Como ejemplos ilustrativos de los elementos necesarios para fabricar TIC cabe presentar dos tecnologías de uso común: ordenadores y smartphones. La Tabla 10 recoge esta información y sus componentes (condensadores, pantallas, etc.).

Tecnología	Componentes principales	Tecnología
Ordenador	Un ordenador puede dividirse, de forma simplificada, en parte estructural y funcional. Los materiales para fabricar la parte estructural (Al, Sn, Ni, acero, Mg, Pb) tienen amplias aplicaciones en otros ámbitos y el uso en ordenadores es muy pequeño en comparación con otros usos. Los elementos funcionales son muchos y se emplean en cantidades pequeñas.	<p>LA MINERÍA Y LOS ORDENADORES</p> <p>El motor que impulsa el disco duro tiene imanes hechos de una aleación de neodimio, hierro y boro. EL NEODIMIO POSEE LA MAYOR FUERZA MAGNÉTICA jamás medida por humanos por lo que los motores fabricados con esta aleación son muy potentes para su tamaño.</p> <p>Cuerpo: Fe, C, S, Al, Si</p> <p>Soldaduras: Cu, Sn, Ag, Bi</p> <p>Batería: Li</p> <p>Pantalla: Eu, Tb, Ga, As</p> <p>Electrónica: Si, As, B</p> <p>Materiales Cerámicos de Gafas</p> <p>Fuente: (Minería Sostenible de Galicia, 2022).</p>

Tabla 10. Materias primas minerales necesarias para fabricación de ordenadores y teléfonos inteligentes (smartphones). Fuente: elaboración propia de los autores a partir de diferentes fuentes.

En relación con la estimación de la demanda, existe bastante incertidumbre, debido a que: (i) muchas de las TIC son nuevas o están en desarrollo, por lo que probablemente cambiarán en el futuro y (ii) es necesario tener en cuenta que es posible emplear alternativas que pueden proporcionar las mismas o mejores propiedades a un coste aceptable.

Para 2035, DERA (2016) estima: (i) una demanda adicional de cobre de 5,3 Mt para cubrir las necesidades de 42 tecnologías emergentes, de las cuales diez son TIC (como referencia cabe señalar que la demanda total de cobre en 2013 fue de 21 Mt) y (ii) la demanda de litio se estima en cuatro veces la producción de 2013, la de cobalto 45 veces y para los metales del grupo del platino (MGP o PGM) y paladio conjuntamente se estimaría un crecimiento del 50 %.

En el caso de algunos elementos anteriormente mencionados se presenta en la Tabla 12 una estimación de la demanda prevista para 2035.

Elemento	Producción total en 2013 (t)	Demanda para 42 tecnologías en 2013 (% producción total)	Demanda para 42 tecnologías en 2035 (t)	Aumento de la demanda para las 42 tecnologías en 2035 (t)
Ga	350	25	130	40
Ge	145	39	118	62
In	790	29	361	128
Tierras raras (Dy/Tb)	2.300	85	7.400	5.400
Ta	1.300	38	2.070	1.570

Tabla 12. Estimación de demanda en 2035 de algunos elementos empleados en TIC. Fuente: traducido por los autores de (DERA, 2016) recogido en (UNCTAD, 2020).

Una de las principales consecuencias de la digitalización es la enorme cantidad de datos producidos y almacenados en centros de datos, infraestructuras empresariales y dispositivos (PCs, *smartphones*, dispositivos *IoT*), conformando el conjunto de todos estos datos lo que se conoce como “*global datasphere*”, que experimenta un avance enorme, estimándose un crecimiento desde 33 Zettabytes-ZB (10^{21} bytes) en 2018 a 175 en 2025 (Reinsel et al., 2018), lo que supone un aumento de demanda de las materias primas minerales necesarias para fabricar los dispositivos de memoria (Figura 5).

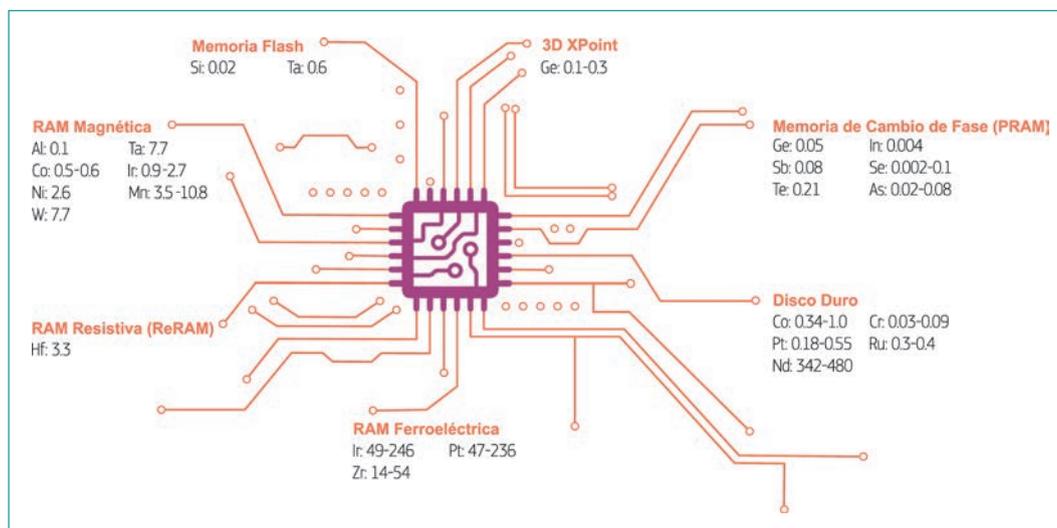


Figura 5. Estimación de factores de intensidad de elementos para diferentes tecnologías de memoria. Las cantidades se representan en toneladas por ZB. Fuente: traducido por los autores de (European Commission, 2020b).

3.2.1. El papel del reciclaje en la digitalización

En relación con el reciclaje de las materias primas minerales que se emplean en la fabricación de las TIC cabe señalar que en 2020 menos del 1 % de los elementos de las TIC fueron reciclados al final de su vida útil. Es importante destacar que el porcentaje de estas sustancias en los dispositivos TIC es muy pequeño. A modo de ejemplo, en un PC el contenido medio de Ga en peso es solo el 0,00004 % (Bakas et al., 2016). Teniendo en cuenta el precio de Galio y su porcentaje en peso, por ordenador serían únicamente 0,02 céntimos de dólar. Por el contrario, el porcentaje en peso de oro en un ordenador es 0,13 %, pero con un precio de 50.000 a 60.000 dólares de Estados Unidos (US\$)/kg supone unos 60 € por kg de ordenador. Estas cifras justifican que se recicle más del 50 % del oro contenido en dispositivos digitales.

Cabe señalar que los incentivos para reciclar los elementos de las TIC son muy escasos y en algunos casos los procesos no están resueltos tecnológicamente. Asimismo, existen pocas tecnologías económicamente viables de reciclaje, de ahí que sea crucial desarrollarlas. Actualmente (ver segunda columna de la Tabla 13) las tasas de reciclaje de estas sustancias al final de la vida útil son muy bajas, casi no llegan al 1 %.

Elemento	Porcentaje material reciclado al fin de la vida útil (EOL, End Of Life) (%)	Contenido medio reciclado en la producción total de metal (%)
Galio	<1	10-25
Germanio	<1	25-50
Indio	<1	25-50
Tántalo	<1	10-25
Berilio	<1	10-25
Cobalto	>50	25-50
Oro	>50	25-50
Litio	<1	>1
Paladio	>50	25-50
Rutenio	10-25	>50
Plata	>50	25-50
Tungsteno	10-25	25-50

Tabla 13. Tasa de reciclaje para elementos empleados en TIC y metales de las pilas de batería. Fuente: traducido por los autores a partir de (UNCTAD, 2020).

4. Conclusiones

Como consecuencia del Acuerdo de París y de los acuerdos de las sucesivas conferencias de las partes (COP), se quiere alcanzar la neutralidad climática en el horizonte de mediados de este siglo. Si bien hay diferencias en los plazos de la descarbonización de algunos países, en Europa el compromiso se ha traducido en regulación vinculante para lograr que las emisiones netas de GEI sean cero en el año 2050.

Este reto plantea la necesidad de proceder a un cambio en la actual estructura de oferta y demanda de energía que se verá positivamente afectado, entre otros, por el avance en el proceso de digitalización de la economía.

Los procesos de descarbonización y de digitalización, actualmente en marcha, se encuentran asociados a tecnologías que van a requerir de abundantes cantidades de materias primas minerales, algunas ya muy utilizadas y otras más novedosas. Una economía descarbonizada y digitalizada plantea importantes diferencias frente a la situación actual, lo que permitirá reducir la dependencia de los combustibles fósiles, pero supondrá la aparición de nuevas y crecientes demandas de materiales y materias primas minerales. En este sentido, se podría plantear la elaboración de un índice de dependencia de materias primas minerales que podría incluir algunos productos intermedios relacionados (concentrados de cobre, chips, etc.).

La demanda de materias primas minerales necesaria, para fabricar las tecnologías vinculadas a la generación, transporte, distribución y almacenamiento de energía aumentará sustancialmente, dependiendo del grado de avance de la descarbonización y la digitalización. Se estiman importantes incrementos de la demanda, de hasta casi el 500 % para 2050 respecto a niveles de producción de 2018 para ciertos elementos o materias primas minerales, especialmente las vinculados a la fabricación de tecnologías de almacenamiento de energía (litio, grafito y cobalto). No obstante, incluso aquellos elementos cuyos aumentos de demanda relativa son menores (por ejemplo, el cobre) se enfrentan a significativos aumentos de la demanda en términos absolutos.

Para satisfacer las necesidades vinculadas a la digitalización será necesario contar con una variedad de materias primas minerales en cantidades crecientes. De los elementos analizados en relación con las TIC (galio, germanio, indio, tierras raras, selenio, tántalo y telurio), solo las tierras raras y el tántalo se extraen como productos primarios en mina. El resto se obtienen como subproductos de otros procesos de producción, por lo que no está optimizada su recuperación y una cantidad importante queda en los residuos, por lo que hay potencialmente sustancias de este tipo en escombreras y acumulaciones de residuos de minas.

Aun cuando en un escenario futuro el porcentaje de reciclaje aumente sustancialmente, la extracción de minerales primarios será necesaria para garantizar el suministro de las materias primas minerales vinculadas a la descarbonización y la digitalización.

Evitar la dependencia de los combustibles fósiles con fuentes renovables de energía puede llevar a una nueva dependencia de las materias primas minerales y de los metales. Por ello es preciso examinar el papel de la minería y la metalurgia en la cadena de valor (que se aborda en los capítulos siguientes), para evitar o mitigar la vulnerabilidad europea referida en la introducción.

3

TECNOLOGÍA MINERA. PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE MINERALES



1. Introducción

Los recursos minerales se encuentran en la corteza terrestre, la parte sólida más superficial de la Tierra, que supone menos del 1 % de la masa terrestre, distribuidos de manera desigual (Valero et al., 2021). Esta está compuesta por una corteza continental de unos 35 km de espesor medio y por una corteza oceánica más delgada, de unos 7 km de espesor. La corteza continental es heterogénea, con una composición media de tipo granodiorítico y está formada por rocas de distinta naturaleza (ígneas, metamórficas y sedimentarias). La corteza oceánica tiene una composición más homogénea y de tipo basáltico. La mayor parte de la corteza terrestre está constituida por ocho elementos que son, por orden de abundancia, oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, sodio, magnesio, y potasio (denominados elementos principales) que se combinan para formar la mayor parte de minerales y rocas. Los elementos minoritarios (conocidos también como *elementos traza*), entre los que se incluyen los metales, están presentes en la corteza en concentraciones medias extremadamente bajas. En la Tabla 14 se muestra el contenido medio de algunos elementos en la corteza terrestre.

Elemento	Abundancia (%)	Cantidad (t) en los 3,5 km de corteza superiores	Elemento	Abundancia (%)	Cantidad (t) en los 3,5 km de corteza superiores
Oxígeno (O)	46,4	10 ¹⁶ -10 ¹⁸	Vanadio (V)	0,014	10 ¹⁴ -10 ¹⁵
Silicio (Si)	28,2		Cromo (Cr)	0,010	10 ¹³ -10 ¹⁴
Aluminio (Al)	8,2		Níquel (Ni)	0,0075	
Hierro (Fe)	5,6		Zinc (Zn)	0,0070	
Calcio (Ca)	4,1		Cobre (Cu)	0,0055	
Sodio (Na)	2,4	Cobalto (Co)	0,0025		
Magnesio (Mg)	2,3	10 ¹⁶ -10 ¹⁸	Plomo (Pb)	0,0013	10 ¹¹ -10 ¹³
Potasio (K)	2,1	Uranio (U)	0,00027		
Titanio (Ti)	0,57	10 ¹⁵ -10 ¹⁶	Estaño (Sn)	0,00020	
Manganeso (Mn)	0,095	Woframio (W)	0,00015		
Bario (Ba)	0,043	Mercurio (Hg)	8x10 ⁻⁶		
Estroncio (Sr)	0,038	10 ¹⁴ -10 ¹⁶	Plata (Ag)	7x10 ⁻⁶	<10 ¹¹
Tierras raras	0,023		Oro (Au)	<5x10 ⁻⁶	
Circonio (Zr)	0,017		MGP (Minerales Grupo Platino: Pt, Os, Ir, Pd, Ru, Rh)	<5x10 ⁻⁶	

Tabla 14. Contenido medio de algunos elementos en la corteza terrestre. Nota: las columnas tercera y sexta recogen las cantidades reales de algunos de los elementos más útiles, hasta una profundidad de 3,5 km. Fuente: traducido por los autores de (Wills y Finch, 2016).

Algunas partes de la corteza terrestre se caracterizan por presentar en algunos elementos una abundancia superior al valor medio que figura en la Tabla 14, formando lo que se denomina un yacimiento mineral. El factor de concentración es el que debe presentar un elemento con respecto a su concentración normal en la corteza terrestre para que resulte explotable o que su explotación sea económicamente viable.

La existencia de un yacimiento mineral dependerá de las condiciones y procesos geológicos a los que se ha visto sometido un mineral (cristalización, erosión, transporte, clasificación, deposición, compactación, etc.). Estas condiciones permitirán que los elementos, presentes en los minerales, se concentren en determinadas zonas de la corteza terrestre, lo que hace que su explotación sea factible.

Los recursos mineros se pueden clasificar en cuanto al mineral a explotar en: (i) minerales metálicos: metales base (cobre, plomo, zinc y aluminio), hierro, metales menores (cromo, vanadio, molibdeno, uranio, wolframio, litio), oro y plata, (ii) combustibles fósiles: carbón siderúrgico y térmico, arenas y pizarras bituminosas, (iii) minerales industriales: empleados en la fabricación de abrasivos, vidrio, cerámica, plásticos, cemento, (iv) materiales de construcción: gravas y arenas y (v) diamantes, piedras preciosas y semipreciosas.

Los minerales contienen los elementos que son objeto de interés. A su vez los minerales se encuentran formando rocas. Así, por ejemplo, el aluminio se obtiene a partir de la bauxita, que es una roca que contiene minerales de aluminio y hierro cuyo contenido de alúmina (Al_2O_3) puede ser superior al 50 %. Por su parte, el cobre se presenta, mayoritariamente, en minerales del grupo de los sulfuros -calcosina (Cu_2S) y calcopirita ($CuFeS_2$), el zinc en la blenda (ZnS) y el plomo en la galena (PbS). Una vez extraídos de la mina, se procesan en plantas mineralúrgicas, concentrando su ley y disminuyendo impurezas, antes de pasar al proceso metalúrgico.

En la naturaleza, los metales (Cu, Zn, Pb, Al...) suelen ir acompañados de otros. Así, por ejemplo, el cobre como se indicó en el párrafo anterior se encuentra en la calcosina (Cu_2S) y la calcopirita ($CuFeS_2$), que pueden contener también plata, oro, arsénico, antimonio, selenio, telurio y otros elementos. A veces esos elementos de acompañamiento constituyen impurezas no deseadas que hay que eliminar (se conocen como elementos penalizantes o contaminantes). Sin embargo, otras veces, por tener más valor que el metal que se quiere obtener (por ejemplo, oro y plata) constituyen subproductos (*by-product*) valiosos que ayudan a rentabilizar el proceso.

La cadena de valor en minería hace referencia a la secuencia temporal operativa de los procesos involucrados en ella, tal como se muestra en la Figura 6, donde se presentan las diferentes fases necesarias para fabricar el material o metal de uso final a partir de los minerales y rocas extraídas mediante la actividad minera, incluyendo las fases de reutilización, reciclaje y rehabilitación.

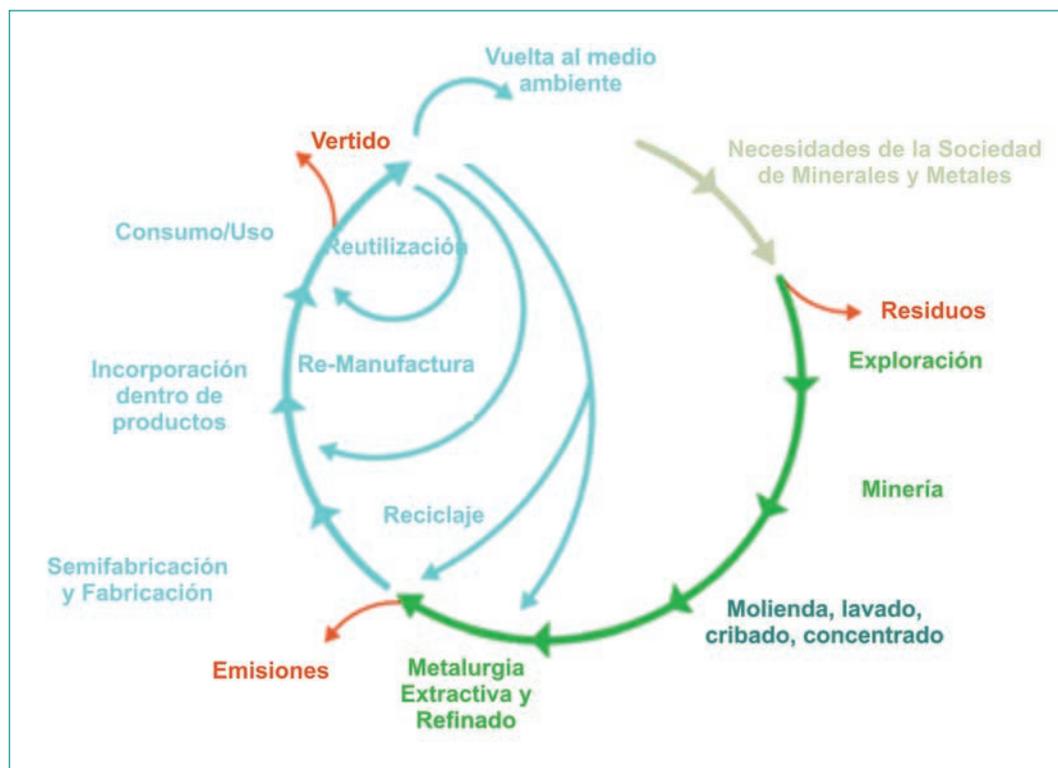


Figura 6. Principales fases del ciclo de la vida de los metales y minerales. Fuente: traducido y modificado por los autores de (ICMM, 2016).

La cadena de valor de los recursos minerales, de su minería y de su metalurgia empieza con la investigación minera (IM) para descubrir y evaluar el yacimiento, seguida del proceso minero, el proceso mi-

neralúrgico y el metalúrgico y los procesos de reciclado, aprovechamiento y reutilización en el contexto de la economía circular. El último punto es el proceso de cierre y rehabilitación de la superficie afectada.

La industria minera, a diferencia de otras industrias, ha de tener en cuenta el agotamiento de los activos minerales, cuyo conocimiento es impreciso antes del comienzo de la extracción. Por lo tanto, es esencial que la industria comunique los riesgos asociados a la inversión de manera efectiva y transparente a fin de obtener el nivel de confianza necesario para respaldar sus actividades. Esta comunicación pública se realiza principalmente a través de Informes Públicos (*Public Reports*).

Las materias primas minerales y los metales se obtienen extrayendo estas sustancias en explotaciones mineras. El desarrollo de un proyecto minero es un proceso generalmente largo y complejo, con un alto coste asociado y de alto riesgo que está formado por una serie de fases sucesivas que definen lo que se denomina el Ciclo de Vida Minero o "*Mining Life Cycle*" y que se describe en el siguiente apartado.

2. Proyecto minero

En esta sección se presentan las fases del Ciclo de Vida Minero que comprenden desde la investigación -que culmina con el descubrimiento de un yacimiento-, la evaluación del yacimiento, el diseño y desarrollo del plan de mina, hasta la fase de extracción (explotación) y la fase de rehabilitación/restauración y post-minería.

En la Figura 7 se muestran las distintas etapas de un proyecto minero y sus duraciones aproximadas. El coste y duración de cada etapa pueden variar mucho de un proyecto a otro, por lo que habitualmente se proporcionan valores medios o referentes. Los estudios técnicos necesarios para llevar a efecto las operaciones mineras son costosos y consumen tiempo. Un proyecto minero, incluyendo todas sus fases hasta llegar al estudio final de viabilidad definitivo, puede tardar varios años en realizarse.



Figura 7. Etapas de un proyecto minero. Ciclo de vida del proyecto. Fuente: traducido por los autores de (ICMM, 2012).

La explotación de un yacimiento mineral es una actividad con alto riesgo económico, que supone inversiones a largo plazo, que a menudo se sustentan en precios sujetos a fuertes oscilaciones de mercado. A

su vez, se producen gastos que solamente se recuperan en caso de que resulte una explotación minera fructífera. La industria minera debe lograr que la extracción de los recursos mineros se realice al mínimo coste posible y teniendo en cuenta que las previsiones de ingresos y gastos permitan prever rentabilidades aceptables para la inversión respetando el medio ambiente.

A lo largo de las fases de un proyecto minero, se requiere la toma de decisiones por parte de todos los grupos implicados (inversores, equipo directivo, organizaciones gubernamentales), por lo que es preciso trabajar con información detallada y clara sobre el proyecto y entender bien los riesgos e incertidumbres asociados. El mercado financiero, a través de las autoridades reguladoras, establece una serie de reglas para controlar la información que las compañías publican a los mercados sobre sus proyectos y la forma en que esta información se hace pública. Por este motivo, existen una serie estándares (*standards*), también denominados códigos o normas, reconocidos por la industria y por los mercados financieros que recogen una serie de definiciones técnicas, clasificaciones, requerimientos y directrices que se utilizan en la realización de los informes públicos de las empresas mineras en relación con todas las etapas del proyecto¹⁷.

2.1. Exploración - Investigación minera¹⁸

La investigación minera es la primera etapa del ciclo minero e involucra una serie de etapas en las que se utilizan técnicas y métodos de prospección muy variados que tienen como objetivo la búsqueda y caracterización de un yacimiento.

Las fases de la investigación minera se recogen de manera simplificada en la Figura 8. Se trata de fases sucesivas, de forma que solamente se aborda la siguiente en caso de que la anterior haya cumplido satisfactoriamente los objetivos previstos.

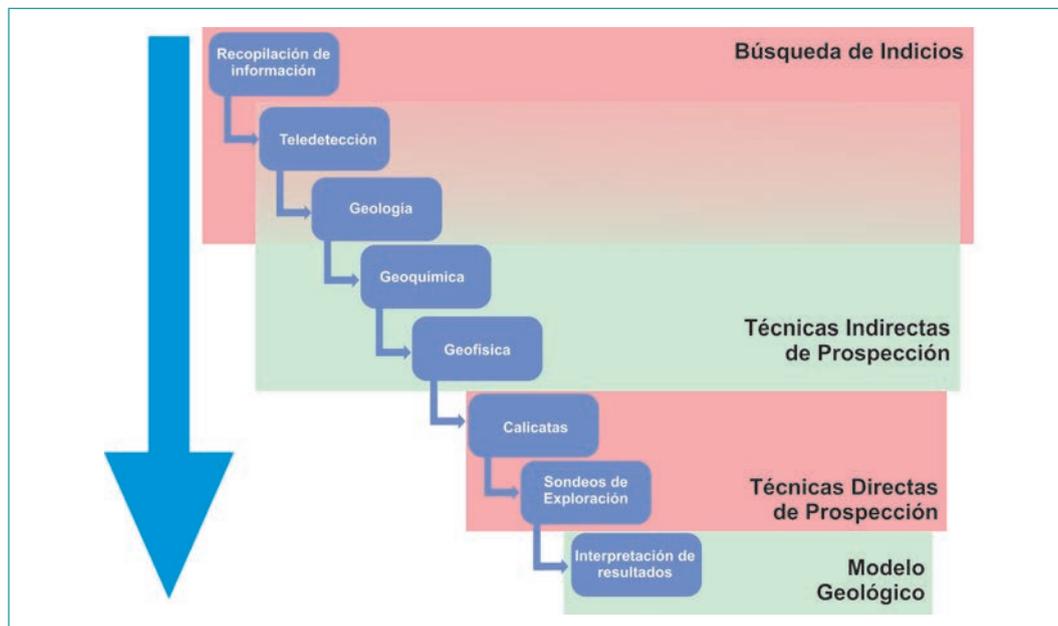


Figura 8. Fases de la investigación minera. Fuente: modificado por los autores de (Castilla y Herrera, 2012).

¹⁷ Los informes técnicos son realizados por profesionales del sector denominados personas competentes (*Competent Person*) o persona cualificada (*Qualified Person*) que toman responsabilidad sobre la correcta clasificación de los recursos y las reservas minerales y de su información al público.

¹⁸ Los temas de investigación minera se tratan desde el punto de vista de la creación de valor en el capítulo 7.

Se comienza con una investigación a nivel regional de una zona determinada, normalmente de gran extensión, hasta llegar a una investigación de detalle. El tiempo y los costes aumentan a medida que se avanza en la investigación, siendo inversamente proporcionales a la superficie investigada o prospectada. A medida que se avanza en la investigación el riesgo disminuye ya que el conocimiento sobre la geología del área de estudio se incrementa.

La investigación minera se inicia con la recopilación de información sobre zonas potencialmente mineralizadas, a través de los estudios geológicos y mapas/cartas metalogenéticos, que normalmente han sido realizados por los servicios geológicos estatales o regionales. En las áreas objetivo se puede usar como ayuda, en estas fases preliminares, la teledetección. Suele ser un trabajo fundamentalmente de gabinete, en el que se cuenta con el apoyo de información bibliográfica, mapas, fotos aéreas, imágenes de satélite, historial minero (explotaciones mineras que han existido en la zona, indicios mineros), etc., y puede incluir el reconocimiento in situ de las zonas de mayor interés, además de la realización de cartografías geológicas de afloramientos de detalle y muestreos puntuales para la identificación de indicios concretos.

Una vez identificadas las posibilidades de la región, se pasa al estudio detallado sobre el terreno. En esta fase se aplicarán las diversas técnicas indirectas disponibles con el objetivo final de confirmar o descartar la hipótesis inicial de existencia de mineralizaciones. Se comienza entonces con la fase de la prospección geoquímica, que se basa en la realización sistemática de análisis químicos. Consiste en la toma sistemática de muestras de sedimentos de arroyos, de rocas, de suelos o de aguas, incluso de plantas, que puedan concentrar elementos químicos relacionados con una determinada mineralización. El objetivo de dichas medidas es localizar anomalías geoquímicas o áreas cuya estructura fuese indicativa de la presencia de mineralizaciones.

El coste de estas técnicas suele ser superior al de las de carácter geológico, ya que implican contar con un equipo de varias personas para la toma y preparación de las muestras y el coste de los análisis correspondientes en laboratorios acreditados. Por ello se aplican cuando la geología ofrece ya información que permite sospechar con fundamento la presencia de yacimientos.

Terminada la fase de la prospección geoquímica se pasa a la prospección geofísica. En esta fase se utiliza toda una gama de técnicas de prospección muy diversas, tanto en coste como en aplicabilidad y que dependen del mineral concreto que se esté investigando. El objetivo es medir variaciones sensibles de las características físicas de la corteza terrestre, ligadas a la existencia de los yacimientos minerales. Se estudia el comportamiento del terreno frente a determinados estímulos. Entre los diversos métodos aplicables se encuentran los recogidos en la Tabla 15: (i) eléctricos, (ii) electromagnéticos, (iii) magnéticos, (iv) gravimétricos, (v) radiométricos y (vi) sísmicos.

Tabla 15. Métodos de prospección aplicables. Nota: Para más detalle ver (López Jimeno et al., 2022). Fuente: elaboración propia de los autores.

Método	Descripción
Eléctricos	Se basan en el estudio de la conductividad eléctrica del terreno (o su inversa, la resistividad), mediante dispositivos relativamente sencillos. Se utilizan para identificar materiales de diferentes conductividades: por ejemplo, los sulfuros y el grafito suelen ser muy conductores.
Electromagnéticos	Se basan en el estudio de otras propiedades eléctricas o electromagnéticas del terreno. Se emplean en la prospección de sulfuros por su mayor cargabilidad.
Magnéticos	Se basan en la medida del campo magnético del terreno, que puede verse afectado por las rocas existentes en un punto determinado, sobre todo si existen minerales como la magnetita o la pirrotina.
Gravimétricos	Se basan en la medida del campo gravitatorio terrestre, que puede estar alterado en sus valores normales por la presencia de determinadas rocas. Esta técnica ha sido utilizada con gran efectividad en la Faja Pirítica Ibérica.

Radiométricos	Se basan en la detección de la radioactividad emitida por el terreno, y se utilizan fundamentalmente para la prospección de yacimientos de uranio, aunque excepcionalmente se pueden emplear para identificar otros elementos o rocas.
Sísmicos	Se basan en analizar el comportamiento (transmisión) de las ondas sísmicas a través del terreno. Se diferencian dos grandes técnicas: la sísmica de reflexión y la de refracción. Solo se utiliza para investigación de recursos de alto valor.

En esta fase se identifican anomalías del terreno que justifiquen estudios posteriores de mayor precisión y que requieren una inversión económica adicional. Se obtienen mapas con la distribución de una cierta propiedad de un suelo o roca. En la Figura 9 se ilustra una investigación geofísica mediante un dron, cuyo uso se va abriendo hueco en la industria durante esta fase por su versatilidad, fácil manejo y escaso impacto sonoro y visual, en contraposición a los vuelos geofísicos tradicionales. Un dron puede llevar un sensor de medidas geofísicas, pero en el caso de la figura lleva una cámara multispectral para la teledetección.

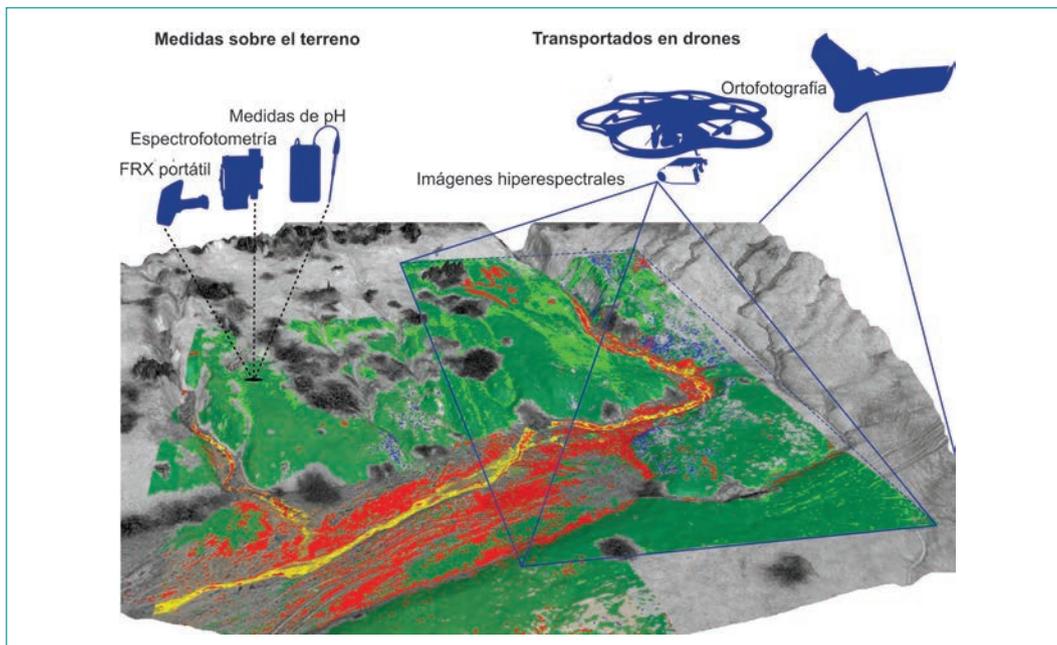


Figura 9. Aplicación de los drones en la investigación minera. Fuente: modificado por los autores de (Jackisch et al. 2018).

En la Figura 10 se ilustra el resultado de la aplicación de drones mostrando anomalías de resistividad.

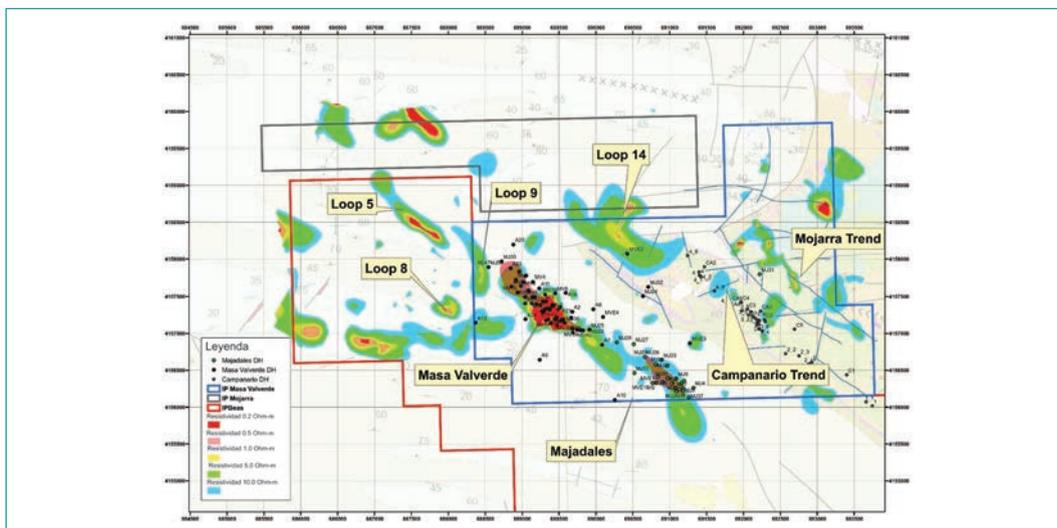


Figura 10. Resultado de la aplicación de drones en la investigación minera. Mapa mostrando anomalías de resistividad obtenidas de un EM SQUID Survey sobre la Masa Valverde y Majadales. Fuente: (CSA Global, 2022).

Una vez detectadas las anomalías geofísicas o geoquímicas, el paso crítico es definir qué valores se consideran "anómalos", para poder identificar si derivan de la existencia de un depósito mineral. Estos valores serán los que servirán como punto de partida para definir la forma, tamaño y valor del depósito. En estas etapas de prospección se manejan un gran número de datos que deben ser correctamente georreferenciados y guardados en sistemas de información geográfica (SIG, GIS), para su correcta representación e integración, con la ayuda de *softwares* comerciales disponibles en el mercado.

A menudo, tras el desarrollo de las fases anteriores se siguen teniendo dudas razonables sobre si lo que se está investigando tiene o no interés minero. Por tanto, para verificar la información generada en fases previas, se recurre a un programa más detallado, que suele ser una campaña de calicatas (zanjas en el terreno de una profundidad de 1-3 m a lo sumo, que permitan visualizar las rocas situadas justo debajo del suelo analizado o reconocido), en la que se obtienen muestras de mineral y a partir de ellas se realizan los ensayos para determinar contenidos en metal o sustancia aprovechable y las características geotécnicas de las rocas.

La perforación de sondeos desde superficie constituye una herramienta muy útil en etapas avanzadas de investigación minera, y permite confirmar o desmentir las interpretaciones realizadas en las fases anteriores. Los sondeos posibilitan la obtención de muestras del subsuelo a profundidades variables, aportando la información más valiosa de que se dispone sobre la mineralización mientras no se llegue hasta ella mediante labores mineras. La perforación de sondeos puede hacerse desde la superficie o desde la explotación subterránea.

Los sondeos pueden ser sin o con recuperación de testigo. Los sondeos sin recuperación de testigo se realizan a rotación con triconos o con martillo en fondo, ambos a circulación inversa. El coste de este sistema es relativamente bajo y con rendimientos de perforación de 10-15 m/h. Con las muestras se realizan ensayos químicos y mineralógicos y sobre los sondeos se realizan testificaciones geofísicas.

Los sondeos con recuperación de testigo son mucho más costosos. Al tener rendimientos mucho menores, 15-20 m/relevo, complementan y validan la información suministrada y permiten la caracterización geotécnica necesaria para el diseño de taludes en explotaciones a cielo abierto y el diseño de cámaras en explotaciones subterráneas.

La realización de sondeos es la etapa más importante del proceso de investigación minera, de manera que la información y evidencias que proporcionan permite localizar y definir el valor económico de una mineralización. En la Figura 11 se muestran partes del ciclo de realización de un sondeo mecánico de exploración minera y el registro fotográfico de cajas de sondeos de testigo de exploración y de las instalaciones donde se realizan labores de descripción (testificación) y muestreo de testigos de sondeo.

Figura 11. Equipo de perforación con recuperación de testigo (izda.) y registro fotográfico de cajas de testigos de sondeos de exploración (centro) y tareas de descripción y muestreo (dcha.). Fuente: (Martínez, 2019) y (Ore Reserves Engineering, (2022).



La etapa de perforación de sondeos para exploración es una etapa que conlleva una inversión económica considerable en cuanto a medios y recursos humanos necesarios. El muestreo y análisis de laboratorio de las muestras obtenidas de los sondeos es una parte fundamental y crítica que requiere el establecimiento de procedimientos de control de calidad (QA/QC: Quality Assurance & Quality Control) de manera que se garantice la representatividad y la calidad de las muestras obtenidas. Los laboratorios seleccionados para el análisis de las muestras deberán ser laboratorios certificados con sistemas de calidad adecuados.

Las campañas de sondeos de exploración cubren zonas amplias del yacimiento para intentar definir su extensión, de forma que la malla de perforación suele ser amplia (100x100m, 200x200m). Si los resultados son positivos, en etapas avanzadas, se realizan perforaciones adicionales de definición a distancias menores (50x50m, 25x25m), con el objetivo de delinear con mayor precisión el yacimiento y confirmar tanto la morfología del cuerpo como la continuidad geológica y la continuidad de la ley.

Con los datos de los sondeos, que se corresponden con su situación espacial y los resultados de los análisis de laboratorio de las muestras recogidas en la campaña de perforación, a través de la interpretación de plantas y secciones geológicas y mediante el uso de *software* minero específico (Studio RM-Datamine, Micromine, Leapfrog, Vulcan, etc.), se procede a la modelización geológica del yacimiento, que se trata más adelante, de la cual se deriva el modelo sólido 3D (Figura 12A). A partir del modelo geológico del yacimiento es posible estimar las siguientes características: (i) cantidad (volumen y tonelaje) de mineral que hay (se conoce como cubicación y se pueden emplear técnicas clásicas de cubicación -secciones, triangulación o polígonos-, o bien usar modelos de bloques, empleando métodos estadísticos y geostatísticos (Figura 12B), (ii) geometría de la mineralización obtenida a partir de datos de sondeos¹⁹ y (iii) calidad del mineral, que en el caso de las menas metálicas se define en base a sus leyes, la presencia o ausencia de elementos penalizantes o bonificadores, así como la forma de ocurrencia del metal.

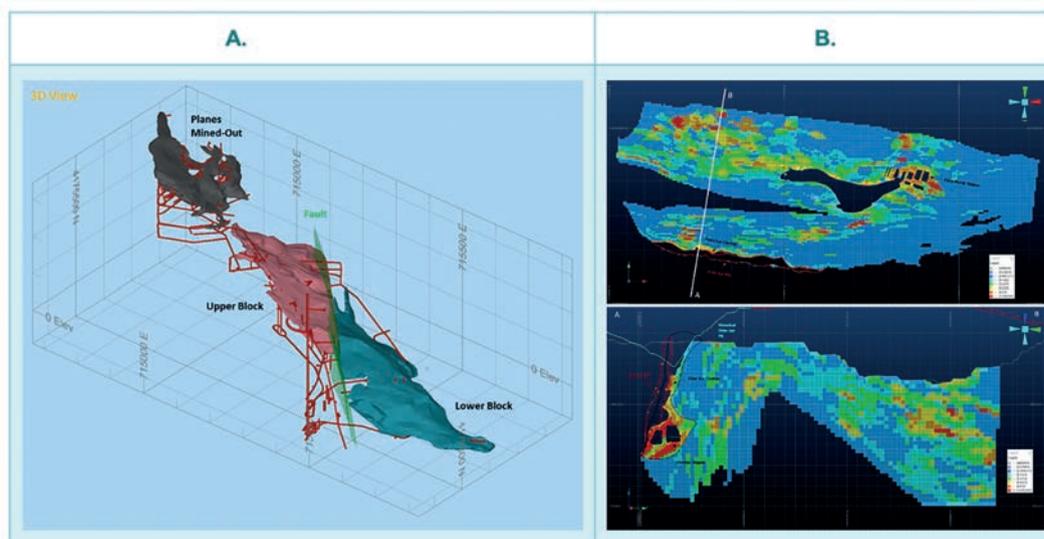


Figura 12. A. Vista en 3D de la modelización de los cuerpos mineralizados del yacimiento de Planes-San Antonio (Riotinto) realizado con Studio RM-Datamine sobre la base de sondeos y labores subterráneos existentes. **B.** Vista en planta y sección vertical del modelo de bloques de cobre del yacimiento de Cerro Colorado (Riotinto) realizado con el software Studio RM-Datamine. Fuente: (Ore Reserves Engineering, 2022).

Los resultados de la exploración incluyen datos e información generados por los programas de exploración minera que podrían ser útiles para los inversores o posibles asesores profesionales, pero que no forman parte de una declaración de Recursos Minerales (PERC asbl, 2021). Los resultados de exploración tienen un alto riesgo, pero al mismo tiempo generan un gran impacto en la valoración de la empresa frente a los mercados. Por este motivo, cuando se publican resultados de exploración estos deben conte-

¹⁹ Al respecto puede consultarse el modelo propuesto por Rodríguez-Terente (2007) para la mineralización aurífera de Salave (Tapia de Casariago), a partir de datos de sondeos, que identifican profundidad, extensión, estructura geológica, etc.

ner la información suficiente de manera que permitan un juicio adecuado y justo de su significatividad e importancia.

2.2. Evaluación del yacimiento

La evaluación del yacimiento constituye la etapa de análisis técnico y económico del yacimiento. La evaluación técnica se realiza a través de la estimación de las curvas tonelajes-leyes y la ley mediante métodos clásicos o geoestadísticos de manera que se obtiene un inventario mineral del yacimiento. Posteriormente, se realiza la evaluación técnica preliminar del yacimiento, en la que se tiene en cuenta una serie de variables entre las que se encuentran los costes de extracción y tratamiento del mineral o el precio de mercado de los metales. El objetivo de esta etapa es la definición del recurso mineral. Los recursos minerales se describen mediante la curva tonelaje-ley con la ley de corte (*cut-off grade*) determinada. Esta ley de corte es la que define la ley mínima que debe contener el material para ser clasificado como mineral.

Una vez definido el recurso mineral y realizada su clasificación y todavía en fases de pre-producción del proyecto, se continúa con estudios de evaluación en los que se identifican todos aquellos factores materiales que podrán afectar a la decisión de explotar el yacimiento (conocidos como *Factores Modificadores* o *Modifying Factors*). De estos estudios se obtiene la estimación de las reservas del yacimiento.

Los tipos de estudios de evaluación para la estimación de las reservas que se abordarán son los denominados estudios de alcance (*scoping studies*), estudios de pre-viabilidad (*pre-feasibility studies*), y estudios de viabilidad (*feasibility studies*).

La estimación de recursos y reservas minerales requiere metodologías de estimación robustas y consideraciones especializadas de acuerdo con las mejores prácticas de la industria. Es muy importante documentar todas las partes del proceso de forma concisa y detallada, incluyendo los procedimientos utilizados, los parámetros seleccionados y las hipótesis efectuadas. En este sentido, la estimación y clasificación de recursos y reservas y su comunicación pública se realizan siguiendo estándares internacionales reconocidos por la industria y por los mercados.

Los recursos y reservas se clasifican de acuerdo con diversos sistemas de clasificación que son aceptados por la industria, autoridades financieras y organismos reguladores. Las principales clasificaciones son las creadas por organismos gubernamentales, que se basan en la clasificación o diagrama de McKelvey. Las clasificaciones internacionales fomentan la consistencia tanto en la terminología, las definiciones y las mejores prácticas como en los estándares de información. Entre ellos está la familia de los códigos CRIRSCO (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards) y la Clasificación de Naciones Unidas.

El CRIRSCO, formado en 1994, reúne a los representantes de las organizaciones responsables del desarrollo de códigos para la revelación de información sobre recursos, reservas y resultados de exploración en Australia, Brasil, Canadá, Chile, Colombia, Europa, India, Indonesia, Kazakstán, Mongolia, Rusia, Sudáfrica, Turquía y USA. En el Mapa 4 se ilustra gráficamente la localización de los códigos agrupados en el CRIRSCO.

En la familia de códigos CRIRSCO se incluyen por ejemplo el Estándar europeo PERC (Pan-European Reserves & Resources Reporting Committee), en el que participan varias organizaciones como el Iberian Mining Engineers Board (IMEB), formado por España y Portugal, o la Federación Europea de Geólogos (EFG). Otros códigos de esta familia son el JORCCode australiano (Joint Ore Reserves Committee) y las definiciones y directrices del CIM (Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum). En el caso

concreto de Canadá, existe una ley o "Mining Rule" denominada National Instrument (NI) 43-101 establecida por las autoridades reguladoras canadienses que incorpora las definiciones y directrices del CIM.

El objetivo de estas normas o códigos es proteger a los inversores, asegurando que los informes emitidos tienen una terminología y contenido de acuerdo con los estándares, de modo que se puedan entender y comparar. Hay pequeñas diferencias entre las normas CRIRSCO como consecuencia de los diferentes regímenes regulatorios en los países en los que se utilizan, pero todas tienen las definiciones y clasificaciones fundamentales idénticas.



Mapa 4. CRIRSCO agrupa a la mayor parte de los países productores de minerales. Fuente: traducido por los autores de (CRIRSCO, n.d.).

A continuación, se introducen los conceptos de recurso y reserva mineral de acuerdo con los códigos internacionales anteriormente mencionados.

Un Recurso Mineral es una concentración o aparición de material sólido de interés económico en o sobre la corteza terrestre en tal forma, o calidad y cantidad, que existen perspectivas razonables para una eventual extracción económica (PERC asbl, 2021). La ubicación, la cantidad, la ley o la calidad, la continuidad y otras características geológicas de un Recurso Mineral se conocen, se estiman o se interpretan a partir de pruebas y conocimientos geológicos específicos, incluido el muestreo²⁰.

Los Recursos Minerales se subdividen en orden de confianza geológica creciente, en las categorías de Inferidos, Indicados y Medidos:

- (i) Recursos minerales inferidos: es la parte del recurso mineral cuya cantidad y ley (o calidad) pueden estimarse sobre la base de la evidencia geológica y muestreo limitados. La evidencia geológica es suficiente para asumir, pero no para verificar, la continuidad geológica y la calidad o ley. Es de esperar que la mayoría de los recursos minerales inferidos se conviertan en recursos minerales indicados con exploración adicional. Un recurso mineral inferido se basa en información y muestreo limitados, obtenidos a través de técnicas de muestreo tales como afloramientos, pozos, trabajos, calicatas y sondeos.
- (ii) Recursos minerales indicados: es la parte de un recurso mineral cuya cantidad, ley (o calidad), densidad, forma y características físicas se estiman con suficiente confianza para permitir la aplicación

²⁰ Se requiere un juicio experto que indique la base sobre la que determinará que la sustancia tiene una perspectiva razonable de extracción rentable a largo plazo. Los supuestos deben incluir estimaciones de la ley de corte y la continuidad geológica en el corte específico, la recuperación metalúrgica, el pago de regalías calculadas a la salida de la fundición, los precios o el valor de los productos, el método de extracción y procesamiento, los costes de operación y procesamiento, y los costes generales y administrativos. La persona cualificada debe indicar si la evaluación se basa en pruebas directas o en ensayos.

de Factores Modificadores²¹ (*Modifying Factors*) con suficiente detalle como para soportar la planificación de la mina y la evaluación de la viabilidad económica del depósito o yacimiento mineral. Las evidencias geológicas se derivan de la exploración, el muestreo y las pruebas adecuadamente detalladas y fiables, y son suficientes para asumir la continuidad geológica y de ley o calidad entre los puntos de observación. Un recurso mineral indicado tiene un nivel de confianza inferior al que se aplica a un recurso mineral medido. La estimación se basa en una exploración detallada y recogida de información de afloramientos, calicatas, pozos, trabajos mineros y sondeos, con las disposiciones o ubicaciones adecuadas para hacer una estimación razonable de las leyes y de su continuidad espacial.

- (iii) Recursos minerales medidos: es aquella parte del recurso mineral cuya cantidad, ley (o calidad), densidad, forma y características físicas pueden estimarse con un nivel de confianza suficiente para permitir la aplicación de Factores Modificadores que soporten la planificación detallada de la mina y la evaluación final de la viabilidad económica del yacimiento. La estimación se basa en una exploración detallada y recogida de información de afloramientos, calicatas, pozos, trabajos mineros y sondeos con las disposiciones o ubicaciones adecuadas que permiten confirmar las leyes y su distribución espacial. Un recurso mineral medido tiene un mayor nivel de confianza que el que se aplica a un recurso mineral indicado o inferido.

Por su parte, las Reservas Minerales constituyen la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido y/o un Recurso Mineral Indicado. Incluyen los materiales de dilución²² y las pérdidas que puedan producirse durante la explotación o extracción del material y se define mediante estudios a nivel de Estudio de Pre-Viabilidad o Estudio de Viabilidad, según corresponda, que incluyen la aplicación de Factores Modificadores. Dichos estudios demuestran que, en el momento de informar, la extracción podría estar razonablemente justificada (PERC asbl, 2021). Las reservas se clasifican en probables y probadas. Las reservas probables tienen un nivel de certidumbre inferior que las probadas.

- (i) Reserva probable: es la parte económicamente explotable de los recursos indicados, y en algunas circunstancias, de los recursos medidos. El grado de confianza en los Factores Modificadores que se aplican a una reserva mineral probable es menor que para una reserva mineral probada.
- (ii) Reserva probada: es la parte económicamente explotable de los recursos medidos. Estas reservas implican un alto grado de confianza en la aplicación de los Factores Modificadores e implican también un alto grado de confianza en la estimación.

El marco para la clasificación de las estimaciones de tonelaje y ley (o calidad) reflejando los diferentes niveles de confianza geológica y en la aplicación de los Factores Modificadores de los códigos de la familia CRIRSCO se muestra en el esquema de la Figura 13, en la cual se refleja la relación entre los resultados de exploración, los recursos y las reservas minerales (CRIRSCO, 2019).

En ciertas situaciones, los recursos minerales medidos podrían convertirse en reservas minerales probables debido a la incertidumbre asociada (lo que está indicado por la flecha punteada). Igualmente, en otras situaciones, las reservas minerales declaradas podrían volver a convertirse en recursos minerales.

²¹ Los factores modificadores son consideraciones empleadas para convertir los recursos minerales en reservas. Incluyen, entre otros, factores mineros, de procesamiento, metalúrgicos, de infraestructura, económicos, de marketing, legales, ambientales, sociales y gubernamentales.

²² La dilución es el proceso de contaminación del mineral con sustancias de menor ley y/o estériles, que se produce durante la etapa de extracción.



Figura 13. Diagrama o esquema básico de recursos y reservas, que muestra la relación entre resultados de exploración, los recursos y reservas minerales. Fuente: traducido por los autores de (CIM, 2014).

Sin embargo, no se pretende aplicar la reclasificación de reservas a recursos minerales debido a cambios a corto plazo o de naturaleza temporal, o cuando la administración de una empresa haya tomado una decisión consciente de explotar a corto plazo sin rentabilidad.

La estimación de los recursos/reservas se considera un proceso continuo que prosigue durante la explotación del depósito. Durante las operaciones de la mina las estimaciones realizadas previamente se modifican por los resultados del control de leyes y los estudios de reconciliación²³, mediante los cuales se comparan las toneladas, ley y metal pronosticados por las reservas contra las toneladas, ley y metal producidos, con el propósito de medir la calidad de la estimación. Con esta técnica se pueden realizar predicciones de la caracterización de la mineralización, mejorando las estimaciones de recursos de largo plazo y los cálculos de reservas para los planes de minería a corto y medio plazo.

Para poder valorar adecuadamente qué parte de los recursos se pueden clasificar como reservas es necesario conocer: (i) el método de extracción de mineral utilizado en relación con las características del cuerpo mineralizado, dado que el método de extracción determina la dilución minera y la recuperación del mineral; (ii) los costes de operación de proyectos asociados que resultan de las leyes límites o de corte empleadas y (iii) los límites de capacidad de los procesos.

En la etapa de planificación minera se considera la viabilidad técnica y económica de la mina, ponderando los riesgos del negocio frente a la probabilidad de obtener ganancias en el volátil mercado de minerales y metales. Durante esta etapa se realiza un dimensionamiento y modelización del yacimiento, de modo que se definan tanto la forma y contenido de mineral como el valor de dicho depósito o cantidad de mineral que se puede extraer de manera rentable.

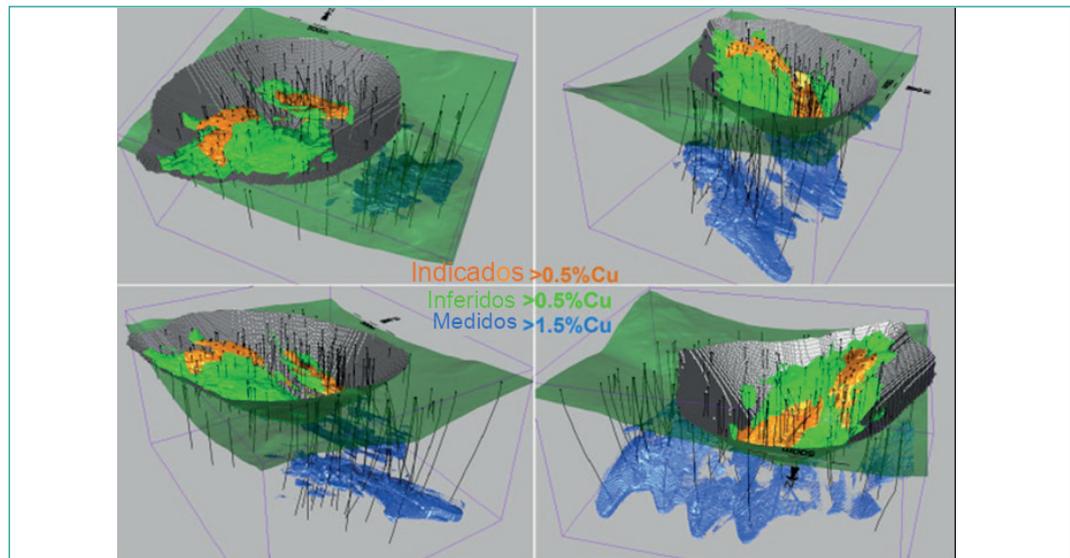
Para la modelización del yacimiento se puede emplear *software* específico como puede ser Surpac, Datamine, Recmin, Minesight, Vulcan, etc. Estos programas sirven para modelizar yacimientos tanto masivos como diseminados, a partir de la información obtenida mediante sondeos, así como estimar recursos y reservas, al obtener un modelo tridimensional (3D) de las leyes minerales y los cuerpos mineralizados.

La realización del modelo geológico 3D o construcción del sólido, como un capítulo más de los informes de viabilidad, resulta fundamental. Con los datos de los sondeos (litología y leyes de los metales o minerales útiles) y, sobre todo, la experiencia minero-geológica del equipo evaluador, se realiza una interpre-

²³ Un estudio de reconciliación busca medir el rendimiento de la operación, apoyar el inventario del mineral, valorar la estimación de recursos y reservas minerales para proporcionar indicadores clave del rendimiento a corto y largo plazo, así como minimizar las pérdidas (Gutiérrez et al., 2014).

tación en tres dimensiones a partir de los perfiles, que facilitan la comprensión y admiten una propuesta geométrica posible. Sin duda es la etapa más trascendente de todo el proceso. El modelo dividirá el sólido geológico en unidades fundamentales que permitirán clasificar los recursos y reservas en función de la calidad de la información disponible (generalmente densidad de sondeos) y, también, será la base de la definición del diseño de extracción óptima del yacimiento (Figura 14).

Figura 14. Clasificación del depósito mineral en tres categorías (recursos inferidos, indicados y medidos). La figura también muestra el perfil del hueco minero creado por minería a cielo abierto (gris) y la masa explotable por minería de interior. Fuente: traducido por los autores de (Nova Copper, 2016).



La elaboración de informes de un proyecto minero es prácticamente obligatoria, y acompañan a la vida de la explotación minera, pero también son de una importancia fundamental en las primeras fases del proyecto. Los informes que se realizan se tipifican del modo siguiente:

- (i) Estudio de Alcance o de Orden de Magnitud (*Scoping Study*): los estudios de alcance son estudios técnicos y económicos básicos sobre la viabilidad potencial de los recursos minerales, incluyen la evaluación apropiada de los factores modificadores asumidos junto con la de cualquier otro factor relevante que sea necesario para demostrar que el progreso a un estudio de pre-viabilidad está razonablemente justificado (PERC asbl, 2021). Este estudio comprende el análisis de los sondeos de reconocimiento y valoración y el muestreo de los testigos, a fin de definir un recurso y analizar el método de extracción más conveniente. El estudio de alcance es clave en el ciclo de vida de un proyecto minero, ya que en él se identifican los problemas técnicos que requerirán un examen adicional o un trabajo de prueba. Generalmente, el resultado final del estudio es una descripción de las características generales y de los parámetros del proyecto y una estimación del orden de magnitud de los costes operativos y del capital necesario para su desarrollo. Los estudios de orden de magnitud normalmente no requieren trabajos previos de ingeniería de detalle.
- (ii) Estudio de Pre-Viabilidad: es un estudio exhaustivo de una serie de alternativas para la viabilidad técnica y económica de un proyecto minero que ha avanzado hasta una fase en la que se ha establecido el método de extracción y se ha determinado un método eficaz de procesamiento del mineral. Incluye un análisis financiero basado en suposiciones razonables sobre los factores modificadores y la evaluación de cualquier otro factor relevante que sea suficiente para que una persona competente, actuando razonablemente, determine si todo o parte del recurso mineral puede convertirse en una reserva mineral en el momento de informar. Implica el uso de la ingeniería y de los estudios geotécnicos dirigidos a la extracción de los recursos. Además, la

compañía estudiará las previsiones de capital y los costes ambientales y de los permisos relacionados con la Administración y el uso del territorio. Resulta fundamental identificar áreas que requieren más investigación. Dependiendo del nivel de detalle en estos estudios y del riesgo de cambio de factores en los que está involucrado, las reservas se declaran en este punto.

- (iii) Estudio de Viabilidad: es un estudio técnico y económico completo de la opción de desarrollo seleccionada para un proyecto minero que incluye evaluaciones debidamente detalladas de los factores modificadores aplicables junto con cualquier otro factor operacional relevante, además de un análisis financiero detallado, ambos necesarios para demostrar en el momento de informar que la extracción está razonablemente justificada (PERC asbl, 2021). Según el código JORC *"analiza en detalle la solidez técnica y viabilidad económica de un proyecto minero y sirve como base para la decisión de inversión"* (JORC, 2012). Se pueden declarar las reservas del mineral y metal recuperable. Esta fase marca la culminación de una minuciosa investigación y recopilación de datos, donde la compañía de exploración toma la decisión de si debe o no proceder con el desarrollo del proyecto minero.

Los Estudios de Viabilidad son la principal herramienta para determinar tanto el coste del proyecto como la fiabilidad de las estimaciones realizadas. Deben incluir datos sobre las instalaciones externas, las necesidades de desarrollo de las infraestructuras, autorizaciones administrativas, acuerdos sociales y ambientales y otros requisitos. Constituyen unas auditorías de todos los aspectos geológicos, de ingeniería, ambientales, jurídicos y económicos. En general, también se requiere un estudio independiente de impacto ambiental requerido por la autorización.

Los requisitos medioambientales son en la actualidad muy estrictos. El procedimiento ambiental es clave para el permiso de explotación e incluso, dependiendo del lugar, para el permiso de exploración (zonas de especial protección). La obligación de la rehabilitación está asociada al permiso, y su coste forma parte de los costes totales del proyecto. Con esta información se pasará a la etapa de planificación y evaluación técnico-económica, que determinará si existen condiciones para continuar con el desarrollo y explotación de la mina.

- (iv) El Informe de Financiación (denominado también, *"bankable"*): es un documento que recoge los riesgos técnicos inherentes al proyecto minero, se esbozan los métodos para eliminar y/o mitigar los riesgos y, además, se cuantifican los potenciales beneficios económicos que pueden alcanzarse. El propio banco o entidad financiera, en última instancia, define lo que es necesario cumplir mediante un documento que se utilizará a fin de justificar la financiación de un proyecto.

Normalmente, un Estudio de Viabilidad de Financiación (*"bankable feasibility study"*) es un análisis prospectivo de la economía de un proyecto (con una precisión alrededor del 15 %, a fin de ser utilizado por las instituciones financieras para evaluar la capacidad crediticia en la financiación de proyectos).

Cuando todos los informes resultan positivos, y una vez que se han obtenido los correspondientes permisos administrativos (que constituyen el elemento base junto con el Estudio de Impacto Ambiental, que debe incluir la rehabilitación y el abandono de labores), comienza la fase de explotación del yacimiento. Estos informes se pueden convertir en una herramienta que debe servir para superar las barreras actuales al desarrollo minero, mediante la difusión de su contenido por diferentes canales y de manera transparente.

2.3. Explotación minera

La explotación minera es la etapa en la que se extrae el mineral del yacimiento y es, generalmente, la etapa más larga de todas, conocida como *vida de la mina* (*LOF, Life Of Mine*). Previamente se han tenido que solicitar los permisos necesarios para la operación minera a las Administraciones competentes²⁴. Una vez la operadora minera recibe el informe favorable del derecho minero solicitado (autorización de aprovechamiento o concesión de explotación, dependiendo del tipo de sustancia a extraer), comienza la fase de preparación para la explotación y posteriormente la explotación del yacimiento.

El objetivo de la fase de explotación es obtener producción de mineral, en cantidad y calidad determinadas, para alimentar la planta de tratamiento mineralúrgico. En esta fase se realizan de forma sistemática las operaciones de arranque, carga y transporte del mineral a planta mineralúrgica, que conforman lo que se conoce como ciclo de producción (ciclo primario, principal o básico). El equipamiento empleado para realizar las operaciones de arranque, carga y transporte y su acoplamiento, conforman lo que se conoce como sistema de explotación (por ejemplo: arranque con voladura, carga con pala cargadora y transporte con volquete).

En minería a cielo abierto (MCA) es necesario extraer el material que rodea al mineral o roca útil (material que no tiene valor y que se conoce en el argot minero como estériles de los hastiales²⁵). La variable que mide la cantidad de estéril que es necesario extraer por unidad de mineral es la ratio de desmonte (*stripping ratio*) y mide la relación estéril a mineral (en t/t, m³/t o m³/m³) de un hueco minero. Por lo tanto, también es necesario aplicar el ciclo de producción al estéril (operaciones de arranque, carga y transporte), en este caso derivando el transporte a escombreras.

Dado que la extracción del estéril (arranque, carga y transporte a escombrera) sólo supone costes (salvo casos de revalorización de residuos mineros), el valor de la ratio condiciona la viabilidad económica de una explotación si la cantidad de estéril a extraer por tonelada de mineral es excesiva. Cada explotación es única, pero, con carácter general, la minería a cielo abierto tiene un límite de profundidad: (i) por viabilidad técnica (garantizar la estabilidad de los huecos mineros), (ii) económica (asumir el coste asociado a un ratio estéril/mineral cada vez más alto) y/o (iii) ambiental (garantizar una adecuada gestión de un volumen cada vez más elevado de residuos mineros). Si el yacimiento continúa en cantidad y calidad apropiadas en profundidad, se puede valorar finalizar la extracción por minería a cielo abierto y comenzar la extracción por minería subterránea (MS). En la Figura 15 se muestra el esquema de un yacimiento explotado previamente por minería a cielo abierto (*corta minera* en el esquema) y que se explota posteriormente por minería subterránea.

La secuencia espacial y temporal en que se realizan las excavaciones en una mina conforma lo que se conoce como método de explotación. Los métodos de explotación convencionales se clasifican en métodos a cielo abierto y subterráneos²⁶.

En los métodos de explotación a cielo abierto la excavación se ejecuta desde la superficie, accediendo

²⁴ En este documento no se aborda la descripción del procedimiento de autorización por parte de la administración de los derechos mineros. No obstante, el Anexo 4 recoge una relación de normativa de aplicación de carácter transversal y sectorial a los proyectos mineros. En relación con los derechos mineros (exploración, investigación, autorización de aprovechamiento y concesión de explotación) es necesario disponer, entre otros, del informe favorable del derecho minero, del Estudio de Impacto Ambiental y del Plan de Restauración.

²⁵ Los hastiales son los contactos físicos de un yacimiento con el material que lo rodea. El contacto superior se denomina *techo* del yacimiento y el inferior, *muro* del yacimiento.

²⁶ Hay una clasificación más general: (i) métodos a cielo abierto, (ii) métodos subterráneos y (iii) métodos por sondeos. En este documento no se hace referencia a estos últimos, dado que se usan para extracción de fluidos (crudo de petróleo y gas), aunque hay algún método de extracción por sondeos para materiales sólidos, por ejemplo, minería auger, que no se aborda en este documento.

de esta forma al volumen de mineral o roca útil a extraer. Cuando el yacimiento se encuentra a gran profundidad no es viable ni técnica ni económicamente extraer el mineral desde la superficie, por lo que se accede al mineral a través de lo que se conocen como *labores de acceso* (galerías inclinadas, en espiral o pozos verticales), sin retirar el recubrimiento de estéril que cubre el mineral. Este es el caso de la minería subterránea.

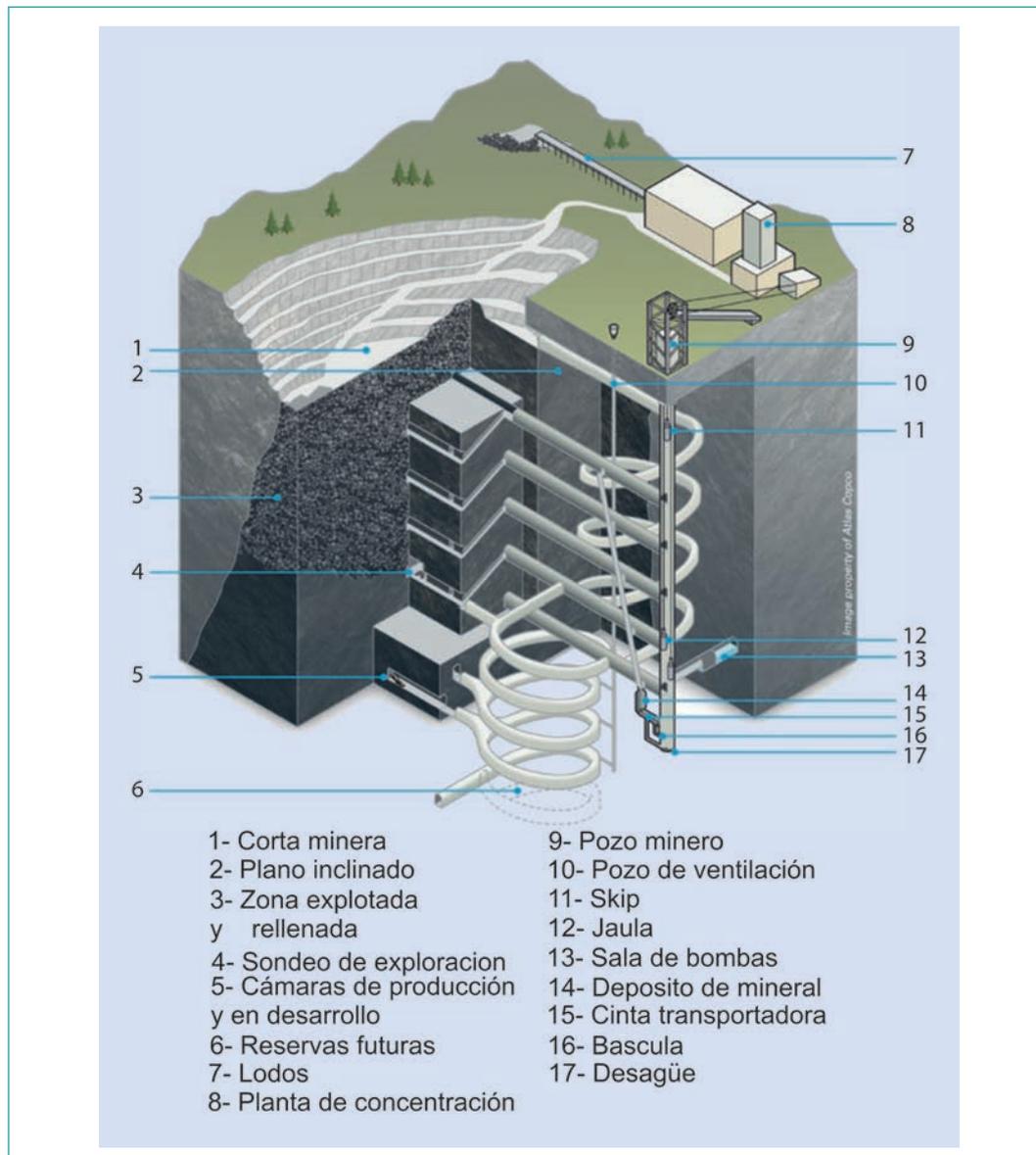


Figura 15. Principales términos empleados para designar labores en una mina subterránea. Fuente: traducido por los autores de (Bustillo, 2017).

Aunque cada yacimiento es único y cada explotación minera también, se pueden identificar algunas diferencias entre minería a cielo abierto y minería subterránea, que se presentan a continuación:

- (i) La minería a cielo abierto implica la realización de un hueco que altera y modifica el relieve y el paisaje y es necesario, casi siempre, contar con espacios para ubicar de forma permanente los residuos que se generan por la extracción de los estériles. En el caso de la minería subterránea, aunque hay extracción de estériles cuando se realizan excavaciones de acceso al mineral, no hay una producción sistemática de los mismos como en minería a cielo abierto, por lo que la gestión de estériles es más sencilla.

- (ii) En minería a cielo abierto hay escasa limitación en cuanto al tamaño de los equipos a emplear en las operaciones de arranque, carga y transporte. En minería subterránea existe una limitación de este tamaño por lo que la mecanización de estas operaciones debe contar con el tamaño de los equipos como requisito, lo cual dificulta (aunque no impide) la mecanización de las operaciones.
- (iii) En minería a cielo abierto tanto los costes de capital como los de explotación son, en términos generales, menores que en minería subterránea. La productividad en términos generales es mayor en minería a cielo abierto que en subterránea.
- (iv) En relación con las condiciones climatológicas y atmosféricas, estas tienen poca o nula influencia en las operaciones en minería subterránea, mientras que pueden afectar y condicionar las operaciones en minería a cielo abierto.
- (v) Finalmente, las operaciones auxiliares son, en términos generales, más numerosas y complejas en minería subterránea. Algunas operaciones auxiliares son comunes a minería a cielo abierto y minería subterránea. Otras son específicas de cada grupo. Entre las operaciones auxiliares comunes a ambos grupos cabe citar: mantenimiento de equipos, distribución de energía, drenaje, depuración y bombeo de agua, comunicación e iluminación. Entre las que son específicas de cada grupo cabe indicar: estabilidad de taludes (MCA), el sostenimiento de las excavaciones (MS), gestión de escombreras (MCA), gestión de pistas mineras (MCA), ventilación (MS) y extracción (MS).

En el Anexo 3 se presenta la descripción básica de los métodos de explotación y los sistemas de explotación de uso más habitual. Cabe indicar que cada yacimiento es único y por lo tanto cada explotación también es única, por lo que la información que se proporciona se debe comprender en términos generales.

En las Figuras 16 y 17 se presentan mediante esquemas y sucesivas imágenes, algunas operaciones que se llevan a cabo tanto en minería a cielo abierto como subterránea, respectivamente, así como el equipamiento de uso más habitual en las operaciones de arranque, carga y transporte.

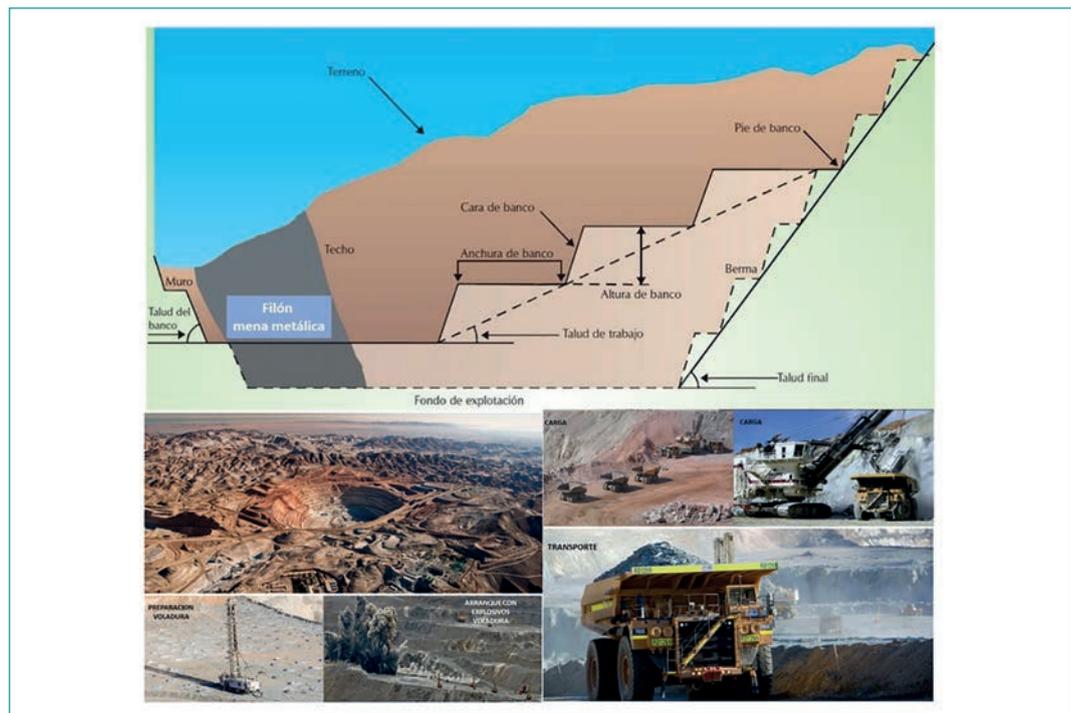


Figura 16. Operaciones de minería a cielo abierto y terminología empleada en el hueco minero. El esquema recoge la sección geológica original, el perfil del hueco en un estadio intermedio de la explotación y el perfil final del hueco minero. Fuente: (López Jimeno, 2007) y elaboración propia de los autores.

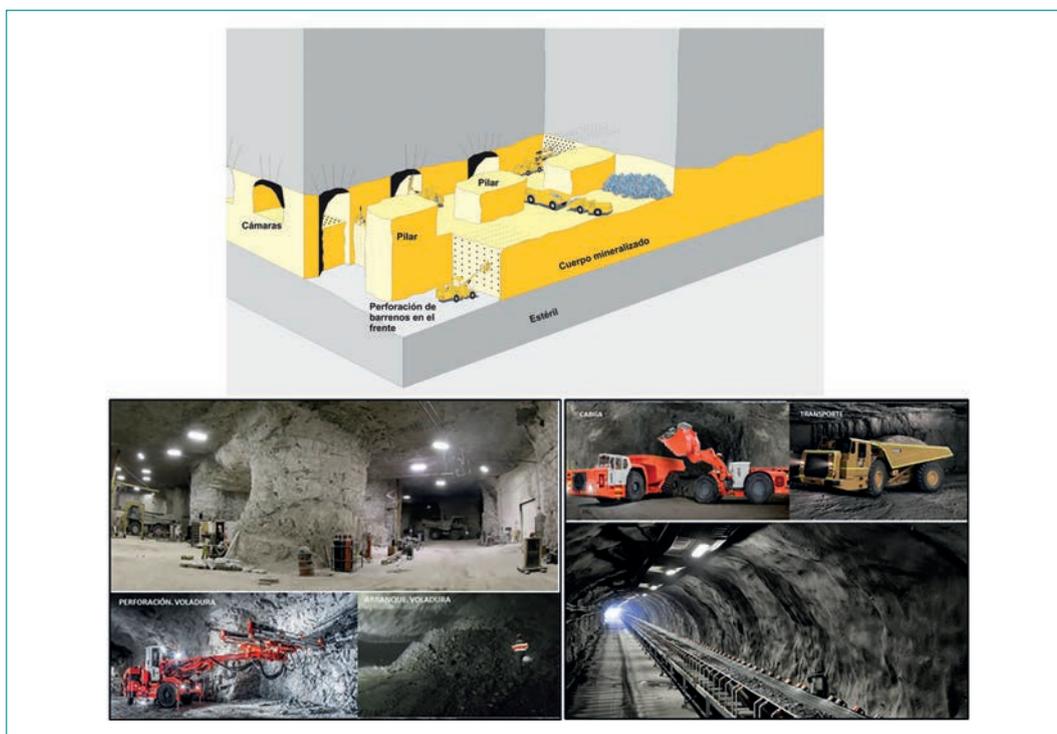


Figura 17. Esquema de una explotación por cámara y pilares (minería subterránea). Fuente: modificado por los autores de (Atlas Copco, 2007) y elaboración propia de los autores.

3. Tecnologías mineralúrgicas

Las plantas metalúrgicas, que se tratarán en el capítulo siguiente, se alimentan con concentrados de leyes entre 30 y 50 %. Sin embargo, el todo-uno extraído durante la explotación minera suele tener leyes entre 0,4 y 4 %. La obtención de los concentrados a partir del todo-uno se lleva a cabo en las plantas mineralúrgicas, que se tratan en este apartado.

El procesamiento mineralúrgico del todo-uno modifica su ley y sus características físicas (tamaño y forma), permaneciendo inalteradas las características químicas o fisicoquímicas de los diferentes minerales. Como resultado se obtienen tres productos: (i) concentrado, que se caracteriza por alcanzar la ley que demanda la metalurgia, (ii) estéril, que son residuos procedentes del proceso que es necesario evacuar y disponer adecuadamente en condiciones de seguridad y (iii) mixtos, compuestos con leyes intermedias entre la del todo-uno y la del concentrado, que es necesario volver a tratar. La producción de mixtos y su control, en las etapas intermedias del proceso mineralúrgico, permiten regular los procesos y contener los costes de producción.

La liberación de los minerales valiosos que están en el todo-uno se logra mediante la reducción de tamaño del todo-uno, que implica triturar y moler a un tamaño de partícula tal que el producto idealmente sea una mezcla de materiales en los que estén separados el mineral (mena) y la ganga. El tamaño debe ser el mayor posible, pues en ese caso no solo se ahorra energía, sino que también se reduce la cantidad de finos producidos y las etapas de separación posteriores se vuelven más fáciles y baratas de operar. En la Figura 18 puede verse un esquema del proceso de liberación del mineral a partir de la reducción de tamaño del todo-uno en el que se distingue el mineral, el estéril y los mixtos.

En la práctica, rara vez se logra la situación ideal. La Figura 18 ilustra el dilema de liberación al que a menudo se enfrenta el procesamiento de minerales. Las zonas identificadas en la figura como regiones A representan el mineral valioso. La región AA es rica en mineral valioso, pero está muy intercalado con la ganga. La reducción de tamaño produce una gama diversa de fragmentos, entre ellos mineral valioso puro (trozo 5) y ganga pura (trozo 6), ambos totalmente liberados. Las partículas de tipo 1 son ricas en mineral valioso (son fragmentos de alto grado) y se clasifican como concentrado. En los fragmentos de tipo 4 la pequeña cantidad de mineral valioso presente es muy pequeña y, por tanto, la pérdida es asumible. Los fragmentos de los tipos 2 y 3 pueden clasificarse como mixtos (*middlings*), aunque el grado de molienda necesario para promover la liberación de mineral del fragmento 3 sería mayor que en el 2. En la práctica, el todo-uno se muele a un tamaño determinado por pruebas de laboratorio y a escala piloto, para producir un grado de liberación económico.

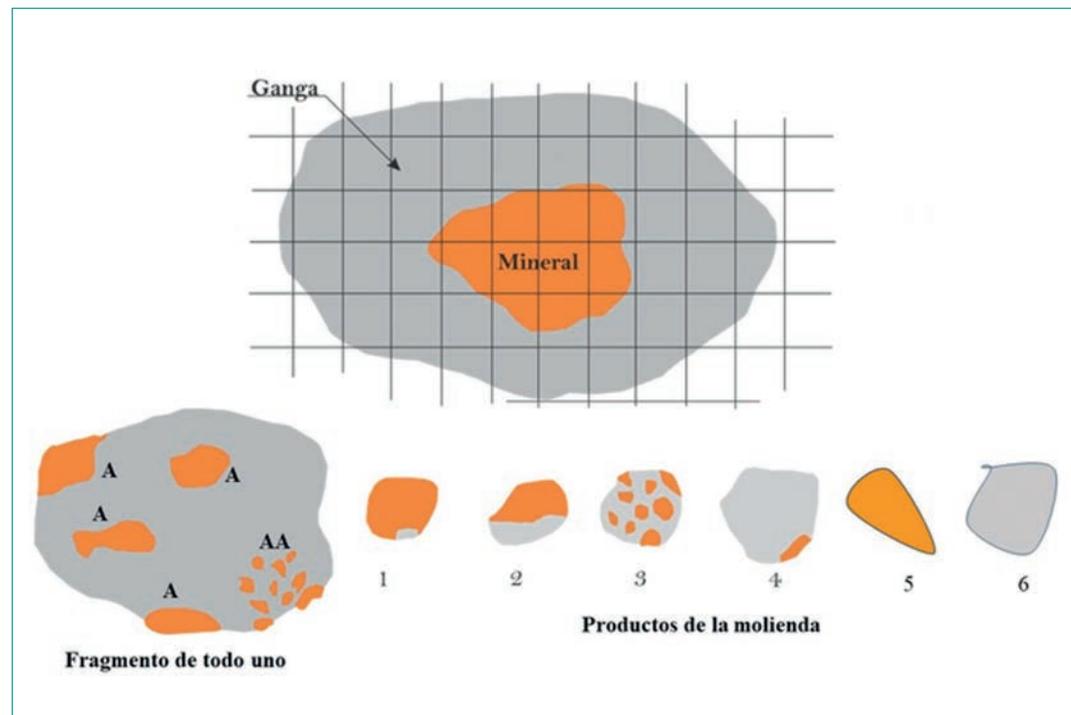


Figura 18. Ilustración del proceso de liberación del mineral a partir de la reducción de tamaño del todo-uno en el que se distingue la mena y la ganga. Fuente: traducido por los autores de (Wills y Finch, 2016).

Durante la molienda de un mineral de baja ley, la mayor parte de la ganga se libera a un tamaño relativamente grueso. En determinadas circunstancias, puede ser económico moler a un tamaño más grueso para producir, en el proceso de concentración posterior, una mayor fracción media y relaves, estériles o *tailings* (producto empobrecido en el mineral valioso). La fracción de mixtos se suele volver a moler.

La tecnología mineralúrgica consta de dos operaciones principales: la preparación y la concentración²⁷, como se puede apreciar en el esquema de la Figura 19. Siguen a estos procesos el espesamiento, la filtración y el secado.

Se entiende como preparación la reducción de tamaño del todo-uno, lo que implica múltiples operaciones de trituración y molienda: (i) trituración primaria (con trituradoras de mandíbula o giratorias), (ii)

²⁷ En general, en este apartado se hace referencia a los procesos de concentración que utilizan propiedades fisicoquímicas. Sin embargo, existen otros procesos de concentración donde los metales se recuperan por disolución.

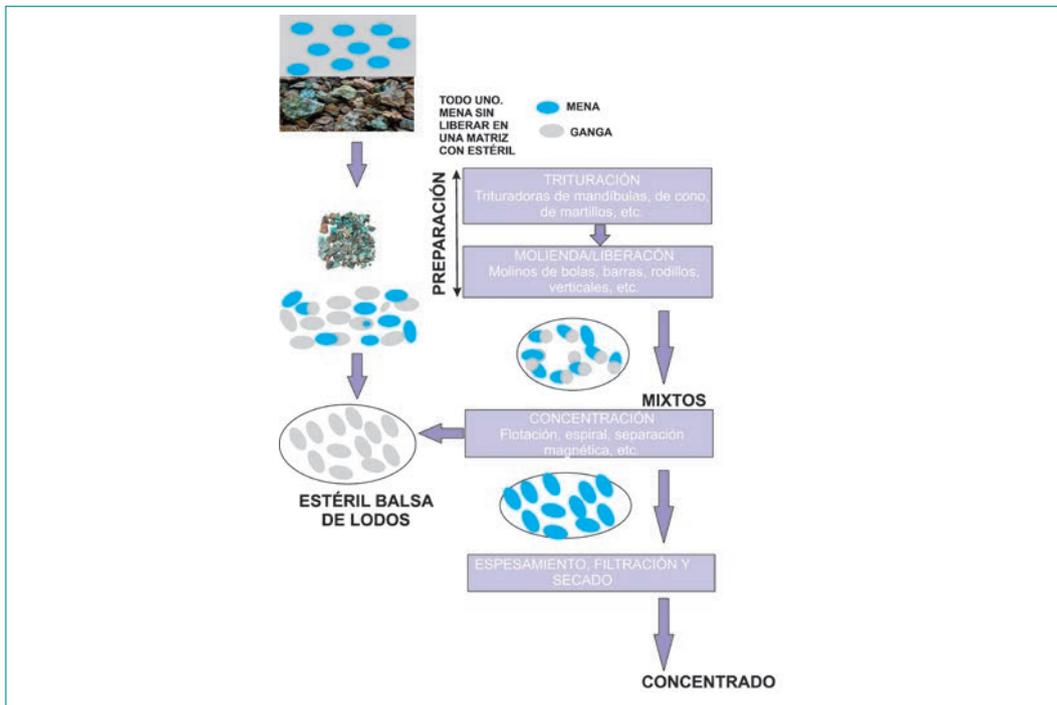


Figura 19. Operaciones de preparación y concentración de las menas. Fuente: elaboración propia de los autores.



Figura 20. A. Trituradora de mandíbulas y **B.** molino de bolas. Fuente: (Wills y Finch, 2016).

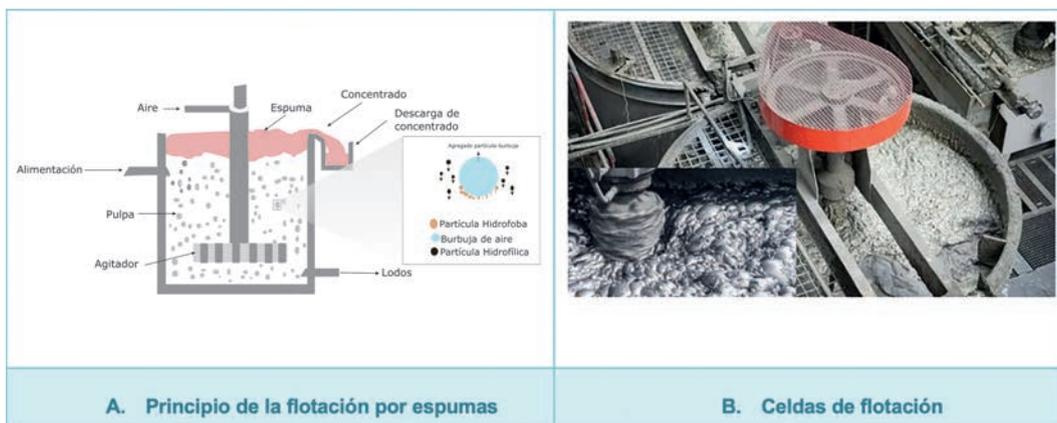


Figura 21. A Principio de la flotación. **B.** Celdas de flotación. Fuente: modificado por los autores de (Wills y Finch, 2016).

trituración secundaria (con trituradoras de cono para obtener un tamaño de partícula del orden de unos centímetros y (iii) molienda (generalmente mediante molinos de barras o bolas para obtener un tamaño de partícula del orden de unos micrómetros) (Figura 20).

La concentración engloba las operaciones para aumentar la ley del todo-uno al valor requerido por el proceso o por el mercado metalúrgico. Se utilizan varias técnicas para la concentración: (i) métodos físicos: separador óptico (que reemplaza el estrío manual), separación gravimétrica basada en la diferente densidad entre la ganga y la mena (mesa de sacudida, espirales), separación por medios densos (tornillos centrífugos, y ciclones), separación magnética y separación electrostática; (ii) métodos fisicoquímicos: flotación diferencial (ver Figura 21) y (iii) métodos químicos: lixiviación.

La tercera fase es el espesamiento, filtración y secado. El espesamiento²⁸ elimina una parte del agua de un *slurry* (papilla) o una suspensión, concentrando así las partículas sólidas en el resto. El líquido recuperado del espesador se recicla para su reutilización. Se agregan floculantes, polielectrolitos aniónicos, para aumentar la eficiencia del espesamiento.

En la operación de filtración, se suele utilizar el prensado que permite la separación de sólidos de una suspensión mediante el paso del espesado a través de un medio poroso que retiene los sólidos formando la torta y deja pasar el líquido, que se recicla.

Con el fin de optimizar los costes (reduciendo costes de transporte), el procesamiento del todo-uno suele realizarse a pie de mina²⁹. En ocasiones, la operación no consiste únicamente en la separación del estéril del mineral principal, sino también en la separación de otros minerales valiosos, por ejemplo, en los pórfidos de cobre se obtiene molibdeno.

4. Rehabilitación de espacios mineros

Debido a que los minerales son recursos no renovables³⁰, las operaciones mineras tienen un tiempo de vida útil o de explotación, tras el que tiene lugar el cierre de la mina. Algunas minas se cierran debido a razones económicas o logísticas, mientras que en otras simplemente se agota el mineral. En algunos casos, las minas cierran temporalmente hasta que el mercado mejore. En cualquier caso, una vez que las operaciones mineras han terminado, debe dejarse un espacio rehabilitado y compatible con el Medioambiente.

Todas las explotaciones mineras están obligadas por ley a disponer de un proyecto de explotación, un Estudio de impacto ambiental (EIA) y un Plan de Restauración, antes de comenzar la operación de extracción, para evitar "pasivos ambientales". Este Plan de Restauración tiene como principal objetivo que los terrenos recuperen o mejoren las condiciones que existían antes de que el lugar fuese explotado o bien adecuarlo a condiciones compatibles con el hábitat natural de la zona.

El término restauración, planteado en el Real Decreto 2994/1982, sobre restauración del espacio natural afectado por actividades mineras, significa "*reparar, renovar o volver a poner algo en el estado que tenía anteriormente*".

²⁸ El espesamiento gravitacional se logra al permitir que los sólidos se asienten bajo la fuerza de la gravedad en un tanque sedimentador.

²⁹ En el caso de las tierras raras, a modo de ejemplo es necesario remover 8,5 toneladas de todo-uno para producir 1 kilo de vanadio, 16 para 1 kilo de cerio, 50 para 1 kilo de galio, 200 para 1 kilo de lutecio y 1.000 toneladas para 1 kilo de oro (Piron, 2019).

³⁰ El concepto de renovabilidad de un recurso natural significa que la naturaleza genera los recursos a una velocidad superior al ritmo de consumo por parte de la humanidad. En el caso de los recursos minerales la diferencia es enorme: tiempo geológico frente a años.

En el Real Decreto 975/2009, sobre la gestión de los residuos de las empresas extractivas, se hace referencia al concepto “*rehabilitación*”, que consiste en una reparación de los procesos productivos y servicios del ecosistema. “*Rehabilitación se define como el tratamiento del terreno afectado por las actividades mineras, de forma que se devuelva el terreno a un estado satisfactorio, en particular a lo que se refiere, según los casos, a la calidad del suelo, la fauna, los hábitats naturales, los sistemas de agua dulce, el paisaje, y los usos beneficiosos adecuados*”. Esta norma, aunque mantiene la terminología anterior (Plan de Restauración), confirma el término *rehabilitación* como más acertado y limita el objetivo de las actuaciones a lograr un “*estado satisfactorio*”, lo que significa reconocer implícitamente la imposibilidad de una corrección total de las alteraciones provocadas por la actividad minera.

Aunque se asocia la operación de rehabilitación a la fase final del proyecto minero, la propia normativa (Real Decreto 975/2009) establece que “*En todo caso, los planes de restauración y explotación se coordinarán de forma que los trabajos de rehabilitación se lleven tan adelantados como sea posible a medida que se efectúe la explotación*”. Es decir, la rehabilitación del espacio afectado por la extracción debe concebirse como parte del propio proyecto, no como una operación aislada que se ejecuta una vez terminada la extracción del recurso. Debe tratarse, en la medida de lo posible, de integrar las operaciones de rehabilitación en el proceso extractivo. Por lo tanto, el control ambiental de las operaciones mineras y la rehabilitación de los espacios por ellas originados forman parte inexcusable de la planificación, operación y clausura de las explotaciones mineras, debiendo empezar desde el comienzo de la operación y prolongándose hasta después del cierre de la mina.

El Plan de Restauración es, por tanto, un proyecto técnico, y debe incluir necesariamente cinco partes:

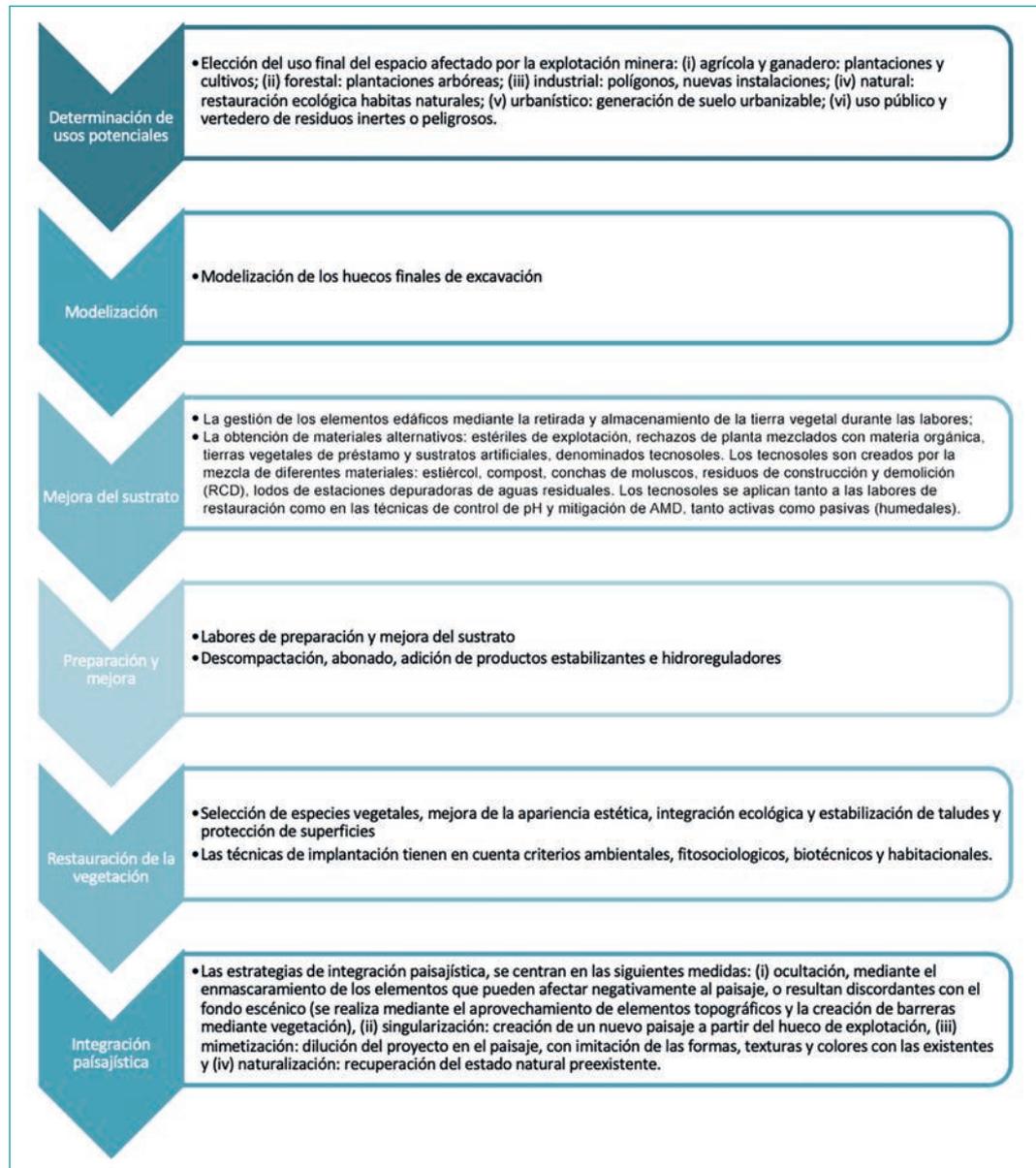
- (i) Descripción detallada del entorno previsto para desarrollar las labores mineras.
- (ii) Medidas previstas para la rehabilitación del espacio natural afectado por la investigación y explotación de recursos minerales. Cabe señalar que, dentro de esta parte, y en estrecha relación con el resto de las labores de rehabilitación, la entidad explotadora debe presentar un anteproyecto de abandono definitivo de labores de aprovechamiento.
- (iii) Medidas previstas para la rehabilitación de los servicios e instalaciones anejas a la investigación y explotación de recursos minerales.
- (iv) Plan de Gestión de Residuos.
- (v) Calendario de ejecución y coste estimado de los trabajos de rehabilitación.

Las etapas básicas para la rehabilitación de las explotaciones mineras se recogen en la Figura 22. El Anexo 4 recoge la información sobre la estructura y contenido que debe tener, según normativa de aplicación, un plan de restauración.

El plan de cierre, que forma parte del Plan de Restauración, debe constituir una parte integral del ciclo de vida del proyecto y debe ser correctamente diseñado, teniendo en cuenta: (i) la salud pública y la seguridad no deben quedar comprometidas, (ii) los recursos medioambientales no deben estar sujetos a un deterioro físico o químico, (iii) el uso posterior del lugar debe ser beneficioso y sostenible en el largo plazo, (iv) todos los beneficios socioeconómicos deben ser maximizados, y (v) cualquier impacto adverso socioeconómico debe reducirse al mínimo.

A medida que la operación minera va llegando al final de su vida, debe haber una transición desde la fase de operación a la del cierre, desmantelamiento y, finalmente, la etapa post cierre. Esta transición consiste, a grandes

Figura 22. Fases de la rehabilitación minera.
Fuente: elaboración propia de los autores.



rasgos, en trabajos de ingeniería para finalizar el servicio y dismantelar la infraestructura, completar la rehabilitación, escalonar los relieves para un drenaje efectivo, sellar y cubrir las instalaciones de los residuos, implementar redes de seguimiento de la etapa post cierre y otros. Incluye, asimismo, trabajos administrativos relacionados con la transferencia de activos, desmovilización de la mano de obra, acuerdos de abandono de la concesión y otros acuerdos gubernamentales y sociales, así como la diligencia debida en el seguimiento e informe de los aspectos ambientales y sociales del emplazamiento en la situación posterior al dismantelamiento.

La prioridad ambiental de una mina consiste en proteger las aguas y el área circundante de las sustancias contaminantes generadas por la explotación. En los últimos años, las reivindicaciones de comunidades que habitan en una región afectada por la minería han sido muy intensas, sobre todo en países con una importante parte de la población dedicada a la agricultura. La transparencia informativa, la participación en decisiones que afectan a las comunidades, el desarrollo comunitario propiciado por la empresa explotadora, la construcción de servicios para la comunidad, el fomento del empleo y capacitación local, son algunas de las medidas más empleadas en estas regiones, con el fin de incrementar la convivencia con las comunidades autóctonas (European Commission, 2021c).

Algunas minas necesitan un seguimiento y mantenimiento después del cierre final, por ejemplo, con el objetivo de controlar la calidad del agua o revisar la seguridad y estabilidad de los terrenos, previniendo posibles situaciones de riesgo para la seguridad y salud de las personas y el medio ambiente. En la Figura 23 se muestra un esquema de la planta de tratamiento de agua ácida de la antigua explotación de Touro.



Figura 23. Planta de tratamiento de aguas ácidas en Touro. Nota: La planta trata las aguas ácidas originadas por la minería histórica que cerró en 1987. Fuente: (Atalaya Mining, n.d.).

Durante la fase de post minería se continúa con la monitorización del área de influencia de la mina. Este proceso de monitorización se realiza para asegurar que no existe ningún proceso en el área que pueda producir un efecto adverso sobre el medio ambiente. Además, sirve como medida de control de los sellados de las balsas de lodos y escombreras. La calidad del agua subterránea se monitoriza y analiza para evaluar la influencia de la inundación de las labores mineras sobre los acuíferos.

Además, en esta fase se aprecian tendencias en la creación de activos ambientales en el cierre de las minas mediante el reaprovechamiento de residuos, huecos y otras infraestructuras como son el aprovechamiento de los huecos mineros como almacén de energía mediante sistemas de bombeo y el uso del espacio subterráneo como almacén.

En cuanto a la normativa relativa a este tema cabe destacar la indicada previamente: el *Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras*, que tiene por objeto el establecimiento de medidas, procedimientos y orientaciones para prevenir o reducir en la medida de lo posible los efectos adversos, que sobre el medio ambiente, en particular sobre las aguas, el aire, el suelo, la fauna, la flora y el paisaje, y los riesgos para la salud humana puedan producir la investigación y aprovechamiento de los yacimientos minerales y demás recursos geológicos, y, fundamentalmente, la gestión de los residuos mineros.

También es de destacar la *Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental*, normativa de carácter transversal, cuya aplicación resulta indispensable para garantizar la protección del medio ambiente. Facilita la incorporación de los criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones estratégicas, a través de la evaluación de los planes y programas. A través de la evaluación de proyectos, garantiza una adecuada prevención de los impactos ambientales que se pueden generar, al tiempo que establece mecanismos eficaces de corrección o compensación.

Cabe indicar que la entidad explotadora está obligada a constituir dos garantías financieras o equivalentes para asegurar el cumplimiento de lo dispuesto en el Plan de Restauración autorizado. Las garantías deben ser suficientes para cubrir el coste de la rehabilitación, por un tercero independiente y convenientemente cualificado, de los terrenos afectados por las instalaciones de residuos, tal y como se describe en

el plan de gestión de residuos. Esta última garantía se establecerá antes del inicio de las operaciones de vertido en las instalaciones de residuos mineros y se ajustará periódicamente.

El cierre de una explotación minera no debe ser nunca el fin de un proyecto, sino el inicio de otros. Las explotaciones mineras tienen un enorme potencial para la biodiversidad, nuevos ecosistemas, itinerarios geológicos, actividades acuáticas, usos agrícolas y forestales, áreas residenciales, hoteles, campos deportivos, circuitos de motor, etc. En definitiva, los nuevos terrenos rehabilitados pueden generar otras oportunidades relacionadas, fundamentalmente, con el turismo, el ocio y la actividad agrícola y forestal.

En la Figura 24 se muestran algunos ejemplos de rehabilitación del espacio minero. Se observa la rehabilitación llevada a cabo en la mina de lignito de As Pontes, el extendido de tecnosoles en la corta Bama de Cobre San Rafael y la rehabilitación de la Corta de Boinas (Orovalle). En el primer caso, el hueco que dejó la mina es ahora un lago de 8,7 km de largo, el mayor lago artificial de España, con dos islotes artificiales y coronado con una playa de arena de cantera lavada.

Figura 24. A.

Rehabilitación de la mina a cielo abierto de As Pontes (A Coruña),

B. extendido de tecnosoles en la corta Bama. Cobre San Rafael y **C.** Corta de Boinás.

Fuente: (Amigo, 2022), (Atalaya Mining, n.d.), (El Valle del Boinás, 2023).



5. Conclusiones

La investigación minera es el conjunto de técnicas (geológicas, geoquímicas, geofísicas y realización de sondeos) empleadas para identificar y evaluar yacimientos minerales explotables económicamente.

En los procesos de investigación minera existen normas internacionales que establecen guías y criterios que permiten elaborar informes técnicos rigurosos sobre las características técnico-económicas de los proyectos mineros. Estos informes independientes se convierten en una herramienta que debe servir para superar las barreras actuales al desarrollo minero, mediante la difusión de su contenido por diferentes canales y siempre de manera transparente.

Una vez evaluado técnicamente el yacimiento y habiendo demostrado su viabilidad económica, se pasa a la extracción mediante el método de explotación más adecuado, según el tipo de yacimiento. Cuando el cuerpo del mineral se encuentra cubierto por una cantidad limitada de roca no aprovechable se puede proceder a su explotación mediante minería a cielo abierto. En caso contrario, se procede a extraer el mineral desde el interior (minería subterránea)

La siguiente etapa de la cadena de valor es la transformación del producto extraído en la mina (todo-uno) al concentrado, lo que se realiza mediante la mineralurgia (preparación y concentración de menas), que es el conjunto de técnicas de tratamiento físico, fisico-químico y químico, con el fin de obtener productos con valor comercial y transformables por la metalurgia. La planta mineralúrgica suele estar en las inmediaciones de la explotación minera. Cada roca/mineral tiene un proceso específico, en función de las condiciones de partida (naturales, marcadas por el yacimiento) y las finales (sustancia que se quiera obtener y calidades).

Una vez concluidas las operaciones mineras el espacio afectado por la actividad debe quedar rehabilitado y compatible con el medio ambiente. Todas las explotaciones mineras en España están obligadas por ley a disponer de un Plan de Restauración autorizado antes de comenzar la operación de extracción, así como constituir las garantías financieras correspondientes para garantizar su ejecución.



4

**METALURGIA.
TÉCNICAS
Y PROCESOS**

1. Introducción

En el capítulo anterior se ha presentado cómo en los procesos mineralúrgicos se procedía a la preparación y concentración de las menas para avanzar en la obtención de los metales necesarios. El resultado era lo que se denomina concentrado, sobre el que, a su vez, hay que continuar trabajando para obtener los metales, con especificaciones y requisitos determinados. Estos procesos son objeto de estudio por la metalurgia extractiva, que se enmarca en la disciplina más amplia de la metalurgia³¹.

En el marco de la metalurgia primaria, los métodos básicos que se contemplan son la hidrometalurgia, la pirometalurgia, la electrometalurgia y la biometalurgia. También se pueden distinguir los procesos metalúrgicos en función del material de partida: metalurgia primaria o secundaria. La metalurgia primaria es la que obtiene los metales a partir de los minerales tal como se encuentran en la naturaleza, mientras que la metalurgia secundaria lo hace a partir de las chatarras o desechos de estos. La metalurgia secundaria ha ido tomando cada vez más importancia y se espera que en el futuro se reciclen más los materiales.

En este capítulo se tratan fundamentalmente los aspectos técnicos de la metalurgia definiendo en primer lugar los procesos de extracción y refino, para posteriormente abordar los métodos metalúrgicos básicos (hidrometalurgia, pirometalurgia, etc.). En una segunda parte del capítulo se tratan algunos procesos metalúrgicos (i.e., cobre, litio y tierras raras) relacionados con los metales de la transición energética y la digitalización.

Volviendo a los procesos fundamentales, en la extracción el objetivo es obtener los metales de los minerales que los contienen³². Por su parte, en la metalurgia de refino se afina el metal bruto obtenido por la extracción. Una vez el metal se ha afinado, con la pureza que el mercado demanda, se alcanzan elevadas leyes en metal, que pueden llegar a la pureza conocida como *cinco nueves* (99,999 %).

Existen dos técnicas o métodos principales, que se pueden implementar de forma independiente o adicional:

- (i) Los procesos de vía húmeda o hidrometalurgia³³ son aquellos que utilizan el agua como medio (reacciones en fase acuosa) o disolventes ácidos o básicos para extraer selectivamente los metales de los minerales que los contienen a bajas temperaturas. La hidrometalurgia supone un menor volumen de inversión que la pirometalurgia. Como consecuencia, hoy en día se trata de utilizar cada vez más la hidrometalurgia y representa ya más del 70 % de los procesos metalúrgicos.

³¹ La metalurgia incluye la metalurgia extractiva, dedicada a los procesos de beneficio de la mena y obtención del metal y la metalurgia física, centrada en el estudio de los diagramas de fase, solidificación, transformación termomecánica de metales y aleaciones y sus tratamientos térmicos. El funcionamiento de las instalaciones metalúrgicas se esquematiza con los diagramas de flujo que indican las diferentes operaciones que constituyen el proceso para la obtención del metal.

La metalurgia, en sentido amplio, comprende el estudio de los metales y aleaciones, desde su obtención a sus aplicaciones debidas a sus propiedades (físicas, químicas y mecánicas), pasando por los tratamientos térmicos, mecánicos y químicos, y por los métodos de conformado y ensayos. Por ello, la metalurgia extractiva se puede definir como la parte de la metalurgia que estudia los métodos necesarios para tratar un concentrado de mineral o un material que se va a reciclar, de tal forma que se pueda obtener, a partir de cualquiera de ellos, un metal, más o menos puro, o alguno de sus compuestos.

La metalurgia incluye técnicas antiguas, que han existido desde que el hombre conoció los metales y que dieron nombre a la Edad del Cobre, del Bronce, o del Hierro. Sin embargo, metales como el aluminio, no fueron obtenidos hasta el siglo XIX y su metalurgia se desarrolló en el s. XX. Es decir, las técnicas metalúrgicas están en continuo desarrollo e innovándose constantemente.

³² Aunque en la naturaleza hay algunos metales que se presentan nativos, lo normal es que se presenten combinados con otros elementos químicos incluidos en los minerales.

³³ La hidrometalurgia se desarrolló a partir del descubrimiento de la electrolisis en el siglo XIX, pues la forma de obtener los metales de las disoluciones que los contienen es depositándolos en los cátodos de las cubas electrolíticas. Sin embargo, la vía húmeda no siempre emplea medios acuosos que acaban en electrolisis, ya que algunos metales y sus compuestos se obtienen sin aplicar electrolisis, en general, con precipitación de estos.

- (ii) Los procesos por vía seca o pirometalurgia son los que emplean el calor y, por tanto, altas temperaturas para obtener el metal de los minerales que lo contienen. Es la metalurgia más antigua, aunque ha evolucionado constantemente. Hoy se utiliza con eficiencia y ventaja sobre la hidrometalurgia en la obtención de metales como el cobre o el plomo. Sin embargo, tiene como inconveniente el impacto medioambiental frente a la vía hidrometalúrgica³⁴.

También se suelen diferenciar dos vías que son una variación de las anteriores, (i) los procesos de electro-metalurgia, que utilizan la electricidad y pueden formar parte tanto de la vía pirometalúrgica como de la hidrometalúrgica, y (ii) los de biometalurgia, donde se obtiene el metal mediante un proceso donde las bacterias son un elemento de apoyo que se complementa con la electrometalurgia o precipitación. Habitualmente la electrometalurgia y la biometalurgia son procesos diferentes, a menudo, complementarios.

2. Procesos metalúrgicos: la hidrometalurgia y la pirometalurgia

2.1. Hidrometalurgia

La extracción del metal por hidrometalurgia se realiza mediante las siguientes operaciones o procesos que se llevan a cabo consecutivamente.

- (i) Lixiviación: operación en la que tiene lugar el ataque químico y solubilización, en fase acuosa, del metal valioso contenido en el mineral. Puede ser ácida, básica o neutra dependiendo del carácter del reactivo químico utilizado, que a su vez es función de la ganga.
- (ii) Purificación y/o concentración: operación que se realiza sobre la disolución obtenida en la etapa anterior. Su objetivo es retirar determinadas impurezas de la disolución. Se suele realizar mediante los siguientes métodos: (i) químicos de precipitación, (ii) cementación (reacción de desplazamiento similar a la metalotermia, pero en fase acuosa), (iii) mediante reacciones de la química convencional, que sirven para retirar un metal de una fase acuosa, (iv) extracción con disolventes (en el caso de disoluciones muy diluidas) y (v) separación con resinas de intercambio iónico (en el caso de disoluciones muy diluidas).
- (iii) Precipitación: el objetivo de esta operación es separar el metal valioso de la disolución, en forma elemental (casi siempre) o en forma oxidada (en raras ocasiones). Se suele realizar mediante los siguientes métodos: (i) electrolisis acuosa (como es el caso del cobre, zinc y níquel), proceso mediante el cual se logra la separación de la disolución en sus iones constituyentes (aniones y cationes), y electrodeposición del metal en cátodos del propio metal o inertes, gracias al paso de la corriente eléctrica³⁵, (ii) electro-

³⁴ No obstante, resulta necesario evaluar el impacto medioambiental de ambas vías dado que no está claro que esta sea más contaminante en la medida en que en la hidrometalurgia es necesario el tratamiento del agua de las purgas.

³⁵ Este proceso se lleva a cabo en una cuba o celda electrolítica formada por dos electrodos de un metal inerte conectados a una fuente de energía eléctrica.

lisis en galvanoplastia, para proteger metales frente a la corrosión, para lo cual se aplica una película protectora de otro metal, (iii) cementación, como es el caso de la cementación con zinc de disoluciones cianuradas de oro y (iv) métodos convencionales de química, como, por ejemplo, la precipitación de metales con hidrógeno gaseoso a presión y temperaturas altas (como es el caso del níquel y el cobre).

En la Figura 25, se presenta el diagrama de flujo de la hidrometalurgia donde se puede ver la fase de preparación del mineral y la del disolvente a utilizar. Hay que destacar que las dos etapas, que se indican de preparación del mineral, corresponden a los procesos mineralúrgicos de preparación o transformación que se han visto en el capítulo anterior. El disolvente debe prepararse formando disoluciones acuosas de ácidos (sulfúrico normalmente) o bases (sosa normalmente), para efectuar la dilución (digestión) y conseguir la disolución selectiva del metal.

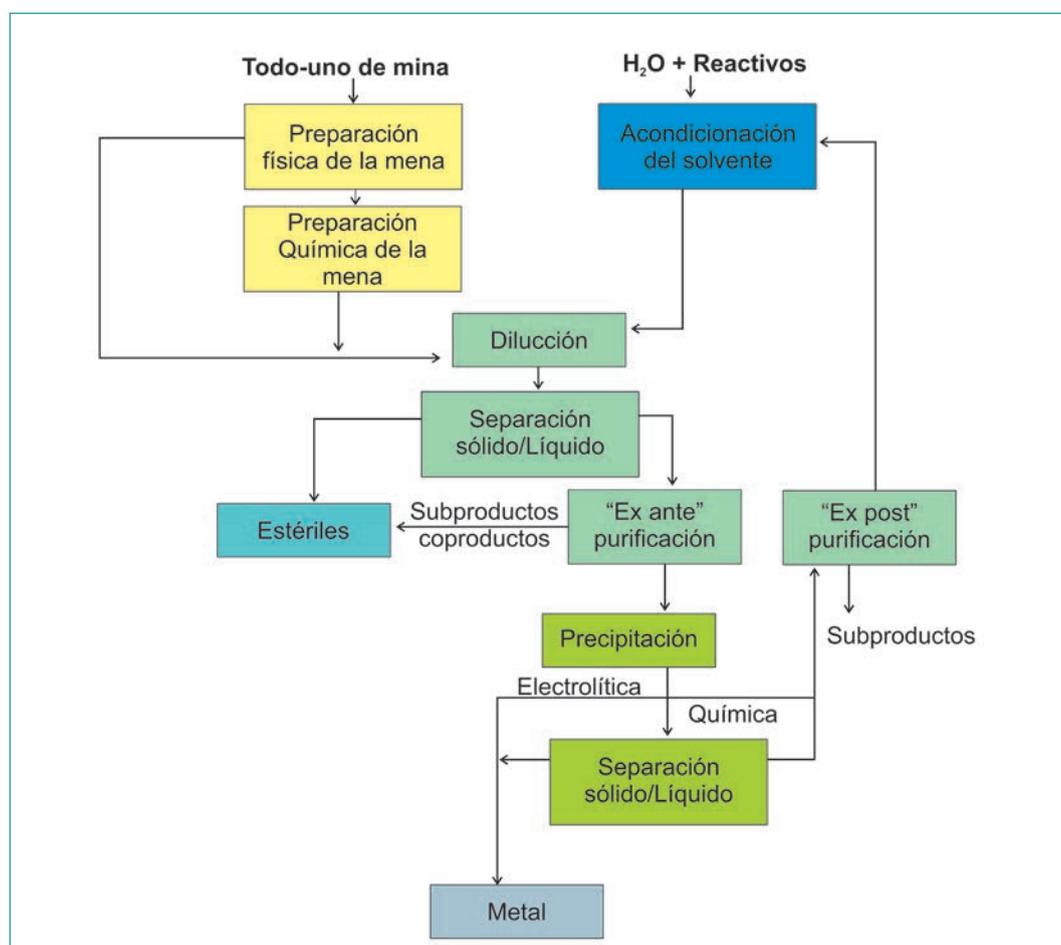


Figura 25. Diagrama de flujo general de la hidrometalurgia. Fuente: modificado por los autores de (Tejera, 2022)

Posteriormente, se realizan operaciones de separación sólido/líquido (decantación, filtrado) para separar la disolución rica, que lleva disuelto el metal de la ganga de acompañamiento en el mineral (estériles, en esta fase del proceso, se vierten en las balsas de estériles anexas a la planta metalúrgica) que está como fase sólida insoluble.

La siguiente operación es la precipitación (física o deposición electroquímica) del metal en la cual queda un licor pobre que se vuelve a utilizar en la cabecera del proceso con el disolvente (en las plantas hidrometalúrgicas la utilización del disolvente es cíclica disolviendo el metal en la digestión y cediéndolo en la precipitación).

El metal obtenido en la precipitación va acompañado de impurezas que se pueden quitar antes de la precipitación (purificación "ex ante") o después (purificación "ex post").

2.2. Pirometalurgia

Los procedimientos para la obtención de un metal por la vía pirometalúrgica se dividen básicamente en: métodos de reducción (óxidos metálicos), o de oxidación (haluros metálicos, sulfuros metálicos) para facilitar tratamientos posteriores. Los principales procesos que se emplean en el proceso de extracción del metal por vía pirometalúrgica se recogen en la Tabla 16.

Proceso	Descripción
Calcinación	Descompone, mediante calor, un compuesto (carbonato, sulfato, hidróxido, etc.) en sus óxidos formadores.
Tostación	Operación por la cual un sulfuro, al reaccionar con el oxígeno del aire, se transforma en un óxido ³⁶ .
Fusión (fundición reductora o mata)	Operación en la que se obtienen, en un horno adecuado trabajando a la temperatura necesaria, varios materiales fundidos: metal, escoria o mata ³⁷ . Es una de las operaciones más utilizadas en metalurgia extractiva.
Volatilización	Operación que conduce a un metal (reductor), un compuesto (oxidante), un haluro o un carbonilo metálico en forma gaseosa ³⁸ .
Electrolisis de sales fundidas	Para la obtención de un metal a partir de uno de sus compuestos disueltos en un electrolito fundido y utilizando la corriente eléctrica como agente reductor ³⁹ .
Metalotermia	Operación en la que un metal desplaza a otro de sus compuestos al ser más reactivo ⁴⁰ .

Tabla 16. Principales procesos para la extracción del metal por pirometalurgia. Fuente: elaboración propia.

Una fase adicional es el afino, que tiene por objeto la separación del metal principal de otros elementos, considerados como impurezas, que pueden o no aprovecharse. Las principales operaciones de purificación o afino del metal son: electrolisis en disolución acuosa, descomposición térmica y fusión por zonas.

La descomposición térmica es un método de afino basado en la descomposición química de compuestos. Existen dos métodos que son muy comunes: (i) descomposición de hidruros metálicos y (ii) descomposición de carbonilos metálicos. Un ejemplo de este último es la fabricación de polvo de níquel por descomposición térmica de carbonilo de níquel. El óxido de níquel se introduce de forma continua en un horno de reducción con hidrógeno puro a 230 °C para producir un níquel impuro en forma granular. En la segunda etapa, en el horno de volatilización, el níquel reacciona con el monóxido de carbono para formar gas de carbonilo de níquel: $Ni + 4CO = Ni(CO)_4$

El gas de carbonilo de níquel se lleva a una planta adyacente para su descomposición térmica para formar polvo de níquel puro: $Ni(CO)_4 = Ni + 4CO$

³⁶ Por ejemplo, la tostación de los minerales sulfurados de cobre para producir óxido de cobre o la tostación de los minerales sulfurados de zinc para producir óxido de zinc. Normalmente es una operación previa a la de fusión. También puede realizarse una tostación sulfatante en vez de oxidante.

³⁷ Por ejemplo, se usa para la obtención del arrabio o hierro sucio en el horno alto (fusión reductora) o como paso previo en la obtención del cobre (fusión neutra: fusión a mata). La escoria se forma al reaccionar la ganga contenida en el mineral con un fundente que se añade al proceso a tal efecto (ácido o básico). La fusión a mata es un proceso de concentración, en el que una parte de las impurezas de la carga se reúnen formando un producto ligero llamado escoria que puede separarse por gravedad de la porción más pesada que contiene prácticamente todos los componentes metálicos.

³⁸ Por ejemplo, en la metalurgia del zinc por vía seca, el metal se obtiene como un gas por reducción del óxido.

³⁹ Por ejemplo, se usa en la obtención del aluminio por electrolisis de la alúmina disuelta en un baño de criolita (Na3AlF6, hexafluoraluminato de sodio) fundida.

⁴⁰ Por ejemplo, en la obtención del titanio se utiliza magnesio para reducir el tetracloruro de titanio.

La fusión por zonas es un método que permite purificar, por ejemplo, los lingotes de un semiconductor. Se realiza en un crisol de cuarzo que se mueve con respecto a una bobina de inducción, por la que circula corriente de radiofrecuencia que induce corrientes de Foucault en el semiconductor, llegando a fundirlo, por efecto Joule. Al ir avanzando la bobina, la zona fundida también lo hace, arrastrando consigo las impurezas, mientras el semiconductor se recristaliza al enfriarse. Se suelen realizar varias pasadas y, al final, se corta el extremo que contiene las impurezas acumuladas. Mediante este método se consigue una concentración de impurezas en el lingote tratado, que puede llegar a ser menor a una parte por millón.

3. Ejemplos de procesos metalúrgicos

A continuación, se recogen cuatro ejemplos de procesos metalúrgicos. Dos de ellos, los procesos del cobre y del zinc, se han escogido por su relevancia y tradición en España, aportando valor a la economía y empleo, así como por su papel en la transición energética. Los otros dos, el litio y las tierras raras se han escogido por su relevancia en la descarbonización y la digitalización. En el caso del litio por su papel en la movilidad y el almacenamiento energético⁴¹ y las tierras raras por sus diversas aplicaciones, como en imanes permanentes de neodimio.

3.1. Metalurgia del cobre

Existen numerosos minerales de cobre (Cu) pero no todos ellos tienen relevancia como menas del metal. El cobre se encuentra frecuentemente en asociación con el azufre, por lo que los principales minerales de cobre son sulfuros: calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4), calcosina (Cu_2S) y covelina (CuS), acom-

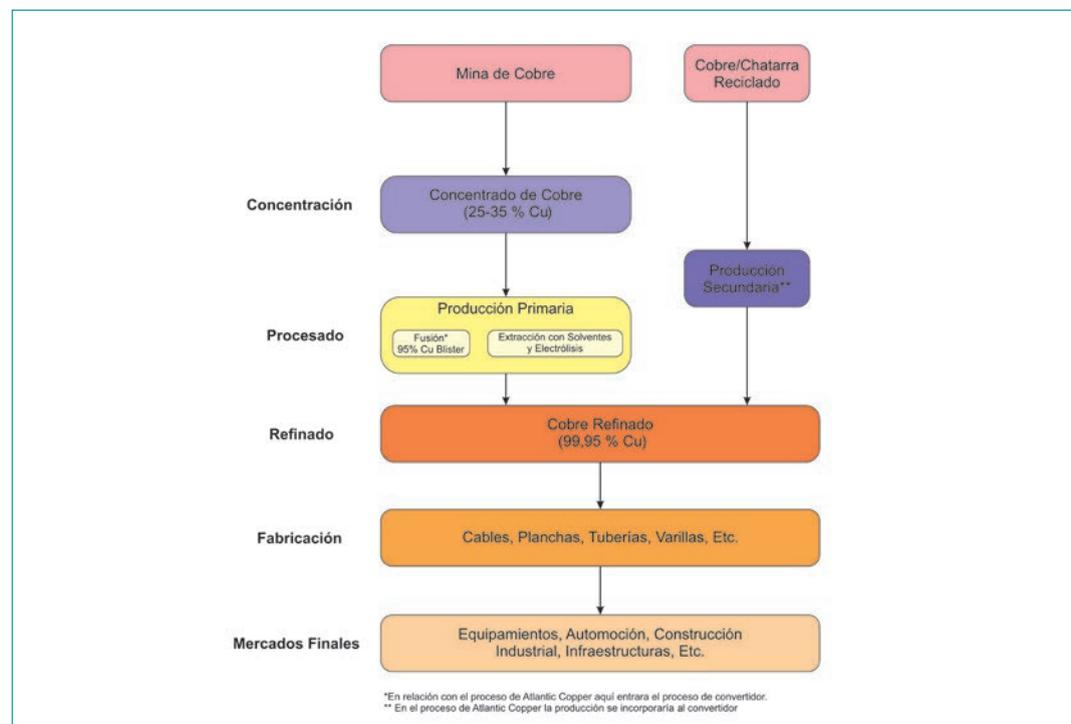


Figura 26. Fases de la metalurgia. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (ICSG, 2022) y (IHS Markit, 2022).

⁴¹ A pesar de su relevancia no se ha incluido la siderurgia, cuyos principales desarrollos van orientados hacia la descarbonización. Para más detalle se recomienda CAETS (2022). Además, en el Anexo 5 se recogen los procesos metalúrgicos del aluminio, el cobalto y el uranio.

pañados por pirita, galena y otros sulfuros de arsénico, antimonio y bismuto. Entre los óxidos y otros se pueden citar: la tenorita (CuO), la cuprita (Cu₂O), la azurita [Cu(OH)₂·2CuCO₃], la malaquita [Cu(OH)₂·CuCO₃] y la crisocola (CuSiO₃·2H₂O).

Los métodos de obtención de cobre dependen lógicamente del mineral de partida. Los minerales sulfurados (~4280 %) se tratan por la vía pirometalúrgica, en la que se producen ánodos y cátodos, y los oxidados (~20 %) por la hidrometalúrgica, en la que se producen directamente cátodos.

En la Figura 26 se presenta la cadena de valor que va desde los concentrados de cobre (y previamente la minería, presentada en el capítulo anterior) al procesamiento, tanto por la vía pirometalúrgica como por la hidrometalúrgica. El afino es común a ambas vías, en las que hay una etapa de electrolisis acuosa.

3.1.1. Proceso pirometalúrgico

El concentrado, resultado del proceso de concentración de menas, es sometido a secado para eliminar el contenido de agua. El secado, en ocasiones, tiene como objetivo eliminar algún componente no deseado por volatilización sin llegar a la fusión, por ejemplo, para reducir el contenido de azufre hasta un valor óptimo para la fusión. En la actualidad, la tostación no se lleva a cabo como tal en una etapa separada.

En la Figura 27 se representa de forma esquemática el proceso metalúrgico de fundición y afino en las instalaciones de Atlantic Copper en Huelva, que permitirá seguir el proceso desde la recepción de los concentrados de cobre hasta la obtención de los cátodos con 99,99 % de cobre.

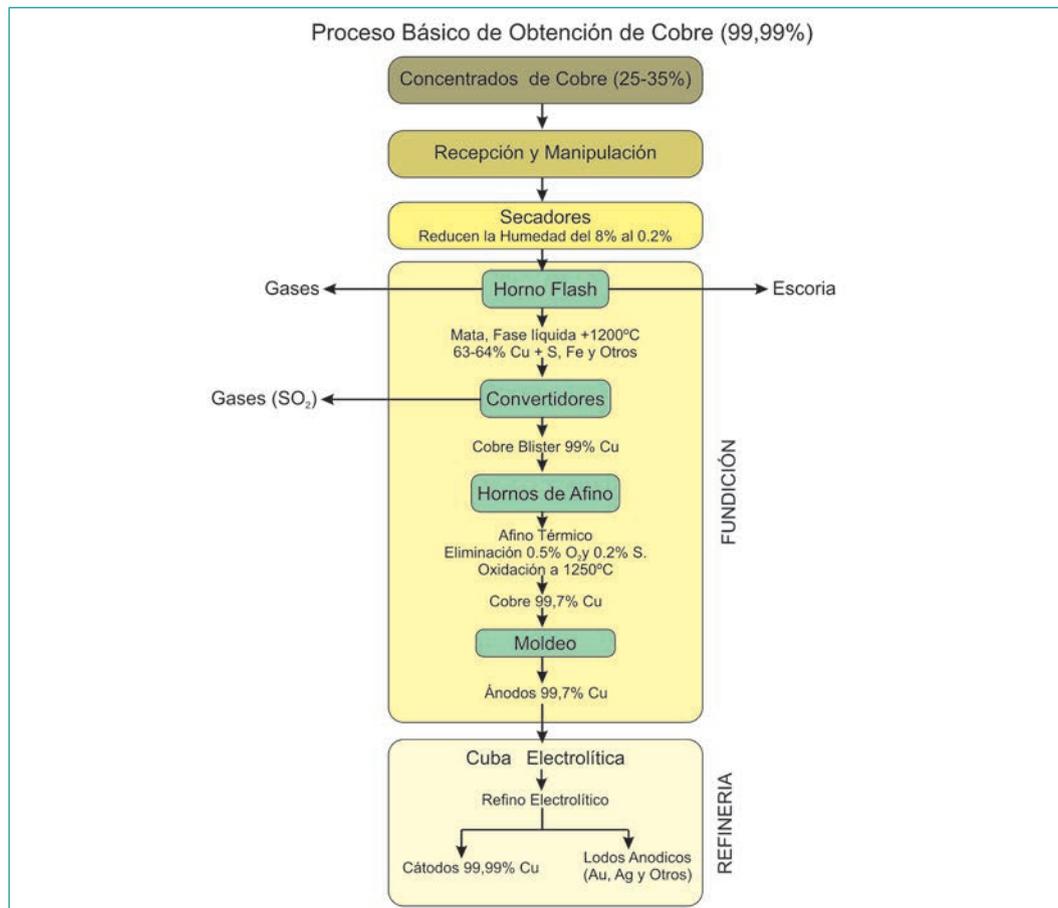


Figura 27. Diagrama de flujo general de la metalurgia del cobre. Nota: No se representa el conjunto de procesos, únicamente el proceso básico o principal, y no los auxiliares (i.e., producción de sulfúrico, silicato de hierro, yeso). Fuente: elaboración propia de los autores a partir de la web de Atlantic Copper.

⁴² ~ = Aproximadamente.

La fusión oxidante de concentrados de cobre con adición de fundentes va a generar dos fases fundidas: la mata (50-70 % Cu), que es la fase semimetálica más pesada que contiene la mayoría de los sulfuros, resultado de la primera fusión de la mena y donde se concentra el cobre; y la escoria, que contiene una fase oxidada y ferrosa, formada por reacción del óxido de hierro (II) con la sílice fundente, dando como resultado la fayalita ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ silicato ferroso de bajo punto de fusión). La mata es mas densa que la escoria y forman dos fases líquidas inmiscibles, que se sangran separadamente por orificios a distintos niveles del horno. La oxidación de azufre de los sulfuros y del hierro es exotérmica, lo que hace que el proceso pueda ser autógeno.

La fusión tradicional se puede realizar en varios tipos de hornos (cuba, reverbero, eléctrico, etc.), pero existe una fusión denominada instantánea o *flash*, cuya principal característica es la rapidez con que se verifica el proceso de fusión al realizarse con un quemador con aire precalentado, enriquecido en oxígeno o bien con oxígeno industrial. La fusión instantánea puede ser autógena o no. Entre los procesos de fusión instantánea pueden citarse, entre otros, el proceso OUTOKUMPU (casi un tercio del cobre mundial se procesa en este tipo de reactor) y el proceso INCO.

En la Figura 28 se presenta un corte del horno *flash* OUTOKUMPU. La construcción del horno INCO es similar a la de un horno de reverbero, pero se inyecta oxígeno (95-98 % de pureza) de manera horizontal por ambos extremos del horno.⁴³

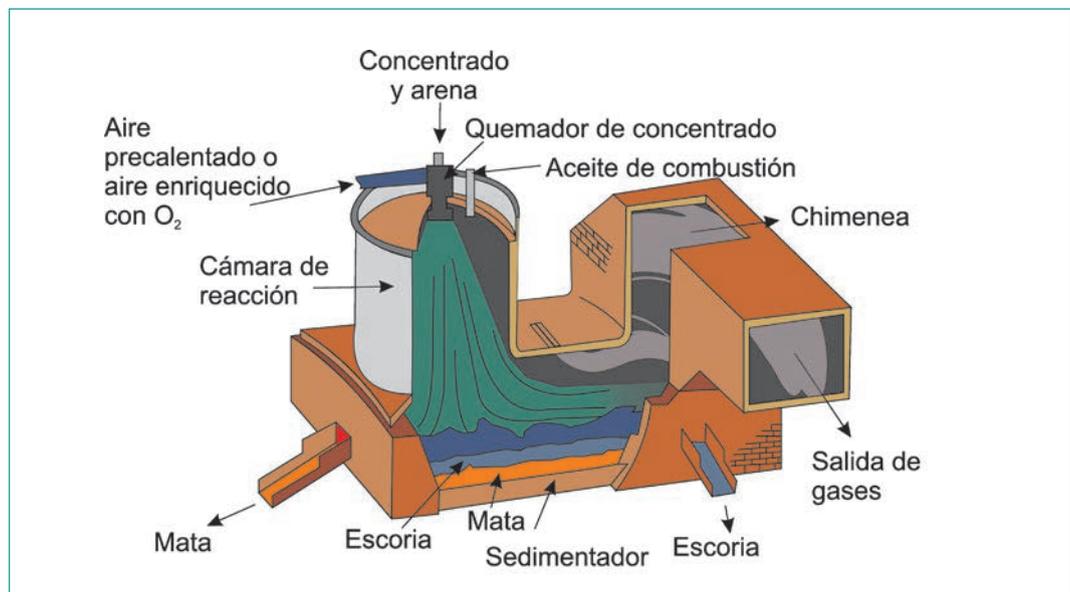


Figura 28. Esquema de un horno flash OUTOKUMPU con aire precalentado. Fuente: modificado por los autores de (Quezada, n.d.).

Con el fin de incrementar la riqueza en cobre, la mata líquida obtenida pasa al proceso de conversión, donde se la somete a una oxidación con aire. La conversión se realiza en dos etapas consecutivas, en la primera etapa se forma la escoria y se elimina el hierro. La segunda etapa da lugar a cobre metálico⁴⁴.

La formación de cobre en la segunda etapa no sucede hasta que la mata contiene menos del 1 % de Fe, de modo que casi todo el Fe se elimina del convertidor (como escoria) antes de comenzar la producción de Cu metálico. El producto obtenido es el cobre blíster, con un 99 % de cobre, que contiene entre 0,02 y 0,1 % de S.

⁴³ La reacción principal de los procesos OUTOKUMPU e INCO es:
 $4(\text{CuFeS}_2) + 5\text{O}_2 + \text{SiO}_2 (\text{Fundente}) = 2(\text{Cu}_2\text{S}\cdot\text{FeS}) (\text{mata}) + 2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2 (\text{escoria}) + 4\text{SO}_2$
 Reacción, exotérmica, que genera el calor necesario para el proceso, lo cual lo hace autógeno.

⁴⁴ Las reacciones citadas son las siguientes: $2\text{FeS} + 3\text{O}_2 + \text{SiO}_2 (\text{fundente}) = 2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2 (\text{escoria}) + 2\text{SO}_2$;
 $\text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2 = 2\text{Cu} (\text{cobre blíster}) + \text{SO}_2$

Existen diferentes hornos para la conversión, pero el más común es el Peirce-Smith, que es un horno rotatorio de forma cilíndrica y en una generatriz se disponen 40 toberas por las que se introduce el aire. La mata líquida se introduce a través de una gran abertura central y entra en el convertidor a una temperatura de 1.100 °C y el calor generado en su interior, por la oxidación del S y del Fe, hace que el proceso sea autógeno. El proceso de conversión dura entre siete y ocho horas. Estos convertidores se controlan por ordenadores, llevando el proceso de forma automática hasta que toda la masa de Cu está en forma de cobre blíster (99 % de Cu). En la Figura 29 se muestra un horno Peirce-Smith.

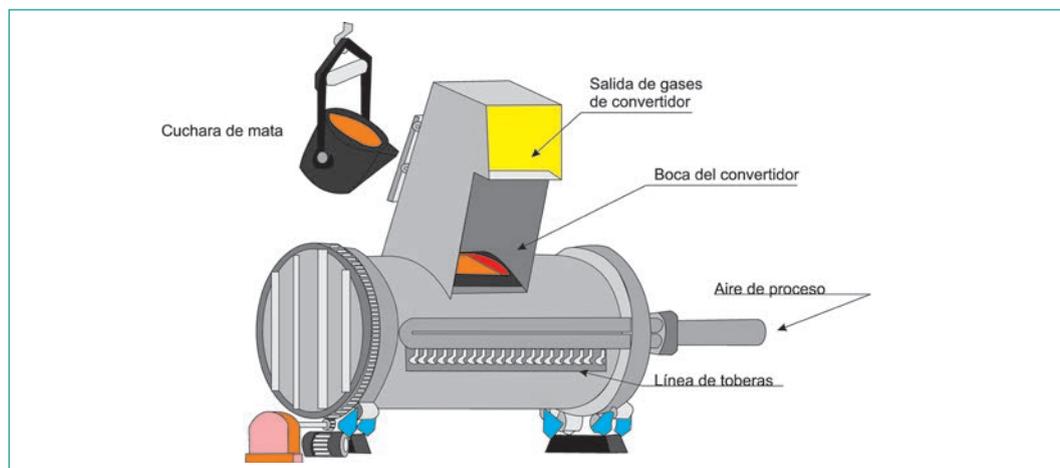


Figura 29. Esquema de un horno Peirce-Smith. Fuente: modificado por los autores de (Quezada, n.d.).

Prácticamente todo el cobre producido por fusión-conversión se electrorrefina posteriormente. Por lo tanto, debe ser adecuado para colarse en ánodos delgados, fuertes y lisos para intercalar con los cátodos en las cubas de electrolisis. Esto requiere que el cobre sea afinado térmicamente para eliminar la mayor parte de su azufre y oxígeno. En el proceso que se lleva a cabo en el horno de conversión (Figura 29) se elimina el 0,5 % de oxígeno y el 0,2 % de azufre llevándose a cabo una oxidación a 1.250 °C incrementándose su contenido en cobre hasta el 99,7 %. Posteriormente, pasa a la colada de ánodos que se realiza mediante una rueda de colada con moldes de cobre que tienen la forma de un ánodo con orejas para su soporte en la cuba de electrolisis. Existen procesos que combinan la fusión para mata y la conversión como son los procesos Mitsubishi y el proceso Noranda.

Los ánodos se llevan a las cubas electrolíticas de forma rectangular, donde se colocan en forma alternada un ánodo (que es la plancha de cobre obtenido de la fundición) y un cátodo, (que es una plancha muy delgada de cobre puro). En las cubas se lleva a cabo el afino electrolítico (electrorrefinación), que es un proceso de recuperación y purificación del cobre contenido en el ánodo. Se basa en la aplicación de una corriente eléctrica continua que circula entre un ánodo de cobre soluble (se solubiliza al paso de la corriente) y un cátodo de cobre, ambos inmersos en un electrolito ácido de iones cúpricos. Este proceso permite obtener cobre de alta pureza (99,99 %), así como la recuperación de pequeñas cantidades de metales preciosos contenidos como impurezas en el cobre. Ambos electrodos se encuentran en una solución acuosa de sulfato cúprico. Al aplicar una diferencia de potencial apropiada, provoca la oxidación del cobre metálico a Cu^{2+} en el ánodo y la reducción del Cu^{2+} a Cu metálico en el cátodo. El proceso ocurre gracias a que es más fácil que ocurra la reducción del Cu^{2+} que la del agua. El electrolito contiene aproximadamente 50 g cobre/l y unos 200 g de ácido sulfúrico /l. La temperatura de trabajo es de 60 °C y se adicionan productos orgánicos que mejoran el depósito catódico y evitan los cortocircuitos⁴⁵.

⁴⁵ Las reacciones del proceso de afino son:
 Ánodo (oxidación): $\text{Cu} \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2e^-$
 Cátodo (reducción): $\text{Cu}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Cu}$

En el procedimiento normal se obtienen dos cátodos sucesivos de cada ánodo en unos 12-14 días y de los más de 300 Kg de cada ánodo se obtienen dos cátodos de unos 125-130 Kg. El resto del ánodo se recicla como chatarra lo que supone poco más del 40 %. Los lodos anódicos son subproducto del proceso de afino, contienen productos muy valiosos como los metales preciosos. Se recogen periódicamente del fondo de la cuba, se filtran y se secan, y luego se tratan para recuperar los productos de valor. Tras unos tratamientos iniciales para solubilizar el cobre que llevan, se recuperan el selenio y el telurio fundiendo los metales preciosos en una aleación denominada bullión o doré, que se trata por electrolisis para recuperar el oro y la plata.

Los cátodos se pueden vender tal cual, pero se suele fundir el metal para producir preformas o semiacabados. Los cátodos se funden en hornos diversos y se adicionan aleantes para proceder posteriormente a colar el producto. La colada puede ser de modo continuo o semicontinuo. Los combustibles empleados en los hornos no deben contener azufre, y la atmósfera no puede ser oxidante (para evitar la oxidación del cobre). El producto final tiene la forma de tochos, placas y barras de extrusión de hasta 12 metros de longitud.

3.1.2. Proceso hidrometalúrgico

El proceso hidrometalúrgico empieza triturando el mineral extraído de la mina y lixiviándolo a continuación, mediante agentes lixiviantes, como el ácido sulfúrico diluido, disoluciones de sales de hierro, disoluciones clorhídricas con un oxidante y disoluciones amoniacales o sales de amonio (carbonato de amonio). Los métodos de lixiviación pueden ser: in situ, en escombreras de mina, en montones, en cajas o cajones y lixiviación en reactor agitado. En menas de baja ley y desechos industriales puede emplearse la lixiviación bacteriana. La Figura 30 presenta el proceso hidrometalúrgico del cobre.

Después de decantar y lavar el lixiviado se pasa a la etapa de extracción (recuperación del cobre), que se puede llevar a cabo por cualquiera de los siguientes procedimientos: extracción con disolventes orgánicos (LIX, KEDLEX, ACORGA), intercambio iónico utilizando resinas para la absorción selectiva de cobre, cementación y precipitación por reducción gaseosa, para producir metal en polvo.

El proceso de Electro Obtención (EO) consiste en la deposición electrolítica del cobre, a partir de disoluciones de lixiviación ricas o de las procedentes de la extracción con disolventes, y permite reducir cobre en solución a su estado sólido mediante la aplicación de energía eléctrica. Se busca que ocurran dos reacciones químicas en la celda electrolítica, que está compuesta por un electrolito conductor de corriente, un ánodo insoluble fabricado de plomo aleado con antimonio o titanio platinado, donde ocurre la reacción de oxidación, y un cátodo, formado por una placa de acero inoxidable 316-L, sobre el cual ocurre la reacción de reducción. En la superficie del ánodo acontece la llamada evolución de oxígeno, en la que la molécula de agua se descompone liberando dos electrones, oxígeno gaseoso y protones, de acuerdo con la reacción⁴⁶.

El cobre se reduce en la superficie del cátodo⁴⁷ hasta que el cátodo ha alcanzado el peso y espesor requeridos, en torno a los 60 kg, lo que usualmente toma entre 5 y 7 días. Se obtienen cátodos de 99,9 % de ley en cobre.

El proceso global se puede resumir según los esquemas mostrados en la Figura 30 y en la 31. En esta se puede observar la presencia de un ánodo unido a un cátodo mediante una conexión eléctrica que incluye una fuente de energía eléctrica. En el ánodo ocurre la descomposición del agua por oxidación del oxígeno, donde se liberan dos electrones por cada molécula de agua. Al mismo tiempo se generan dos moles

⁴⁶ Reacción anódica (oxidación): $H_2O \leftrightarrow 2H^+ + (1/2)O_2 + 2e^-$

⁴⁷ La reacción catódica es como sigue: $Cu^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Cu$

de protones y medio mol de oxígeno gaseoso. El cobre en solución debe difundir hacia la superficie del cátodo donde es depositado al capturar los electrones.

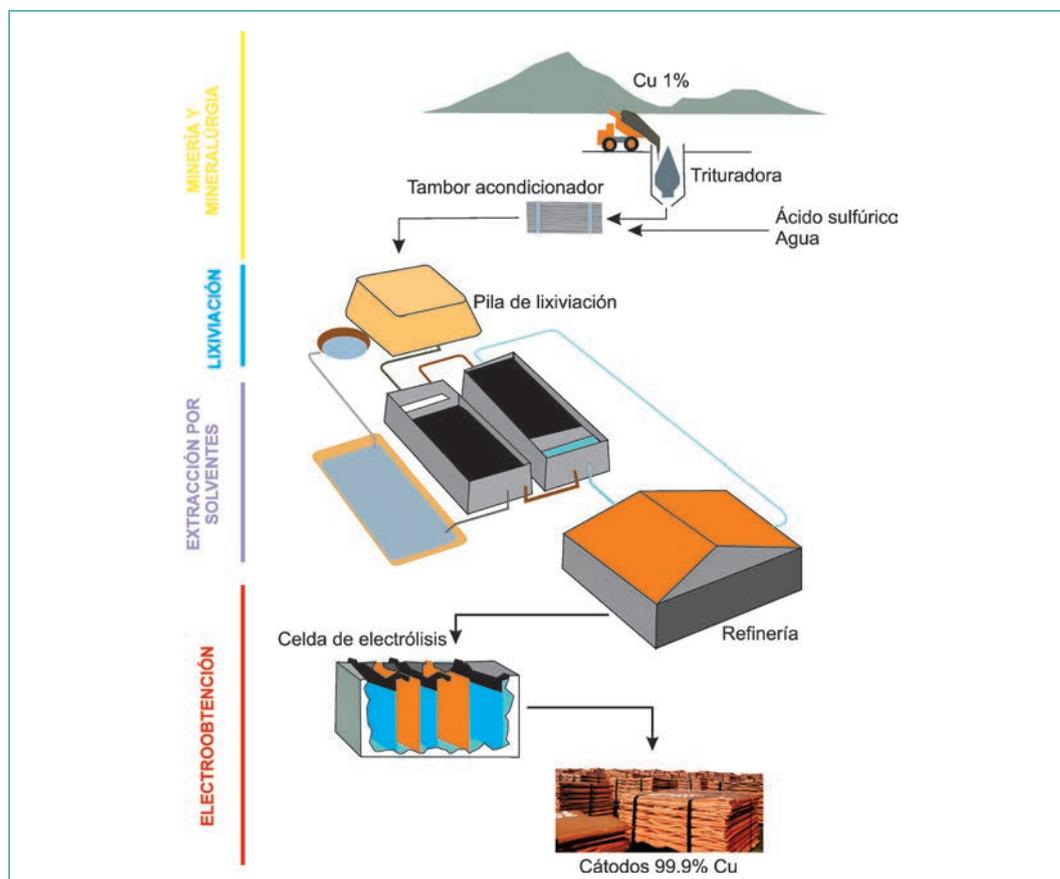


Figura 30. Diagrama de flujo general de la metalurgia del cobre por vía hidrometalúrgica. Fuente: (Sagredo Gómez, 2021).

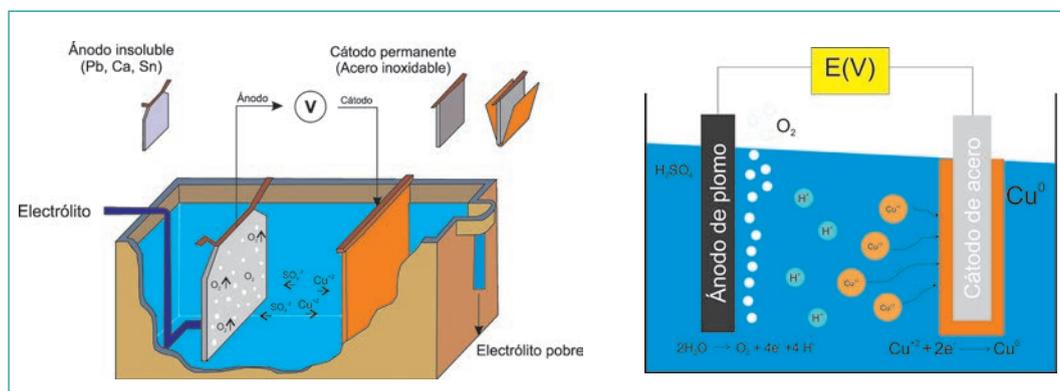


Figura 31. A. Esquema de la reacción de Electro-Obtención de cobre, **B.** Esquema simplificado de la reacción de Electro-Obtención de cobre. Fuente: reelaborado y modificado por los autores de (Inostroza Flores, 2017).

3.2. Metalurgia del litio⁴⁸

El litio (Li) se encuentra en unos 145 minerales debido a su gran reactividad química. A pesar de ello, únicamente la espodumena, la petalita, la lepidolita, la ambligonita y la eucryptita han sido fuentes comerciales de producción de litio.

La espodumena, es el mineral más abundante. Se trata de un silicato doble de litio y aluminio, $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$ (64,5 % SiO_2 , un 27,4 % Al_2O_3 , y un 8,1 % Li_2O), que generalmente se encuentra mezclado con cuarzo,

⁴⁸ Las principales fuentes de este apartado son (Píceros, n.d.; Waldron Arentsen, 2020 y Wilkomirsky, 1999).

feldespatos y micas y donde el contenido de litio es de 3,76 % como máximo. Los concentrados de espodumena suelen contener de 1,9 % a 3,3 % de Li.

La petalita ($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$) tiene una estructura de silicato y su contenido teórico de Li_2O es del 9,8 %. La lepidolita es un filosilicato que tiene composición variable y su fórmula general es $\text{K}_2(\text{LiAl})_3(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$.

Una importante fuente de obtención de litio, que ha incrementado considerablemente su participación en las últimas dos décadas, son las salmueras de salares, geiseres y lagos salados donde el litio se puede encontrar en la forma de cloruro, sulfato, sales dobles de potasio y magnesio y boratos de litio. El contenido de litio en las salmueras es muy variable, desde un 0,02 % como en las salmueras de Clayton Valley en Nevada y Searles Lake en California, hasta las del Salar de Atacama en Chile con un 0,13 %. Por evaporación y cristalización fraccionada de las sales contenidas es posible llegar a alrededor del 6 % de litio, equivalente a cerca de 21 % de LiCl^{49} .

De todas estas fuentes, las salmueras representan actualmente el 60 % de los recursos mundiales de litio (Comisión Chilena del Cobre, 2021) y en el futuro este porcentaje podría aumentar más con la progresiva explotación del Salar de Atacama y de otros salares de la cordillera de Los Andes. Debido a la continua exploración, los recursos de litio identificados han aumentado sustancialmente en todo el mundo y sumaban en 2022 alrededor de 89 millones de toneladas (U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2022).

El carbonato de litio es el compuesto base más importante entre las sales de Li y su demanda representa el 60 % de los productos del Li. Su importancia radica en que es el material de partida para la producción industrial de todos los demás compuestos de litio, incluido el cloruro de litio. El hidróxido de litio también se usa como precursor para la preparación del cloruro y del fluoruro de litio. En la Figura 32 puede verse el esquema que permite situar el conjunto del proceso desde los minerales o las salmueras a la obtención del litio y compuestos del litio utilizados en las baterías y en otros productos.

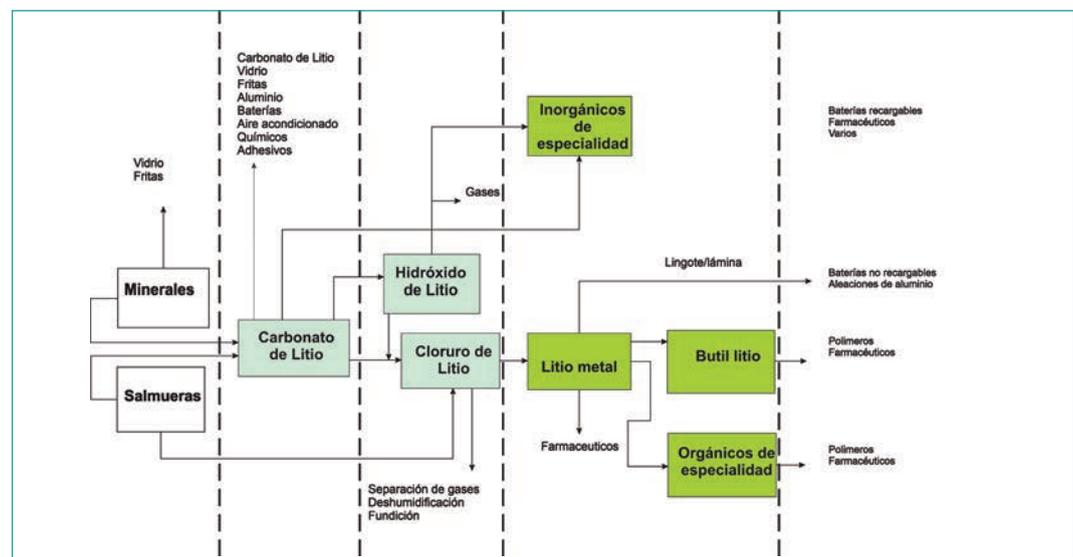


Figura 32. El árbol de los compuestos del litio. Fuente: modificado por los autores de (Comisión Chilena del Cobre, 2009).

A continuación, se examinarán, en primer lugar, los procesos a partir de minerales y a continuación a partir de salmueras.

⁴⁹ Para mayor detalle de las composiciones en diferentes salmueras, puede verse (Garcés, n.d.).

3.2.1. Procesos a partir de minerales (espodumena)

El primer paso del tratamiento de los minerales de litio mencionados; es el procesamiento físico, donde para la separación de los minerales de litio de los minerales de ganga se usan operaciones de trituración y molienda para la liberación de los minerales y, posteriormente, procesos gravimétricos y de flotación por espumas para la separación de minerales.

3.2.1.1. Obtención de hidróxido de litio a partir de espodumena

En el caso de la obtención de sales de litio a partir de la espodumena, la principal estrategia es, primero la conversión a carbonato, luego a cloruro, seguida de la electroobtención de sales fundidas. El carbonato de litio es el producto básico de litio más común en el mercado, utilizado como materia prima para la fabricación de diferentes sustancias y materiales. La conversión a carbonato se puede realizar por: (i) fusión alcalina y carbonatación, (ii) tostación ácida, calcinación y carbonatación (implica purificación y precipitación). Estos dos procesos se examinarán a continuación. También se puede llevar a cabo por vía húmeda mediante lixiviación con ácido sulfúrico⁵⁰.

La espodumena natural se encuentra en la forma cristalina α , que es prácticamente insoluble en ácido sulfúrico caliente, por lo que se requiere convertirla en la forma cristalina tetragonal β por calcinación (Píceros, n.d.). La calcinación puede ser simplemente una descomposición (pérdida de componentes volátiles) y un cambio estructural, pero también puede realizarse en presencia de aditivos (reactivos como piedra caliza, cal o un donante de sulfato) describiéndose entonces como un proceso de tostación.

En el proceso alcalino, el concentrado de espodumena (o lepidolita) se muele y se calcina con piedra caliza. El producto calcinado resultante luego se tritura, se muele y se trata con agua para obtener hidróxido de litio que se puede convertir en cloruro por reacción con ácido clorhídrico. La recuperación es de aproximadamente el 85-90 %. La adición de caliza permite formar un silicato de calcio estable, liberando el óxido de litio, que se puede recuperar posteriormente por lixiviación, ya que es fácilmente soluble en agua⁵¹

En el método de tostación ácida, calcinación y carbonatación, la espodumena se convierte, tostándola en un horno a 1.050-1.100 °C, de la forma alfa a una forma beta más reactiva. Después de la calcinación o tostación, los siguientes pasos son hidrometalúrgicos, con el fin de solubilizar el litio en un medio acuoso. El producto obtenido se puede tratar de distintas formas dependiendo del producto final que se desea.

Si se quiere producir hidróxido de litio (LiOH), el producto calcinado se muele y luego se lixivia con agua, de manera que se recupera el litio en solución acuosa como hidróxido de litio⁵².

La pulpa lixiviada se sedimenta y filtra y el filtrado obtenido, que contiene cerca del 10 % de hidróxido de litio en solución, se evapora y cristaliza formando cristales de hidróxido de litio monohidratado $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$, que se retira del cristalizador junto con el licor. A continuación, se centrifuga y se seca a 80-120 °C con vapor indirecto para tener los cristales secos del monohidrato.

La solución obtenida en la centrifugadora se retorna al cristalizador y una pequeña parte se descarta para evitar la acumulación de impurezas como Al, Mg, Ca, K y Cl. Los cristalizadores se incrustan rápidamente de cristales de hidróxido de litio, lo que requiere de un lavado semanal con ácido clorhídrico, HCl, para desincrustarlos. Este cloruro de litio producido con el HCl se debe tratar separadamente.

⁵⁰ Para más detalle ver (Garcés, n.d.; Píceros, n.d. y Wilkomirsky, 1999).

⁵¹ La reacción global que tiene lugar es la siguiente: $2\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2(\text{s}) + 4\text{CaCO}_3(\text{s}) \rightarrow \text{Li}_2\text{O}(\text{s}) + 4\text{CaSiO}_3(\text{s}) + \text{Al}_2\text{O}_3(\text{s}) + 4\text{CO}_2(\text{g})$

⁵² Según la reacción: $\text{Li}_2\text{O}(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2(\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O})(\text{aq})$

Si se requiere hidróxido de litio anhidro, el monohidrato se calina a baja temperatura en vacío a 100-120 °C, y se envasa luego el producto, ya que es hidroscópico.

La Figura 33 recoge el diagrama de producción de hidróxido de litio anhidro y monohidratado a partir de espodumena.

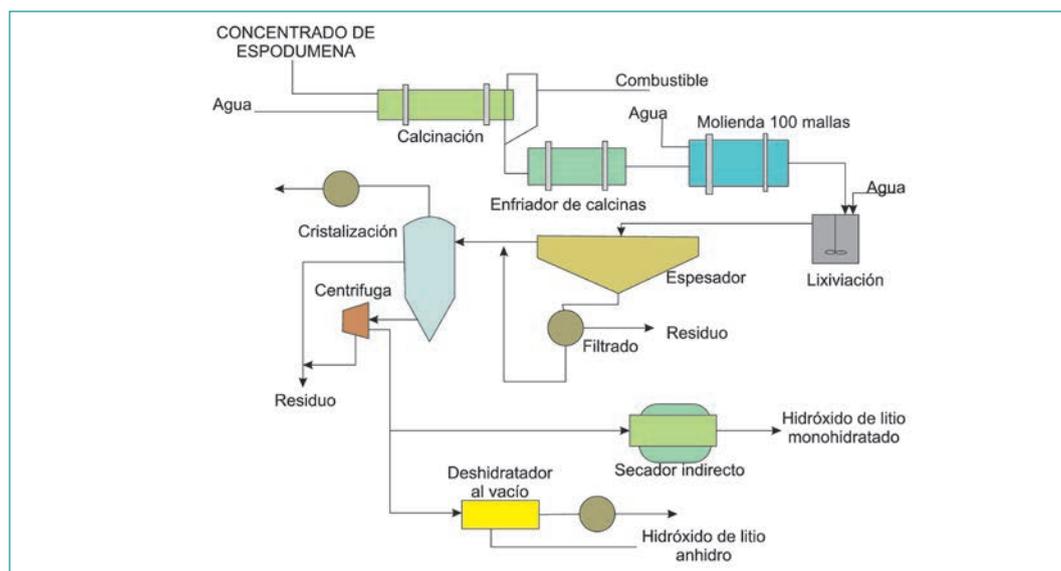


Figura 33. Diagrama de procesos para producir hidróxido de litio anhidro y monohidratado a partir de concentrados de espodumena. Fuente: modificado por los autores de (Píceros, n.d.).

3.2.1.2. Obtención de carbonato de litio a partir de espodumena

El producto calcinado de espodumena también se puede emplear para producir carbonato de litio. En este caso, el calcinado se muele y luego se trata con ácido sulfúrico concentrado (96-98 %) a 250 °C en un reactor agitado, formando así sulfato de litio (soluble), que se extrae posteriormente mediante lixiviación con agua. La pulpa se decanta y se filtra. La solución obtenida se trata con hidróxido de calcio para precipitar los sulfatos presentes como sulfato de calcio y dejar el litio en solución como hidróxido.

En la Figura 34 se encuentra esquematizado el diagrama de procesos para obtener carbonato de litio a partir del calcinado de espodumena por sulfatación con ácido sulfúrico, lixiviación con agua y precipitación con carbonato de sodio. El producto obtenido es carbonato de litio con una riqueza del 98,5 – 99 %.

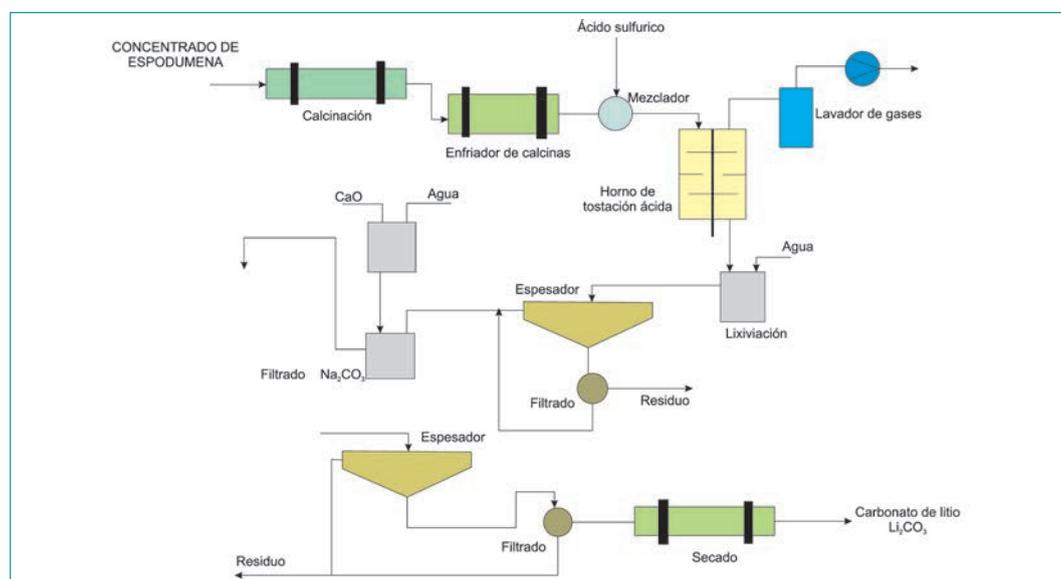
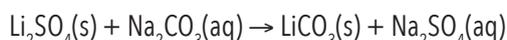


Figura 34. Obtención de carbonato de litio desde concentrado de espodumena mediante tostación, lixiviación y precipitaciones sucesivas. Fuente: modificado por los autores de (Píceros, n.d.).

La reacción con el ácido sulfúrico concentrado a 250 °C es dificultosa y complicada y ocurre en forma de una pasta semi-plástica con apariencia de cemento pastoso y con generación de gases altamente corrosivos (SO₂, SO₃ y ácido sulfúrico gaseoso), lo que requiere de reactores agitados tipo mezcladores u hornos de pisos, con control y neutralización de los gases de salida⁵³.

La precipitación del carbonato de litio se efectúa a 90-95 °C, ya que tiene solubilidad inversa con la temperatura, con cerca de 0,7 g/l a 100 °C y 1,5 g/l a 0 °C, con ello se evita una excesiva disolución del carbonato. El lavado del carbonato se hace con agua caliente a 90-95 °C y las soluciones de lavado recirculan al proceso para no perder carbonato de litio disuelto.

El carbonato de litio también se puede recuperar mediante la adición de carbonato de sodio a la solución después del ajuste del pH, la purificación y la evaporación.



El proceso de producción de carbonato de litio a partir de la espodumena encontró algunos problemas económicos en la década de 1990 debido a que la producción de carbonato de litio desde salmueras (particularmente del Salar de Atacama) era más rentable y menos demandante energéticamente, ya que las salmueras agotadas (pero aun con cloruros y/o sulfatos) se devuelven al salar.

3.2.2. Obtención de carbonato de litio a partir de salmueras

La obtención de litio a partir de salmueras naturales es una creciente e importante fuente de litio en el mundo como carbonato, cloruro e hidróxido de litio. La extracción de litio de salmueras y agua de mar es entre un 30 y un 50 % menos costosa que la extracción de los minerales.

La composición de las salmueras comerciales de donde se recupera litio varía considerablemente, desde salmueras con bajos contenidos de litio (0,02 %) hasta algunas con contenidos cercanos al 0,4 %, y presencia de otros elementos como potasio, sodio, calcio, magnesio, hierro, boro, bromo, cloro, nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos, lo que requiere que cada salmuera sea tratada de acuerdo con su composición. En cuanto al boro, en general, hay trazas en concentraciones muy bajas, que no alcanzan para obtener algún compuesto del boro, pero sí para considerarse una impureza para producir compuestos de litio, debido a la alta pureza requerida de estos últimos.

Todas las salmueras son previamente concentradas por evaporación solar para aumentar el contenido de litio y precipitar sales que pueden ser comerciales, como el KCl, NaCl, K₂SO₄, Na₂SO₄, etc. así como otras sales dobles como la silvinita, carnalita, bishoffita, schoenita, kainita, glasserita, glauberita, epsomita o singerita. Las salmueras más abundantes son de sulfatos y cloruros (ver Figura 35, donde se muestra el

⁵³ Las reacciones que ocurren son las siguientes:

- (i) Sulfatación con ácido sulfúrico. Reacción reversible con una temperatura de inversión de 502 °C.
 $2\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2(\text{s}) + 4\text{H}_2\text{SO}_4(\text{l}) \rightarrow \text{Li}_2\text{SO}_4(\text{s}) + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{s}) + 4\text{SiO}_2(\text{s}) + 4\text{H}_2\text{O}$
- (ii) Precipitación del aluminio como alúmina insoluble:
 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{s}) + 3\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq}) \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3(\text{s}) + 3\text{CaSO}_4(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O}$
En esta etapa, la pulpa se espesa y filtra para dejar en solución solo el sulfato de litio.
- (iii) Formación de hidróxido de litio monohidratado (se agrega un exceso de Ca(OH)₂ para formar el hidróxido de litio):
 $\text{Li}_2\text{SO}_4(\text{aq}) + \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2(\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O})(\text{aq}) + \text{CaSO}_4(\text{s})$
Esta reacción tiene una temperatura de inversión cercana a los 30 °C, por lo que debe enfriarse la solución a 5-10 °C.
- (iv) El litio en solución está como hidróxido de litio y se precipita finalmente desde el filtrado a la forma de carbonato de litio empleando carbonato de sodio al 20-24 % en peso:
 $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}(\text{aq}) + \text{NaCO}_3(\text{aq}) \rightarrow \text{LiCO}_3(\text{aq}) + \text{NaOH}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}$

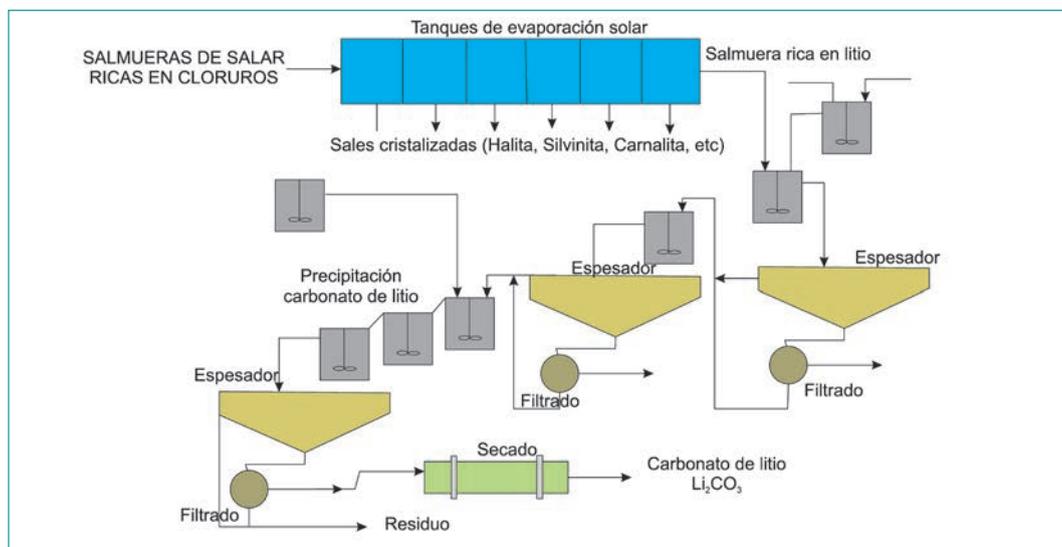


Figura 35. Obtención de carbonato de litio desde salmueras naturales altas en cloruros. Fuente: modificado por los autores de (Píceros, n.d.).

diagrama de flujo del proceso de obtención de carbonato de litio a partir de salmueras naturales altas en cloruros).

Las salmueras, si bien son líquidas, no contienen agua libre, ya que están saturadas y solo tienen agua de hidratación de las distintas especies que forman hidratos. El agua libre es solo una fracción muy pequeña del total de la salmuera. Sin embargo, las salmueras son fluidas, transparentes y de relativamente baja viscosidad.

Las salmueras, por ejemplo, del Salar de Atacama, se bombean desde 30 a 50 m de profundidad del salar y luego se dejan evaporar en piscinas (pozas) de 1,5 m de profundidad y grandes dimensiones (600 x 800 m o mayores) donde comienza una cristalización secuencial de sales. La altura del Salar de Atacama (sobre 1.600 m), la baja humedad ambiente (<15 %) y la elevada radiación solar (sobre 1 kW verano/m², 0,4 kW invierno/m²) favorecen una alta evaporación de salmuera, cercana a 10 cm/día entre diciembre y marzo.

Como generalmente las salmueras de cloruro están saturadas en NaCl, la primera sal que precipita es la halita (NaCl) o la halita y sulfato de calcio hidratado, si hubiera sulfatos presentes. La precipitación continúa con la silvinita (KCl-NaCl) y luego la silvita (KCl). Esta última es un producto de uso industrial, de forma que hacia el término de la precipitación de la silvinita se transfiere la salmuera a otra piscina y recupera la sal precipitada de KCl + silvinita para así obtener KCl por flotación diferencial. Se prosigue con la evaporación de la salmuera para cristalizar seguidamente la carnalita (KCl.MgCl₂.6H₂O) y luego la bishoffita (MgCl₂.6H₂O).

En esta etapa, el litio se ha incrementado hasta cerca del 4,5 % con un contenido de magnesio cercano al 4 %. Debido a que en la posterior purificación química de la salmuera se requiere tener entre un 5,5-6 % de litio, al proseguir la evaporación de la salmuera, precipita carnalita de litio (LiCl.MgCl₂.6H₂O) lo que disminuye el rendimiento de la operación. Sin embargo, es posible lixiviar la carnalita de litio con salmuera fresca para recuperar parte del litio contenido.

La salmuera concentrada en litio contiene entre un 5,5 y un 6,0 % de litio, equivalente a un 33,4-36,5 % de LiCl y se purifica en una o dos etapas para eliminar el resto de otros elementos, esencialmente el magnesio y calcio remanentes. La precipitación se hace en dos etapas: primero con carbonato de sodio y luego con hidróxido de calcio (lechada de cal) como se presenta en la Figura 35. El sulfato presente en la forma de sulfato de sodio también precipita como sulfato de calcio. En esta etapa, se introduce agua libre al sistema con la solución de 23-24 % de Na₂CO₃, de manera que ahora el sistema es acuoso.

El carbonato de sodio que se agrega en la primera etapa se hace para evitar una excesiva cantidad de precipitado de hidróxido de magnesio en la segunda etapa, que es difícil de separar de la salmuera por ser excesivamente fino (submicrónico), en tanto que también contribuye a precipitar el cloruro de calcio, como carbonato de calcio, ya que normalmente la cantidad de sulfato de sodio presente en la salmuera no es suficiente para precipitar todo el cloruro de calcio a sulfato de calcio.

La salmuera purificada, previamente filtrada para separar el sólido suspendido, se trata finalmente con carbonato de sodio en caliente (90-95 °C), para precipitar el carbonato litio⁵⁴.

El carbonato de litio precipitado se sedimenta y filtra en caliente y luego se lava extensamente con agua caliente desmineralizada en el filtro. El carbonato se seca a 130-160 °C en un secador rotativo indirecto y envasa, protegido de la humedad.

El producto final tiene alrededor de un 99 % de Li_2CO_3 y es la materia prima para la producción de hidróxido de litio o de cloruro de litio de alta pureza empleado en la obtención de litio metálico por electrolysis de sales fundidas. En este caso, el carbonato se trata con ácido clorhídrico para formar nuevamente el LiCl ⁵⁵.

3.2.3. Obtención de hidróxido de litio

Para obtener hidróxido de litio a partir de carbonato de litio, este se trata con hidróxido de calcio (lechada de cal)⁵⁶. La pulpa resultante, que contiene hidróxido de litio en solución y carbonato de calcio precipitado, se lava en un sistema de cuatro o cinco decantadores en serie en contracorriente para obtener finalmente una pulpa con cerca del 10 % de hidróxido de litio en solución (cerca de 24 g de $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}/\text{l}$ a 20 °C). Esta, después de ser filtrada en filtro prensa, se lleva a un sistema de evaporadores de triple efecto para cristalizar el hidróxido de litio (ver Figura 36, donde se muestra el diagrama de flujo del proceso de obtención de hidróxido de litio monohidratado a partir de carbonato de litio técnico).

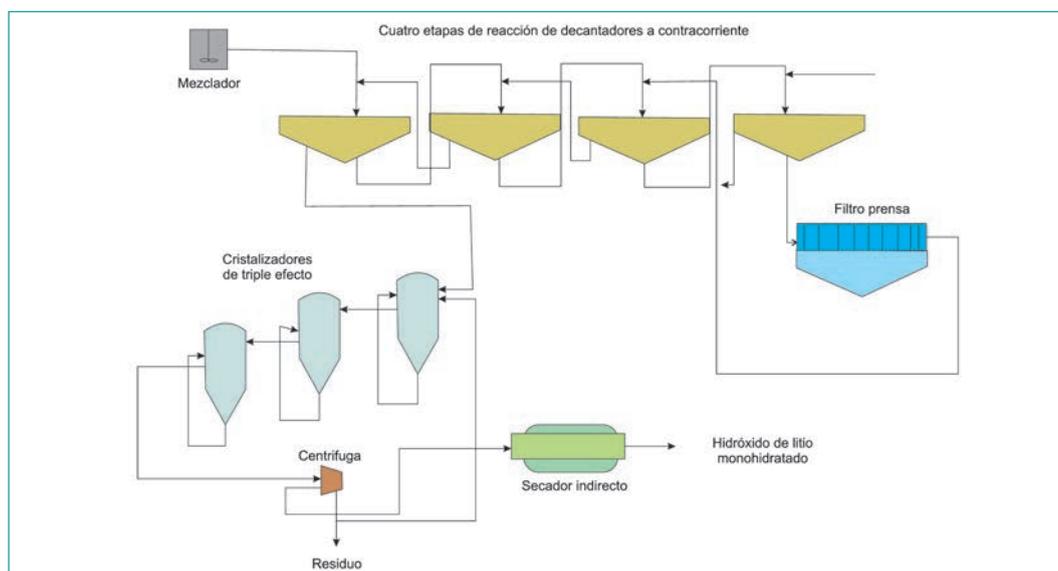
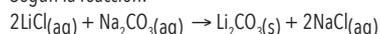


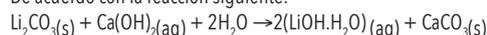
Figura 36. Producción de hidróxido de litio monohidratado a partir de carbonato de litio técnico. Fuente: modificado por los autores de (Píceros, n.d.).

⁵⁴ Según la reacción:



⁵⁵ A efectos de conversión de la producción y reservas se utiliza habitualmente: 1 tonelada de litio = 5,28 toneladas de carbonato de litio equivalente (LCE, por sus siglas en inglés)

⁵⁶ De acuerdo con la reacción siguiente:



El producto obtenido son cristales de hidróxido monohidratado de litio y licor, que aún contiene cerca de 25 g/l de hidróxido de litio. Los cristales de hidróxido de litio monohidrato se separan en una centrifugadora y luego se secan a 80-100 °C con vapor indirecto. La solución resultante del centrifugado de los cristales se retorna al cristizador, descartando una parte de esta para evitar la acumulación de impurezas como K, Ca, Na y Mg. Si se desea hidróxido de litio anhidro, este se seca indirectamente y en vacío a 100-120 °C. En el caso de que se quiera obtener cloruro de litio, el carbonato se trata con ácido clorhídrico para formar el LiCl⁵⁷.

3.2.4. Obtención de litio metálico

La producción del litio metálico requiere de un cloruro de litio de un 99,9 % de pureza. El cloruro de litio tiene una solubilidad de 70,2 g/l a 20 °C y se concentra por evaporación/cristalización hasta tener alrededor del 99,9 % de LiCl que luego se seca.

Aun cuando se ha producido litio metálico mediante metalotermia por reducción con aluminio y silicio a partir del cloruro de litio o mediante magnesio a partir del óxido de litio, estos métodos no tienen aplicación práctica y la totalidad del litio metálico se obtiene mediante electrolisis de sales fundidas empleando un electrolito de cloruro de litio (55 % en peso) y cloruro de potasio (45 % en peso) usando ánodos de grafito. Las celdas operan a 420-500 °C y se calientan externamente con quemadores de gas o gasóleo.

El depósito que se consigue es del 99,8 % de litio como mínimo, con una recuperación de litio del 98 % y una eficiencia de corriente de aproximadamente el 80 %. Se debe evitar el contacto del metal con aire para impedir la oxidación y la formación de nitruro de litio, que lo contaminaría por lo que este se sangra bajo gas inerte o se enfría inmediatamente.

El litio que se obtiene (líquido) se cuela en lingotes pequeños para su posterior laminación a la forma deseada. Todas las operaciones deben ser efectuadas en atmósfera protegida cuando el litio está líquido para evitar su contaminación.

En la Figura 37 se presenta un esquema de una celda de electrolisis de litio, que es aislada del ambiente, empleando electrolito de LiCl-KCl. Un subproducto de la celda es cloro gaseoso comercializable, que se extrae para su recuperación⁵⁸.

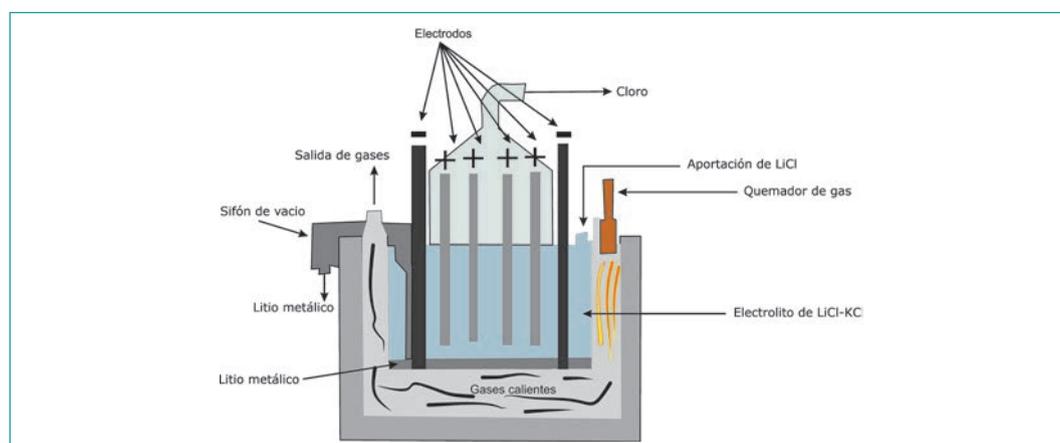


Figura 37. Celda de electroobtención de litio metálico. Fuente: modificado por los autores de (Piceros, n.d.).

⁵⁷ Según la reacción: $\text{Li}_2\text{CO}_3(\text{s}) + 2\text{HCl}(\text{aq}) \rightarrow 2\text{LiCl}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2(\text{g})$

⁵⁸ Las reacciones que ocurren en la celda son:

Ánodo: $\text{LiCl}(\text{l}) = \text{Li}^+ + \text{Cl}^-$; $\text{Cl}^- = \text{Cl}(\text{g}) + \text{e}^-$

Cátodo: $\text{Li}^+ + \text{e}^- = \text{Li}(\text{l})$

3.3. Metalurgia de las tierras raras

Se conoce como tierras raras al conjunto de 17 elementos químicos: escandio, itrio y los 15 elementos del grupo de los lantánidos (lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometeo, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio). El escandio y el itrio se incluyen entre las tierras raras porque aparecen frecuentemente mezclados con los lantánidos en los mismos yacimientos⁵⁹.

Los minerales más importantes de tierras raras (TR o conocidas por sus siglas en inglés como REE, *Rare Earth Elements*) son la monacita, que es un ortofosfato de tierras raras ((TR,Th)PO₄) y la bastnasita que es un fluorocarbonato ((TR)(CO₃)F), que contiene principalmente elementos de tierras raras ligeras. La monacita puede contener hasta un 70 % de tierras raras, principalmente Ce y La, así como cantidades significativas de Nd, Pr y Sm. El contenido de Th también es bastante elevado, oscilando entre el 4 y el 12 %, lo que es un problema en el procesamiento de la monacita. La bastnasita es la fuente del 70 % de los elementos de tierras raras del mundo.

Las tierras raras no se dan de forma nativa y la estabilidad de sus óxidos, cercana a la del óxido de calcio o del aluminio, hace difícil extraerlos por pirometalurgia. Se aplica pues la vía hidrometalúrgica, a veces seguida de una reducción metalotérmica o reducción electrolítica, que requerirá, dadas las dificultades de extracción, de instalaciones costosas y de dimensiones justificables según el precio de venta de las TR.

En el proceso general de producción de tierras raras se puede distinguir tres fases, que se muestran en la Figura 38: (i) preparación y concentración de la menas (enriquecimiento físico), (ii) enriquecimiento químico y (iii) separación y purificación⁶⁰.



Figura 38. Diagrama de procesamiento general de las tierras raras. Fuente: (Avendaño, 2017).

En la primera etapa se trata de reducir el tamaño del mineral (trituration y molienda), para luego pasar a la etapa de concentración, que incluye técnicas gravitatorias, magnéticas, electrostáticas y de flotación.

El procesamiento más común en la siguiente etapa es la vía hidrometalúrgica, y comienza con una lixiviación del concentrado de mineral, con una disolución, que puede ser ácida o básica. La Tabla 17 ofrece una descripción general de las tecnologías de lixiviación utilizadas tanto a partir de la producción primaria de tierras raras como para los recursos secundarios. Todos los procesos involucran múltiples pasos y algunos usan ácidos y álcalis de forma interactiva.

⁵⁹ Para más detalle sobre las tierras raras, ver (Prego, 2019) y (Prego, 2021).

⁶⁰ El procesamiento de tierras raras está concentrado en China (85 %) (European Commission, 2022b).

Mineral	Proceso	Rendimiento de tierras raras	Detalles	Estatus
Bastnasita	1) Lixiviación con HCl para eliminar los carbonatos que no son de REE 2) Calcinación del residuo para formar REO	85-90 %	La forma más antigua de procesar concentrados de bastnasita	Obsoleto
	Digestión con HNO ₃ o H ₂ SO ₄	98 %	La elección del ácido depende del tratamiento posterior: extracción con disolventes → precipitación HNO ₃ → H ₂ SO ₄	Obsoleto
	1) Tostación a 620 °C liberando CO ₂ 2) Lixiviación con HCl al 30%	-	El Ce ^{+III} se oxida a Ce ^{+IV} durante la tostación. Los fluoruros de REE no lixiviarán, el residuo es comercializable	Obsoleto
	1) Conversión alcalina RE ₂ F ₃ → RE(OH) ₃ 2) Lixiviación con HCl	-	El proceso puede ir precedido de lixiviación con HCl para extraer carbonatos de REE antes de la conversión alcalina	En uso
	1) Tostación con ácido sulfúrico 2) Lixiviación con solución de NaCl 3) Precipitación como sulfatos dobles de Na	-	Los precipitados se convierten en cloruros para su posterior purificación mediante extracción con disolventes.	En uso
Monacita	Digestión en H ₂ SO ₄ caliente	-	Las condiciones del proceso determinan lo que se lixivia: solo REE o LREE+HREE+Th No se obtiene ningún producto puro	Obsoleto
	1) Digestión en NaOH caliente al 60-70 % 2) Lavado del residuo con agua caliente 3) Lixiviación con ácido mineral a elección	98 %	El Ce no puede lixivarse si hay Mn presente. El Th se lixivia junto con REE. El Na ₃ PO ₄ es un subproducto comercializable	En uso
	1) Calentamiento en atmósfera reductora y sulfurosa con CaCl ₂ y CaCO ₃ 2) Lixiviación con HCl al 3 %	89 %	No requiere molienda fina. El Th no se lixivia, permanece en el residuo como ThO ₂ . No hay problema de Mn	En uso
Arcillas con iones de tierras raras adsorbidos	Lixiviación salina con (NH ₄) ₂ SO ₃	80-90 %	Se dirige a REE adsorbidas mediante intercambio de cationes.	En uso
	Lixiviación con agua de mar	40 %	Proceso ineficiente pero barato	I+D
	Lixiviación ácida con ácido fuerte (pH<1)	Todos	Disuelve toda la arcilla, incurre en costes adicionales significativos	No empleado

Tabla 17. Resumen de las tecnologías de lixiviación en la producción primaria de tierras raras. Nota: REO = óxidos de tierras raras, LREE = tierras raras ligeras, HREE = tierras raras pesadas. Fuente: traducido por los autores de (Peelman, et al., 2015).

En el enriquecimiento químico de la bastnasita una de las principales dificultades era extraer los fluoruros. En la actualidad, se ha resuelto de dos maneras diferentes: (i) pre/postratamiento mediante una tostación alcalina con hidróxido de sodio o (ii) ácida con ácido sulfúrico.

El tratamiento alcalino es un proceso de tres pasos. Se procede con una lixiviación ácida con HCl para convertir los carbonatos de tierras raras en cloruros. Posteriormente, se tratan con hidróxido de sodio a 96 °C para convertir los fluoruros de tierras raras en hidróxidos y, a continuación, se procede a disolver los hidróxidos por lixiviación con HCl⁶¹. Molycorp habría utilizado el método alcalino en la mina Mountain Pass antes de que cerrara.

⁶¹ Las reacciones químicas serían las siguientes:

$$\text{TRF}_3 - \text{TR}_2(\text{CO}_3)_3 + 9\text{HCl} \rightarrow \text{TRF}_3 + 2\text{TRCl}_3 + 3\text{ClH} + 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2$$

$$\text{TRF}_3 + 3\text{NaOH} \rightarrow \text{TR}(\text{OH})_3 + 3\text{NaF}$$

$$\text{TR}(\text{OH})_3 + 3\text{ClH} \rightarrow \text{TRCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$$

En la tostación con ácido sulfúrico, el concentrado de bastnasita se calienta en una solución de H_2SO_4 al 98 % a una temperatura de 400-500 °C durante varias horas. Esto descompone la matriz de fluorocarbonato de la bastnasita, liberando CO_2 y ácido fluorhídrico. Las tierras raras se convierten en sus sulfatos y pueden precipitarse selectivamente como sulfatos dobles de Na lixiviando el residuo con agua que contiene NaCl. Los precipitados se convierten en cloruros para una mayor purificación con extracción con solventes. Este proceso es el utilizado en los procesos de enriquecimiento químico en China, en particular en la mina de Bayan Obo.

En el caso de la monacita, el concentrado puede ser atacado químicamente con ácido sulfúrico o hidróxido de sodio para disolver los elementos de tierras raras. Además, se disuelven elementos como el torio, uranio y algunos sulfatos y fosfatos presentes en el concentrado.

El método alcalino es actualmente una de las principales tecnologías de lixiviación de la monacita⁶². En este caso, el concentrado de monacita es atacado con una solución de hidróxido de sodio concentrada (60-70 %) a 140-150 °C durante cuatro horas, después de lo cual se pasa a una operación de filtración. El residuo sólido se disuelve en una solución ácida caliente de HNO_3 para la extracción con solvente usando fosfato de tributilo o tributil fosfato (TBP) y H_2SO_4 para la extracción con solvente usando aminas. Este proceso requiere una molienda adecuada del mineral de monacita antes del tratamiento (tamaño de partícula por debajo de 45 μm) para que se puedan lograr índices de extracción del 98 % incluso con minerales de ley relativamente baja.

En este proceso se recupera el fosfato trisódico del filtrado por evaporación/cristalización. Este subproducto es comercializable, lo que ha sido un gran atractivo para el uso comercial de este proceso. Por su parte, el torio al final del proceso puede terminar en forma de nitrato y el uranio en forma de fluoruro⁶³.

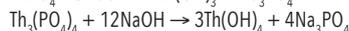
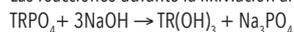
Las arcillas con iones adsorbidos son arcillas de alúmina-silicato en las que se han adsorbido iones de elementos de tierras raras. Aunque estas arcillas tienen una concentración promedio de solo 0,05-0,2 % en peso, su facilidad para procesar y su fracción de tierras pesadas, relativamente alta, las convierte en un recurso viable. Estas arcillas no requieren un proceso previo y contienen muy pocos elementos radiactivos.

En la lixiviación se usan comúnmente como agentes lixiviantes $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y NaCl ⁶⁴. La cinética del proceso de lixiviación es muy rápida. El proceso industrial, que se utiliza actualmente en China, utiliza una arcilla iónica con una concentración de óxidos de tierras raras entre 0,08 y 0,8 % en peso y un lixiviado de 7 % de NaCl y 1-2 % de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ a un pH de 4 (Peelman et al., 2015). Se logra una tasa de recuperación de óxidos de tierras raras de hasta el 95 %.

A continuación, la separación y purificación busca separar los óxidos de tierras raras de forma individual, utilizando un sistema de varias etapas de extracción con solventes, precipitaciones y secados.

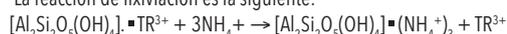
Para la producción de metales, los óxidos individuales se electrolizan. La afinidad de los elementos de las tierras raras por el oxígeno muestra que su reducción al estado metálico no es particularmente fácil

⁶² Las reacciones durante la lixiviación alcalina son:



⁶³ Merritt ha propuesto un método en el que la monacita se calienta con CaCl_2 y CaCO_3 en una atmósfera reductora y sulfurante. Esto conduce a la conversión de los fosfatos de tierras raras en oxisulfuros y oxiclорuros de tierras raras, al mismo tiempo que se crea un óxido de torio estable y cloropatita A partir de esta mezcla, las tierras raras se pueden lixiviar selectivamente con HCl al 3 %.

⁶⁴ La reacción de lixiviación es la siguiente:



en un medio acuoso o incluso para una simple reducción química. La ruta electrolítica es aplicable para elementos con baja temperatura de fusión (La, Ce, Pr y Nd). Una mezcla de cloruro de tierras raras $TRCl_3$ con $NaCl$ o $CaCl_2$ que constituye el baño de sales fundidas, se electroliza en un crisol de acero revestido internamente con grafito que sirve como cátodo y una barra de grafito que sirve como ánodo. Este paso de electrolisis de sales fundidas se concentra hoy en día casi por completo en China (IRENA, 2022).

En la Figura 39 se muestra el diagrama de flujo del proceso global utilizado para obtener neodimio. Pueden observarse los procesos de tostación y lixiviación que se aplican sobre el concentrado y los posteriores procesos de extracción con disolventes y precipitación para obtener disprosio y neodimio.

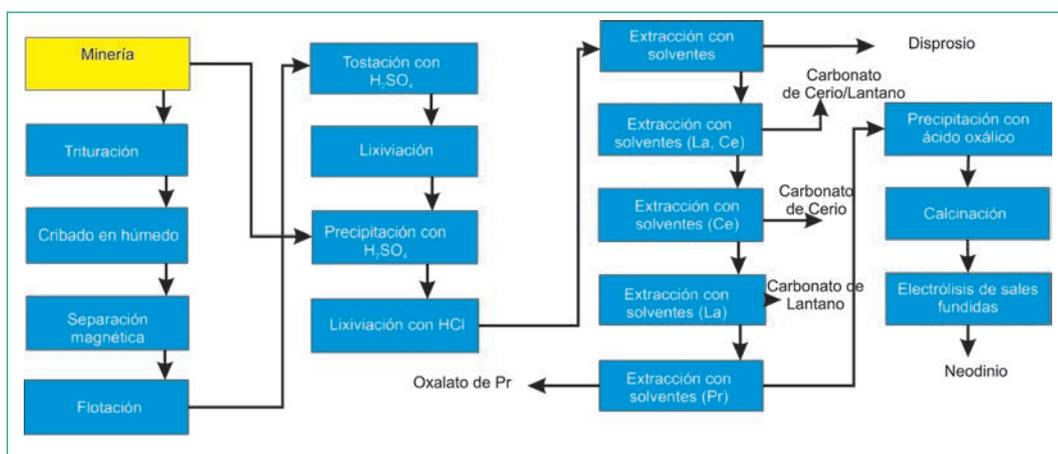


Figura 39. Diagrama de flujo del proceso global utilizado para obtener, entre otros productos, el neodimio, que es un elemento clave para la fabricación de los imanes NeFeB. Fuente: modificado por los autores de (IRENA, 2022).

3.4. Metalurgia del zinc⁶⁵

El zinc, al igual que otros metales no férricos, puede producirse mediante procesos hidrometalúrgicos o pirometalúrgicos. La mayor parte de las unidades de producción utilizan el proceso electrolítico (vía hidrometalúrgica), debido a la alta calidad del zinc que se obtiene. El proceso electrolítico, desarrollado comercialmente en 1917, supuso un verdadero impulso para la industria del zinc y, actualmente, acapara la producción de mayor tonelaje de metal produciendo el 85 % del zinc mundial.

Los procesos de reducción térmica (vía pirometalúrgica), basados en las reacciones: $ZnO(s) + CO(g) \rightarrow Zn(g) + CO_2(g)$, $C(s) + CO_2(g) \rightarrow 2CO(g)$ y una posterior condensación, presentan diferencias fundamentales entre todos ellos. Los diferentes procesos son: retortas horizontales, retortas verticales, electro-térmico y reducción en horno de cuba Imperial Smelting Furnace (ISF). En este caso, también son necesarias otras dos etapas posteriores, una que depende de la materia prima, y otra del proceso seguido, que son respectivamente: purificación y tratamiento de residuos.

Ambas vías tienen un punto común, que es la necesidad de realizar un tratamiento de los residuos, por tres motivos fundamentales: conseguir aumentar la recuperación del zinc, recuperar los otros metales valorizables contenidos en los concentrados y condicionantes medioambientales.

En la vía electrolítica de obtención del zinc, las etapas fundamentales son: tostación, lixiviación, purificación y electrolisis. Hay otras dos etapas, que presentan múltiples variantes: fusión y tratamiento de residuos⁶⁶.

⁶⁵ Las principales fuentes que se han empleado para este apartado son (Sancho et al., 2000) y (Sinclair, 2005).

⁶⁶ El único proceso que puede competir con este procedimiento es el ISF, aunque en este los hornos mayores solo han alcanzado las 80.000 t de zinc y las 40.000 t de plomo. Sin embargo, la pureza del zinc es baja si no se instala una destilación fraccionada. Las mayores instalaciones de zinc electrolítico llegan a producir entre 250.000 y 300.000 t por año de un zinc de calidad 99,995 %.

En España, la primera planta de zinc electrolítico arrancó en 1960 en Cartagena (Murcia), e inmediatamente después, en 1961, la de Asturiana de Zinc, en San Juan de Nieva (Asturias). Esta última alcanzó en el año 2020 una producción de 532.235 t, manteniéndose en el "Top 3" de las fábricas de su sector en el mundo y la primera en el continente europeo.

Al comienzo de la producción de zinc metal se usaron como menas las calaminas ($4\text{ZnO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), pero agotados los yacimientos de calamina hubo que recurrir a la esfalerita (ZnS) y hoy se puede decir que casi la totalidad de la producción mundial de zinc se obtiene a partir de sulfuros concentrados por flotación. La galena y la esfalerita son los sulfuros más comunes, pero también se presentan en cantidades significativas en la cerusita (PbCO_3), anglesita (PbSO_4) y smithsonita (ZnCO_3). En la Figura 40 se recoge un esquema general de una planta de electrolisis de zinc.

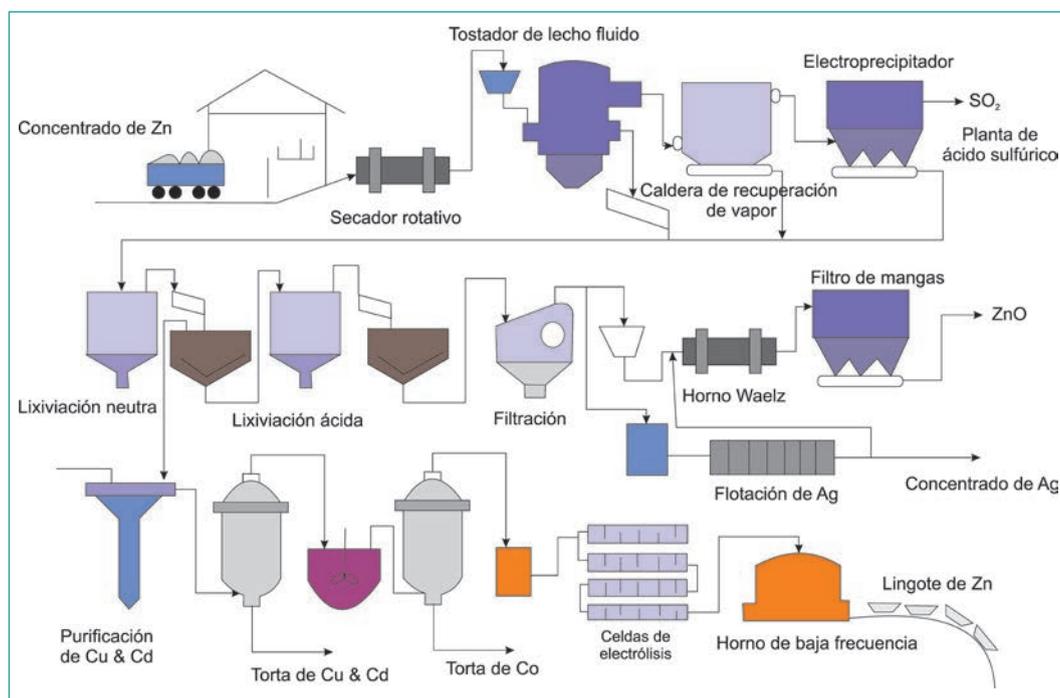
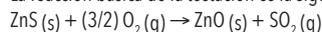


Figura 40. Diagrama de flujo de una planta de electrolisis de zinc. Fuente: modificado por los autores de (Huang, 1990).

La primera fase del proceso de fabricación del zinc es obtener el concentrado a partir del mineral. La concentración de menas por flotación ha resuelto el problema de las menas mixtas (cada vez más comunes); no obstante, antes de esta operación es preciso hacer una molienda que libere los distintos componentes del mineral. La práctica normal de la flotación en menas mixtas es flotar primero los minerales de cobre, deprimiendo los de zinc y plomo. A continuación, se flota la galena, luego la blenda y, a veces, finalmente, la pirita.

En la fase de tostación se somete el mineral a una tostación oxidante. Esta conversión de la blenda en óxido se exige tanto para la vía pirometalúrgica como para la hidrometalúrgica, puesto que el sulfuro no se ataca con facilidad por ácidos o bases y, además, es inerte a la reducción con carbón⁶⁷. La tostación debe efectuarse por encima de los 700 °C, en aire y con continua agitación. El dióxido de azufre obtenido se envía a la planta de obtención de ácido sulfúrico⁶⁸.

⁶⁷ La reacción básica de la tostación es la siguiente:



⁶⁸ Si el hierro está en forma sustitucional en la blenda, la formación de ferrita de zinc, $\text{ZnO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (franklinita), es inmediata y completa, ya que cuando se calientan a cierta temperatura los óxidos de zinc y de hierro se produce dicho compuesto. Incluso si el hierro está como pirita, a la temperatura de tostación de 900 °C, se fija el 90 % del hierro como ferrita de zinc.

A continuación, el ZnO obtenido, conocido como tostado o calcina, es enviado a la siguiente etapa de producción, que es la lixiviación, mediante la cual se disuelve el óxido de zinc en una disolución diluida de ácido sulfúrico (100-150 g/l), formando una disolución de sulfato de zinc (ZnSO_4). Dicha concentración de ácido solo permite disolver el ZnO, quedando las ferritas formadas en la tostación, $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, intactas.

Para mejorar la recuperación del zinc y evitar así pérdidas de metal se efectúa la lixiviación ácida en caliente (90-95 °C) durante 2-4 horas. Bajo estas condiciones no solo se disuelve el zinc sino también el hierro asociado a la ferrita de zinc, obteniéndose una solución rica en zinc que contiene entre 15-30 g de hierro/l (principalmente en forma férrica), que debe ser eliminado de la misma.

La lixiviación se realiza simultáneamente a la oxidación y la neutralización de forma que se pueda precipitar el hierro con el que coprecipitan impurezas como el As, Sb y Ge. También se coprecipitan sílice coloidal e hidróxido de aluminio. Esta precipitación del Fe^{3+} se efectúa actualmente, de forma preferente, haciendo uso de la precipitación jarosítica⁶⁹.

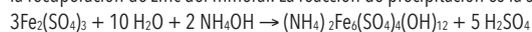
Después de la lixiviación se efectúa una purificación de la disolución con objeto de eliminar algunos elementos presentes en la misma. Dicha eliminación se realiza con la adición de zinc en polvo. La cantidad necesaria de polvo de zinc depende del porcentaje de impurezas que contiene la solución. Esta purificación dura entre una y ocho horas. Al final del proceso, se recuperan las partículas de zinc por filtración. Por medio de dicha adición se precipitan el Cu, el Co y el Cd, y se reduce el contenido de Sb y Ge a niveles aceptables. Esto es posible debido a la cementación de los mencionados metales por el zinc, que es menos noble que ellos. En la práctica, a 90 °C y a un pH de 4, el primero en precipitar es el Co; después se precipitan Cu, Ni, As y Sb. En un paso posterior, con más adición de zinc, se precipitan Cd, Tl y Ge, lo que se produce a pH igual a 3 y a una temperatura de 70-80 °C⁷⁰.

Una vez purificada la disolución, esta se pasa a la instalación de las cubas de electrolisis, que son rectangulares, de hormigón y recubiertas de plomo o PVC. Las cubas están asociadas en grupos en serie y por ellas circula el electrolito continuamente.

Los ánodos son de plomo aleado con algo de plata (1 %) para reducir su corrosión y, por tanto, la contaminación del zinc con plomo y los cátodos son de aluminio. A menudo, están perforados con el fin de facilitar la circulación del electrolito y ayudar a mantener una película de MnO_2 en la superficie. El manganeso constituye una de las principales impurezas del electrolito y parte de él se deposita parcialmente como MnO_2 en los ánodos formando una costra protectora beneficiosa ya que evita la contaminación por plomo. Este depósito cae y forma lodos y, a veces, crece demasiado incrementando la tensión anódica; así pues, las cubas y los ánodos se deben limpiar periódicamente para eliminar dicho MnO_2 .

Por su parte, los cátodos son de aluminio y su superficie ha aumentado a más del doble con lo que se ha aumentado mucho la productividad de las plantas. La producción por celda que contiene hasta 86 cátodos de 1,6 m², puede alcanzar 3 t/día.

⁶⁹ En la precipitación jarosítica el hierro precipita como jarosita, que es un compuesto sintético cristalino cuya fórmula es $\text{M}_2\text{Fe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$ en donde M puede ser Pb, Na, K, NH₄, etc., añadiendo NH_4^+ o Na^+ a la disolución, ajustando el pH a 1,5 y fijando una temperatura de unos 90 °C. El resto del hierro se puede precipitar a un pH de 3,5 por neutralización. La jarosita tiene la ventaja de separarse muy bien de la disolución. Con este método se puede permitir la lixiviación de más hierro, a la vez que se recupera el zinc de las ferritas aumentando, así, la recuperación de zinc del mineral. La reacción de precipitación es la siguiente:



⁷⁰ Parece ser que el As activa el zinc en polvo aumentando su selectividad y eficacia. Por ello se adiciónó, a veces, en forma de óxido; su peligrosidad hizo que se cambiara por Sb y entonces las condiciones varían ligeramente: a 65-75 °C, se precipitan Cu, Ni y Co juntos con algo de Cd. Se filtra y la disolución se trata con más zinc en polvo para precipitar el resto del Cd y los otros metales. En ciertas plantas, la precipitación de metales se hace, primero, en frío, obteniéndose Cd y Cu y luego en caliente, a 90 °C, precipitándose Co y Ge mediante adición de polvo de zinc en presencia de Sb.

El proceso de electrolisis necesita entre 30 y 40 °C y va a permitir al zinc depositarse en el cátodo de dónde se le despegará por pelaje (o *stripping*) cada 24, 48 o 72 horas, según el caso. El zinc obtenido es muy puro (99,995 %). Contiene menos de 50 ppm de impurezas, siendo el plomo la principal.

Los cátodos procedentes de la electrolisis no son una forma comercial usual de venta de zinc, por ello es preciso fundirlos. La fusión se lleva a cabo en hornos de inducción de baja frecuencia, de hasta 1.800 kW. El metal fundido alimenta a máquinas de colada con distintos formatos de lingote para la venta, una vez que se ha preparado bien la correspondiente aleación o bien el metal puro.

Las falsas entradas de aire en los citados hornos de inducción pueden provocar la formación de grasos u óxidos de zinc y espumas (2-2,5 %), que en forma de sólidos permanecen flotando sobre el zinc fundido. Para favorecer la separación de ambas fases se adiciona cloruro amónico.

Los óxidos, materiales y espumas producidos son tratados para su recuperación en forma de tochos de zinc que son refundidos en un horno basculante de inducción. El flujo de zinc se hace pasar por una fuerte corriente de aire, atomizado el zinc líquido, siendo recogido en unas cámaras de decantación. El polvo de zinc así producido es utilizado como agente cementante en la fase de purificación en lixiviación.

Como se ha comentado, el zinc también se puede obtener por medio de la pirometalurgia, para lo cual se desarrolló, a mediados del siglo pasado en el Reino Unido, el proceso Imperial Smelting Process. El ISF es un proceso de alto horno para la recuperación simultánea de zinc y plomo. En la actualidad, es el único capaz de competir con la obtención electrolítica de zinc. Además de las materias primas tradicionales como los sulfuros de plomo y zinc, en el ISP se pueden utilizar materiales secundarios como polvo y lodos de los procesos siderúrgicos. Por esta razón, la producción simultánea de plomo metálico es una ventaja del proceso, ya que en la mayoría de los materiales de reciclaje además de contener zinc, también contienen plomo. El ISP no produce residuos que contengan plomo como lo hacen otros procesos de fabricación de zinc⁷¹.

4. Conclusiones

Una vez obtenido el concentrado en la planta mineralúrgica, se requiere su procesamiento para obtener los materiales y metales necesarios para la transición energética y la sociedad digital. De ello se encarga la metalurgia extractiva.

Son dos las principales técnicas o métodos principales, que pueden implementarse de manera independiente o muy a menudo de manera combinada: la hidrometalurgia o vía húmeda y la pirometalurgia o vía seca.

La vía húmeda o hidrometalurgia incluye aquellos procesos que utilizan el agua (reacciones en fase acuosa) o disolventes ácidos o básicos para disolver selectivamente los metales de los minerales que los contienen y que trabaja a bajas temperaturas. La hidrometalurgia es escalable y los equipos que utiliza no necesitan de inversiones tan grandes como en la pirometalurgia donde la economía de escala ofrece

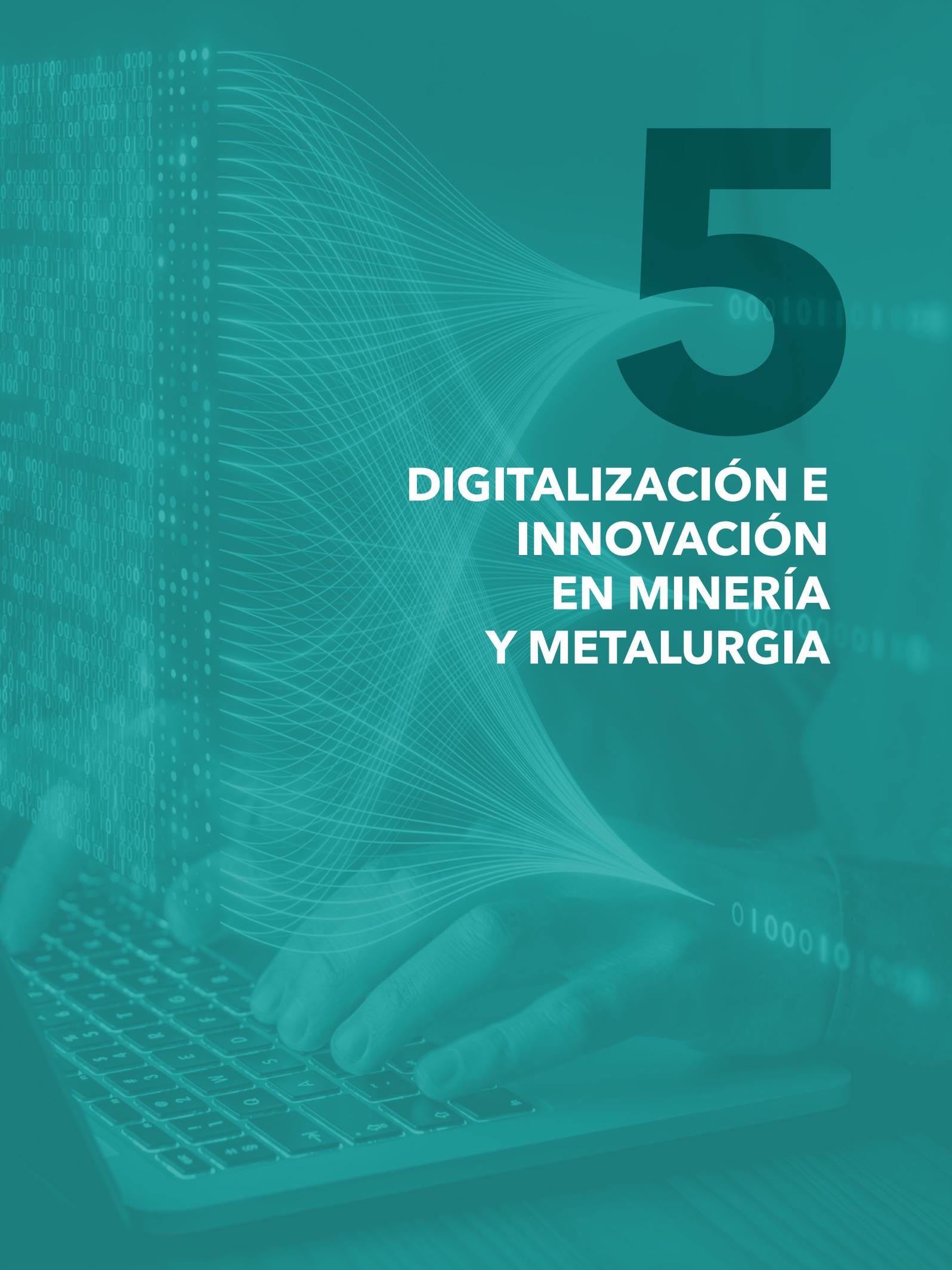
⁷¹ Una descripción del proceso pirometalúrgico por el método de la fundición imperial puede verse (Sancho et al., 2000).

menores costes. Hoy en día se trata de utilizar cada vez más la hidrometalurgia representando más del 70 % de los procesos metalúrgicos.

Por su parte, los procesos por vía seca o pirometalurgia emplean altas temperaturas para obtener el metal de los minerales que lo contienen. Es la metalurgia más antigua, aunque ha evolucionado a lo largo del tiempo. Hoy se utiliza con eficiencia y ventaja sobre la hidrometalurgia en la obtención de metales como el cobre o el plomo.

Además, existen otras opciones menos habituales como los procesos de electrometalurgia y los de biometalurgia. Los primeros utilizan la electricidad y pueden formar parte tanto de la vía pirometalúrgica como de la hidrometalúrgica, y en los segundos, se obtiene el metal mediante un proceso donde las bacterias son un elemento de apoyo que se complementa con la electrometalurgia. Habitualmente la electrometalurgia y biometalurgia son procesos complementarios.

Además, en este capítulo se han presentado con cierto detalle los procesos metalúrgicos utilizados en cuatro metales relevantes para la transición energética y la digitalización: el cobre, el litio, las tierras raras y el zinc. En dicha descripción se ha puesto de manifiesto la necesidad de procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos y el contenido ingenieril de los mismos, soportados en conocimientos científicos y técnicos de diversas disciplinas.



5

**DIGITALIZACIÓN E
INNOVACIÓN
EN MINERÍA
Y METALURGIA**

1. Introducción

La minería y la metalurgia no son ajenas a las innovaciones tecnológicas. Este capítulo recoge algunos aspectos relacionados con la digitalización y la innovación en minería y metalurgia. No se trata de ser exhaustivos, pero se ha considerado importante dedicarle un capítulo teniendo en cuenta el papel de las materias primas minerales en la digitalización.

En el caso de la minería se cubre principalmente la fase primera, no entrando en el procesamiento o la transformación del mineral (la mineralurgia) en donde la digitalización; como la sensorización, los sistemas y la supervisión de los procesos, se han incorporado en los procesos de transformación de los minerales.

En los últimos años el avance de las TIC y la automatización han transformado muchas áreas. Equipos, maquinaria pesada, vehículos, dispositivos y muchas otras herramientas de trabajo automatizados ofrecen una solución a diversos problemas o simplifican el trabajo manual. La automatización no solo reduce el tiempo necesario para realizar una tarea, disminuyendo así los costes asociados a la misma, sino que también estandariza y optimiza las operaciones y el rendimiento de las industrias. Así mismo, permite que las operaciones se ejecuten ininterrumpidamente las 24 horas del día. Por ello, estos avances tecnológicos son muy útiles en el sector minero. Al igual que la mayoría de los sectores, el sector minero incorpora los requerimientos y desafíos del siglo XXI. Como resultado, la mina se está convirtiendo rápidamente en la mina inteligente o 4.0.

En este capítulo se abordan, por un lado, los aspectos de digitalización relacionados con lo que se puede denominar mina inteligente, del que se describen, brevemente varios casos, y, por otro, otras tecnologías que tienen que ver con aspectos innovadores y/o de digitalización, tanto para la minería como la metalurgia.

2. Mina inteligente (*Smart mine*)⁷² y mina del futuro

Se entiende por "Mina Inteligente" aquella que maximiza la utilización de medios tecnológicos informáticos, instrumentos de medida, sistemas de comunicación y de control remoto, al servicio de las actividades contempladas en toda la cadena de valor, desde la localización del yacimiento hasta la clausura de la explotación.

La estandarización y la extensión de la automatización industrial al ámbito de las operaciones mineras supone una serie de mejoras en distintos ámbitos, pudiéndose concretar, al menos, los siguientes: (i) mejora en la eficiencia y fiabilidad de la producción mediante el seguimiento en tiempo real de las operaciones en la cadena de producción (de la mina al puerto), (ii) reducción de riesgos y mejora en la protección del personal mediante tecnologías de localización, capacidad de operar de manera remota y de monitorizar áreas de trabajo peligrosas (con sensores alarmas, regulación de permisos de manteni-

⁷² Mina conectada (*Connected mine*), Mina digital (*Digital mine*) o Mina 4.0 (*Mine 4.0*).

miento y otros), (iii) incremento de la productividad mediante el intercambio automático de información en todos los procesos y aplicaciones empresariales y (iv) reducción de los costes de producción gracias a la visibilidad en tiempo real de los activos, que ayuda a identificar de manera anticipada potenciales problemas. En la Figura 41 se resumen las diferentes áreas de digitalización para las empresas mineras.

1. Personal y trabajo	2. Sostenibilidad	3. Operaciones y tecnología
<ul style="list-style-type: none"> • Innovación en el modelo de negocio • Gobierno y personal • Colaboración 	<ul style="list-style-type: none"> • Seguridad • Energía y medio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Operaciones remotas • Integración de la información y visualización • Productividad, eficiencia y reducción de costes • Gestión de activos

Figura 41. Áreas de aplicación de las tecnologías digitales en la minería del futuro. Fuente: elaboración propia de los autores.

En la Figura 42 se ilustran diferentes dispositivos y equipos digitales en un complejo minero a cielo abierto.



Figura 42. Presencia de dispositivos y equipos digitales en un complejo minero a cielo abierto. Fuente: (López Jimeno, C., 2022).

Por su parte, en las minas se utilizan y utilizarán en mayor medida todo un conjunto de tecnologías que permiten y permitirán avanzar en los objetivos de productividad, seguridad y economía. Algunas de estas tecnologías innovadoras son las siguientes: redes eléctricas, ventilación bajo demanda, desagüe automatizado, mantenimiento predictivo, modelización integrada de información geoespacial y gestión del tráfico. En la Figura 43 se muestra una infografía sobre la automatización y digitalización de la mina.

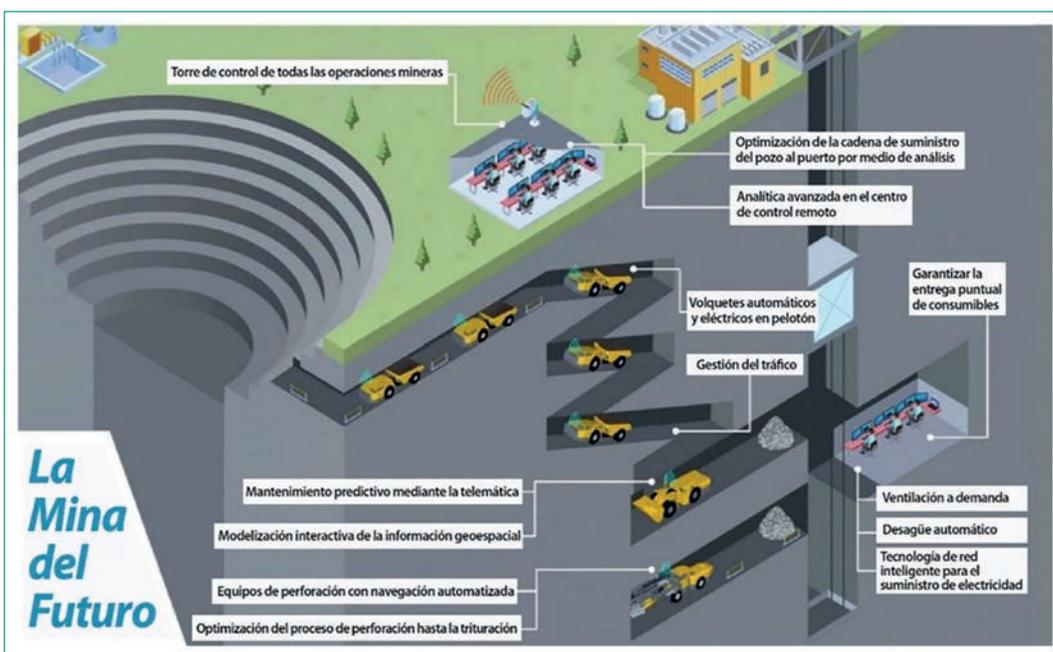


Figura 43. La mina del futuro. Fuente: (López Jimeno, C., 2022).

3. Iniciativas de digitalización de la minería

A continuación, se enumeran y describen someramente diversas iniciativas, algunas maduras y otras en fase de experimentación, de lo que actualmente se considera técnicamente viable en materia de digitalización del sector minero⁷³. Sin ser exhaustivos, el conjunto reseñado es ilustrativo de las actuaciones ya en operación. En particular, se describirán, brevemente, los paquetes de *software* para modelización de yacimientos, los equipos de perforación robotizados, los volquetes autónomos, la gestión de flotas y los sistemas de iniciación de explosivos inalámbricos.

3.1. Paquetes de *software* para modelización de yacimientos y diseño de explotaciones

Desde los años ochenta, con la aparición de los ordenadores personales, se ha potenciado el desarrollo y uso de aplicaciones informáticas destinadas a modelizar los yacimientos objeto de explotación, como ya se ha presentado en el capítulo tercero. La gran mayoría del *software* está pensado para manejar un gran volumen de datos, fruto de las diferentes campañas de sondeos; por ejemplo, en los yacimientos metálicos existen algunos desarrollos adaptados a la realidad de estos, que traducen un macizo rocoso o depósito con unas mismas características litológicas, diferenciando un reducido número de volúmenes.

La mayoría de las aplicaciones se basan en modelos de bloques, como se observa en la Figura 44, es decir, pequeños paralelepípedos a los que se les asigna unos atributos, bien porque han sido atravesados directamente por los sondeos o bien porque se han asignado los valores resultado de una interpolación.

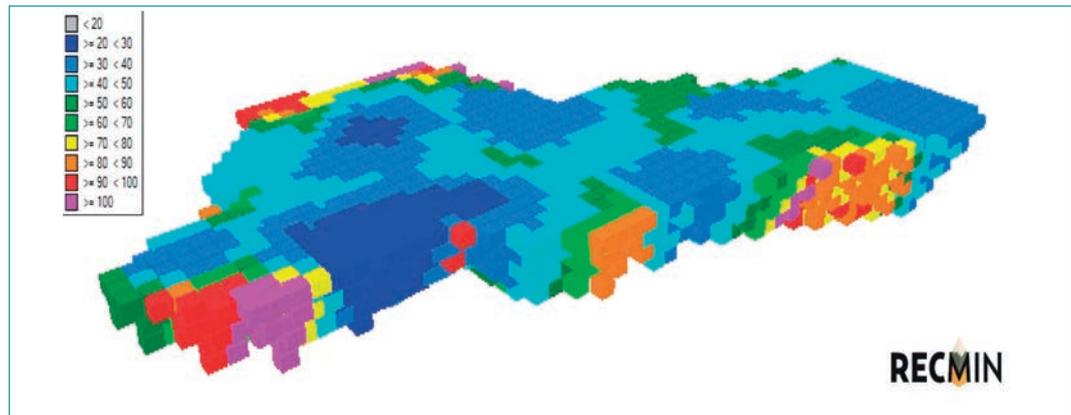


Figura 44. Corta según el precio del concentrado de uranio (Método de Winter). Fuente: (Jares, 2022).

Una vez creado el correspondiente modelo geológico, se construye el llamado modelo económico, estimando el valor del yacimiento en función de la ley, los costes estimados y la cotización del metal previsible. A continuación, se construye el diseño geométrico del hueco final mediante la aplicación de alguno de los algoritmos o técnicas propias de la investigación operativa. Se pueden crear diseños para maximizar la recuperación de mineral mientras se cumple con factores condicionantes, tales como la ley mínima de corte, restricciones financieras y estabilidad del terreno.

⁷³ La digitalización de la minería es algo que ha venido desarrollándose a lo largo de las últimas décadas, tal y como se deriva de Bustillo et al. (2000).

3.2. Equipos de perforación

3.2.1. Cielo abierto

Las tendencias actuales de mejoras en el campo de la perforación son fundamentalmente dos. En primer lugar, está el registro continuo de los parámetros de perforación: la velocidad de perforación, el empuje, la velocidad y el par de rotación. Esto posibilita la realización de planos tridimensionales, representando las características geomecánicas del terreno, constituyendo una herramienta para el diseño y configuración posterior de las cargas de explosivo a emplear, adecuándolas a dichos parámetros. Estos sistemas de registros se conocen con el nombre de MWD (*Measuring While Drilling*).

En segundo lugar, se encuentra el control remoto y automatizado de varios equipos perforadores por un solo operador con posicionamiento de los equipos de perforación mediante geolocalización basada en la tecnología de satélites (GPS, GLOSSNAS, GALILEO, etc.), eliminándose los errores de replanteo (Figura 45).

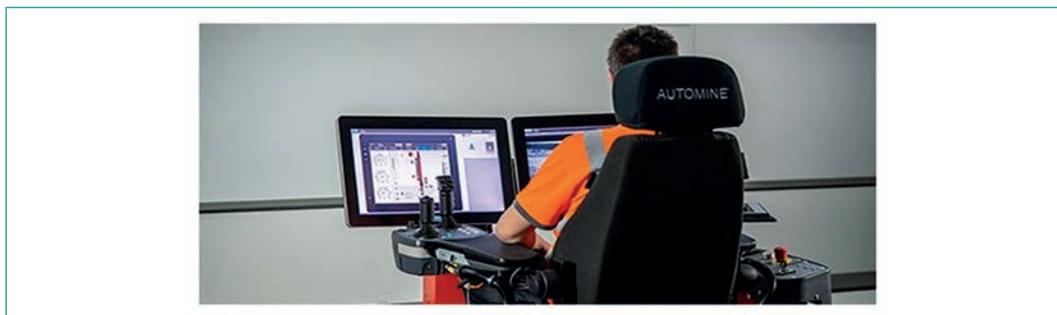


Figura 45. Automine for drilling de Sandvik. Fuente: (Sandvik).

Las ventajas de estos sistemas, son múltiples⁷⁴: (i) ubicación exacta en posición y cota, (ii) profundidad y ángulo de perforación, en su caso, exactos, (iii) aplicación en todo momento de los parámetros óptimos de perforación, empuje y velocidad de rotación, (iv) aumento de la vida de los triconos, (v) reducción de la supervisión antes y después de la perforación, (vi) disminución de los gastos de mantenimiento, (vii) aumento de la producción, (viii) mejora de la fragmentación y (ix) disminución de repiés.

3.2.2. Subterráneo

El desarrollo de la informática y su aplicación a los equipos mineros ofrece buenos resultados en los denominados jumbos de perforación para el avance de túneles y galerías. Mediante el ordenador de a bordo se logran automatizar numerosas operaciones que realizan los brazos que soportan las deslizaderas con los martillos perforadores. Antiguamente se necesitaba una persona por cada brazo, mientras que actualmente una persona puede supervisar los tres brazos que están trabajando simultáneamente, ejecutando los barrenos, diseñados previamente siguiendo un determinado patrón de perforación elaborado con un *software ad hoc*.

En la Figura 46 a puede verse el *AutoMine Concept Underground Drill "Amelia"*, un equipo de perforación de desarrollo de doble brazo totalmente autónomo capaz de perforar sin interacción humana. No tiene cabina para el operador, lo que genera un espacio para el almacenamiento de agua y para la batería,

⁷⁴ Los fabricantes Caterpillar, Epiroc, Komatsu y Sandvik, incorporan estos sistemas.

eliminando la necesidad de cables de suministro o mangueras de agua durante la operación. Durante la perforación, Amelia utiliza un cambiador automático de brocas guiado por Inteligencia Artificial para identificar cuándo las brocas están desgastadas y las cambia automáticamente. El equipo usa la energía según las necesidades, lo que hace que tenga aún más autonomía.

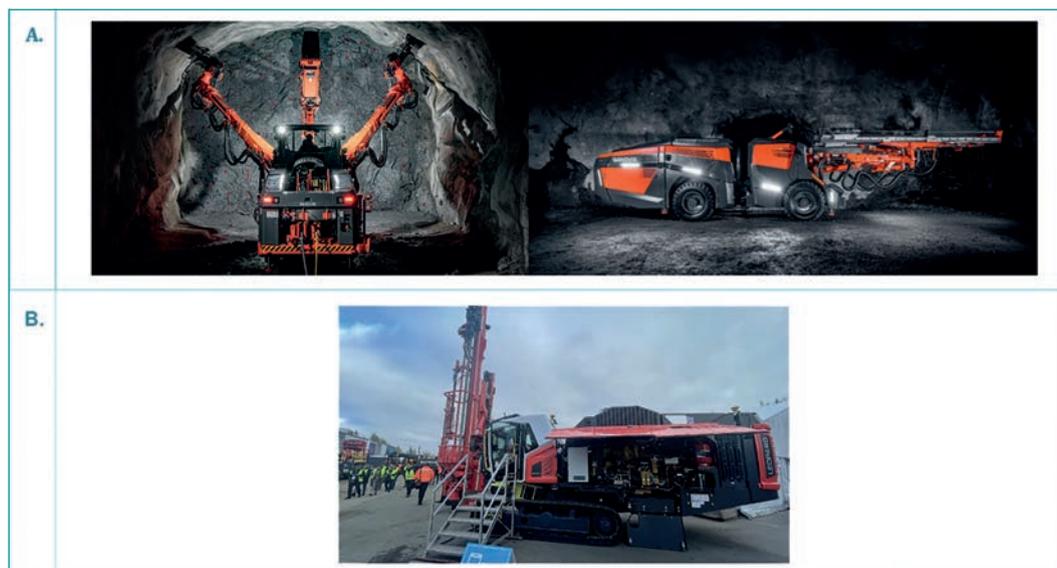


Figura 46. A. Jumbo robotizado de tres brazos (Sandvik), **B.** Equipo de perforación inteligente con martillo en el fondo. Leopard DI650i. Fuente: (ProfesionalesHoy, 2021).

De manera análoga al desarrollo experimentado con los equipos de perforación, los denominados minadores también han incorporado esta tecnología, que les permite una elevada precisión y la posibilidad de controlar el perfil excavado, minimizando las desviaciones.

3.3. Volquetes autónomos

Desde la primera década del siglo XXI los grandes fabricantes mundiales de volquetes, Caterpillar, Komatsu, Liebherr e Hitachi, llevaron a cabo un gran número de pruebas en grandes explotaciones, con volquetes sin conductor. Las ventajas obtenidas han sido: (i) aumento de la productividad (15-20 %), (ii) aumento de la disponibilidad, pudiendo llegar al 90 %, (iii) reducción del consumo de combustible y de los GEI (5-7 %), (iv) aumento de la vida de los neumáticos y de los frenos (5-7 %), (v) disminución de los costes de mantenimiento (17 %), (vi) fuerte aumento de la seguridad en las operaciones, (vii) disminución de la plantilla de personal y (viii) disminución de los costes de operación (30 %).

En el estudio de una mina australiana, se constató que el mayor ahorro en el coste de producción se debía a la mayor efectividad de la operación (85 %), mientras que la disminución de personal significaba un 10 % y el de los neumáticos un 4,5 %.

Entre los sistemas disponibles se encuentran el AHS (Autonomous Haulage System), FrontRunner de Komatsu y el Command for Hauling de CAT. Todos los fabricantes de volquetes presentan sistemas de transporte autónomo (Hitachi, Liebherr y Belaz).

El AHS, se implementó en 2008 en la mina Gabriela Mistral de Codelco y estaba controlado por el sistema de gestión de flota Dispatch de Modular Mining, subsidiaria de Komatsu. La curva de la evolución de unidades autónomas se recoge en la Figura 47.

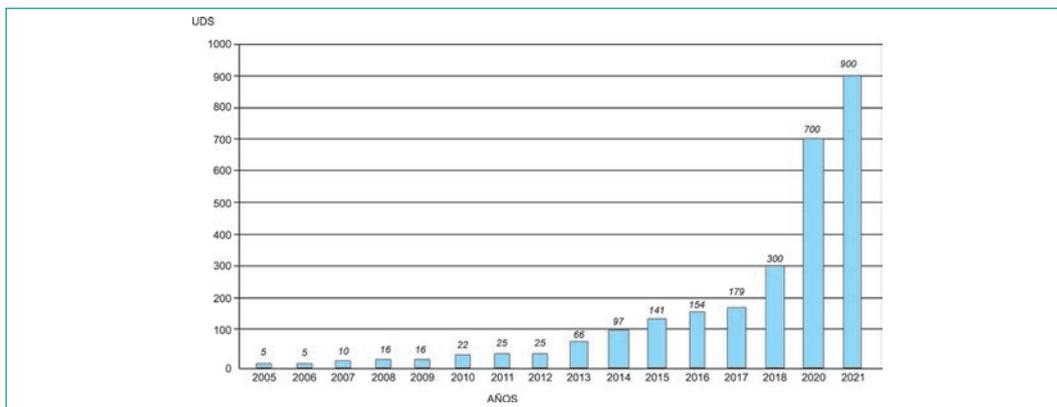


Figura 47. Evolución del número de volquetes autónomos (unidades). Fuente: modificado por los autores de (López Jimeno, E., 2022).

Un volquete autónomo consta de cuatro sistemas: (i) captación, (ii) control, (iii) georreferencia y (iv) radio.

El primero capta información en tiempo real de objetos en comportamiento dinámico o estático, así como las condiciones de la superficie de rodadura, suministrando datos para que el sistema de control autónomo pueda tomar decisiones, garantizando la integridad del vehículo evitando colisiones o accidentes⁷⁵.

El sistema de control reúne todas las interacciones que se producen en el equipo. El sistema motriz, de dirección y de frenado, recibe los valores de referencia calculados por el algoritmo del sistema. Existen más de 2.000 puntos de medición en el volquete que garantizan el comportamiento planificado de la operación.

El sistema de georreferencia se basa en dos receptores GPS, ligados a un conjunto de satélites. La pérdida de señal implica la parada de la operación.

Mediante el sistema de radio el volquete tiene acceso a la red de comunicaciones del centro de mando y recibe información sobre las otras entidades del sistema, de las pistas de transporte, así como las consignas de producción del *dispatching*. La compañía Rio Tinto ha puesto en operación tres volquetes para riego (Figura 48), que detectan las zonas a regar y repostar agua automáticamente.



Figura 48. Camión de riego autónomo. Fuente: Caterpillar.

3.4. Volquetes eléctricos

Motion Traction ABB e Hitachi Construction Machinery acordaron desarrollar un volquete totalmente eléctrico. Este volquete, que se encuentra en diferentes grados de desarrollo, se alimentará a través de

⁷⁵ El sistema AHS, utiliza sensores LIDAR, Radar, sistemas de geoposicionamiento de alta precisión e inerciales.

una catenaria, al tiempo que se cargan las baterías desarrolladas por ABB. La utilización del freno dinámico en los trayectos con pendiente negativa también recargará las baterías.

En las maniobras de carga en el tajo y las de descarga tanto en las plantas de trituración como en las escombreras, se utilizará la energía acumulada en las baterías para el accionamiento del volquete (Figura 49).

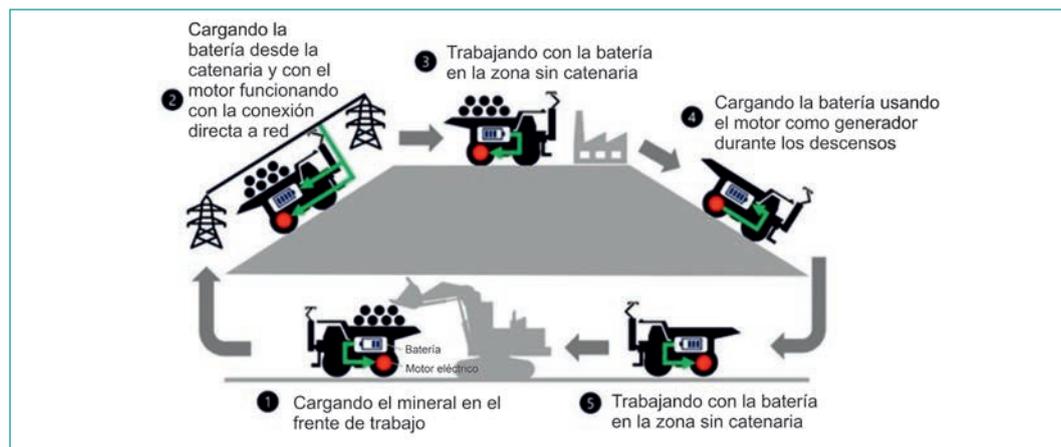


Figura 49. Funcionamiento volquete eléctrico Hitachi. Fuente: modificado y traducido por los autores de Hitachi.

Las ventajas del sistema son entre otras: (i) disminución del peso en vacío del volquete, (ii) aumento de la productividad y (iii) eliminación del gasoil (Figura 50).



Figura 50. Volquete Hitachi alimentado mediante trole. Fuente: Hitachi.

3.5. Gestión de flotas de volquetes (Dispatching)

Esta tecnología se viene utilizando desde los años ochenta en las grandes explotaciones mineras, conociéndose como el sistema de despacho o asignación dinámica de los volquetes. Se emplean sistemas de geolocalización para asignar a cada volquete un equipo de carga y un punto de vertido. Las ventajas obtenidas por su utilización son las siguientes: (i) incremento de la productividad, (ii) aumento de la seguridad con los sistemas anticolidión entre vehículos, (iii) mejora del mantenimiento o conservación de las pistas, (iv) mayor control de leyes del mineral a la entrada y (v) sistema de información para tomar decisiones en línea. En la Figura 51 se muestra un sistema de procesos mineralúrgicos (i.e., trituradora) de asignación dinámica de volquetes en el interior de una explotación a cielo abierto.

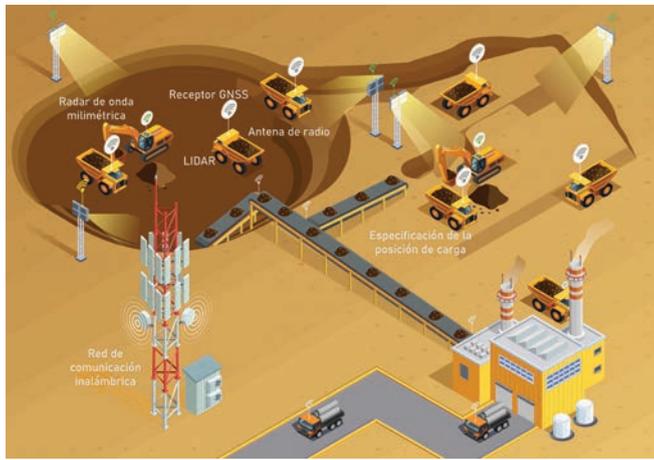


Figura 51. Asignación dinámica de volquetes de Hitachi en el interior de una explotación a cielo abierto. Fuente: modificado por los autores de (López Jimeno, C., 2022).

3.6. Sistemas de iniciación inalámbrico

A diferencia de los sistemas tradicionales, mediante cableado, en los de iniciación inalámbrica las señales de disparo viajan en forma de ondas desde el explosor hasta el detonador. A modo de ejemplo, el sistema Webgen™, de ORICA, establece comunicación con el detonador estando dentro del barreno mediante ondas de frecuencias ultrabajas, denominadas de inducción magnética.

La secuencia de la voladura se “almacena” en el multiplicador durante la codificación que se realiza al cargar la voladura. Todas las unidades Webgen™ requieren la señal única correcta para “despertar” y, a continuación, la señal correcta para disparar (Figura 52).

El denominado Wireless Primer o multiplicador inalámbrico consta de tres componentes: complemento i-KOM™; DRX™ y Pentex™ (Figura 53). El detonador electrónico i-KOM™ se conecta a un receptor que comprende una antena multidireccional y una batería que sirve como fuente de energía dentro del barreno. Por otro lado, es necesario un controlador codificador. Este codificador contribuye a la seguridad inherente del sistema y programa cada multiplicador con dos códigos. El primer código es un número de

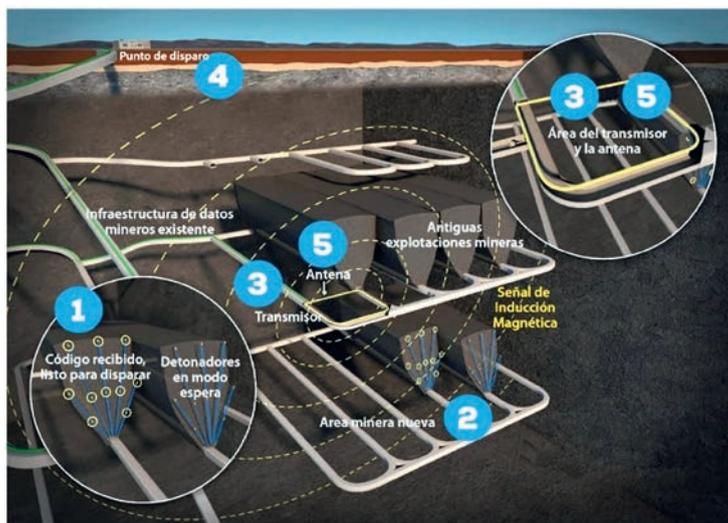


Figura 52. Esquema de una mina donde se emplea un sistema de iniciación inalámbrica de voladuras. Fuente: (López Jimeno, C., 2022).

Figura 53.

Componentes del sistema de iniciación inalámbrico (Webgen™, Orica). Fuente: (Orica, 2022).



identificador de grupo (GD), que es exclusivo de cada mina y se asigna a grupos específicos de multiplicadores que se dispararán juntos. El segundo código es un “tiempo de retorno”, específico para el diseño del cebador y voladura “inalámbrica”.

También se cuenta con el controlador del transmisor que proporciona los comandos de activación, y la activación propiamente dicha, para un grupo de DRX™ codificados. Por último, la cartera puede ser portátil de cuatro bucles para transmisión de corto alcance o un bucle de 40 m para la transmisión de largo alcance.

3.7. Otras tecnologías

La Tabla 18 recoge los desarrollos tecnológicos de carácter digital que están siendo empleados en la minería, alguno de los cuales, al menos en parte, se han tratado con anterioridad.

Tabla 18. Iniciativas de digitalización de la minería. Fuente: elaboración propia de los autores.

Denominación	Descripción
Escaneado digital de los testigos de sondeos	Utilización de dispositivos escáner para el análisis de muestras de las rocas obtenidas mediante sondeos. Permite agilizar el almacenamiento digital de un gran volumen de datos en formato imagen, así como de información adicional que se puede ir generando mediante el análisis de muestras.
Analizadores portátiles de fluorescencia de rayos X (XRF)	Analizadores que, de manera sencilla y muy rápida, realizan un barrido de todos los elementos químicos constituyentes del material que se desea analizar
Análisis en tiempo real de la perforación de barrenos	El control de las leyes de mineral durante la perforación de los barrenos de voladura puede ayudar a conocer mejor la distribución espacial de las calidades de la mineralización y permitir reducir la dilución con los estériles adyacentes o la pérdida de mineral, traduciéndose todo ello en un aumento de la producción y recuperación de mineral en la planta y, en definitiva, en una reducción de los costes de tratamiento.
Aeronaves no tripuladas o drones	En minería a cielo abierto las principales aplicaciones de los drones son: inspección de instalaciones o áreas de trabajo de difícil acceso, levantamientos topográficos y cubicaciones de acopios de mineral o estériles de escombreras; exploración, etc. En minería subterránea también han empezado a utilizarse estos equipos (drones esféricos), con capacidad para volar en espacios subterráneos donde no se dispone de señal GPS y escanear y modelar en 3D dichas excavaciones, para los siguientes fines: (i) topografía subterránea de túneles, cámaras, etc., (ii) inspección y mantenimiento de infraestructuras, (iii) generación de modelos 3D y de realidad virtual de alta definición y (iv) evaluación de entornos para seguridad y prevención de riesgos.
Trazabilidad	Se han desarrollado dispositivos que permiten conocer la trazabilidad en las explotaciones (RFID Technology). Ante cualquier incidente, se puede conocer el lugar exacto donde ha tenido lugar, actuando inmediatamente los equipos de emergencia. También se pueden emplear para evitar las colisiones entre vehículos dentro de la mina o el atropello de personal al conocerse la posición relativa de cada uno. Existen minas donde se combinan sensores inteligentes (smart sensors) con dispositivos de trazabilidad que garantizan que no haya personal cerca de las voladuras que se van a disparar o se hace una gestión del aire de ventilación haciendo llegar caudales de aire fresco allí donde hay una mayor concentración de personal.

Perforadoras de superficie gobernadas por control remoto	La comunicación se efectúa a través de una red de comunicación WiFi, por lo que es independiente de la infraestructura de red local y puede instalarse en un vehículo, un remolque o dentro de un contenedor. Es particularmente útil cuando los equipos tienen que perforar al pie, por ejemplo, de taludes que manifiestan riesgos de desprendimiento. Además de las evidentes ventajas de seguridad, estas unidades también permiten incrementar la productividad ya que se pueden controlar hasta tres equipos simultáneamente.
Palas LHD	Las palas LHD (<i>Load-Haul-Dump</i>) realizan la carga, el transporte y el vertido. Están manejadas por control remoto y accionamiento eléctrico por baterías.
Perforadoras autónomas	En la mina de hierro Pilbara, del Grupo Río Tinto, están operando de manera autónoma siete grandes perforadoras rotativas, bajo la supervisión a distancia de un operador por cada cuatro máquinas.
Camiones de fabricación y carga de explosivos	Cada día se tiende más a fabricar las cargas de explosivo <i>in situ</i> , por medio de la mezcla de sustancias que no son intrínsecamente explosivas, y sensibilizarlas instantes antes de su iniciación. Por ello, tanto en los trabajos subterráneos como a cielo abierto se están diseñando fábricas móviles de explosivos, que permiten trabajar con unos estándares de seguridad elevados y adecuar las cargas de explosivo en cuanto a las energías que desarrollan las propiedades resistentes de las rocas que previamente se han perforado y mediante sensores han permitido caracterizar los macizos rocosos. Estos últimos sistemas se conocen como de Medición Durante la Perforación (<i>MWD, Measurement while Drilling</i>).
Detonadores electrónicos	Estos accesorios llevan en el interior de las capsulas un microchip, que permite programar los detonadores para que estos tengan tiempos de salida a intervalos deseados, con una precisión elevadísima, del orden de un milisegundo, y facilitando que no se repitan los tiempos de detonación de las cargas dentro de la voladura. Ello redundará en una mejor fragmentación y en una reducción de las intensidades de vibración.
Maquinaria operada por control remoto	Cambios o mejoras que van desde una mayor automatización de las diferentes operaciones o movimientos de las máquinas, sin intervención humana, pasando por el control remoto o a distancia, de manera que los operadores ya no se encuentran físicamente montados en la máquina sino a una cierta distancia si se constata que existen riesgos debidos a caídas de rocas, colapsos, etc. hasta estar la máquina en el interior de la mina y el operador en superficie. En el nivel superior se encontrarán los equipos autónomos, que actúan como verdaderos robots.
Volquetes eléctricos de interior	Se han empezado a comercializar vehículos totalmente eléctricos accionados por baterías. Paralelamente, se han desarrollado diversas unidades híbridas, así como retomado la tecnología trole, cuyo origen se encuentra en los países escandinavos. Por otro lado, cabe mencionar la aparición en el mercado de equipos de recarga móviles, que suprime la necesidad de postes o estaciones de recarga eléctrica estáticos.
Maquinaria conectada	Sistemas que permiten la comunicación entre los equipos de una misma marca.
Telefonía móvil de interior	En diversas minas se ha implantado el estándar de comunicación móvil conocido por <i>LTE Advanced (Long term evolution)</i> , que permite emplear con calidad teléfonos móviles en ambientes subterráneos.

4. Iniciativas de digitalización de la metalurgia

Las tecnologías facilitadoras de la Industria 4.0 encuentran aplicación en la industria metalúrgica, permitiendo su digitalización. Las fábricas metalúrgicas están experimentando una gran transformación incorporando sensores, interconectando máquinas y procesos, captando datos, procesándolos y analizándolos, desarrollando algoritmos de toma de decisiones y gemelos digitales que emulan procesos físicos, permitiendo acortar los ciclos de mejora y desarrollo de producto.

Entre todas las tecnologías disponibles pueden destacarse las siguientes: modelización microestructural y propiedades mecánicas, internet de las cosas y sistemas ciber físicos, gemelos digitales, análisis de datos, inteligencia artificial, robótica colaborativa, realidad virtual y realidad aumentada⁷⁶.

⁷⁶ No se incluyen en este capítulo tecnologías como la impresión 3D (tales como el *Selective Laser Melting (SLM)* y el *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* basados en la fusión de capas de polvos o el proceso *WAAM Wire Arc Additive Manufacturing*), por entender que se corresponde más a una técnica de conformado de fabricación de componentes y lo referido aquí respecto a la digitalización, está más focalizado en los procesos de metalurgia extractiva.

En cualquier caso, pueden citarse el proceso de fundición a presión de las aleaciones de aluminio que permite la automatización de la producción, incorporando todas las tecnologías facilitadoras de la industria 4.0.

4.1. Modelización microestructural y propiedades mecánicas

Las propiedades de los materiales dependen de su composición y microestructura. La microestructura es la consecuencia de cinco factores: limpieza del caldo, composición química de la aleación, proceso de solidificación, deformación termo-mecánica y tratamiento térmico.

Es necesario comprender cómo interviene cada una de las variables en las propiedades mecánicas del material sometido a solicitaciones tensionales. En este sentido, la modelización de la microestructura permite prever el comportamiento mecánico en servicio ante la aplicación de diferentes hipótesis de carga, y de entre ellas, las solicitaciones a fatiga, optimizando el proceso de tratamiento térmico que controla, por ejemplo, el tamaño y distribución de los precipitados en aleaciones ligeras estructurales.

4.2. Internet de las cosas

El internet de las cosas (IoT, Internet of the Things) se refiere al conjunto de tecnologías que permiten la integración armónica y colaborativa de todos los procesos de creación de valor de una industria como la metalúrgica.

Digitalizar no consiste solo en sensorizar las máquinas de proceso, captando señales que se suben a internet, sino de integrar la información en una plataforma que permita la gestión de las operaciones y de los procesos de negocio, dotando al sistema de capacidades de minería de datos y analíticas que faciliten la mejora continua y el desarrollo de algoritmos de decisión.

El IoT es el conjunto de tecnologías que permiten implantar el nuevo paradigma de industria conectada y el desarrollo de sistemas ciberfísicos. Se trata, en definitiva, de implantar sistemas que faciliten la gestión del cambio en las organizaciones y la optimización de los procesos de fabricación (Tabla 19).

Operaciones de fabricación	Seguimiento de lotes y unidades	Trazabilidad y genealogía	<i>Routing and dispatching</i>	Recogida y adquisición de datos	Formación y certificación de operarios	Lista de materiales (BOM)
	Gestión de consumibles	Gestión de herramientas	Instrucciones de trabajo/ SOPs	Impresión de etiquetas y documentos	Gestión de tareas	Gestión de pedidos
Ingeniería de procesos	Introducción de nuevos productos (NPI)		Gestión de recibos		Gestión de experimentos	
Ingeniería de equipos	Seguimiento de equipos		Gestión del mantenimiento		Calibración	
Gestión de calidad	Control estadístico de procesos (SPC)	Acciones preventivas y de conexión (CAPA)	Informes de no conformidad y disposiciones	Inspección basada en muestras/ AQL	Gestión de documentos	Firmas electrónicas
Planificación y logística	Planificación y programación avanzadas		Gestión de materiales		Cálculo de costes	
Visibilidad e inteligencia	Cuadros de mando	Informes y análisis	Almacén de datos operativos y almacén de datos	Gestión de alarmas	Gemelo digital de fábrica	Realidad aumentada
Automatización e integración	Integración de equipos		Gestión del flujo de trabajo de automatización de fábricas		Integración empresarial (ERP, PLM, ...)	
Plataforma de datos IoT						

Tabla 19. Sistemas para la gestión del cambio. IoT. Fuente: traducido y modificado por los autores de (Neves, 2022).

4.3. Gemelos digitales

Conocidos en inglés como *Digital Twins* son modelos digitales que emulan el desempeño de un proceso o el comportamiento de un producto. En la industria metalúrgica su uso es cada vez más extendido. La Figura 54 presenta las tecnologías facilitadoras y las soluciones y servicios que dan lugar a la creación de un *gemelo digital* de un horno alto.

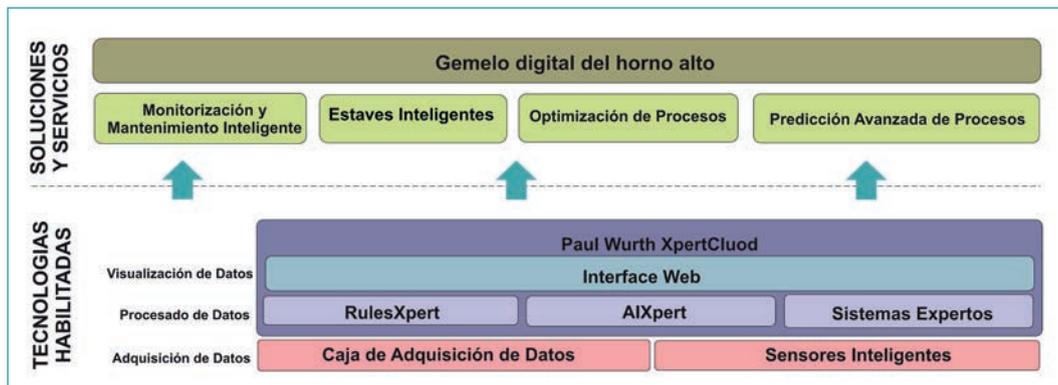


Figura 54. Tecnologías facilitadoras de gemelos digitales en un horno alto. Fuente: traducido y modificado por los autores de (Weyer et al., 2019).

Los elementos esenciales que ha de incluir un gemelo digital son tres: contexto y datos característicos, datos de operación en tiempo real e implantación de un modelo de información holístico como se observa en la Figura 55.

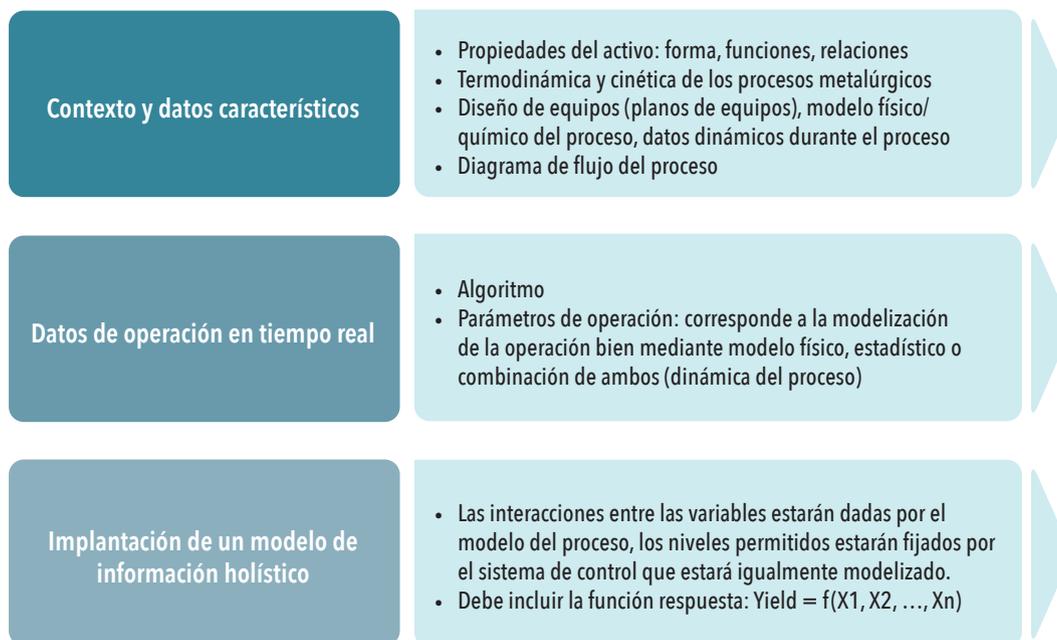


Figura 55. Elementos de un gemelo digital. Fuente: elaboración propia de los autores.

4.4. Data mining, big data y análisis de datos

La captación de ingentes cantidades de datos mediante la sensorización de máquinas que trabajan simultáneamente para desarrollar un proceso metalúrgico requiere gestionar el tráfico de datos, su almacenamiento, gestión, depuración, procesamiento y análisis.

La industria metalúrgica ha realizado importantes inversiones en *data mining* (minería de datos) lo que ha permitido captar y almacenar información con seguridad, lo cual no es sinónimo de una explotación eficiente de los mismos. Para crear valor a partir de los datos se requiere: extraerlos, depurarlos, combinarlos, visualizarlos y establecer relaciones. Es lo que se conoce como *data analytics* (análisis de datos) y *business intelligence* (Inteligencia de negocio)⁷⁷.

La fase de depuración de datos es esencial para evitar que errores manuales de transcripción invaliden los resultados obtenidos con el procesamiento de datos incorrectos. En este sentido, el proceso de validación de estos es fundamental, para lo que hay que evitar la existencia de datos ocultos (aquellos que se almacenan en bases de datos no integradas, en dispositivos no conectados con el servidor central, en hojas Excel, o en formatos no procesables). En metalurgia es esencial que los datos sean obtenidos y tratados aplicando los principios de Seis Sigma, técnica conocida de calidad, cuyas etapas básicas fundamentales son las de definir, medir, analizar, mejorar y controlar (DMAIC por sus siglas en inglés).

Los procesos metalúrgicos no son reducibles a un mero análisis estadístico. Por ello el análisis debe iniciarse desde el estado de conocimiento actual (*state-of-the-art*) fijando las llamadas MCC (Mejores condiciones conocidas), abriendo el campo de experimentación siguiendo los principios del diseño de experimentos (DOE), fijando el número de variables y niveles de experimentación, y midiendo la respuesta.

Las tecnologías facilitadoras de la industria 4.0 permiten transitar a las industrias metalúrgicas desde la prueba y error al desarrollo de algoritmos y sistema ciberfísicos que tienen en cuenta las interacciones de los factores controlables y de los no controlables.

4.5. Inteligencia artificial

Debido a la complejidad de los procesos metalúrgicos, especialmente en la metalurgia extractiva no férrea, la Inteligencia Artificial (IA) está teniendo una penetración más lenta que en procesos replicados a nivel mundial, como puede ser la industria siderúrgica, cuyos aspectos diferenciadores entre países y empresas es menor.

En la actualidad, la inteligencia artificial ha de ser vista como una herramienta de mejora de los procesos, facilitadora de la toma de decisiones rutinaria, en muchos casos, dependientes de una decisión humana a pie de instalación.

La inteligencia artificial aplicada a la visión artificial sí es un campo real de trabajo y mejora. En el laboratorio, permite el procesamiento automático de imágenes metalográficas y en la planta facilita los sistemas de calidad y control de procesos, así como mejoras en la fiabilidad de estos y en la productividad.

4.6. Otras tecnologías

Además de lo indicado en párrafos previos se han realizado otros avances, como la utilización de cámaras para medir partículas o burbujas, velocidades, ruido y temperatura en el control de las plantas que optimizan los procesos de extracción de minerales.

⁷⁷ Ha de disponerse de un modelo de proceso para la realización del análisis de los datos.

Por otro lado, la robótica colaborativa (Cobot) irá penetrando en la industria metalúrgica, comenzando por la parte final de los procesos de fabricación, los más susceptibles a que los robots y las personas compartan espacio de trabajo sin barreras de seguridad físicas entre ambos.

Por su parte, la realidad virtual y la realidad aumentada penetrarán con mayor facilidad en los procesos de diseño facilitando la implantación de la metodología *Design for Six Sigma*, ya mencionada, disminuyendo la probabilidad de fallo al avanzar en la mejora de las tecnologías de simulación de entornos virtuales que emulen con fiabilidad las condiciones reales, a la vez que se acorta el tiempo de llegada al mercado de los nuevos desarrollos.

5. Conclusiones

Los métodos y técnicas de digitalización son ya de aplicación en la minería, en los procesos de tratamiento de los minerales (mineralurgia) y en los de extracción de metales (metalurgia). Sus aplicaciones se implementan en ámbitos relativos a la modelización de yacimientos, equipos de perforación robotizados, volquetes autónomos, gestión de flotas, escáner de testigos y monitorización de muestras y explosivos.

En el procesamiento de minerales, la utilización de sensores en diferentes partes del proceso (i.e. molienda, flotación) permite tener sistemas integrados de monitorización y control. En la metalurgia, las modelizaciones de microestructuras y de las propiedades mecánicas, así como los gemelos digitales o el análisis de datos, permiten mejorar los procesos metalúrgicos y la calidad de estos.

La digitalización está teniendo, como resultado de su implantación en diversas aplicaciones, una mejora de la seguridad, un aumento de la productividad y el acceso a recursos de leyes bajas o muy bajas. También permite disminuir los impactos medioambientales y facilitar innovaciones y mejoras en los procesos y en los modelos de negocio.

La digitalización en la minería y la metalurgia ha abierto un camino que permitirá que estas actividades sean cada vez más seguras, más sostenibles y con menor impacto medioambiental.

The background is a solid teal color with a subtle, textured pattern of rocks or minerals. A large, bold, black number '6' is positioned in the upper right quadrant. The text is centered in the lower half of the page.

6

**SOSTENIBILIDAD Y
ECONOMÍA CIRCULAR
EN EL ABASTECIMIENTO
DE MATERIAS PRIMAS
MINERALES**

1. Introducción

En este capítulo se examina el papel de la minería y la metalurgia en el contexto de la sostenibilidad y la economía circular. La minería y la metalurgia se enfrentan a importantes retos y oportunidades para avanzar en la sostenibilidad, concepto introducido por el informe Brundtland de la comisión designada por la Asamblea General de Naciones Unidas ("World Commission on Environment and Development"), que define el crecimiento sostenible como "aquel que permite cubrir las necesidades del presente sin poner en riesgo la capacidad de las generaciones futuras de cubrir las suyas propias".

Es decir, es sostenible aquel desarrollo que permite que la generación presente y las generaciones futuras dispongan de los recursos naturales necesarios para su razonable desarrollo con un determinado grado de bienestar, al tiempo que la naturaleza dispone de la capacidad necesaria para mantener sus procesos físicos, químicos y biológicos, y todo ello en el entorno científico, tecnológico, económico, social y cultural que exista en cada momento. Entre sus implicaciones se trata, de minimizar el impacto sobre el entorno que tiene cualquier actividad, al tiempo que se maximiza su contribución social y económica.

En el caso de la economía circular, se cambia el paradigma de "extraer, fabricar, usar y tirar" (economía lineal) por uno diferente, que puede describirse como de "extraer, fabricar, rediseñar, reducir, reutilizar, reparar, renovar y reciclar" (economía circular, concepto sobre el que se volverá más adelante).

Si bien desde una visión simplista se puede entender que la economía circular tiene solo como objetivo obtener el máximo valor de los materiales asegurando que estos se produzcan de manera responsable y se mantengan en uso durante el mayor tiempo posible, un análisis en profundidad permitirá comprender la amplitud de los aspectos que abarca y el universo de cambios y oportunidades que aporta sobre la estructura de las cadenas de valor de los productos y cómo interactúan con el mundo que los rodea y, por tanto, las implicaciones para todos los sectores de la economía, y en particular para la minería, la producción de materias primas minerales, la metalurgia y la fabricación de metales para equipos y componentes.

En consonancia con la sociedad, la minería y la metalurgia están inmersas en procesos de transformación, para utilizar métodos circulares de producción y consumo, implantando principios y esquemas de circularidad en la gestión.

Se plantean así retos y oportunidades para el sector de las materias primas en general, y de la minería y la metalurgia en particular, alineados con la visión europea de utilizar eficazmente los recursos, garantizando un suministro sostenible de materias primas para la economía europea, aumentando los beneficios para la sociedad en su conjunto, y creando nuevos puestos de trabajo

En este capítulo se recogen los conceptos de sostenibilidad y de economía circular, refiriéndose en particular, a los objetivos de desarrollo sostenible; al marco europeo y español; así como a los indicadores de gestión minero-metalúrgica sostenible.

Posteriormente, se examina el modelo de producción circular en el contexto de la sostenibilidad, el plan de acción de la Unión Europea para la economía circular, abordando los beneficios y ventajas de la economía circular en particular en la cadena de valor de la minería y la metalurgia, así como la estrategia española de economía circular.

En los últimos apartados se trata el papel de la metalurgia en el reciclaje de las materias primas secundarias, en ocasiones denominado minería urbana, y la simbiosis industrial como solución para la gestión de residuos de las actividades mineras. Para finalizar se presentan los retos y oportunidades de una mayor integración de la economía circular junto con las conclusiones del capítulo.

2. Sobre el concepto de sostenibilidad

El desarrollo sostenible descansa sobre tres pilares (Figura 56), la sostenibilidad económica (crecimiento económico), la social (equidad social) y la ecológica (protección ambiental), donde la importancia de cada principio dependerá de la singularidad de la región en la que se aplique y entendiendo la sostenibilidad como viabilidad a largo plazo de la actividad industrial y su medio social y ambiental.



Figura 56. Esquema de los tres pilares del desarrollo sostenible. Fuente: (Universidad Andina Simón Bolívar, n.d.).

A nivel comunitario, la Iniciativa de Materias Primas (European Commission et al., 2018), incorpora el carácter de justo y sostenible al suministro de materias primas, tanto primarias como secundarias, procedentes de los mercados globales y en la UE, así como el del uso eficiente de los recursos. Como resultado, con el fin de atraer inversores a un proyecto minero, una vez evaluado el potencial geológico y la viabilidad económica debe necesariamente completarse un análisis de sostenibilidad que debe tener en cuenta no solo el aspecto ambiental (clave, tanto durante la operación minera como en la rehabilitación), sino también el ámbito social y en particular el de las relaciones con la comunidad.

En cuanto a la perspectiva económica, desde que en los años ochenta se apuntase ya que la sostenibilidad se convertiría en punta de lanza en la industria minera, hasta hoy, se ha avanzado en materia de información empresarial, de manera que la información financiera debe completarse con información relacionada con la dualidad sostenibilidad-ESG (Environmental Social and Governance) (Kesler, 2015).

El desarrollo sostenible en la minería, según el gobierno australiano, se refiere al "desarrollo de los recursos minerales y energéticos de un país, en tierra y en alta mar de tal manera que se maximicen los beneficios económicos y sociales al tiempo que se minimizan los impactos ambientales de la minería" (BBVA, 2023).

Una política de desarrollo sostenible para el sector minero debe contemplar todo el ciclo, desde la exploración hasta la rehabilitación del espacio afectado por la actividad minera. Debe incluir también las etapas de extracción, producción, procesamiento metalúrgico y comercialización de productos minerales y metales, así como el uso y reciclado de los metales, realizando estas actividades de la forma más eficiente posible y manteniendo o mejorando, en su caso, la calidad del medio ambiente para las generaciones futuras.

En 2015 se publicaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, que han establecido una visión para una futura sociedad global basada en principios de sostenibilidad. Los 17 objetivos, que conforman la agenda y que se muestran en la Figura 57, cubren las dimensiones ecológica, económica y social de la sostenibilidad. Estos objetivos proporcionan principios y una referencia para la política nacional y local. Se alienta a las empresas a comprometerse a mejorar la sostenibilidad de los procesos de producción y se pide a los responsables políticos de todos los niveles que alineen sus estrategias con los principios de desarrollo sostenible.



Figura 57. Objetivos de desarrollo sostenible.
Fuente: (Naciones Unidas, n.d.).

Para tener éxito ante el desafío de la “buena gobernabilidad de los recursos naturales” se requiere planear una agenda de largo plazo que encuentra en los ODS un marco de trabajo. En esta línea, existe una Hoja de ruta con objetivos y metas. Su implementación necesita de esfuerzos conjuntos entre el gobierno, el sector privado y la sociedad civil. Llevar a cabo dicha Hoja de ruta implica el reconocimiento de compromisos que deberán concretarse en indicadores medibles que puedan ser objeto de seguimiento y con ello saber, de forma real y actualizada, el grado de avance.

El marco de los ODS no incluye un objetivo explícito sobre materias primas, ya que estas pueden influir, directa o indirectamente, en todos los objetivos. El sector de la cadena de valor de la industria extractiva y la metalurgia puede contribuir significativamente al logro de los 17 ODS y, en particular, los relacionados con la erradicación de la pobreza (ODS 1), agua limpia y saneamiento (ODS 6), energía asequible y sostenible (ODS 7), trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8), industria e infraestructura (ODS 9), acción climática (ODS 13), así como paz y justicia (ODS 16). En la Tabla 20 se recogen diferentes aspectos del sector minero y metalúrgico en algunos de los ODS.

Tabla 20. Influencia del sector minero y metalúrgico en algunos ODS. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (Narrea, 2018) y (Foro Económico Mundial, 2016).

ODS	Descripción
1	Erradicación de la pobreza. Los sectores de materias primas pueden ser un estímulo para la economía local, creando empleo estable y de calidad, aumentando los ingresos de la población y creando oportunidades de negocio.
2	Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria, la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible. El sector extractivo y la industria de transformación suministran fertilizantes para la agricultura, por ejemplo, fosfato y potasa. Al fomentar la productividad agrícola, estos sectores contribuyen indirectamente a la seguridad alimentaria
6	Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. La extracción y procesamiento de las materias primas pueden afectar a las aguas creando un estrés hídrico local, pero, por otra parte, proporciona materias primas esenciales para las tecnologías ambientales y el tratamiento de las aguas.
7	Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos. Se requieren materias primas para el despliegue de las tecnologías bajas en carbono y renovables y las operaciones mineras crean y mantienen la infraestructura energética que también pueden abastecer a la población local.
8	Trabajo decente y crecimiento económico. La producción de materias primas y materiales genera ingresos que los gobiernos pueden invertir en desarrollo socioeconómico; oportunidades de empleo y formación, y desarrollo tecnológico y de nuevas infraestructuras.

9	<p>Industria, innovación e infraestructura.</p> <p>La actividad minera puede contribuir al desarrollo local y regional a través de la provisión y mejora de infraestructuras físicas como las redes de carreteras, las redes de energía y agua, o de los sistemas sanitarios y educativos.</p> <p>Las materias primas se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones, incluidas la maquinaria. Se requieren algunos metales y materiales críticos para los componentes de energía renovable y las tecnologías relacionadas, como las baterías para el almacenamiento de energía.</p>
12	<p>Producción y consumo responsables.</p> <p>La eficiencia en el uso de los recursos es un objetivo tanto en la política medioambiental, como en la política industrial. Los sectores de materias primas tienen un papel clave en la consecución del objetivo de eficiencia de los recursos, ya que producen insumos para otros sectores.</p> <p>Los recursos naturales (tierra, agua, energía, etc.) utilizados para extraer materiales y producir productos semiacabados puede optimizarse mediante tecnologías innovadoras y limpias. El diseño ecológico (o ecoinnovación) permite la mejora de la eficiencia.</p>
13	<p>Acción climática.</p> <p>Las actividades industriales que se desarrollan a lo largo de la cadena de valor de la minería y la metalurgia producen GEI, pero su uso en tecnologías bajas en carbono contribuye a combatir el cambio climático.</p>
17	<p>Revitalizar las alianzas para lograr los objetivos.</p> <p>Este es un objetivo transversal mediante el cual se trata de fomentar y promover la constitución de alianzas eficaces en las esferas pública, público-privada y de la sociedad civil, aprovechando la experiencia y las estrategias de obtención de recursos de las alianzas.</p> <p>La sostenibilidad en el medio y largo plazo de los proyectos mineros depende de su aprobación pública por parte de la sociedad civil de la zona de influencia. Para ello, se desarrollan los proyectos de responsabilidad social que, según normativa nacional e internacional, son un deber del sector privado y del gobierno.</p>



La Figura 58 destaca la contribución potencial de las materias primas⁷⁸ a los diferentes ODS a lo largo de la cadena de valor, desde la extracción hasta la fabricación, el uso y el final de la vida útil. A menudo, tanto los resultados positivos como los negativos para el mismo objetivo son posibles, por lo que el objetivo es maximizar los primeros y minimizar los negativos, de tal modo que se tenga una incidencia positiva y directa.

En diciembre de 2019, la Comisión Europea publicó el Pacto Verde Europeo (PVE) cuyo objetivo es desarrollar una economía sostenible, para lo que plantea una Hoja de ruta de normas y desarrollos legis-

⁷⁸ En este caso materias primas incluye minerales (menos energéticos), papel, madera, caucho y corcho.

Figura 58. Contribuciones potenciales de las materias primas a los ODS a lo largo de la cadena de suministro. Fuente: modificado y traducido por los autores de (Mancini et al., 2019).



lativos que abarcan todas las ramas de actividad de la economía. También se incluye la necesidad de garantizar el acceso a materias primas sostenibles, y en especial, a las materias primas críticas necesarias para las tecnologías limpias y las aplicaciones digitales, espaciales y de defensa, planteando entre otros la diversificación del abastecimiento de fuentes primarias y secundarias. Además de actualizar la lista de materiales críticos en 2020 (ya mencionada), se desarrolló un Plan de Acción en Materias Primas.

Por su parte, el Grupo de Suministro de Materias Primas (del que forman parte los Estados miembros, autoridades regionales, asociaciones industriales, la sociedad civil, los interlocutores sociales y organizaciones de investigación) y la Comisión Europea han formulado y acordado una serie de principios voluntarios para unas materias primas sostenibles.

Los principios son aplicables en el conjunto de la Unión, "a las fases de extracción y transformación de materias primas no energéticas y a todo el ciclo de vida de las cadenas de valor de los minerales, desde la exploración hasta el período posterior al cierre, así como a la producción de materias primas secundarias a partir de los flujos de residuos de la extracción, como rocas estériles, residuos de la transformación/ escombreras" (Comisión Europea, 2021). Estos principios se recogen en la Tabla 21.

Principios sociales	Principios económicos y de gobernanza	Principios medioambientales
Derechos humanos, interacción con las comunidades de interés, empleo, salud y seguridad	Integridad empresarial, transparencia y una mayor contribución económica	Gestión medioambiental y mitigación del impacto
La extracción y transformación de materias primas sostenibles respaldan los derechos humanos, las comunidades y la buena gobernanza	La extracción y transformación de materias primas sostenibles cumplen todas las disposiciones legales y reglamentos de la UE, incluida la legislación de los Tratados de la Unión	La extracción y transformación de materias primas sostenibles aplican buenas prácticas de gestión medioambiental
La extracción y transformación de materias primas sostenibles respaldan el trabajo decente por medio de: la mejora de la salud y la seguridad de los trabajadores, la mejora continua de las capacidades de los trabajadores y el respeto de los derechos de los trabajadores	La extracción y transformación de materias primas sostenibles constituyen una base esencial para las cadenas de valor sostenibles que entrañan una importancia estratégica para el crecimiento económico y la sostenibilidad de la economía y la sociedad europeas, incluidas la transición hacia la neutralidad climática y una economía digital, respetando el principio de «no causar un perjuicio significativo» tal y como se establece en el PVE	La extracción y transformación de materias primas sostenibles mejoran y promueven la eficiencia energética, contribuyen a la mitigación del cambio climático y a las medidas de adaptación
	La extracción y transformación de materias primas sostenibles aplican una buena gestión financiera	La extracción y transformación de materias primas sostenibles incluyen la gestión de los materiales y contribuyen a la economía circular de la UE en la medida de lo posible y dentro de sus responsabilidades

Tabla 21. Principios de la UE para unas materias primas sostenibles. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (Comisión Europea, 2021).

Además, se han desarrollado 10 acciones para garantizar el acceso de Europa a las materias primas, que incluyen (European Commission, 2021b): (i) poner en marcha la Alianza Europea de Materias Primas, (ii) desarrollar criterios de financiación sostenible para la minería, (iii) investigar e innovar en materia de tratamiento de residuos, materiales avanzados y sustitución, (iv) elaborar un mapa del suministro potencial de materias primas críticas secundarias a partir de las existencias y los residuos de la UE, (v) identificar necesidades de inversión para proyectos mineros que puedan estar operativos en 2025, (vi) desarrollar la experiencia y las habilidades en la minería, (vii) desplegar programas de observación de la tierra para la exploración, la explotación y la gestión medioambiental, (viii) desarrollar proyectos de investigación e innovación sobre la explotación y el tratamiento de las materias primas críticas, (ix) desarrollar asociaciones estratégicas internacionales para asegurar el suministro de materias primas críticas y (x) promover prácticas mineras responsables para las materias primas críticas.

En España, la propuesta de Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050, estableció la reutilización y el reciclado como primera opción. Esta estrategia debería implicar la configuración de *una política nacional de materias primas autóctonas, que garantice que los recursos se explotan de forma económicamente viable y sostenible, utilizando las mejores técnicas disponibles, asegurando la reducción de emisiones en el sector y disminuyendo en la medida de lo posible la dependencia de las importaciones* (Vicepresidencia Tercera del Gobierno, Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2022).

Por su parte, la Hoja de ruta, aprobada por el Consejo de ministros el 30 de agosto de 2022, para la gestión sostenible de las materias primas minerales, fundamentales para el éxito de la transición ecológica y digital, impulsa el aprovechamiento de las oportunidades de la minería autóctona sostenible en términos de empleo de calidad, riqueza y vertebración territorial (Vicepresidencia Tercera del Gobierno, Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2022).

Esta Hoja de ruta recoge cuatro orientaciones estratégicas: (i) eficiencia y economía circular en las cadenas de valor del suministro de materias primas minerales; (ii) impulso y consolidación de la gestión sostenible de las materias primas minerales autóctonas en la industria extractiva española; (iii) garantía de seguridad de suministro y el cumplimiento de los requisitos medioambientales, geoestratégicos y de justicia social en la importación de materias primas minerales y (iv) fomento de la industria de materias primas minerales ligada al proceso de descarbonización, alineándose con las políticas europeas de acceso a los recursos y sostenibilidad.

2.1. Gestión minero-mineralúrgica-metalúrgica sostenible. Normas UNE 22480 y 22470

La Asociación Española de Normalización ha desarrollado la norma UNE 22480 "*Sistema de gestión minero-mineralúrgica-metalúrgica sostenible. Requisitos*" (UNE, 2019a). En esta versión se amplía el campo de aplicación a la mineralurgia de transformación y a la metalurgia extractiva, que se añaden a la minería y a la mineralurgia de concentración existentes en la versión anterior.

Esta norma está alineada con las iniciativas más avanzadas en materia de sostenibilidad como los Principios del Pacto Mundial de las Naciones Unidas, las líneas directrices de la OCDE para empresas multinacionales, los principios rectores sobre empresas y derechos humanos de las Naciones Unidas, los Principios del Ecuador (una de las iniciativas más grandes e internacionalmente aceptadas que

involucran a entidades financieras en el desarrollo sostenible y que son un marco voluntario de gestión del riesgo de crédito para determinar, evaluar y gestionar los riesgos ambientales y sociales en las operaciones de financiación de proyectos). Estos principios han sido impulsados por diferentes entidades del sector financiero en coordinación con la Corporación Financiera Internacional, (agencia dependiente del Banco Mundial), y las normas de desempeño sobre sostenibilidad Ambiental y Social (IFC Banco Mundial). Igualmente está alineada con ámbitos específicos del sector minero como Better coal y el Suplemento sectorial para minería y metalurgia de la Global Reporting Initiative.

La Norma UNE 22480 especifica los requisitos de un sistema de gestión minero-mineralúrgica-metalúrgica sostenible, cuya finalidad última es facilitar a las organizaciones que trabajan en sectores relacionados con las actividades citadas una herramienta que facilite la consecución de los objetivos medioambientales, sociales y económicos, acercándolos a las expectativas del entorno en el que se desenvuelven.

El sistema de gestión minero-mineralúrgica-metalúrgica sostenible se ha basado en el ciclo de mejora continua Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA) y es compatible con otros sistemas de gestión propios de las organizaciones. La Figura 59 representa el ciclo de mejora continua del sistema de gestión minero-mineralúrgica-metalúrgica sostenible.

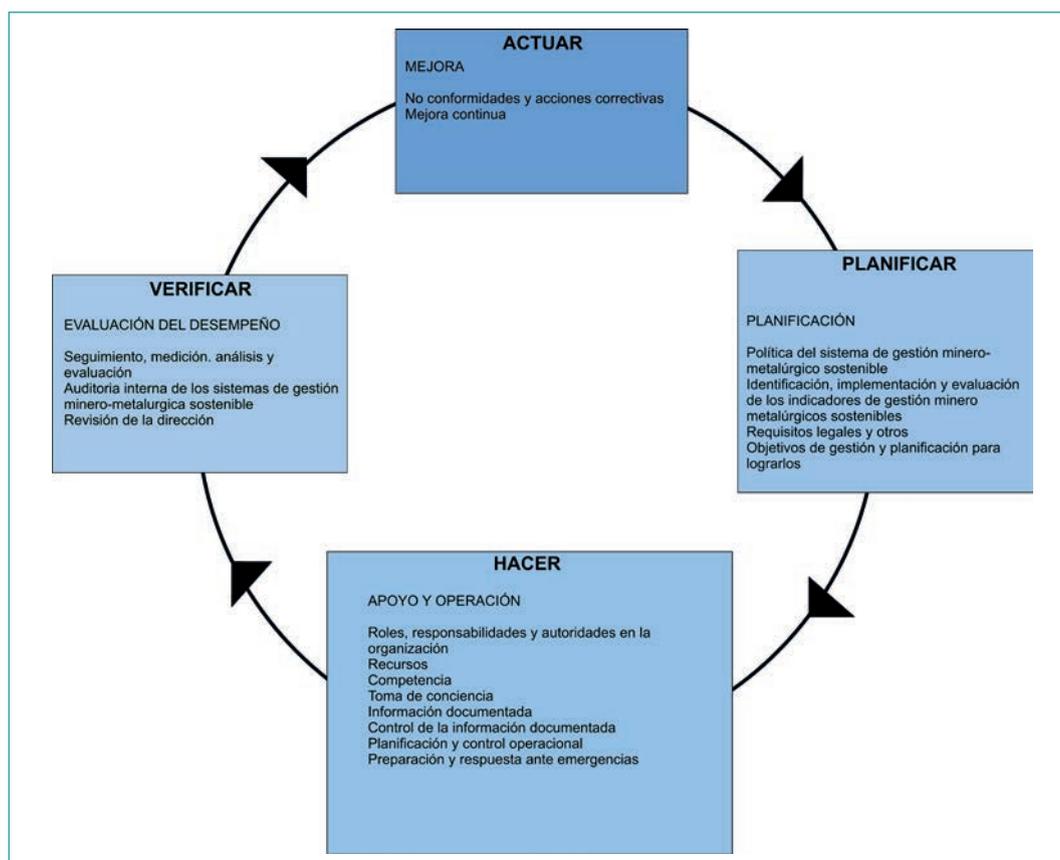


Figura 59. Modelo de sistema de gestión minero-mineralúrgica-metalúrgica sostenible. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (UNE, 2019a).

Esta norma está pensada para ser usada juntamente con la Norma UNE 22470 "Sistema de gestión minero-mineralúrgica-metalúrgica sostenible. Indicadores" (UNE, 2019b), que tiene por objeto establecer los indicadores de tipo económico, social y ambiental (Tablas 22, 23 y 24) para la evaluación de la implantación de un sistema de gestión minero-mineralúrgica-metalúrgica sostenible. De hecho, fruto de la inclusión de la mineralurgia de transformación y de la metalurgia extractiva, la norma UNE 22470 recogió nuevos indicadores. De esta manera, se aplica a las actividades de industrias mineras, mineralúrgicas de concentración o transformación y metalúrgicas extractivas.

Indicador	Parámetro
Indicador de gestión económica	Producción anual.
	Ventas netas anuales.
Indicador de I+D+i	Ratio de inversión en I+D+i con respecto al EBITDA (<i>Earnings Before Interest Taxes Depreciation and Amortization</i> , Beneficio antes de intereses, impuestos, depreciación y amortización) anual de la organización.
Indicador de Investigación Geológica y Minera	Inversión en investigación geológica y minera.
Indicador de materias consumibles	Ratio de las materias consumibles en la extracción y tratamiento de recursos minerales o en la obtención de productos procedentes de la metalurgia extractiva o en investigación y exploración geológica con respecto a la producción anual.

Tabla 22. Indicadores económicos Fuente: (UNE, 2019b).

La contribución de los sectores de las materias primas al empleo de la UE va mucho más allá de las actividades económicas estrictamente relacionadas con la producción de materiales, de tal modo que se crean incentivos para que las empresas locales participen como proveedoras de la demanda de las empresas mineras y metalúrgicas. También se puede desarrollar un observatorio de carreras técnicas y universitarias vinculadas a las profesiones y oficios demandados por la minería y la metalurgia, ya que existe un problema a escala mundial de escasez de profesionales cualificados en esos campos. En países como Canadá y Australia, el 60 % de empresas considera importante invertir en mejorar las capacidades de la fuerza laboral en los campos citados (Fraser Institute, 2018).

Indicador	Parámetro
Indicador de Protección del patrimonio cultural	Gasto total en la protección del patrimonio cultural.
Indicador de comunicación con el ámbito de influencia socioeconómico	Valor monetario de las contribuciones desde la empresa hacia el exterior, en actividades de interés público, social, o de interés para el ámbito de influencia socioeconómico.
	Índice de respuesta social.
	Número de tipos de fórmulas participativas puestas en marcha por iniciativa de la empresa que promueven la implicación de las partes interesadas del ámbito de influencia socioeconómico.
	Ratio de consumibles adquiridos en el ámbito de influencia socioeconómico respecto al total.
Indicador de empleo	Servicios contratados en el ámbito de influencia socioeconómico.
	Empleo total en plantilla.
	Empleo total subcontratado.
Indicador de formación	Porcentaje de mano de obra local.
	Ratio de horas totales de formación anual sobre el empleo total.
Indicador de seguridad y salud de los trabajadores	Índice de frecuencia de accidentes con baja del personal propio y de subcontratas.
	Índice de incidencia de accidentes con baja del personal propio.
	Índice de gravedad para el personal propio.
	Duración media de las bajas por accidente del personal propio.
	Índice de frecuencia de incidentes laborales en trabajos propios.
Indicador de comunicación con los grupos de interés (GDI)	Nivel de identificación de los grupos de interés.
	Nivel de inclusión y efectividad de los diálogos con los grupos de interés.
	Nivel del mecanismo de respuesta de los grupos de interés.
	Nivel de elaboración de informes.

Tabla 23. Indicadores sociales. Fuente: (UNE, 2019b).

Indicador	Parámetro
Indicador de protección ambiental	Gasto total en medio ambiente.
Indicador de eficiencia energética en el proceso productivo	Ratio de consumo total directo anual de energía en el centro productivo. Porcentaje de generación anual de energía procedente de fuentes renovables propias.
Indicador de emisión de gases	Ratio de toneladas de CO ₂ equivalente (tCO ₂ eq.) (GEI) sobre la producción anual. Ratio de las emisiones de gases de NO _x con respecto a la producción anual. Ratio de las emisiones de gases de SO ₂ con respecto a la producción anual. Ratio de las emisiones de gases de NH ₃ con respecto a la producción anual. Ratio de las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano (COVDM) con respecto a la producción anual. Porcentaje de recuperación, captación o prevención del SO ₂ y su transformación o eliminación con respecto al SO ₂ producido anualmente.
Indicador de emisión de partículas de polvo	Ratio de las emisiones por fuente de partículas de polvo PM ₁₀ y PM _{2,5} con respecto a la producción anual. Ratio de las emisiones difusas de partículas de polvo PM ₁₀ y PM _{2,5} con respecto a la producción anual.
Indicador de demanda de agua	Ratio del consumo neto anual de agua primaria con respecto a la producción anual. Porcentaje del consumo anual de agua reciclada. Ratio del consumo anual total de agua con respecto a la producción anual.
Indicador de demanda de suelo	Porcentaje de superficie total rehabilitada. Porcentaje de superficies rehabilitadas con objetivos de conservación de la naturaleza.
Indicador de uso de sustancias peligrosas	Ratio de sustancias muy tóxicas y tóxicas para el ser humano y los organismos vivos, utilizadas en las instalaciones. Ratio de sustancias nocivas para el ser humano y/o que pueden provocar a largo plazo efectos negativos para el medio ambiente, utilizadas en las instalaciones.
Indicador de vertidos	Ratio de los vertidos líquidos, por contaminante y en conjunto, con respecto a la producción anual.
Indicador de residuos	Ratio de los residuos mineros inertes vertidos en escombreras, balsas o presas, con respecto a la producción anual. Ratio de los residuos mineros no peligrosos no inertes vertidos en escombreras, balsas o presas, con respecto a la producción anual. Ratio de los residuos mineros peligrosos vertidos en escombreras, balsas o presas, con respecto a la producción anual. Porcentaje de los residuos mineros reutilizados y/o reciclados y/o valorizados y/o empleados en la rehabilitación. Porcentaje de residuos inertes externos reutilizados, y/o reciclados, y/o valorizados, y/o empleados en la rehabilitación, acondicionamiento o relleno, con respecto al total de materiales empleados en la rehabilitación. Ratio de otros residuos generados en el proceso productivo. Ratio de residuos domésticos o asimilables generados en el centro productivo con respecto a las horas trabajadas. Instalaciones de almacenamiento de residuos de categoría A ⁷⁹ . Ratio de los estériles de tratamiento declarados como residuos con respecto a la producción anual. Ratio de las escorias declaradas como residuos con respecto a la producción anual.
Indicador de incidentes medioambientales	Incidentes y accidentes medioambientales.

Tabla 24. Indicadores ambientales. Fuente: (UNE, 2019b).

En el ámbito medioambiental, la literatura también incluye indicadores relacionados con la economía circular (De la Torre et al. 2022). Entre ellos se encuentra la proporción en la que el material reciclado reemplaza la extracción de recursos naturales y la proporción en que es reincorporado en la economía. Relacionadas también están las ISO del Comité Técnico 323 y Economía Circular 59004, 59010 y 59020, que se encuentran en fase "Committee Draft" y que recogen los indicadores y la metodología para evaluar la circularidad.

⁷⁹ Una instalación de residuos se clasificará en la categoría A (Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras), si: (i) conforme a una evaluación del riesgo realizada teniendo en cuenta factores tales como el tamaño actual o futuro, la ubicación y el impacto medioambiental de la instalación de residuos, pudiera producirse un accidente grave como resultado de un fallo o un funcionamiento incorrecto, por ejemplo, el colapso de una escombrera o la rotura de una presa, o (ii) si contiene residuos clasificados como peligrosos con arreglo a la Directiva 91/689/CEE por encima de un umbral determinado, o (iii) si contiene sustancias o preparados clasificados como peligrosos con arreglo a las Directivas 67/548/CEE o 1999/45/CE por encima de un umbral determinado.

En este contexto, la excelencia tecnológica es también un elemento fundamental. Autores como De la Torre et al. (2022) lo incluyen como otro pilar de la sostenibilidad. En efecto, la eficiencia de los recursos, en términos de eficacia del proceso, es el principal activo de las empresas mineras. La industria minera se ve obligada a trabajar con una visión a largo plazo debido al tiempo para desarrollar los proyectos y, especialmente, a los períodos de recuperación de sus inversiones. Por esta razón, la industria necesita que las nuevas tecnologías reciban soporte durante el tiempo suficiente para garantizar un retorno de la inversión.

Los indicadores de eficiencia tecnológica descritos por Jacobs y Weber-Youngman (2017) tienen en cuenta tanto las tecnologías físicas como las digitales midiendo la capacidad de: (i) aumentar la producción, (ii) aumentar la productividad, (iii) aumentar la eficiencia y (iv) mejorar la seguridad y reducir el riesgo de error humano.

Actualmente, la perspectiva de una actividad minera sostenible constituye un elemento clave para la continuidad de la operación extractiva. Sin embargo, reunir los indicadores, en ocasiones no es una tarea fácil. Los datos utilizados no siempre son suficientemente homogéneos y, en general, no son fáciles de conseguir.

2.2. Economía circular y sostenibilidad

La idea de retroalimentación y de ciclos en sistemas es antigua y estuvo presente en varias escuelas filosóficas, creándose diferentes ramas de pensamiento⁸⁰. Resurgió en países industrializados después de la Segunda Guerra Mundial, cuando los estudios computarizados de sistemas no-lineales revelaron la naturaleza compleja, conectada e imprevisible del mundo, que se parece más a un metabolismo que a una máquina. Sin embargo, fue a finales de los años setenta cuando cobró impulso, gracias a académicos, líderes de opinión y empresas que llevaron su aplicación práctica a sistemas económicos modernos y a procesos industriales.

Poco a poco, fue ganando interés y atención y en 2015 se publicó la comunicación de la Comisión Europea "Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular" y en 2020, fruto del ya mencionado PVE, se adoptó un Plan de Acción de Economía Circular, que recoge medidas en el ciclo de vida de los productos, para adaptar la economía a un futuro ecológico y reforzar la competitividad.

La economía circular (EC) es un concepto de economía sostenible donde las empresas y consumidores se preocupan por el ciclo completo de los productos; incluyendo qué pasa *a posteriori*, una vez consumido el producto, cuando hay que ver cómo se gestionan los desechos y qué compromisos adquieren las empresas de no contaminar y de asegurarse que recuperan sus productos (European Union External Action Service - EEAS, 2018).

La economía circular está siendo considerada por las principales compañías mineras y metalúrgicas, como una parte importante de las estrategias de mejora y competitividad; por cuanto significa una nue-

⁸⁰ El modelo actual de economía circular sintetiza varias escuelas de pensamiento: la *Economía del Rendimiento* de Walter Stahel; la filosofía del diseño *Cradle to Cradle™* (de la cuna a la cuna) del arquitecto estadounidense William McDonough y el químico alemán Michael Braungart, una filosofía de diseño que compara los procesos industriales y comerciales con un proceso de metabolismo biológico, donde los desechos equivalen a nutrientes que pueden ser recuperados y reutilizados; la idea de biomimética presentada por Janine Benyus (autora de *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*), disciplina que invita a estudiar los fenómenos de la naturaleza con el fin de encontrar soluciones a problemas humanos; la *ecología industrial* de Reid Lifset y Thomas Graedel; el *capitalismo natural* de Amory y Hunter Lovins y Paul Hawken; el abordaje *blue economy* (economía azul) como el descrito por Gunter Pauli, o el *Diseño regenerativo*. Todas ellas son filosofías donde se hace énfasis en qué es la economía circular y en cómo se puede aplicar en la actualidad. Es por ello, que la EC es un marco de solución con visión sistémica que aborda desafíos globales como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, los desechos y la contaminación.

va forma de operar basada en las oportunidades de la reingeniería de los procesos, la circularidad de las operaciones y las oportunidades que brinda el concepto de producto-servicio. No menos importante es el marco regulatorio y legislativo que, a nivel europeo, promueve la progresiva implantación de estos principios de producir de manera sostenible, reduciendo el consumo y la generación de residuos.

Los conceptos de desarrollo sostenible y de economía circular presentan similitudes: ambos son de naturaleza global y ponen el énfasis en la importancia de integrar mejor los aspectos ambientales y sociales con el progreso económico. Ambos conceptos llaman la atención sobre las obligaciones entre las diferentes generaciones, debido a los peligros ambientales y ambos señalan la importancia de aumentar la participación de las autoridades y de la sociedad civil.

Al exigirse una reinversión completa de las cadenas de valor, la generación de residuos quedaría descartada. Los productos vuelven al sistema de producción, el crecimiento se desvincula del consumo (salvo de energía) y los materiales se mantienen dentro del proceso productivo. En este sentido, la circularidad también es un motor para la creación de oportunidades en todas las industrias, donde a través de modelos comerciales innovadores y nuevas tecnologías, se redefine el concepto mismo de residuo (Spindler et al., 2020).

La EC está ligada a la sostenibilidad ambiental y al logro de los objetivos del Acuerdo de París. En la lucha contra el cambio climático, la EC constituye una opción de desarrollo de especial interés. Las investigaciones sugieren que las emisiones de GEI se pueden reducir en aproximadamente un 50 % con significativas mejoras de la eficiencia energética y operativa y con la implementación a gran escala de soluciones de energías renovables. El 50 % restante debe provenir de una completa transformación en la forma en que se producen y consumen los bienes (Spindler et al., 2020).

Las políticas de desarrollo de EC y las políticas de cambio climático no solo son compatibles, sino que se benefician mutuamente. El potencial de mitigación de las emisiones de GEI del reciclaje, del desarrollo de modelos de negocio circulares y la eficiencia en el uso de los recursos es enorme y podrían complementar eficazmente las estrategias de cambio climático actualmente existentes, si bien es necesario incluir en los análisis los consumos energéticos y las emisiones en los procesos de reciclaje.

La EC se sustenta en la transición hacia energías y materiales renovables, pues una economía circular desvincula la actividad económica del consumo de recursos finitos (Ellen MacArthur Foundation, 2022). La economía circular busca ser regenerativa "dando más de lo que se necesita" al mismo tiempo que ofrece un valor económico sólido (Morris, 2020).

2.3. Modelo lineal vs. economía circular

El actual sistema económico está basado mayoritariamente en un modelo de crecimiento que se apoya en la producción de bienes y servicios bajo las pautas de "extraer-fabricar-consumir-desechar" (Figura 60). Este modelo lineal tiene claros impactos sobre el medio ambiente y eventualmente agotaría las fuentes de suministro de materias primas, ya que funciona bajo un sistema en el que todo lo fabricado tiene un final, que generalmente es de un solo uso o tiene una vida útil corta.

El modelo lineal comporta impactos sobre los recursos y ecosistemas, residuos, GEI, y contaminación. Estas afecciones adquieren una dimensión adicional al referirse a recursos no renovables o escasos, y

cuando se trata de insumos clave en la producción de determinados bienes y equipos. Adicionalmente, los impactos del modelo lineal se agravan debido a la obsolescencia programada y a unos hábitos de consumo cada vez más asociados a la «moda rápida», con tasas de renovación de los bienes que no agotan el ciclo de vida útil del producto, como ocurre, por ejemplo, con la ropa o los dispositivos electrónicos.

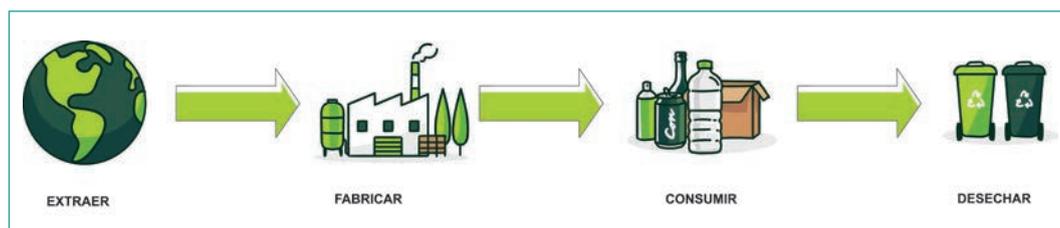


Figura 60. Concepto de economía lineal. Fuente: elaboración propia de los autores.

En el modelo de economía lineal hay una fuerte dependencia de la disponibilidad de las materias primas, lo que conlleva un riesgo asociado al suministro, con precios potencialmente elevados y volátiles, así como una reducción significativa del capital natural. Se hace, por tanto, necesario dar pasos hacia la incorporación de conceptos y procesos de la economía circular (Figura 61), basada en tres principios fundamentales:

- (i) Incorporar, desde la fase de diseño de los productos, tecnologías (por ejemplo, la Inteligencia Artificial), así como criterios para optimizar el consumo de materias primas en su producción e incrementar el reciclado de sus componentes.
- (ii) Prolongar la vida económica útil de los materiales y los recursos tanto como sea posible, para que permanezcan el mayor tiempo posible en el ciclo de vida, reduciendo en la medida de lo posible o eliminando la generación de residuos y la contaminación.
- (iii) Maximizar los recursos disponibles haciendo “circulares” los productos y materiales: se extraen materias primas, se fabrican productos y de los residuos generados se recuperan materiales y sustancias que se reincorporan al proceso productivo. De ese modo, se mantienen al menos una parte de los recursos en un circuito cerrado, evitando la extracción de nuevas materias primas vírgenes y alargando la vida de los recursos naturales⁸¹.

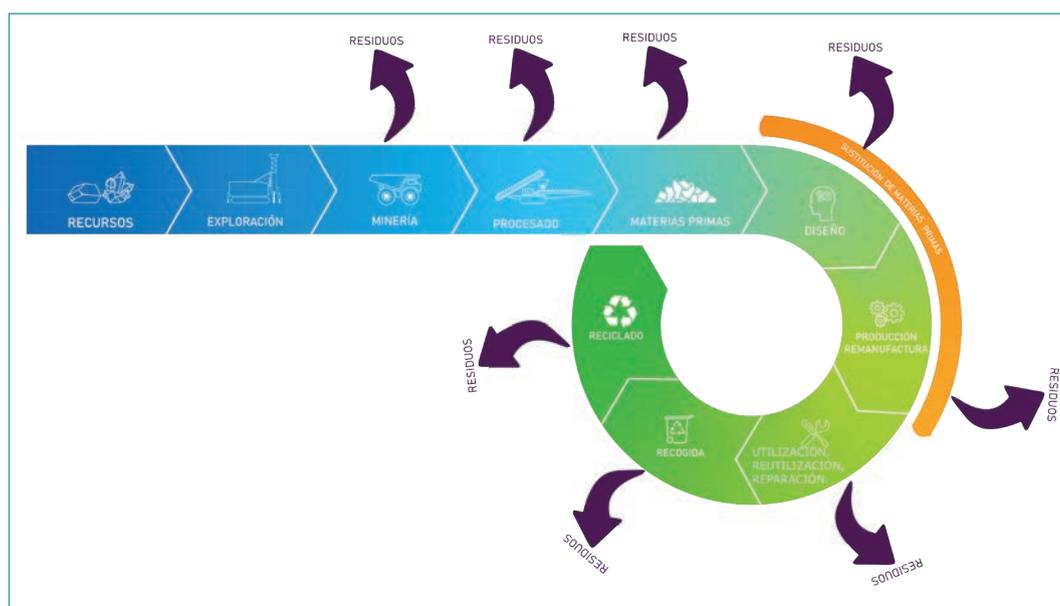


Figura 61. Concepto de economía circular en la industria minera. Fuente: traducido y reelaborado por los autores de (EIT, Raw Materials, 2022).

⁸¹ En todo caso, se seguirá consumiendo energía (cada vez más renovable) para los reprocesamientos.

La aplicación de los principios anteriores de economía circular supone una visión diferente de la economía: se trata de diseñar de forma distinta desde el principio, en lugar de concentrar los esfuerzos en mitigar y reducir los impactos de algo que ya se ha producido⁸². En este sentido el enfoque de la EC, más que en una mejor gestión de residuos, pone el énfasis en que los residuos se reducen y pueden llegar a eliminarse mediante un mejor diseño. Morris (2020) señala la distinción entre diseñar a partir de desechos y diseñar sin desechos.

Según Cheatle et al. (2020) la economía circular ofrece una solución realista (una alternativa) al *business-as-usual*, propugnando un sistema económico que abarca y fomenta el reciclaje, la reducción, la reutilización, la reparación y la "refabricación" de recursos, creando en última instancia un sistema circular o de circuito cerrado, que disminuye la necesidad de nuevas materias primas minerales. Bajo este prisma se reconoce la necesidad del ecodiseño, como instrumento que permita alcanzar una economía más circular y con mayor nivel de reciclaje (Valero y Valero, 2021).

3. Sobre la economía circular en el ámbito europeo

Según datos de la Comisión Europea, en 2011, cada persona de la UE consumía de media 16 toneladas de materiales anualmente, de las cuales seis se desperdiciaron y la mitad se destinó a vertederos. En promedio, los europeos consumen recursos al doble de velocidad que el planeta puede renovarlos (European Commission, 2017).

Durante las últimas cuatro décadas, el uso global de materiales casi se triplicó, pasando de 26.700 millones de toneladas en 1970, a 92.100 millones de toneladas en 2017, y se prevé que en 2050 se sitúe entre 170.000 y 184.000 millones de toneladas (The Platform for Accelerating the Circular Economy – PACE, 2019). El Producto Mundial Bruto (PIB mundial) se desarrolló también de manera similar, pasando desde 2,6 billones de dólares en 1900, a 14,5 billones de dólares en 1970, y 94 billones de dólares en 2021. Según las proyecciones del Fondo Monetario Internacional (FMI), se espera que la economía mundial alcance los 104 billones en 2022. Impulsados por la expansión económica, se estima que en 2050 se sitúe entre 140 y 165 billones de dólares.

Un informe de la organización Circle Economy, que cuenta con el apoyo de la ONU, calcula que en la economía mundial entran anualmente 100.600 millones de toneladas de minerales, combustibles fósiles, metales y biomasa, y señala que el reaprovechamiento y la eficiencia solo se aplican en un 9 % de esa producción. Puede decirse que solo un 9 % de la economía mundial actual es circular (The Platform for Accelerating the Circular Economy – PACE, 2019).

Se estima que una reducción de tan solo un 1 % en el consumo de recursos en la economía global podría suponer un ahorro anual de, aproximadamente, 840 millones de toneladas de metales, combustibles fósiles, minerales y biomasa, así como de 39,2 trillones de litros de agua (Rubel et al., 2017).

⁸² Uno de los modelos de EC es el de la fundación Ellen MacArthur que describe la integración del ciclo de vida natural (biológico) donde los recursos son limitados y los materiales tienen un uso, que se reincorpora en los procesos productivos de forma circular (tecnológico).

Europa podría aprovechar el cambio de modelo para generar un beneficio neto de 1,8 billones de euros de aquí a 2030, es decir, 0,9 billones más que en el actual modelo lineal (The Platform for Accelerating the Circular Economy - PACE, 2019). Además, se estima que se podrían generar en torno a 580.000 nuevos puestos de trabajo, de los cuales un 30 % estarían asociados al cumplimiento de la normativa comunitaria en materia de residuos y ecoinnovación (Fundación Cotec para la innovación, 2019).

Por su parte, aumentar la eficiencia en el uso de materiales en la economía de la UE de un 17 % a un 24 % podría impulsar el PIB hasta en un 3,3 % y crear de 1,4 a 2,8 millones de empleos. Al utilizar los recursos de manera más eficiente, las empresas podrán beneficiarse de ahorros en el rango de 245-604 mil millones de euros por año, que representan entre el 3 % y el 8 % de su facturación anual. Esto implicaría una reducción del 2-4 % del total emisiones de GEI de la UE (European Commission, 2014).

La Comisión Europea prevé desarrollar fuertes inversiones desde el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, a través de la especialización inteligente, el programa LIFE y Horizon Europe para complementar la financiación de la innovación privada y apoyar todo el ciclo de innovación con el objetivo de aportar soluciones al mercado, modelos de negocio circulares y nuevas tecnologías de producción y reciclaje, incluida la exploración del potencial de reciclaje metalúrgico y químico; y teniendo en cuenta el papel de las herramientas digitales para lograr objetivos circulares.

En la UE apenas el 12 % de los materiales y recursos secundarios vuelven a entrar en la economía; y en el contexto de sostenibilidad, en el apartado referente a este asunto, ya se ha indicado que el PVE considera el acceso a las materias primas sostenibles y contempla una ambiciosa Hoja de ruta hacia una economía circular climáticamente neutra. La Comisión Europea considera que extender la aplicación de los principios de la economía circular a los principales agentes económicos contribuirá decisivamente a lograr la neutralidad climática para 2050 (de manera que hasta el último gramo de emisiones de GEI pueda ser absorbido por la naturaleza o retirado) y desvincular el crecimiento económico del uso de los recursos, al tiempo que se garantice la competitividad a largo plazo de la UE. Para cumplir esta ambición, la UE necesita acelerar decididamente la transición hacia un crecimiento regenerativo (European Commission, 2021a).

En el plan de acción de la UE se incluyen medidas para hacer que los productos sostenibles sean la norma (que duren más, sean fáciles de reutilizar, reparar y reciclar e incorporen en la medida de lo posible material reciclado en lugar de materias primas primarias). Se trata también de empoderar a los consumidores y de centrarse en los sectores que utilizan más recursos y que tienen un elevado potencial de circularidad. En este sentido se anuncia que la Comisión adoptará medidas concretas sobre electrónica y TIC, baterías y vehículos, envases y embalajes, plásticos, productos textiles, construcción y vivienda, y alimentos.

En el contexto actual de digitalización y descarbonización de las economías, los principios de la economía circular encajan muy bien en un escenario en que los recursos se pueden usar de una manera más eficiente.

Las tecnologías digitales pueden rastrear la circulación de productos, componentes y materiales y hacer que los datos resultantes sean accesibles de forma segura. El espacio de datos europeo para aplicaciones circulares inteligentes que se está desarrollando e implantando proporcionará la arquitectura y el sistema de gobernanza para impulsar aplicaciones y servicios como pasaportes de productos, mapeo de recursos e información del consumidor (European Commission, 2021a).

Para la Comisión Europea, la transición a la economía circular será sistémica, profunda y transformadora, tanto en la UE como fuera de ella. Será disruptiva, por lo que tiene que ser justa y requerirá una alineación y cooperación de todas las partes interesadas y a todos los niveles, tanto internacional, de la UE, como a nivel nacional, regional y local (European Commission, 2021a).

4. La estrategia española de economía circular

En junio de 2020 el Gobierno de España aprobó la estrategia española de economía circular denominada "España Circular 2030", cuyos objetivos para la década son, entre otros: (i) reducir en un 30 % el consumo nacional de materiales, en relación con el PIB, tomando como año de referencia 2010, (ii) disminuir en un 15 % la generación de residuos respecto a 2010 y (iii) reducir la emisión de GEI por debajo de los 10 millones de toneladas de CO₂ equivalente. Su ejecución se materializará mediante planes de acción trienales. El primero, ya publicado, es para el periodo 2021-2023.

Este plan de acción de economía circular contempla cinco ejes de actuación i) producción, (ii) consumo, (iii) gestión de residuos, (iv) reutilización y depuración del agua y (v) actuación materias primas secundarias; y tres líneas de acción (i) investigación, innovación y competitividad, (ii) participación y sensibilización y (iii) empleo y formación.

En el eje de la producción, se hace referencia a promover el diseño/rediseño de procesos y productos para optimizar el uso de recursos naturales no renovables en la producción, fomentando la incorporación de materias primas secundarias y materiales reciclados y minimizando la incorporación de sustancias nocivas de cara a obtener productos más fácilmente reciclables y reparables, reconduciendo la economía hacia modos más sostenibles y eficientes. Se trata de *"lograr la integración de las medidas de la EC en la fase de concepción y diseño y en la de la producción o distribución supone en primer lugar, mejorar la durabilidad de los materiales y productos al restringir los de un solo uso, evitar la obsolescencia programada o la destrucción de los no vendidos y en segundo lugar incrementar las posibilidades de actualización y reutilización y también facilitar, al final de su vida útil, su refabricación y reciclaje, teniendo en cuenta la presencia de productos químicos peligrosos y la mejora de la eficiencia de los materiales"*.

En el eje de consumo, el objetivo es reducir la huella ecológica mediante una modificación de las pautas de consumo hacia uno más responsable que evite el desperdicio y las materias primas no renovables.

En el de gestión de residuos, se trata de aplicar el principio de jerarquía de residuos favoreciendo la reducción y la preparación para la reutilización y el reciclaje. Entre los puntos que contempla este eje el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITRED) está trabajando en la revisión de la normativa de residuos para, entre otras actuaciones, revisar los procedimientos para la aplicación del concepto de subproducto y el fin de condición de residuo. También se contempla en este eje el *"refuerzo del régimen jurídico de la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos"* y el de los vehículos al final de su vida útil, así como de las pilas y baterías y sus residuos.

En el eje de reutilización y depuración del agua el objetivo es promover un uso eficiente del recurso agua, que permita conciliar la protección de la calidad y cantidad de las masas acuáticas con un aprovechamiento sostenible e innovador del mismo.

En el eje de actuación materias primas secundarias (MPS) el objetivo es garantizar la protección del medio ambiente y la salud humana reduciendo el uso de recursos naturales no renovables y reincorporando en el ciclo de producción los materiales contenidos en los residuos como materias primas secundarias

Relevantes para el caso que se trata en este documento son las medidas para mejorar la prevención y gestión de los flujos de residuos, ya que entre ellas figura un proyecto piloto de reutilización de módulos fotovoltaicos y baterías de litio de automoción en aplicaciones de autoconsumo doméstico; así como una guía para el desarrollo de criterios ambientales a tener en cuenta en el desmantelamiento y repotenciación de instalaciones de generación eólica⁸³.

Un eje muy relevante es el de las MPS, que pretende la "reintroducción de materias primas secundarias en el ciclo productivo". *"De esta manera se reduce la dependencia de las materias primas vírgenes a la vez que se garantiza el suministro de alternativas ambiental y económicamente viables. En este sentido el término MPS abarca los conceptos jurídicos de subproducto y de fin de la condición de residuo según se definen respectivamente en los artículos 4 y 5 de la Ley 22/2011 de 28 de julio de residuos y suelos contaminados"*.

En este eje se reconoce que *"la sustitución de la materia prima virgen por MPS no siempre es factible en términos de mercado entrando en juego cuestiones tales como la cuantía y calidad de las MPS disponibles, así como el precio de la MPS respecto a la materia prima procedente de recursos naturales"*. En este sentido el plan de acción aboga por llevar a cabo un estudio dirigido a determinar el número de empresas beneficiadas en el marco de cada una de las ordenes aprobadas, la implantación real por parte del sector afectado, el volumen de residuos que se incorporan nuevamente al ciclo productivo como MPS y con ello, los beneficios ambientales al evitar su depósito en vertedero y su contribución a la aplicación de los objetivos europeos y nacionales.

Otro aspecto importante, contemplado en este eje es el relativo a las materias primas fundamentales (MPF). Se refiere el plan de acción al documento de la Comisión Europea "Resiliencia de las materias primas fundamentales: trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad" y al respecto señala que *"España debe avanzar en la identificación y aprovechamiento de las MPF y otras materias primas esenciales, cuya adecuada gestión debe contribuir a la competitividad de la economía española, su menor dependencia del exterior y la eficiencia en el uso de recursos, en el marco de los principios de la EC"*.

En particular, el plan de acción contempla la creación de un inventario nacional de residuos de la industria extractiva que contenga materias primas fundamentales y la aprobación de una Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales que permita garantizar el suministro de los recursos minerales autóctonos de la manera más sostenible, eficiente y maximizando los beneficios a lo largo de la cadena de valor, añadiendo que se contemplará como primera opción la reutilización y el reciclaje para alimentar los procesos productivos.

5. Economía circular en la cadena de valor: minería y metalurgia

El aumento de la demanda de minerales y metales con destino a las tecnologías verdes⁸⁴ implica un mayor número de minas y más procesamiento de minerales. Al mismo tiempo, la industria minera también busca reducir o eliminar las emisiones y reducir la producción de residuos en sus operaciones (CIM,

⁸³ A este respecto, se puede ver (Fundación Naturgy, 2022).

⁸⁴ Las tecnologías verdes o tecnologías limpias son aquellas que incluyen técnicas, procesos, materiales y métodos aplicables en la economía en general con el fin de mejorar la calidad de vida, mientras se preserva y recupera el medio ambiente.

2022). La recuperación eficiente de recursos secundarios contribuirá a que la demanda de recursos primarios pueda modularse en su crecimiento. Por ello, las compañías mineras de metales necesitan determinar dónde enfocarse para así sacar provecho a la economía circular y de las tendencias de la tecnología limpia (Bartels y Morrison, 2019).

Las implicaciones para la industria minera y metalúrgica son de importante calado, por cuanto implican una gran transformación en la concepción de los proyectos mineros y en el abastecimiento de las materias primas minerales en el futuro. Es evidente que la actividad de reciclaje se intensificará en los próximos años, incrementándose la entrada en los mercados de forma decisiva de los “recicladores”, ya que los consumidores finales exigirán conocer la procedencia del contenido del producto y los productos reciclados se volverán cada vez más deseables en virtud de su naturaleza (Cheatle y Freele, 2020).

Lograr un desarrollo de los principios de la economía circular y su implantación requiere que todos los sectores económicos, incluido el sector minero, rediseñen sus cadenas de valor y suministro para mantener sus recursos en uso durante el mayor tiempo posible. De forma resumida, los productos que han llegado al final de su vida útil pueden reutilizarse y volver a las etapas iniciales del modelo de economía circular para impulsar la economía y retener el valor inherente de los desechos (Averda, 2022).

La Figura 62 ilustra las principales etapas del ciclo de vida de los minerales y metales, y permite diferenciar los diferentes grados de administración, gobierno o responsabilidad en las diferentes etapas. Si bien la minería genera una considerable cantidad de estériles y residuos en los procesos de las operaciones mineras, en la concentración de menas y en los procesos subsiguientes de fundición y refinado, los estériles y residuos pueden utilizarse para otros usos.

Por otra parte, en las operaciones mineras se puede avanzar hacia la economía circular con una visión sistémica, en la que, entre otros aspectos, se adapten los sistemas técnicos para maximizar el valor, se disminuyan o eliminen los residuos, se consideren nuevas estrategias de diseño y se cree valor en los residuos mediante la simbiosis industrial⁸⁵.

Dado que gran parte de las operaciones mineras no están integradas verticalmente aguas abajo en la cadena de valor, no es fácil actuar en las operaciones de economía circular en el diseño y fabricación de

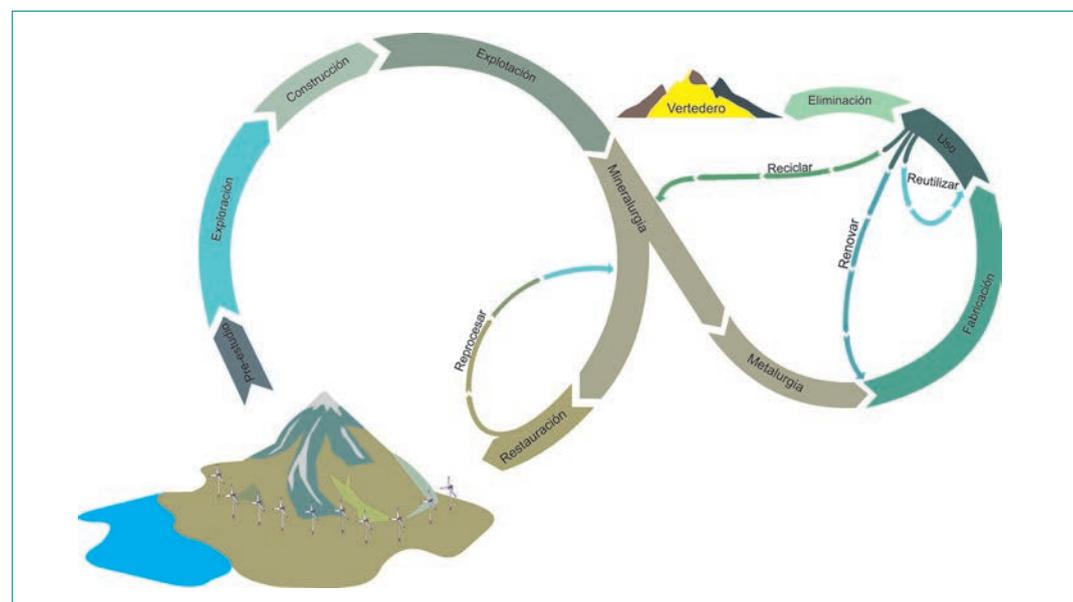


Figura 62. Principales fases del ciclo de vida de los metales y minerales. Fuente: traducido y modificado por los autores de (Cheatle y Freele, 2020).

⁸⁵ Para más detalle ver (Young, et al., 2021).

productos, que son claves en la concepción de una economía circular. Sin embargo, es en las plantas metalúrgicas de obtención de metales por la vía pirometalúrgica y de afino donde se puede tener una notable contribución a la economía circular procesando residuos y metales secundarios; como se verá más adelante.

Según Pinchuk et al. (2019), la aplicación del concepto de economía circular en la industria minera implicará la creación de formas innovadoras de producción, incrementará la posibilidad de reutilización de bienes y materiales, con menor coste de los recursos y promoverá el uso eficiente y la protección de recursos naturales. El impacto de la economía circular en la industria minera es directo y potencialmente disruptivo para la industria a medida que reciclan más productos.

Comprender dónde residen las oportunidades para la industria minera es un proceso complejo y desafiante, dado que no es simplemente incrementar las tasas de reciclaje. Las compañías mineras han estado tradicionalmente enfocadas en la producción de materia prima y muy poco mentalizadas en monetizar el flujo de metales reciclados. Sin embargo, la realidad indica que a medida que aumenta la circularidad, la demanda relativa de productos básicos se modulará, especialmente a medida que se reduzcan las pérdidas de residuos y materiales.

5.1. Recuperación de materias primas secundarias

La EC es particularmente relevante para la minería ("extension & extraction") y la metalurgia ("processing") como se puede apreciar en la Figura 63. El volumen de residuos es particularmente elevado en las fases de minería y metalurgia, siendo menores en otras fases de la cadena de valor, si bien son también relevantes en la etapa de fabricación ("manufacturing").

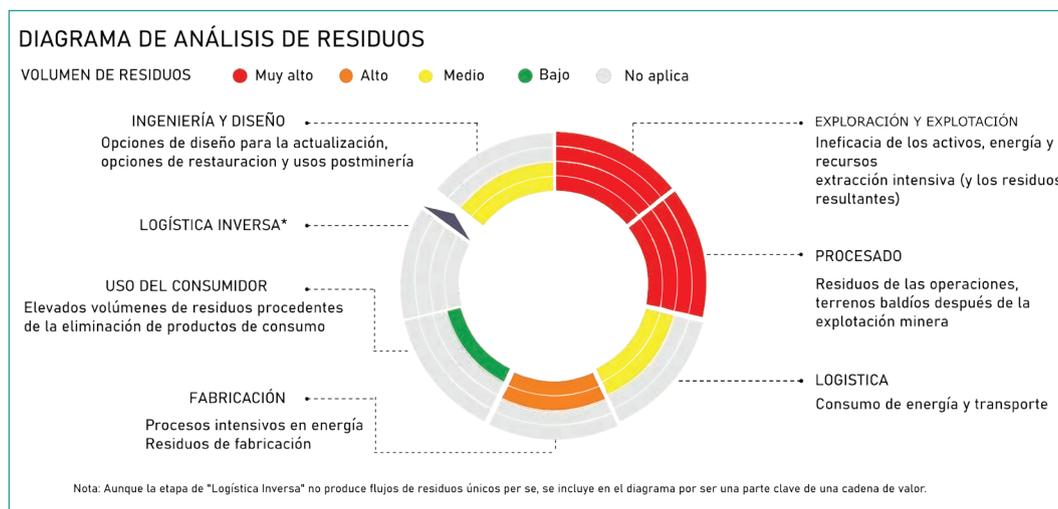


Figura 63. Diagrama de análisis de residuos. Fuente: modificado por los autores de (Lacy et al., 2020).

Algunos ejemplos pueden ayudar a comprender el papel de la recuperación de recursos secundarios y cómo estos, no obstante, no pueden llegar a suplir totalmente la demanda de materias primas primarias, si bien, su recuperación es fundamental.

Reciclar 41 teléfonos móviles pueden producir tanto oro como el que se obtiene a partir de una tonelada de mineral primario con una ley de 1 g/t. Sin embargo, no es presumible que todos los teléfonos móviles del mun-

do se reciclan al mismo tiempo y, aunque así fuera, sería imposible cubrir la demanda de oro en los mercados. Otro ejemplo ilustrativo es el aluminio, donde una sola tonelada de aluminio reciclado ahorra nueve toneladas en emisiones de CO₂ (Cheatle y Freele, 2020). Alrededor del 90 % del titanio en circulación hoy en día se recicla. Sin embargo, esto solo satisface alrededor del 50 % de la demanda actual (Leonida, 2022).

El acero es el material más reciclado del mundo (Figura 64). Toda la chatarra proviene de estructuras demolidas, vehículos y maquinaria al final de su vida útil, así como de las pérdidas de materiales en el proceso de fabricación, que se recogen y se reciclan. La tasa de reciclaje general actual se estima en alrededor del 85 %. Cada año se reciclan, aproximadamente, 630 Mt de chatarra, lo que evita la emisión de unos 950 Mt de CO₂. Desde el año 1900 se habrían reciclado alrededor de 25.000 Mt de chatarra, lo que ha ahorrado un consumo de mineral de hierro de 35.000 Mt, así como 18.000 Mt de carbón coquizable. Las plantas siderúrgicas tienen un componente de reciclaje, y los procesos de obtención de acero, predominantes hoy en día, utilizan chatarra, hasta un 100 % si la producción es mediante horno de arco eléctrico y hasta un 30 % en la fabricación mediante el horno alto y los procesos subsiguientes. Para la obtención de 1.000 kg de acero, valores ilustrativos para la fabricación mediante horno alto pueden ser: 1.370 kg de mineral de hierro, 125 kg chatarra, 270 kg caliza y 780 kg carbón, mientras que, por arco eléctrico, serían: 710 kg chatarra, 586 kg mineral de hierro, 88 kg caliza y 150 kg carbón (World Steel Association, 2020b).

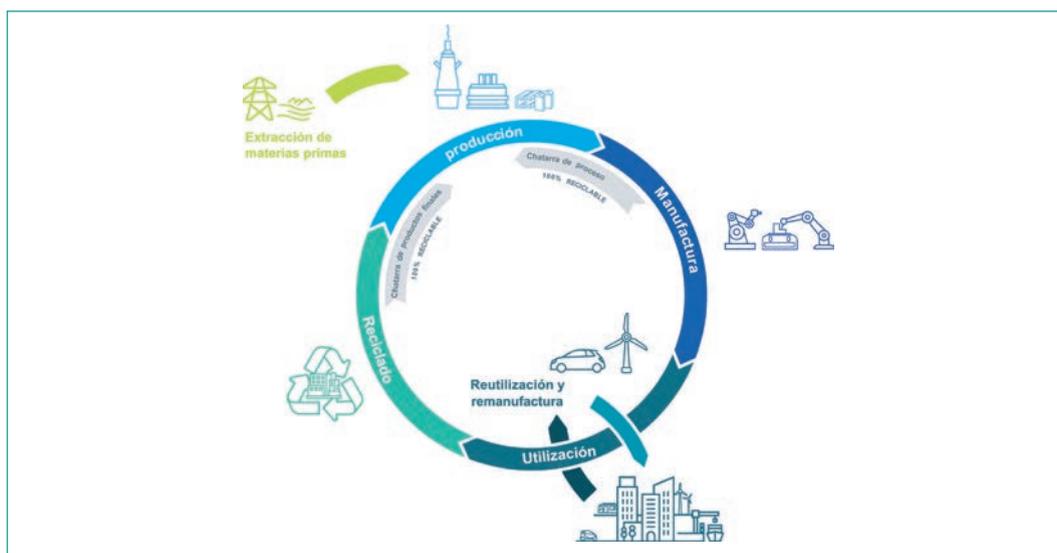


Figura 64. Ciclo de vida del acero. Fuente: traducido por los autores de (World Steel Association, 2020b).

La futura expansión de la producción de acero a partir de chatarra dependerá de la disponibilidad de chatarra de alta calidad. Si bien la oferta de mineral de hierro puede adaptarse a la demanda, la disponibilidad global de chatarra es una función de la demanda de acero y la generación de chatarra al final de la vida útil de los productos que contienen acero.

En el capítulo sobre el papel de las materias primas en la transición energética y la digitalización, ya se puso de manifiesto que la transición energética y la digitalización supondrán notables o muy fuertes incrementos de la demanda de minerales y metales. En este contexto, la economía circular es una solución prometedora para los desafíos de recursos en la industria de los metales y la minería, donde se prevé un aumento posible del 250 % en la demanda de metales para 2030 (Spindler, Long, y Morrison, 2020) e incluso un incremento en la demanda de algunos metales como el cobre en un 600 % (y hasta un 900 %) en los próximos veinte años (Fundación Chile, 2022), lo que generará un aumento de las actividades de extracción, procesamiento y generación de residuos. Bajo el desarrollo del Pacto Verde Europeo, se prevé que las baterías, principalmente para vehículos eléctricos, aumenten la demanda de litio en la UE en casi un 6.000 % para 2050, lo que es un claro ejemplo de la absoluta necesidad de encontrar materiales sustitutivos o de utilizar litio reciclado.

A modo de ejemplo el 90 % de los estériles de planta de concentración, almacenados en vertederos o escombreras, provienen de minas metálicas y aún conservan una gran cantidad de materiales valiosos y recuperables con las tecnologías actuales, como elementos de tierras raras, oro, níquel, cobalto y tungsteno. La roca estéril de mina, los estériles de planta de tratamiento, las escorias y hasta el polvo de roca pueden tener salida y ser reutilizados en aplicaciones muy variadas, desde materiales de construcción hasta la energía solar, elaboración de aditivos para suelos agrícolas, y un sinnúmero de aplicaciones más (Cheatle y Freele, 2020). Naturalmente, la realización del potencial debe de ir soportada, entre otros, de una economía de los procesos de recuperación que hagan que esta sea de interés.

5.2. El papel de la metalurgia en el reciclaje de las materias primas secundarias

Una de las fuerzas motrices clave de la economía circular es la metalurgia y el reciclaje. Si los productos de consumo fueran simples y estuvieran fabricados con un solo material (lo más probable es que fueran poco atractivos desde el punto de vista estético y carecieran de toda la funcionalidad compleja requerida por los productos modernos), los reciclados obviamente podrían ser 100 % puros. La economía circular sería entonces y, en principio, una tarea aparentemente fácil.

Sin embargo, la realidad actual es que los productos de consumo modernos se caracterizan porque su composición presenta una elevada complejidad al estar constituidos por metales funcionales, nanometales y micrometales complejamente unidos, así como por aleaciones vinculadas a materiales inorgánicos funcionales y plásticos.

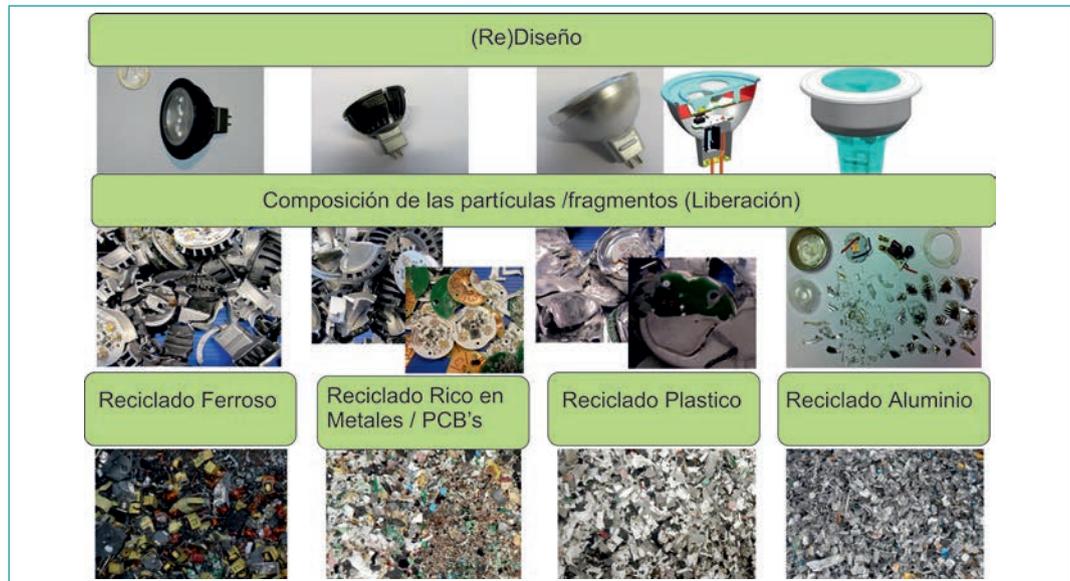
Además, aparece otra cuestión adicional, ya que existen dos tipos de reciclado: (i) el del final de la vida del producto (postconsumo), que para la mayoría de los elementos críticos es muy bajo, y (ii) el reciclado del producto del que se extraen durante el procesamiento y la fabricación (en estas etapas se pueden producir desechos), que es muy superior, debido a que, en general, el material de los desechos previos al consumo es más fácil de explotar, ya que suele estar mucho menos disperso y contaminado y, por lo tanto, es mucho más fácil de recolectar y procesar (Moss et al., 2013).

En el caso del final de la vida del producto, es bajo porque en algunos de ellos, ciertos elementos aparecen en concentraciones inferiores a las que están en la corteza terrestre y es prácticamente inviable su recuperación; en otros casos son elementos que, como el Nd, Pr y Dy, se han empezado a utilizar hace relativamente poco. Además, donde se utilizan en cantidades mayores, como pueden ser los motores para la generación de energía eólica, están todavía muy lejos de completar su vida útil y existen problemas tecnológicos para conseguir la misma calidad en el producto final cuando se obtiene a partir de los elementos reciclados.

En la Figura 65 se ilustran los diferentes diseños, composiciones y tipos de fragmentos del reciclado para diferentes diseños de lámparas LED.

Establecer el límite para la eficiencia de recursos de los sistemas complejos y altamente interconectados de una economía circular, requiere una comprensión a fondo de los diferentes elementos que constituyen los productos junto con sus materiales, y cómo se mueven en un sistema de economía circular. Además, los productos, a menudo tienen una vida útil corta, son complejos y se producen y consumen de forma intensiva, dificultando la recuperación de los metales que los componen; a partir de grandes volúmenes reciclados con mezclas complejas.

Figura 65. Relación entre el diseño, la composición de partículas y la calidad del reciclado, así como las composiciones de fragmentos/partículas y reciclado para los diferentes (re)diseños de lámparas LED. Fuente: traducido y modificado por los autores de (Reuter y Schaik, 2015).



La economía circular se puede definir, en este caso, en términos del Internet de las cosas metalúrgico (m-IoT) es decir de un sistema de producción de materiales que están interconectados, que es un requisito integral y necesario para "cerrar el círculo" y maximizar la eficiencia de recursos. Los minerales, tanto los que provienen de la fabricación a partir de materias primas minerales primarias como del reciclaje, son el elemento común y el enlace entre ambos procesos. Algunos de los aspectos que afectan a la tasa de reciclaje de los productos de

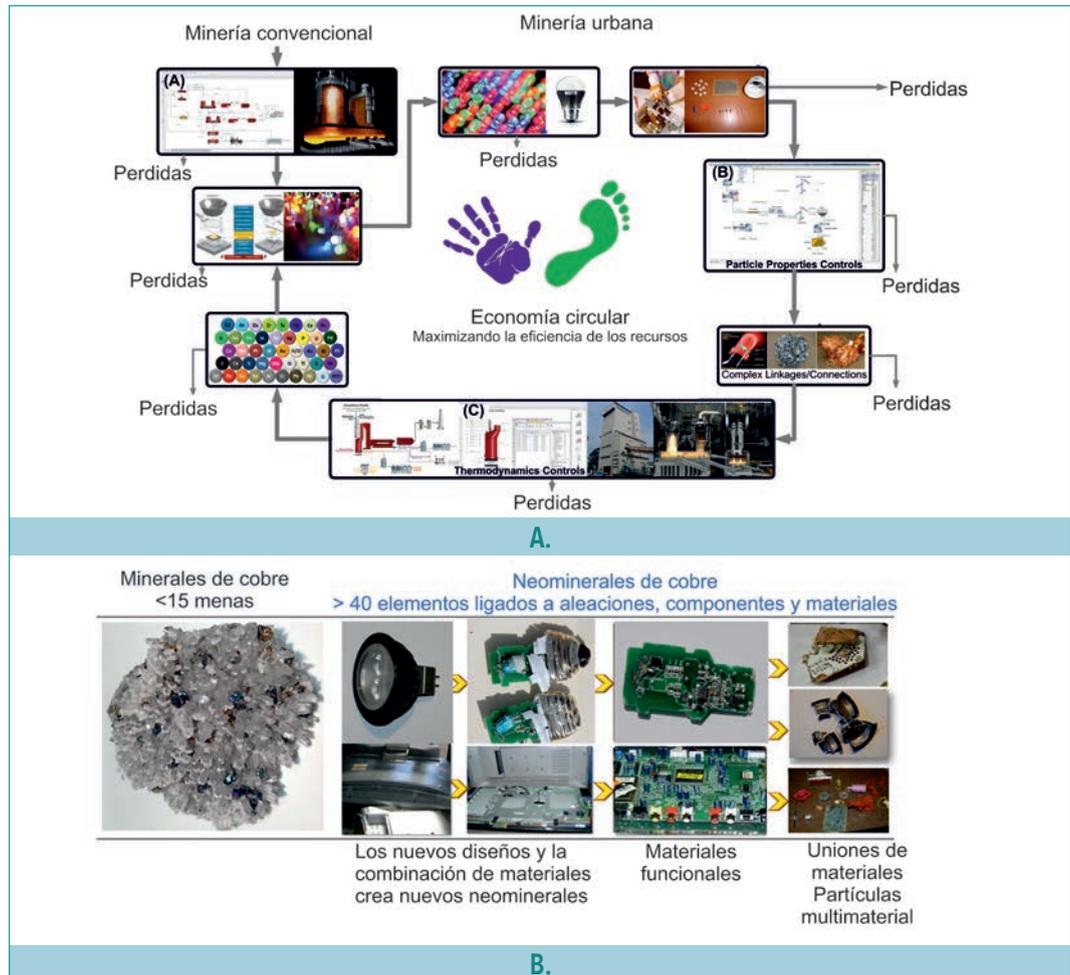


Figura 66. A. Resumen de los aspectos que afectan las tasas de reciclaje de los productos al final de su vida útil como se incluyen en los modelos de reciclaje, **B.** Complejidad de los minerales geológicos frente a los minerales urbanos diseñados. Fuente: modificado por los autores de (Reuter y Schaik, 2015).

consumo al final de su vida útil son: distribuciones de tiempo y propiedades, diseño del producto, grado de liberación, separación física, termodinámica metalúrgica y tecnología de procesamiento mediante fundición.

La Figura 66A, trata de ilustrar la relación entre la minimización de la huella ambiental y el diseño de productos con las minas geológicas y "urbanas", cuestión clave para una economía circular. Se puede observar que el tratamiento de los materiales proveniente de una "mina urbana" se basa en las mismas operaciones y procesos que el tratamiento de los minerales naturales, es decir, desmantelamiento, trituración y molienda, separación física y metalurgia extractiva (vías pirometalúrgica e hidrometalúrgica). Por su parte, la Figura 66 B muestra la complejidad de los materiales en un producto y las posibles cuestiones que afectan al comportamiento de liberación, la inevitable (in)eficiencia de reciclado y, por tanto, las pérdidas del sistema.

La variabilidad de productos y materiales exige una infraestructura de procesamiento metalúrgico dinámica y ágil para absorber y procesar en productos de alta calidad tantas combinaciones de materiales complejamente enlazados. Como resultado, la política debería reconocer la importancia clave de la metalurgia para una economía circular.

5.3. La simbiosis industrial como enfoque para la gestión de los residuos de las actividades mineras

Los residuos de las industrias metalúrgicas pueden aprovecharse por parte de otras industrias afines, pero para ello es necesario desarrollar una estrategia de intercambio de materias primas minerales para su procesamiento entre empresas, aplicar tecnologías de baja generación de residuos y contar con personal cualificado. También la normativa debe acompañar este proceso.

En la Figura 67 se muestran los coproductos que se generan durante la fabricación del acero, entre los que destaca por su cantidad la escoria, tanto granulada como cristalizada, que es utilizada por empresas externas, como cementeras y de obra civil. Se puede observar cómo parte de los residuos o coproductos son usados internamente por la empresa.

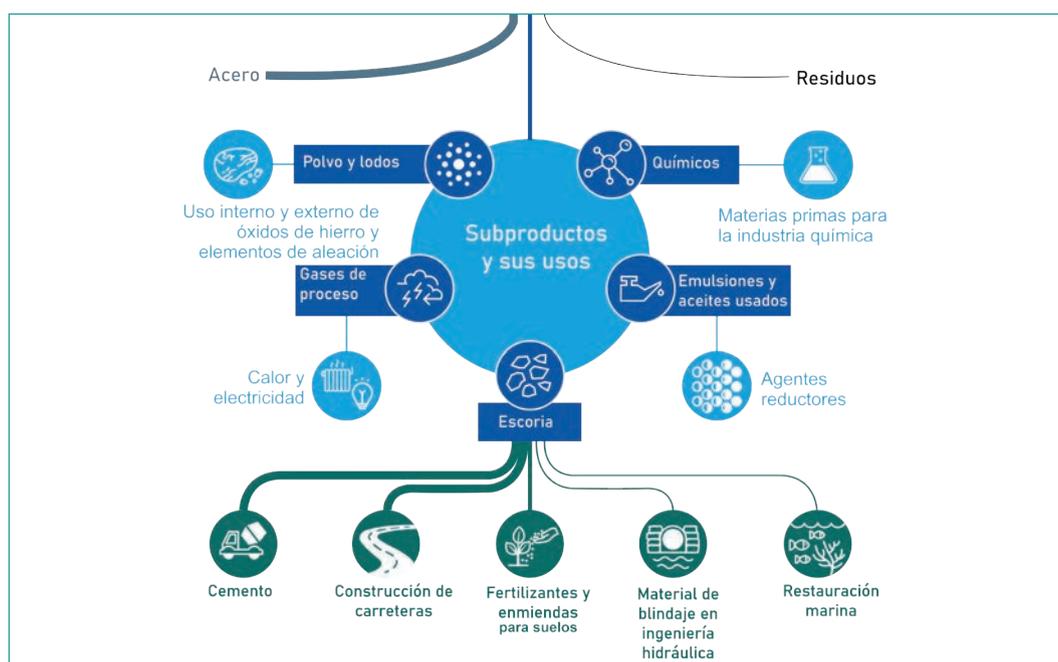


Figura 67. Coproductos en la industria siderúrgica y sus usos. Fuente: traducido por los autores de (World Steel Association, 2020a).

Una reducción de la generación final de residuos y una reutilización de estos, bien por la propia empresa que los produce o bien por una empresa externa, conllevará una reducción de los residuos, lo que supone ventajas en cuanto a las necesidades de depósitos de almacenamiento de los residuos (vertederos), que ocupan terreno, así como optimizar el uso de todas las materias primas naturales y minimizar el daño al entorno.

Sin embargo, lograr una producción total sin residuos en la industria minera no es tarea fácil, dado el volumen de estos, como se ha visto en el apartado de recuperación de materias primas secundarias. Es aquí donde es de notable interés el principio de simbiosis industrial, que básicamente aboga por utilizar los residuos de un proceso de una industria como recurso para otra, de tal suerte que una vez tratado o procesado se convierta en un producto comercializable. Esto requerirá que exista una comunicación y colaboración entre empresas, heterogéneas entre sí, pero unidas en un parque eco-industrial, cuyo resultado redundará en una conservación de recursos, reducción de consumos energéticos, reducción de emisiones de todo tipo y mejoras en la calidad medioambiental (Pinchuk et al., 2019).

En el capítulo sobre aspectos económicos e industriales de la cadena de valor de las materias primas minerales se abordarán los aspectos industriales de los clústeres y ecosistemas industriales, como conjunto de empresas de industrias relacionadas y con competencias que cubren un amplio abanico de industrias relacionadas o interdependientes.

En este marco se puede situar lo que en la economía de circular y gestión de residuos y reciclaje se denomina en ocasiones la simbiosis industrial, como se recoge en el documento I Plan de Acción de Economía Circular 2021-2023 de la estrategia española de Economía Circular (Gobierno de España, Vicepresidencia cuarta del Gobierno, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021).

Ejemplos de este tipo de simbiosis se encuentran cuando los productos de desecho o residuos pueden devolverse a plantas de enriquecimiento y empresas minero-mineralúrgicas para mejorar la recuperación, o cuando los residuos en forma de escorias o cenizas se utilizan para materiales de construcción. Otros residuos pueden tener salida hacia las industrias química y farmacéutica. De esta manera, el desarrollo de una economía circular ayuda a reducir la dependencia de la economía española y europea del exterior.

En el contexto actual de digitalización y descarbonización de las economías los principios de la EC encajan muy bien en una visión de que los recursos se pueden usar de una manera más eficiente, lo que a su vez permite una reducción de emisiones y generar mayor riqueza en la cadena de valor de las materias primas minerales. Con todo, se debe tener en cuenta que las soluciones de reciclado no posean un balance ambiental, económico ni social negativo. Para ello, se cuenta con herramientas de valoración como el Análisis de Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) y Análisis Coste Beneficio Ambiental.

En el marco de la EC y en los procesos de desarrollo de una nueva estructura económica y tecnológica, cabe pensar como necesaria la transición de los parques industriales a ecoparques industriales. La construcción de un parque eco-industrial permitirá el uso, al menos parcial, de los residuos provenientes de la producción y procesamiento, dando lugar a una simbiosis industrial, a una minimización de residuos, a un reciclado y a un intercambio de materiales y recursos entre las distintas industrias.

Esto se puede implementar a través de la Industria 4.0 debido a la necesidad de coordinar de manera muy efectiva el flujo de materiales y de información. Para Pinchuk et al. (2019), la razón por la cual la economía circular no se implementa hoy en día es la falta de información, y la economía digital es el

“eslabón perdido” para su implementación. En su opinión, el peso principal debe recaer en tecnologías como: sistemas ciberfísicos, plataformas automatizadas de mercado y logística, IoT y *blockchain*. De esta manera, la aplicación de los principios de la EC en la industria minera generará beneficios económicos, ambientales y sociales para el Estado, la región, las empresas mineras y una serie de empresas relacionadas, que operarán en la estructura del parque eco-industrial, que es coherente con el concepto de desarrollo sostenible.

Por otra parte, la aplicación de los elementos de la economía circular en diferentes campos de actuación brinda la oportunidad de aumentar la competitividad de las regiones, aumentar la eficiencia de los recursos, la eficiencia energética y preservar el medio ambiente. No obstante, hay desafíos que superar. Como resultado, el ingenio y la innovación nunca han sido más críticos para la transición sostenible hacia la circularidad a escala (Accenture, 2020).

Las consideraciones anteriores apuntan a que la actual situación requiere una adaptación del tejido industrial, así como la adecuación de los recursos humanos (mediante educación y formación). En el próximo capítulo se volverá sobre este asunto, que se refleja aquí en el ámbito del enfoque industrial de los residuos y el reciclaje en el contexto de la economía circular.

En el contexto de la EC, Leonida, C. (2022) se pueden identificar tres pasos para su implementación. Algunos de ellos, como se verá, relacionados con los ecosistemas y la simbiosis industriales. El primero sería el desarrollo de las operaciones circulares en las actividades mineras y metalúrgicas, como, por ejemplo: (i) asociación o formación de partenariados con proveedores para extender la vida útil de los bienes de capital a través de monitorización, análisis y mantenimiento predictivo en tiempo real de activos como camiones, cintas transportadoras, etc., mientras se promueve la refabricación y el reciclaje al final de su vida útil; (ii) venta de residuos de producción a otras industrias, como puede ser el caso de la construcción y (iii) compartir la propiedad de equipos pesados con bajas tasas de utilización, por ejemplo, entre emplazamientos y/o con otras industrias locales.

El segundo paso consistiría en innovar en nuevos productos y servicios circulares. Para ello debería involucrarse e interactuar con los usuarios intermedios de los materiales producidos en la operación minera para crear conjuntamente productos y servicios circulares innovadores, que pueden incluir: (i) arrendamiento de materiales, habilitado por sistemas avanzados de seguimiento y localización; (ii) apoyo en la certificación de los productos de los clientes, para permitir la reutilización y la fácil refabricación y (iii) mejora de los procesos de recuperación, reprocesado y reutilización de chatarra. Se puede reducir los costes de producción y materiales al tiempo que se crean nuevas fuentes potenciales de ingresos.

En tercer lugar, se trataría de colaborar con los clientes para construir un ecosistema circular de socios y, por último, colaborar de manera proactiva en todas las cadenas de suministro de la mina con el fin de generar impulso en la industria para: (i) crear regímenes regulatorios favorables para mejorar la circularidad; (ii) establecer asociaciones entre industrias para desarrollar la Hoja de ruta de la minería y metales para extender la vida útil del producto y retener la propiedad y (iii) desarrollar estándares intersectoriales para validar la integridad de los productos/materiales para su devolución y reutilización al final de su vida útil.

6. Retos y oportunidades de una mayor integración en la economía circular

Los proyectos mineros deberían buscar formas de reutilizar sus residuos en otros procesos y reintroducir sus residuos para que formen parte del conjunto de recursos. Las minas pueden, así potencialmente, reducir sus costes de gestión y operación. Muchos de las acciones de EC en el sector minero hasta la fecha se han centrado en el reciclaje de agua, la extracción de valor de los subproductos y la reutilización de desechos y las rehabilitaciones.

Para Averda (2022), las empresas necesitan adaptarse en este mundo cambiante. Dar los primeros pasos hacia una EC ayudará a las empresas mineras a posicionarse mejor para el futuro, permitiéndoles desarrollar resiliencia a largo plazo y generar ingresos a partir de los residuos. Los beneficios ambientales y sociales de una EC también permitirán que las minas accedan a posibles nuevos modelos de negocio.

Un aspecto que fomenta la aparición y desarrollo de innovaciones circulares y nuevos modelos comerciales es la financiación. Cada vez más, las principales empresas mineras están incorporando conceptos circulares en su planificación y modelos estratégicos a largo plazo, lo que indica una transformación de ser “mineros de productos minerales” a “proveedores de soluciones de metales y minerales” (Cheatle y Freele, 2020).

Para Accenture (2020) la economía circular brinda a las organizaciones tres oportunidades importantes para crear valor adicional, a saber: (i) escalar insumos renovables para reducir costes de energía, consumo y huella de carbono; (ii) incorporar la circularidad en las operaciones del emplazamiento para reducir o eliminar los flujos de residuos minerales y no minerales y (iii) implementar modelos comerciales circulares innovadores y soluciones de reciclaje aguas abajo para incluir toda la cadena de valor.

Torrubia et al. (2023) consideran que las oportunidades que se abren en materia de economía circular son tan grandes como los desafíos. A modo de ejemplo, en el caso de los equipos eléctricos, los retos se relacionan con la heterogeneidad de los residuos, la falta de trazabilidad de estos, la escasez de incentivos y de acervo legislativo para la recuperación de materias primas críticas y la extensión de la vida de los equipos.

Actualmente, la aplicación más común de la EC en la minería implica el reprocesamiento de materiales de balsas y escombreras de residuos para extraer los minerales de valor remanentes, pero hay muchas otras oportunidades para aprovechar los recursos disponibles como, por ejemplo, el reacondicionamiento y reutilización en operaciones de producción, principales o auxiliares, de equipos usados (CIM, 2022).

Una mejor gestión de los recursos naturales es solo una forma en que las minas pueden beneficiarse de los principios circulares. Las prácticas circulares han venido introduciendo mecanismos para reducir el consumo de agua y energía, así como las emisiones de CO₂. Para obtener el máximo valor de estas iniciativas, es conveniente un enfoque integral de la circularidad del negocio y del ciclo de vida de la mina.

Uno de los principales impulsores es la colaboración y asociación de diferentes corporaciones y sectores de la industria. Para la CIM (2022), en lugar de innovaciones ambientales desarrolladas individualmente, puede ser más beneficioso fomentar el compartir conocimiento a lo largo de la cadena de suministro para integrarlo de la manera más eficiente en las operaciones y generar valor.

Cada mina es diferente por lo que no existe un enfoque único sobre cómo será una mina operando bajo los esquemas de EC. Las minas que siguen estándares aceptados de minería responsable, como los "Towards Sustainable Mining" de la Asociación Minera Canadiense, podrían estar implementando muchos elementos de un enfoque de EC en sus operaciones, pero existe una gran oportunidad para que las empresas mineras generen valor al pasar de mejoras incrementales a un cambio transformacional integral (CIM, 2022).

7. Conclusiones

El desarrollo sostenible descansa, en el equilibrio, de tres componentes básicos de la sostenibilidad (i) la económica; (ii) la social y (iii) la ecológica. Por su parte, la economía circular es un concepto de economía sostenible donde el conjunto de partes interesadas (i.e. empresas y consumidores) tiene en cuenta el ciclo completo de los productos.

Los conceptos de sostenibilidad y economía circular están relacionados y cada vez más presentes en las políticas, en las regulaciones, y en la cadena de valor de la minería y la metalurgia. Todo ello se traduce en directrices y normativas, tanto a nivel comunitario como nacional, así como en estrategias empresariales.

La economía circular comienza en la fase de diseño de los componentes, equipos y productos de uso final, lo que favorecerá el aprovechamiento y gestión de los residuos y su reciclaje.

El buen gobierno de los recursos naturales requiere una agenda de largo plazo que encuentra en los ODS un marco de trabajo, con hojas de ruta y objetivos. Su implementación requiere esfuerzos conjuntos de todos los agentes. Si bien el marco general de los ODS no incluye un objetivo explícito sobre materias primas, estas pueden influir, directa o indirectamente, en varios de los objetivos.

La minería y la metalurgia son elementos necesarios para la sostenibilidad y la EC, y si bien tienen considerables retos que abordar, también podrán aprovechar las oportunidades. La sostenibilidad, forma ya parte, como elemento para evaluar los proyectos mineros y metalúrgicos, entre otros, por el lado de los inversores. La metalurgia, con su ingeniería y sus técnicas, es clave para dar respuesta al reciclado de componentes, equipos y productos. Se han dado pasos para avanzar en términos de economía circular en la minería y metalurgia, avance que se debería proseguir de manera continuada.

Una visión integradora de la cadena de valor en el ámbito industrial permitirá desarrollar el concepto de simbiosis industrial, que se pueden enmarcar en los clústeres regionales y en los ecosistemas industriales. Esta simbiosis, se produce cuando los productos o los productos intermedios pueden utilizarse en el propio proceso o en plantas de enriquecimiento y empresas minero-mineralúrgicas para mejorar la recuperación, o cuando los residuos (i.e., escorias o cenizas) se utilizan para materiales de construcción y de infraestructuras para el transporte por carretera.

Entre los retos para avanzar en términos de sostenibilidad y de EC, al igual que con otras iniciativas, la clave radicará en un progreso constante. Todos y cada uno de los cambios, por pequeños que sean, deberían abordarse y sus resultados tendrán un efecto acumulativo que se ira apreciando con el tiempo.

7

ASPECTOS ECONÓMICOS E INDUSTRIALES DE LA CADENA DE VALOR DE LAS MATERIAS PRIMAS MINERALES

1. Introducción

Como se ha indicado previamente, la extracción de minerales y el procesamiento mineralúrgico y metalúrgico de estos permiten obtener los metales necesarios para la fabricación de componentes y equipos para la transición energética y la digitalización. Las diferentes fases de la cadena o del proceso, en las condiciones adecuadas, aportan un valor económico cuantificable. Además, contribuyen con otros elementos (en términos de empleo, riqueza para la región, inversión, tecnología, y espíritu emprendedor). Ello conduce a la potencial creación de verdaderos clústeres o agrupaciones internas en un determinado territorio, o en una región, que pueden tener planteamientos transnacionales. También pueden generar cadenas industriales y tecnológicas que aseguren la sostenibilidad económica de las regiones donde se desarrollan.

Puede afirmarse que hay un interés creciente por fortalecer las cadenas de suministro de los diferentes materiales (i.e., la alianza entre la UE y EE. UU. para fortalecer la cadena de suministro de las baterías (Smartgridsinfo, 2022)). El interés no está solo en las tierras raras, sino que la mirada también está puesta en otros elementos como el wolframio (que hace que los teléfonos vibren), el níquel (utilizado para formar aleaciones con el acero), el cobalto (que se utiliza en las baterías), el coltán (columbita y tantalita, componentes principales de los microcondensadores que controlan el flujo de corriente en el interior de las placas de circuitos), el litio y otros minerales como el magnesio, vanadio o grafito. A modo de ejemplo, la Figura 68 ilustra el papel de las materias primas minerales y los metales en la fabricación de paneles fotovoltaicos.

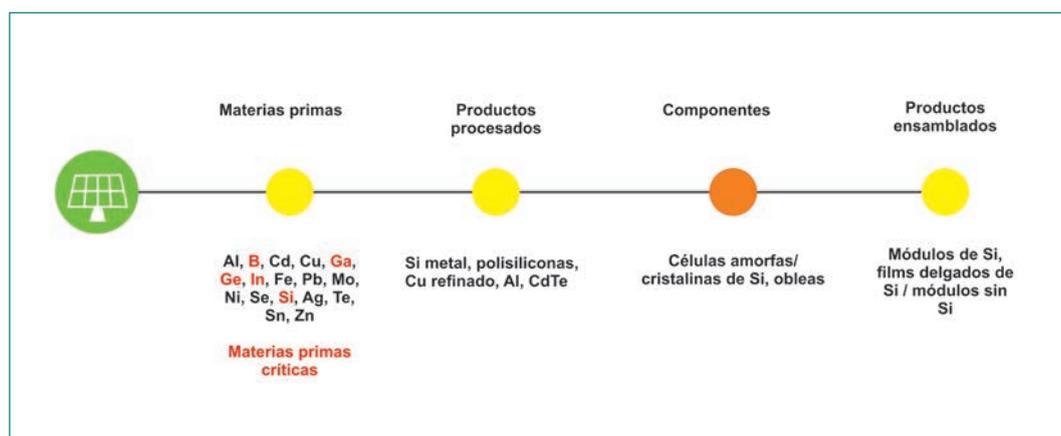


Figura 68. Energía solar fotovoltaica: una visión de la cadena de valor. Fuente: modificado y traducido por los autores de (European Commission, 2020b).

La demanda de recursos viene impulsada por el crecimiento económico mundial y el tipo de recursos demandados. De acuerdo con (Regueiro y Alonso-Jiménez, 2021), existe una correlación directa entre el crecimiento del PIB y la minería. En esta línea, la Comisión Europea considera que para 2030, la UE necesitaría hasta 18 veces más litio y 5 veces más cobalto que su consumo actual para cubrir la demanda de baterías para los vehículos eléctricos y el almacenamiento de la energía. Para 2050, la demanda de estos sería 60 veces y 15 veces superior a la actual (European Parliament, 2021).

Desde el punto de vista de la estrategia de un abastecimiento seguro, las agrupaciones, clústeres, ecosistemas o conglomerados industriales disminuyen el riesgo de interrupciones de suministro, aprovechan mejor los recursos existentes y colaboran en su mantenimiento a través de nuevos descubrimientos. De esta manera, la minería, la mineralurgia y la metalurgia desempeñan un papel importante, primero completando la cadena de valor local, y segundo pudiendo crear un ecosistema industrial más completo, que sobreviva a la propia actividad minera y que siga generando empleo de calidad, riqueza e inversiones

en un futuro. Para lograrlo, los estándares de eficiencia económica, tecnológica y ambiental deben ser adecuados, por lo que es necesario demostrar la existencia de relaciones equilibradas entre los aspectos tecnológicos, ambientales y económicos.

En este capítulo se abordan las etapas de creación de valor en la minería y la metalurgia, así como el desarrollo de ecosistemas industriales.

1.1. El valor de la actividad minera y la metalurgia en general

La minería, la mineralurgia y la metalurgia, actividades íntimamente relacionadas, juegan un papel vital en el desarrollo económico de muchos países. A escala comercial dichas actividades generan oportunidades de empleo y transferencia de habilidades a un gran número de trabajadores y su efecto multiplicador aumenta este beneficio por un factor de entre 2 y 5 (Walser, 2000).

La mayor parte de la investigación económica sobre la minería se ocupa principalmente del impacto macroeconómico de la industria, analizando los beneficios o la falta de ellos, para las economías nacionales. No hay duda de que la minería puede ser una fuente importante de divisas y de ingresos fiscales para los gobiernos, siempre que exista un marco legal y fiscal adecuado. Cuando están bien administrados, estos recursos pueden utilizarse como motor de crecimiento económico y, por lo tanto, las operaciones mineras pueden producir un impacto significativo en las economías nacionales.

Sin embargo, la minería se percibe en bastantes ocasiones como una actividad controvertida, ya que se asocia con una serie de problemas económicos, medioambientales y sociales. Como resultado, la contribución de la minería a la sostenibilidad debe ser considerada en términos de viabilidad económica, técnica, ecológica y equidad social. Según The World Bank (2020), para lograrlo, los gobiernos, las empresas mineras y las comunidades locales deben trabajar conjuntamente.

El Departamento de Minería del Banco Mundial ha llevado a cabo un estudio sobre el impacto económico y social de la minería en varios países sudamericanos, africanos y asiáticos. En el mismo se muestra que existen importantes beneficios sociales y económicos para las comunidades, en especial los relacionados con el crecimiento de las actividades de la pequeña y microempresa local.

Desde hace años, el ICMM (The International Council on Mining and Metals) publica un estudio sobre los efectos del desarrollo del aprovechamiento de los recursos naturales, sobre todo los minerales, en las economías de todas las naciones del planeta. Para ello ha construido un indicador, el Índice de Contribución Minera (MCI por sus siglas en inglés). El informe de 2020 (ICMM, 2020) confirma que muchos de los países del mundo continúan dependiendo de sus recursos naturales y, por ello, de la minería como el principal impulsor de la actividad económica. España figura en el puesto 85 con un MCI de 47,9.

Otros indicadores, como el Índice de Gobernanza de Recursos del Instituto de Gobernanza de Recursos Naturales (NRGI por sus siglas en inglés) y los Indicadores de Gobernanza Mundial (WGI por sus siglas en inglés) del Banco Mundial, valoran la gobernanza de los recursos naturales en muchos de estos países (i.e., si es débil, deficiente o está fallando). A pesar de ello, queda mucho por hacer para garantizar que se maximiza la contribución de la minería a las economías nacionales. De la propia investigación del ICMM se sabe que, en países de bajos y medianos ingresos dependientes de la minería, las prácticas mineras responsables pueden ser transformadoras, conducir a reducciones sustanciales en los niveles de pobreza

y a mejoras generales en el bienestar social. Sin embargo, la gobernanza de los recursos minerales es clave para garantizar que la riqueza se traduce en beneficios económicos y sociales.

En España, la Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales cuenta con 46 líneas de actuación que impulsarán la autonomía estratégica del país gracias al suministro de materias primas minerales autóctonas de una manera más sostenible y eficiente, para maximizar los beneficios a lo largo de la cadena de valor y, dando también respuesta a la amenaza real de una nueva geopolítica y a los riesgos inherentes a la misma, promoviendo, apoyando y desarrollando, entre otras, las actividades extractivas sostenibles en España para la obtención de materias primas minerales.

En este capítulo se examina la cadena de valor de la minería y los clústeres o ecosistemas ya que estos se consideran muy relevantes, por entender que su diseño e implantación en el campo de la minería y la metalurgia permitiría añadir valor a las actividades minero-metalúrgicas, contribuyendo además a que estas sean más sostenibles.

El apartado sobre la cadena de valor plantea un análisis detallado del proceso, desde la investigación y exploración minera, al cierre y a las operaciones relacionadas; pasando por las operaciones para la producción o explotación. Se analiza la creación de valor, a medida que se avanza en el proceso y se aportan datos de carácter económico sectorial, en algunos casos de índole global. Igualmente, aunque más conciso, se realiza un análisis sobre la cadena de valor de la metalurgia.

Los aspectos macroeconómicos y los relativos a la minería y metalurgia en España, así como el examen de la relación de proyectos en nuestro país, dada su relevancia, se tratan en el capítulo siguiente.

2. Etapas de la cadena de valor de la minería y la metalurgia: valor económico

Como ya se ha visto en el capítulo tercero, la investigación minera consiste en una serie de etapas relacionadas entre sí y de carácter secuencial, que también pueden observarse en la Figura 69. Esta figura refleja los elementos de la cadena de valor y, por tanto, incluye además de las etapas técnicas, otros aspectos relacionados con las inversiones y el control de gestión. La actividad minera se ha caracterizado tradicionalmente por ser una actividad donde los resultados rara vez se consiguen fácilmente. En el caso

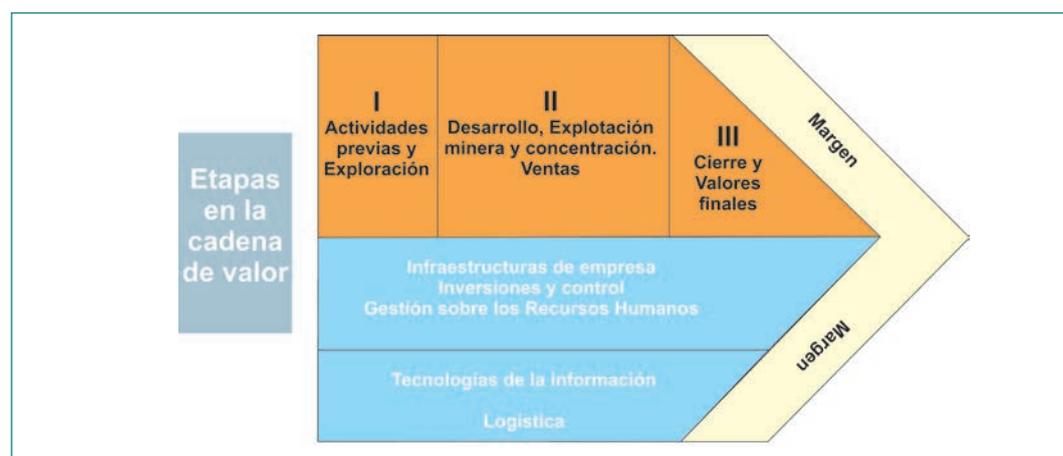


Figura 69. Etapas de la cadena de valor resumida en minería. Fuente: elaboración propia de los autores.

de las pymes mineras españolas (con facturación anual inferior a 100 millones de dólares), de 1.000 proyectos estudiados, únicamente 100 superaron la evaluación detallada, y de ellos, solo 10 tuvieron éxito (Regueiro y Espí, 2019).

Las actividades que generan valor en una cadena productiva de recursos minerales son muy amplias. Así, en una empresa, la primera creación de valor surge de la constitución de un equipo que se dedica a la promoción de nuevos proyectos como motor de la supervivencia o de crecimiento de esa organización. En el otro extremo figuran las obligaciones administrativas después del cierre de una operación minera, que también genera valor añadido para la sociedad.

Todos los proyectos en minería siguen una cadena de valor muy completa y consensuada por las normas internacionales que buscan asegurar la confianza de sus valoraciones en la calidad de los métodos empleados. Es más, la secuencia de informes, que de manera más o menos continuada van dando a conocer las empresas, se corresponde con una valoración económica en los mercados especializados de los proyectos. Así, en la última fase previa a la operación, la empresa llega a la categoría de proyecto “bancable” que viene a significar el nivel o calidad alcanzado que puede satisfacer a la entidad financiera interesada en su desarrollo.

En la Figura 70 se representa la curva del valor, que tiene un carácter ilustrativo, de un proyecto de aprovechamiento mineral. En ella sobresale el alto riesgo de la primera fase y su origen: el escaso conocimiento del comienzo del proceso, la exploración, la investigación minera, así como el tiempo empleado y el limitado crecimiento temporal del valor generado. En Europa y en especial en España, los períodos representados son más dilatados.



Figura 70. Curva tradicional de valor, mostrando además del valor del proceso, el tiempo normal invertido y el origen del riesgo. Fuente: elaboración propia de los autores.

En la exploración o investigación minera también se puede producir valor, puesto que, por ejemplo, el valor de negocio de una venta de derechos puede alcanzar precios muy elevados, ya que se ponen en el mercado permisos con un alto valor potencial. Además, en la última fase, una vez saldado el valor negativo del cierre, pueden haberse consolidado aglomeraciones, polos o clústeres industriales de éxito que pueden perdurar en el tiempo y trascender al valor de la propia minería.

En la Tabla 25 se recogen las etapas de actividad en la cadena de valor de un proceso minero, detallando el contenido en las diferentes fases de este y las metodologías aplicables o de referencia.

Tabla 25. Contenido de las fases de la cadena de valor en minería. Nota: I= Exploración o investigación minera, II=Explotación, III=Cierre y valores finales. Fuente: elaboración propia de los autores.

Cadena de valor económico en minería			
FASE	ETAPA	Contenido	Metodología de valoración
I	Equipo humano	Junior/Senior	Tipo
I	Idea o propuesta	Tamaño y componentes	Ejemplos
I	Permisos administrativos	Resumen económico	Cálculo
I	Desarrollo de la investigación/valoración	Etapas	Gasto contable
I	Valoración del hallazgo	Valor del derecho	Metodología propia
I	Adquisición	Estrategia corporativa	Valor del mercado
			
II	Informes estándar según sistemas de calidad internacionales	De PEA a Informe técnico	Indicadores de rentabilidad y eficacia
II	Validación de los informes iniciales y nuevos Informes técnicos	Incorporación de modificaciones y/ o variaciones	Indicadores de rentabilidad, eficacia y riesgo
II	Permisos administrativos, ambientales y opinión social	Resumen en economía financiera y ambiental	Principios económicos y valores ambientales
II	Valoración empresarial	Evolución empresarial	Indicadores
			
III	Valor circular/residual	Valor futuro	Modelos
III	Obligación social y administrativa	Valores ambientales económicos	Economía ambiental

2.1. Actividades previas y exploración: investigación minera

La investigación minera es la primera fase del ciclo de vida minero y comprende los procesos y actividades técnicas y de gestión que buscan el descubrimiento, la definición y la evaluación del depósito mineral.

Tras la definición de grandes áreas e identificación de objetivos, comienzan las actividades de exploración de mayor coste, a fin de descubrir depósitos minerales con potencial económico satisfactorio y donde una campaña de perforaciones de suficiente precisión puede llevar a la definición de recursos minerales con la fiabilidad suficiente para ser reconocidos en el marco de un código de valoración internacional.

Siendo la primera huella ambiental y social del aprovechamiento de recursos minerales de un área, la gestión de la exploración de forma responsable y transparente es crítica para conseguir el permiso social para operar.

2.1.1. Primera etapa: la exploración o investigación minera

La titularidad de los derechos de las sustancias minerales forma parte del dominio del Estado. Por lo tanto, ninguna persona puede llevar a cabo actividades de exploración y prospección o explotación sin un permiso o licencia expedida por la autoridad gubernamental que tenga jurisdicción sobre el dominio minero.

Por otra parte, la industria minera es intensiva en capital, desde la exploración hasta el cierre de las minas. La inversión en exploración se ve afectada por la demanda de metales y su abastecimiento, los precios, la capacidad de reunir capital y la remuneración de los accionistas, así como por los obstáculos administrativos y las limitaciones medioambientales. La suma de todos estos factores determina los motivos que hacen de la minería una actividad con sus peculiaridades frente a otras actividades económicas. A pesar de ello, en ciertos aspectos pueden encontrarse similitudes en el ámbito de la energía, por ejemplo, en la exploración y producción de petróleo o gas, o en las decisiones sobre determinadas tecnologías de generación eléctrica.

2.1.1.1. Inversiones

La Figura 71 indica, en la parte inferior, el flujo de gastos (o inversiones) necesario para producir las unidades de metal de la parte superior del gráfico. Conviene señalar que la exploración no acaba nunca y que, la calidad de las unidades de producción (leyes o riquezas) decae con el paso del tiempo del proyecto.

En la misma figura se muestra la magnitud de las inversiones necesarias para poner en marcha y mantener la actividad de un proyecto minero. La inflexión en el empleo de recursos comienza cuando se traspasa la fase del estudio de viabilidad. La esperanza de producción a partir de esos gastos resulta muy limitada por el elevado riesgo que conlleva esa fase.

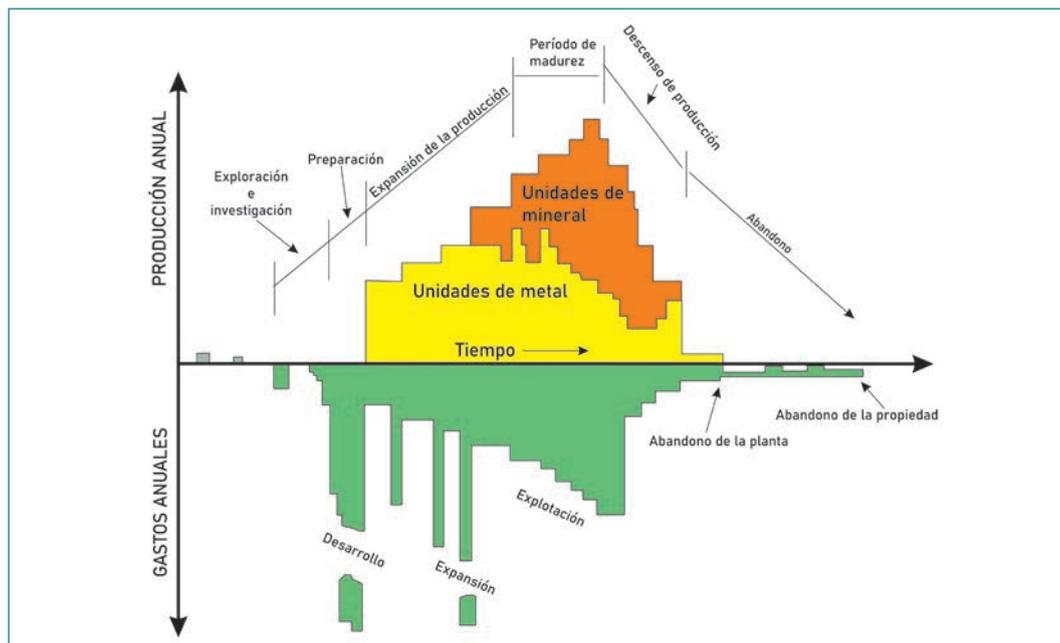


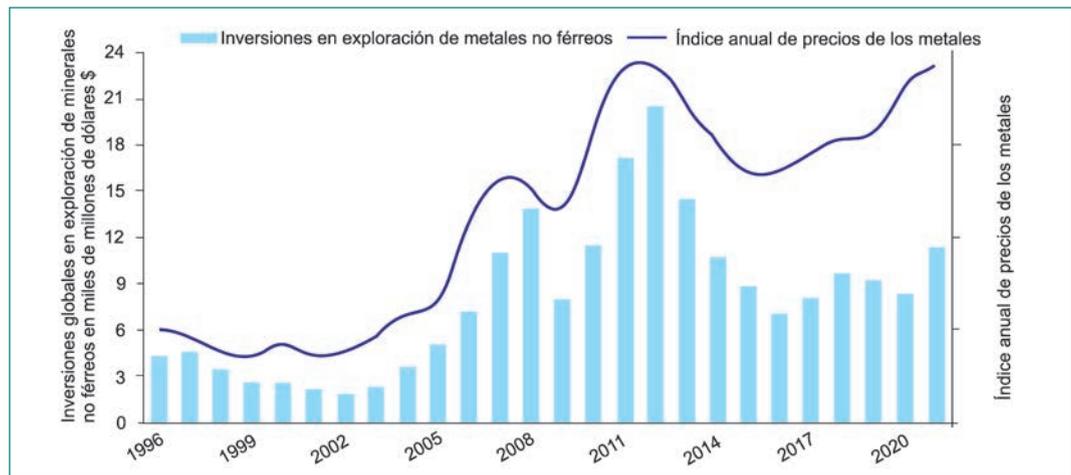
Figura 71. Relación del coste con la inversión total de un proyecto minero. Fuente: (IGME, 1997).

El presupuesto de exploración global para 2021 (de la serie Corporate Exploration Strategies de S&P Global Market Intelligence), muestra que el sector de exploración minera ha superado la recesión causada por la pandemia de COVID-19 (Figura 72). Según dicha figura, las inversiones mundiales en exploración alcanzaron los 11.200 millones de dólares en el año 2021.

Según la Prospectors & Developers Association of Canada (PDAC) la actividad de exploración global en 2021 aumentó en un 35 %. Este aumento puede atribuirse, en gran medida, a la tendencia al alza de los precios de la mayoría de las materias primas minerales⁸⁶ y a un entorno financiero más sólido en 2020. Además, existen otros factores menos importantes: (i) el descubrimiento de un World Class o yacimiento

⁸⁶ Para más detalle sobre la evolución de los precios de algunas materias primas críticas para la transición energética ver (Larrea y Cisneros, 2023).

Figura 72. Inversiones globales en exploración minera durante el periodo 1996-2021. Fuente: traducido por los autores de (S&P Global Market Intelligence, 2021).



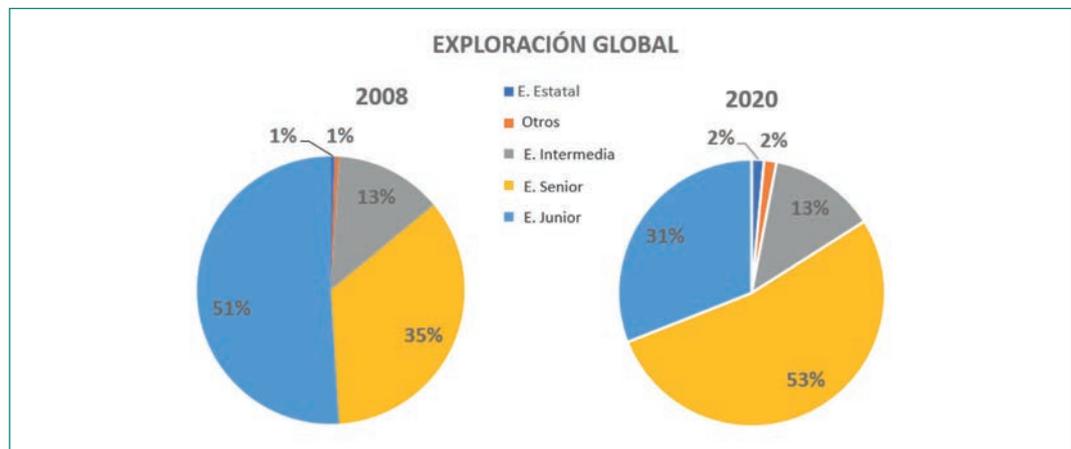
singular, como, por ejemplo: Lac Grass (diamantes), Yanacocha (oro), Neves Corvo (cobre); (ii) nuevos modelos geológicos o la aparición de una nueva tecnología: Carlin (nuevo modelo metalogénico de oro en Nevada), "heap leaching" (cianuración en pilas para oro) y (iii) políticas de promoción por administraciones interesadas en el desarrollo minero de su territorio.

Por metales, desde hace décadas el oro es el metal con mayor inversión en exploración, seguido de los metales base (Cu, Zn, Pb y Ni) según MinEx Consulting (2017). Ello se debe a su precio unitario, pero también a aspectos relacionados con la dificultad de su prospección y su coste. Además, hoy, ante la demanda vertiginosa de metales relacionados con las nuevas tecnologías, existe una tendencia a la exploración específica de esas sustancias. En 2020, la tendencia a explorar mayoritariamente el oro no cambió (52 % del total). El cobre fue el segundo (21 %) y zinc-plomo, el 5 % (S&P Global Market Intelligence, 2021).

En la Figura 73 se muestran las inversiones en exploración según el tipo de empresa. Puede observarse que el entorno de mercado de las empresas mineras *junior*⁸⁷ es muy dinámico y depende, en gran medida, del mercado de capitales y de los inversores. Esto abre oportunidades, pero también implica grandes riesgos. Su importancia en ciertos periodos puede verse acompañada de decrecimientos en otros.

Los volúmenes de capital en la industria minera para las compañías *senior* oscilan como promedio entre los 350 millones de dólares de EE. UU. (US\$) y los 500 millones de US\$ (Tabla 26).

Figura 73. Inversiones en exploración según tipo de empresa. Fuente: elaborado por los autores con datos de (PDAC, 2021).



⁸⁷ Una empresa minera junior está enfocada a la prospección y exploración de recursos metálicos. Como aún no operan sus propias instalaciones de extracción de mineral, no generan ingresos ni ganancias de su negocio actual, dependen de los inversores para cubrir sus gastos.

Tipo de compañía	Campo de acción	Ingresos	Capitalización en los mercados
Junior	Exploración	Nuevo capital	< 500 mill \$
Intermedia	Exploración y Minería	Parcialmente cash	< 1.000 mill \$
Senior	Minería	Generación cash	> o igual a 1.000mill \$

Tabla 26. Clasificación de las compañías mineras. Fuente: traducido por los autores de (One Stone Consulting, 2021).

2.1.1.2. Riesgos de la financiación de un proyecto minero

La exploración es un negocio de alto riesgo que, a menudo, implica grandes inversiones con un rendimiento aparentemente escaso. La exploración es una inversión en la reposición y el crecimiento de la base de activos de una empresa; no es la única oportunidad de crecimiento disponible y compite con otras opciones. Debe permitir obtener un valor realizable competitivo con las otras alternativas.

La Figura 74 muestra el número de proyectos que van pasando a las fases más avanzadas hasta llegar el desarrollo. Puede verse cómo, de un conjunto de 500-1.000 proyectos, solo un uno llega a la fase de producción. Debido a su elevada incertidumbre, la gestión eficaz del riesgo así como la cuantificación del riesgo económico son fundamentales.

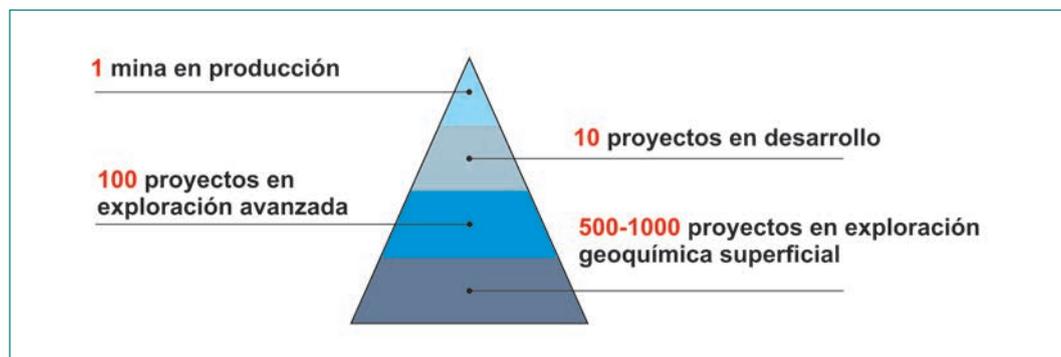


Figura 74. Según Eggert (2010), menos de un 1 % de los proyectos de exploración progresa hasta la etapa de desarrollo. Fuente: elaboración propia de los autores.

Debido a la envergadura financiera y a su elevado riesgo, es habitual que para la puesta en marcha de un proyecto minero se precise una estructura financiera que asegure su desarrollo. Hoy, una modalidad común es el "Project Finance", donde el proyecto se desarrolla mediante un préstamo de una entidad financiera (*lender*), que asume el riesgo del proyecto promovido, y dirigido por el (o los) *sponsors* que poseen intereses en la compañía propietaria del proyecto minero. En este esquema, el riesgo se reparte con el grupo financiero o bancos que asumen su papel de suministrador de recursos. Esto significa que la entidad financiera debe velar por la factibilidad y por la buena ejecución en un marco técnico que no es el suyo. Para ello, contrata a grupos de expertos o, en su caso compañías auditoras, que velarán por su seguimiento.

2.1.1.3. Costes de la actividad

Una estrategia de exploración se mueve por la necesidad de un crecimiento empresarial, el precio de los metales, la disponibilidad de capital de riesgo y los nuevos descubrimientos, abriendo nuevas áreas de exploración. Se puede conseguir un crecimiento de los recursos mediante una inversión directa en exploración, o bien contando o adquiriendo los recursos de terceros (por ejemplo, compañías "junior").

En algunos momentos, las compañías mineras *junior* contabilizaron casi el 50 % de los gastos mundiales de exploración. Su éxito se debe a siete ventajas competitivas, como son: (i) la eficiencia en los costes, (ii) la selección del mejor personal disponible (técnicos en exploración), (iii) la formación de un equipo mul-

tidisciplinar, (iv) el desarrollo de esquemas significativos de incentivos, (v) la exploración en áreas con buenas expectativas de éxito, (vi) el diseño de programas a largo plazo y (vii) la selección de los objetivos.

Por su parte, las grandes compañías ("senior") dedican entre 100 y 200 millones de US\$ al año en mantener su cartera de proyectos. Cada vez resulta más caro investigar, al mismo tiempo que las esperanzas de encontrar grandes depósitos minerales son cada vez más remotas.

Costes del descubrimiento

Tal como recoge la Figura 75 desde 1950 los gastos unitarios para describir una libra de cobre se mantuvieron más o menos constantes. Es a partir del final del siglo pasado que se han incrementado de manera constante. Ello evidencia que los recursos superficiales son más escasos y que hay que avanzar hacia la minería subterránea. Otra opción sería el impulso de metodologías de extracción de mayor volumen de producción y bajo coste, como el *block caving*. Esto se ha producido en un par de minas en Chile, donde la mayor parte del aumento de la producción se ha producido debido al uso de la lixiviación de pilas de los óxidos y ampliaciones en la capacidad de tratamiento de las plantas existentes.

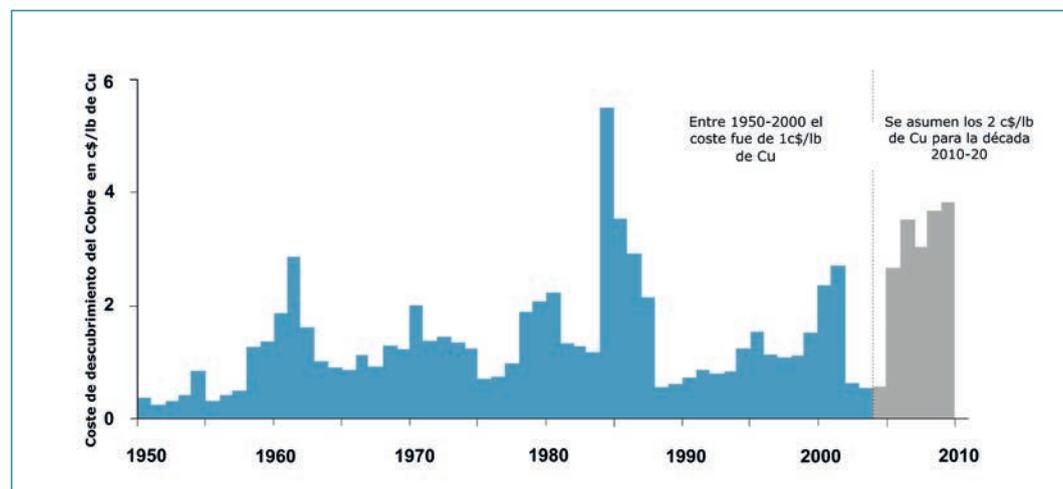


Figura 75. Costes unitarios del descubrimiento de una libra de cobre en el mundo occidental y en el periodo 1950-2010. Fuente: adaptado por los autores de (MinEx Consulting, 2009).

Según D. L. Stevens, vicepresidente de Noranda Mining and Exploration, el éxito de una campaña de exploración necesita tanto de una alta probabilidad de encontrar el cuerpo mineral buscado, como de unos costes razonables.

2.1.1.4. Creación de valor: el valor de los derechos de propiedad minera

Muchos yacimientos no llegan a ser explotados por múltiples razones: insuficiente esfuerzo investigador de sus recursos, bajo tonelaje o riqueza en el momento de tomar la decisión de invertir, razones socioeconómicas, medioambientales o limitaciones legales. Ello, sin embargo, no quiere decir que esa propiedad carezca de valor.

En este sentido, se define el término de "Valor de Mercado más Conveniente" (*The Most Convenient Market Value*) como el mayor precio de un permiso administrativo entre el valor para el comprador y para el vendedor, ambos totalmente informados, y relacionado con el momento y condiciones imperantes en una determinada fecha. El objetivo del evaluador es emplear una metodología que elimine la mayor subjetividad posible y que establezca un precio de mercado apropiado.

Los métodos para conseguir la valoración de un activo de exploración, o de un recurso mineral no puesto en marcha, presentan las mismas dificultades que los empleados en la determinación del valor de una propiedad minera en explotación. Además, este tipo de valoración posee un cuerpo de doctrina muy elaborado.

El factor que más determina la metodología es el grado de conocimiento que, en ese momento, se dispone sobre la calidad de los recursos o reservas existentes, las condiciones tecnológicas de su aprovechamiento, las características de su entorno administrativo, social o ambiental disponible, etc. En la actualidad, se recurre a diferentes sistemas que se recogen en la Tabla 27, de los cuales, los tres primeros son las metodologías fundamentales para la valoración de propiedades mineras.

Metodología	Método	Descripción
Sobre los costes	<i>Appraised Value</i>	Los costes de investigación ya realizados más los necesarios para lograr el último objetivo
	Transacciones comparables	Costes menos cualquier deuda significativa
Sobre los ingresos	Análisis de los DCF (<i>Cash flow descontado</i>), incluyendo o no, análisis de riesgo	VAN (Valor Actual Neto) de los flujos de caja
	Opciones reales, con o sin Análisis de Riesgo	Asumiendo inversiones irreversibles bajo condiciones de incertidumbre
De mercado	Transacciones comparables: ventas, acuerdos de opción y otros	Principio de que las propiedades semejantes han de poseer valores parecidos
	Capitalización de mercado por reservas	Valor de mercado de las empresas dividido por las reservas o recursos totales
	Capitalización de mercado por producción	Valor de mercado de la compañía dividido por la producción
Otros	Factor Geocientífico	Asignación de categorías según las características de la propiedad y referencia a un valor estándar por hectárea. Se encuentra muy cuestionado
	Árboles de Decisión	Análisis con un factor de probabilidad
	Estadístico/Probabilístico	VAN afectado por un factor estadístico
	Valor Bruto "in situ"	Valor/t de recurso

Tabla 27. Metodologías de valoración de la propiedad minera. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de diversas fuentes.

El número de descubrimientos en sí no tiene debidamente en cuenta el valor económico potencial. Para ello, se pueden calcular las tasas de éxito relacionando los gastos de exploración con el valor bruto estimado de los minerales económicos contenidos en el mineral descubierto. Más complejos son los intentos de calcular los rendimientos netos descontados antes de impuestos sobre el gasto en exploración⁸⁸.

2.1.1.5. Estrategias de crecimiento de la exploración minera

Existen diferentes estrategias de exploración minera. En primer lugar, la estrategia de exploración *Greenfield* (exploración de tipo básico en zonas todavía vírgenes) se centra en el descubrimiento de nuevos yacimientos minerales en áreas donde ya han sido descubiertos otros depósitos, o bien, en áreas sin descubrimientos previos pero que muestran unas condiciones geológicas favorables. Por su parte, la exploración *Brownfield* se focaliza en el entorno de operaciones mineras existentes, y persigue el descubrimiento de extensiones y repeticiones de depósitos. Además, se deben mencionar las fusiones y adquisiciones y las alianzas estratégicas, especialmente entre las grandes empresas, las pequeñas (*juniors*) y medianas.

⁸⁸ Para más detalle ver (Regueiro y Espí, 2019).

La estrategia de crecimiento por “descubrimientos” está considerada como de “bajo riesgo y alta incertidumbre”, ya que la cantidad de capital invertido en ello puede ser controlada, pero la probabilidad de éxito suele ser baja. De manera similar, el riesgo en la exploración de los *Brownfields* es bajo y la incertidumbre algo menor. Por tanto, el crecimiento a través de la exploración puede ser considerado como una estrategia conservadora, de bajo riesgo. Por ejemplo, la estrategia de exploración de AngloGold tradicionalmente ha consistido en descubrir reservas de oro a través de la exploración de campos *Brownfields* con un coste menor de 9 US\$/ onza (oz) de reservas de oro descubiertas, y de *Greenfields* con un coste de exploración inferior a 30 US\$/oz.

Las estrategias de crecimiento mediante adquisiciones se caracterizan por buscar preferiblemente un bajo nivel de incertidumbre. En general, las estrategias de exploración de la mayor parte de compañías productoras buscan un equilibrio entre las estrategias de exploración y adquisición, realizando sus propios programas de exploración y, al mismo tiempo, haciendo un seguimiento de las oportunidades de adquisición.

Otro aspecto estratégico importante es el hecho de que la inversión en exploración tiende a ir a países y regiones con un marco legal estable y favorable y hacia áreas con alto potencial de descubrimiento. Sin embargo, algunos de los yacimientos de “clase mundial” tenían una metalogénesis desconocida cuando fueron descubiertos. Esto ocurrió cuando no se contaba con experiencia, o bien se carecía de depósitos similares, tal es el caso de Neves Corvo, Candelaria y Century.

2.1.1.6. Impacto ambiental y social de la exploración. Creación de valor en investigación/exploración

El proceso de exploración, en principio no afecta de manera importante y permanente al uso de la tierra, donde tiene lugar y, por tanto, no genera impactos sociales ni ambientales de importancia o, en todo caso, son de índole transitoria. Sin embargo, la exploración minera representa la interacción inicial entre la empresa minera y las comunidades locales y, por tanto, se manifiesta como un momento delicado en la construcción de una relación de confianza entre las partes interesadas. En general, la oposición a los proyectos mineros futuros suele encontrarse en las fases iniciales de exploración minera. Por ello, una buena gestión, de los procesos, entre otras del medioambiental, en las fases de exploración es esencial para lograr la licencia social de carácter permanente.

Prácticamente, todos los países contemplan la presentación obligatoria de un Estudio de Impacto Ambiental como paso previo a la obtención de permisos de exploración minera. Países muy sensibilizados, como Australia y Canadá, disponen de códigos de conducta de afiliación voluntaria, con guías de actividad acordes con principios de equidad con los propietarios y habitantes del lugar, al mismo tiempo que orientan sobre la calidad ambiental de las acciones desarrolladas en esta primera fase del ciclo de vida de un proyecto minero.

2.1.2. Segunda etapa: la explotación

En ocasiones, no es sencillo distinguir la exploración del comienzo de la explotación. En principio, la explotación comienza tras la identificación de los proyectos que traspasan un umbral de rentabilidad incorporándose a las reservas, lo que generalmente coincide con el estudio de viabilidad económica y con el aumento del valor relativo. En la Figura 76 se han idealizado alternativas de aumento del valor de los recursos ya en explotación (en rojo) mediante acciones transversales, al actuar elementos de apoyo organizativos, de investigación, de logística, comerciales y otros.

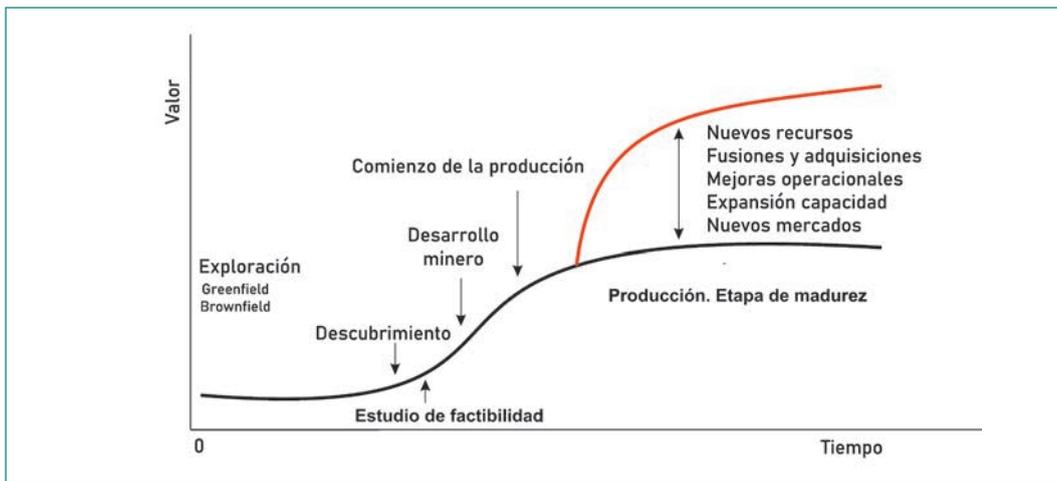


Figura 76. Oportunidades de crecimiento del valor al inicio de la producción o ya mediada la etapa madura. Fuente: elaboración propia de los autores.

La industria minera aporta materiales esenciales para todos los sectores de la economía y también genera empleo e ingresos para los gobiernos. Además, no se puede entender sin la industria metalúrgica, que como se verá genera valor “aguas abajo”. Asimismo, durante la fase de explotación de la mina pueden desarrollarse alrededor de la misma clústeres o polos industriales que podrían sobrevivir a la propia mina. En la Figura 77 se muestran diversas etapas de la cadena de valor que van desde la mina al mercado y que comprenden pasos interdependientes y las correspondientes actividades.



Figura 77. La cadena de valor de la mina al mercado comprende pasos interdependientes y las correspondientes actividades. Fuente: modificado y traducido por los autores de (McKinsey & Company, 2020).

Los costes de extracción son muy variables y dependen de cada mina. Pueden ir desde unos pocos céntimos de euro por tonelada extraída hasta varias decenas de euros. Las operaciones de extracción de gran escala (grandes tonelajes en movimiento) reducen los costes de operación, pero obligan a elevadas inversiones iniciales. Esto se justifica cuando se explotan depósitos de grandes dimensiones que amortizan la gran inversión inicial.

2.1.2.1. Inversiones

La explotación minera es, en líneas generales, una operación que requiere importantes inversiones. Ahora más que nunca porque cada vez resulta más compleja la extracción y procesado de los minerales por múltiples razones: el agotamiento de los depósitos de mejor acceso y más fáciles de extraer⁸⁹, la necesidad de procesar menas con menor ley, las obligaciones ambientales y sociales, las disputas por el uso del territorio y el encarecimiento de los insumos básicos (agua y energía, sobre todo). En la Tabla 28 se recogen datos agregados de proyectos para diferentes metales.

⁸⁹ Por ello, las compañías mineras, siempre que es posible, buscan proyectos de ampliación de los existentes en lugar de construir nuevas minas.

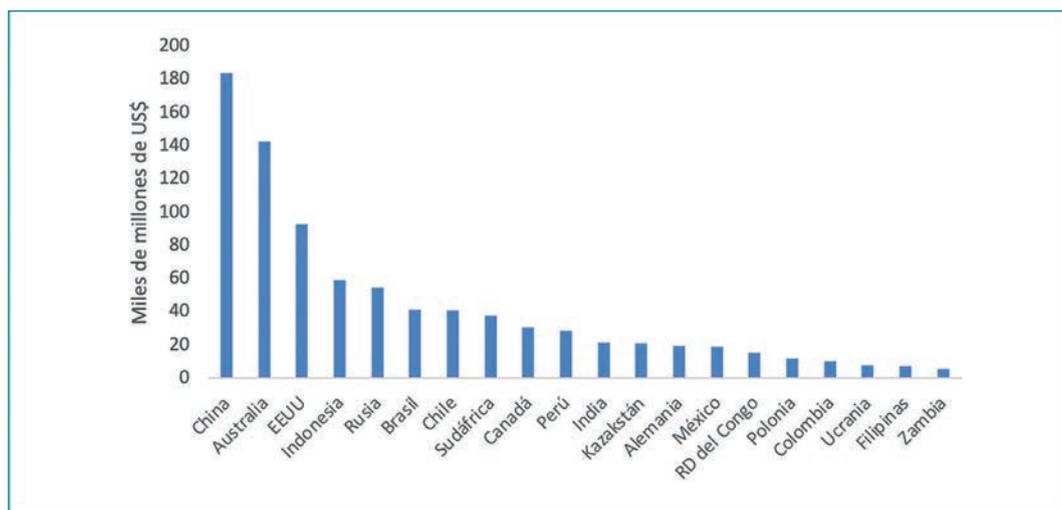
Tabla 28. Datos globales de inversión en la minería de las principales materias metálicas. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (E&MJ, 2021).

Metal	N.º. de proyectos	Inversión máxima (M US\$)	N.º. Proyectos con Inv.>1000 M US\$	Inv. Media todos los proyectos (M US\$)	Inv. Media proyectos>1.000 M US\$
Mineral de hierro	16	16.000	10	3.200	4.800
Cobre	53	8.000	33	1.590	2.300
Níquel	13	2.500	5	860	1.540
Zinc	14	2.500	1	490	2.500
Oro	73	6.700	15	490	2.380
Plata	7	740	-	350	-
MGP	5	2.000	2	1.000	1.700
Diamantes	6	2.100	3	1.100	1.800
Uranio	10	1.400	2	430	1.300
Litio y TR	10	1.300	1	450	1.300

En la industria minera, a nivel mundial, hay más de 13.000 proyectos activos grandes y medianos, lo que representa un valor total de inversión de 1,18 billones (europeos) de dólares, según Business Intelligence de Industrial Info (Govreau, 2021). Destacan los proyectos de mineral de hierro donde casi toda la inversión se dirige a la construcción de grandes infraestructuras de abastecimiento y, sobre todo, de transporte y almacenaje. Además, los grandes proyectos de cobre son numerosos y, en muchos casos, coinciden con expansiones de capacidad o transformaciones de mayor complejidad, como el cambio de minería de exterior, o a cielo abierto, a sistemas subterráneos de *block caving* de gran productividad.

En la Figura 78 se muestran los valores de la producción de los 20 países más importantes, excluyendo la producción de combustibles fósiles, que hace destacar a países como China, EE. UU. y Australia.

Figura 78. 20 mayores países productores de minerales (no combustibles) en 2017 (miles de millones de US\$). Fuente: (US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2022).



En 2019, el sector minero incrementó sus inversiones a un ritmo del 12 %, continuando una tendencia de aumento de los gastos de capital, que comenzó en 2017. Sin embargo, la pandemia del COVID-19 llevó al aplazamiento de las inversiones, detención o ralentización de sus proyectos. Desde entonces, las empresas aprendieron a operar de manera segura en un entorno pandémico, introduciendo nuevos sistemas de automatización, digitalización, acceso remoto o servicios relacionados (Govreau, 2021).

En un contexto de incertidumbres, en 2020, el oro superó por primera vez los 2.000 US\$/oz (como inversión refugio). Los precios del cobre y el mineral de hierro alcanzaron máximos de siete años al concluir 2020. Los productores de todo el mundo dieron la bienvenida a estos precios, que impulsan la inversión y que probablemente se vea aupada por la opinión compartida de muchos analistas de que la depresión

pandémica de 2020 sería reemplazada en 2021 por la fiebre de la descarbonización (Govreau, 2021). No obstante, en 2022, se produjeron, en muchos casos, caídas en los precios desde los niveles máximos que habían alcanzado.

En 2021, de los 20 principales países para el desarrollo de proyectos mineros, China fue líder, seguida de Australia, India y Canadá. Además de Canadá, América está representada por Brasil, Estados Unidos, Chile y Argentina. África sigue siendo un continente con creciente actividad de exploración y desarrollo minero (en especial Sudáfrica, Guinea, Mozambique, Congo, Ghana y Namibia) empujada por muchos países, incluidas China e India, que buscan asegurar el suministro de recursos a largo plazo. Perú en Sudamérica y Mali y Burkina Faso en África son también relevantes, en particular en la minería del oro.

Entre estos países no figura ninguno europeo, lo que apunta, por un lado, la falta de peso de la producción y consecuentemente la vulnerabilidad europea medida como la dependencia de terceros países (que alcanza entre el 75 y el 100 % en función del tipo de materias primas minerales) y, por otro, el potencial de creación de valor en los territorios donde se producen los minerales y los metales para la transición energética y la digitalización.

2.1.2.2. Costes de la actividad

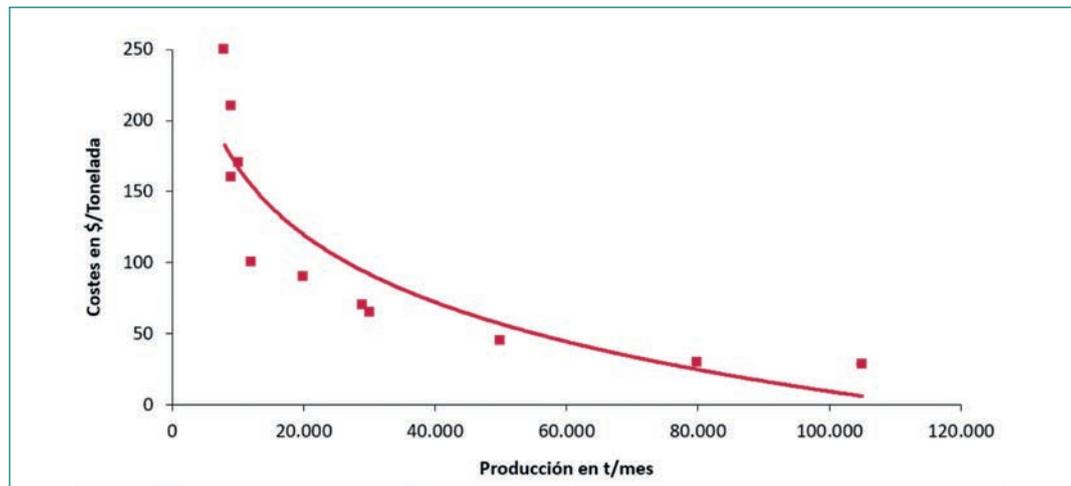
Los costes asociados a la actividad minera son enormemente variados, como también lo son las circunstancias naturales y de otros ámbitos (como el administrativo, social, laboral o tecnológico) en los que se desenvuelve. No obstante, el conocimiento creado alrededor de la relación oferta-demanda va facilitando las previsiones para diseñar los proyectos. En la Tabla 29 se muestra la estructura de costes.

Cash Cost Directo	Operación de minería Operación de procesado Gastos de administración en mina Servicios esenciales de la operación: agua, energía, gestión de estériles Fundición y refinado Transportes y seguros de los envíos externos Gastos comerciales
Cash Cost Indirecto	Tasas y royalties de producción Gastos de permisos administrativos y ambientales Gastos sobre responsabilidad social
Costes de mantenimiento	En minería: renovación de maquinaria y flota, desmontes no operativos, desarrollos subterráneos Planta de procesado: sustituciones de grandes equipos en planta de tratamiento Nuevas infraestructuras Rehabilitaciones y cierres
Cash Cost Total	

Tabla 29. Ejemplo de estructura de costes realizado por SRK Consulting en 2016. Fuente: elaboración propia de los autores sobre la base de (SRK Consulting, 2016b).

Los condicionantes de los costes son variados. Quizás el más representativo es la dimensión. Bajo este parámetro, están los costes fijos, que no varían con la producción (por ejemplo, los costes laborales hasta cierto punto, los costes generales, los impuestos o los costes de apoyo en el lugar de operaciones) y los costes variables (en función del nivel de producción). Como consecuencia, conforme aumenta la producción, los costes fijos ven reducir su participación en el coste total unitario, como se aprecia en la Figura 79. Asimismo, los costes son relevantes a la hora de determinar el margen bruto de explotación.

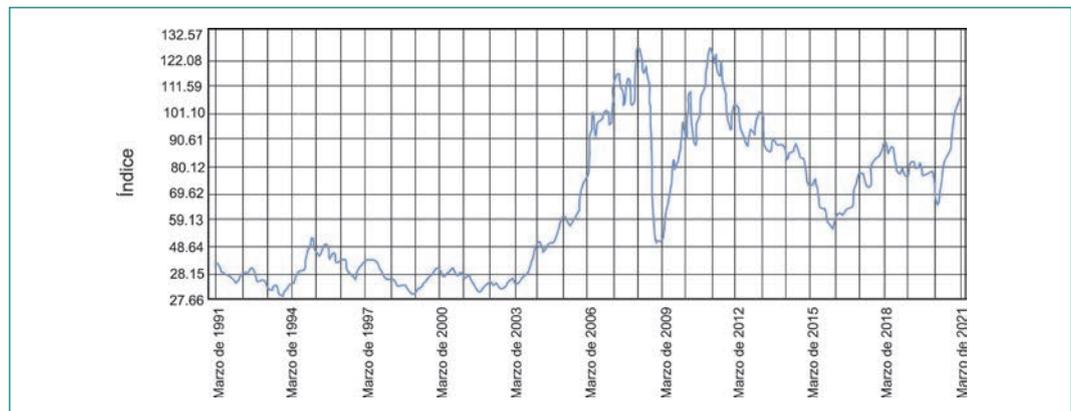
Figura 79. Ejemplo del efecto de la variación de la producción en el coste unitario. Fuente: elaboración propia de los autores sobre la base de (SRK Consulting, 2016a).



2.1.2.3. Creación de valor: formación de los precios de los minerales

Los precios de las materias primas minerales y de los metales, en general, se encuentran determinados por la oferta/demanda y no por una sola variable. En este caso, la oferta, la demanda o ambas suelen encontrarse en continuo cambio como se observa en Figura 80, que recoge un índice de algunos de ellos.

Figura 80. Evolución del Indicador Commodity Metals Price Index, que incluye al cobre, aluminio, mineral de hierro, estaño, níquel, zinc, plomo y uranio. (2005 = 100, 1990-2020). Fuente: elaboración propia de los autores sobre la base del indicador de Index Mundi.



La producción tiende a ser más estable y predecible que la demanda. Por su parte, la demanda participa en los mercados de manera fluctuante y casi siempre ligada a la actividad económica. En el corto plazo las fuertes variaciones de la demanda son más difíciles de comprender (De La Torre y Espí, 2022).

La variabilidad en los precios de las materias primas minerales es una fuente de preocupación recurrente para gobiernos, inversores, empresas fabricantes y mineras (De La Torre y Espí, 2022). Además, el precio de los metales es actualidad y sus variaciones son noticia (Espí et al., 2021). Al tratarse de una actividad donde el insumo viene dado por la naturaleza, la calidad de un mismo mineral se convierte en una variable que influirá en la economía del proyecto. Esto viene a añadirse a los diferentes costes operativos.

Otra variable, que contribuye a la complejidad, es la necesidad de cumplir con los criterios de explotación sostenible, lo que engloba la revisión del carácter social y ambiental de cada proyecto minero. La importancia de estos criterios es tal que pueden impedir el cambio de estado de recursos a reservas explotables, o más directamente, extinguir o no permitir la concesión de la licencia de operación necesaria.

Los metales se compran y venden de diferentes maneras y bajo diferentes acuerdos que reflejan su facilidad de almacenaje y transporte, así como su grado de estandarización o diferenciación. Habitualmente

se negocian en Bolsas de materias primas (cuyos precios directa o indirectamente gobiernan todas las transacciones del día), mercados OTC (*Over The Counter*), o mediante precios negociados con los productores. La oferta y la demanda pueden venir no solo de las compañías industriales productoras y de los compradores, sino también de los intermediarios e inversores de todo tipo.

La Bolsa de metales de Londres o London Metal Exchange (LME) es el primer mercado de metales del mundo, cubriendo aproximadamente el 90 % de las transacciones globales de los metales que gestiona, entre los que se encuentran el aluminio y sus aleaciones, el cobre, estaño, níquel, zinc, plomo, cobalto, molibdeno, así como palanquilla y chatarra de acero. También conviene reseñar la Bolsa Mercantil de Nueva York (New York Mercantile Exchange, Nymex) y su división Comex (Al, Cu, Au, Ag, Pt, Pd, U) y el Shanghai Metal Exchange. Los precios en las Bolsas son fijados diariamente (en horario de operaciones), equilibrando la oferta y la demanda en el mercado *spot* y permitiendo las transacciones de futuros. Como es habitual en este tipo de mercados, las operaciones son anónimas y el propio mercado provee garantías para los participantes.

Los mercados OTC son mercados de negociación directa entre agentes (oferta y demanda) y donde los riesgos por impago (*default*) son asumidos por los participantes (por ejemplo, London Bullion Market Association, LBMA y London Platinum and Palladium Market, LPPM). Los precios de los productores se dan en aquellos casos donde hay pocos productores, con precios de venta similares. En este caso, el productor anuncia o determina el precio (e.g., diamantes, MGP, potasas).

Por último, los precios negociados se obtienen en contratos bilaterales vendedor/comprador sin estructura institucional. Son habituales en materias primas minerales con características diferenciales (mineral de hierro, carbón), vendidas en pequeñas cantidades (Cd, Nb) o con otras características que no permitan su venta en mercados. Los precios de referencia aparecen en Metal Bulletin, Platts Metal Week e Industrial Minerals.

Cuando se agotan los recursos o cuando suben los costes de producción, surge un mayor interés por controlar los precios de las materias primas minerales. Al contrario, la apertura de nuevas explotaciones (que entran en operación a intervalos irregulares), o el descenso de la demanda, tienden a reducir los precios de las materias primas minerales. Un uso generalizado de productos financieros, como las opciones, afectan al mecanismo de la relación oferta/demanda y, por lo tanto, repercuten en los precios.

La determinación del precio a futuro es una operación arriesgada pero inevitable en una empresa. Los proyectos de inversión en nuevos depósitos minerales, las previsiones futuras de los negocios en marcha y otras situaciones requieren la determinación de un precio. Encontrar el precio adecuado significa fijar una cifra que reúna las condiciones de defensa ante la volatilidad de las cotizaciones, con el suficiente conocimiento de la oportunidad en los mercados. Además de los factores de calidad del propio yacimiento, la experiencia y la adecuación de la tecnología disponible configuran los criterios de elección de esta cifra. Por tanto, es competencia de la empresa decidir la estrategia adecuada a su perfil de aceptación de riesgo y la formulación de los objetivos sobre la calidad, siempre bajo una mirada geológica experta (Espí y De la Torre, 2013).

Los métodos más comunes para la determinación del precio se basan en estudios de mercado a futuro, que se mueven en los campos de las estrategias de empresa y disponibilidad de inversión, las estrategias de financiación y la disposición ante el riesgo. Las metodologías más empleadas por las empresas del sector son (i) la media de los precios medios en los últimos tres años (en ocasiones hasta los últimos cinco años), (ii) asimilación de la experiencia de otros proyectos y (iii) la decisión de un grupo de diseñadores que hacen uso de su experiencia en cada proyecto.

2.1.2.4. Valor de la producción

El valor de la producción mundial de minerales no es fácil de obtener y los datos de diferentes fuentes no siempre coinciden. La Tabla 30 presenta el valor en dólares de la producción atribuida a los diez principales países productores mundiales. Los seis primeros lo son en carbón y en mineral de hierro que, además del cobre y el oro, suponen un gran valor para sus productores.

Tabla 30. Valor de la producción minera por países. Nota: los datos de ICMM incluyen la minería metálica y del carbón. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (ICMM, 2020).

País	Valor de la producción en 2018 en miles de mill. US \$ (ICMM 2020)
China	183,8
Australia	142,9
EE. UU	92,9
Indonesia	59,2
Rusia	54,6
Brasil	41,6
Chile	40,9
Sudáfrica	37,8
Canadá	30,8
Perú	28,9
Total, mundial	713,4 (solo 10 primeros)

La Tabla 31 recoge el valor total mundial de la producción de los principales metales. Pueden clasificarse en tres grupos: (i) metales de minerales "bulk" (a granel, producidos en grandes cantidades), que suponen la mayor parte del valor total (72,1 %) (se incluyen el hierro y el aluminio, además del cobre y el oro); (ii) metales base (zinc, plomo, níquel) y titanio, que representan el 21,7 % y (iii) metales tecnológicos (fundamentalmente críticos o estratégicos) y uranio, cuyo valor económico asciende al 6,2 % del total.

Tabla 31. Valor de la producción de metales en el año 2019 en US\$. Nota: valor del metal contenido en los minerales. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (Statista, 2022c).

Metal	Valor en miles de mill. US \$	Metal	Valor en miles de mill. US \$
Oro	170	Cobre	155
Aluminio	165	Mineral de hierro	137
Zinc	49	Níquel	27
Manganeso	40	Plata	17
Plomo	30	Titanio	13
Paladio	10	Estaño	7
Tierras Raras	9	Molibdeno	4
Platino	8	Uranio	4
Cobalto	8	Litio	3

2.1.2.5. Márgenes y resultados globales

Un indicador económico fundamental es la ley de corte o *cut-off*⁹⁰. Por definición, la ley de corte es la concentración de metal que iguala o supera los gastos incurridos en su explotación y beneficio. Para ello considera el total de los costes operativos, incluyendo los del proceso de extracción, la concentración de mineral, los costes administrativos, las recuperaciones metalúrgicas, los precios de los metales y los gastos de fusión y refino.

⁹⁰ Para más detalle ver el capítulo 3 y el glosario de términos.

Una vez que se ha definido el *cut-off*, toda porción del yacimiento que supere dicha ley debe ser considerada como económicamente aprovechable. La entrada de mineral a la planta de proceso tendrá una ley media superior a este *cut-off*, y la diferencia será el margen que proveerá al proyecto de recursos suficientes para llevarlo a cabo y que el negocio funcione.

Otra manera de visualizar el margen teórico (además de visualizar la posición competitiva del proyecto), es referirlo a la cotización del metal en un momento dado sobre los costes unitarios de las producciones mundiales acumuladas, referidas a proyectos o compañías concretas.

2.1.2.6. Productividad y capitalización

La productividad de una operación minera se puede evaluar de varias maneras, normalmente determinando la cantidad de mineral o metal producido por persona. Sin embargo, la masa salarial cada vez disminuye más a causa de los cambios tecnológicos. Por ello, resulta casi universal referir la productividad al metal producido, comparando los resultados con los proyectos más importantes a nivel global.

Un buen indicador de la importancia económica de una empresa es su capitalización. Por ello se presentan las diez primeras del sector en la Tabla 32, destacando las grandes productoras de mineral de hierro, aunque en general, en menor o mayor medida, están diversificadas.

Compañía	Capitalización mill. US\$	País	Sustancia mineral/ Metal
BHP	179.000	Australia	Mineral de hierro, cobre, carbón
Rio Tinto	132.000	Australia	Mineral de hierro, aluminio, cobre
Vale	112.000	Brasil	Mineral de hierro, níquel
Glencore	55.000	Suiza	Cobre, cobalto, zinc, níquel
Norilsk Nickel	54.000	Rusia	Paladio, níquel
Freeport-McMoRan	52.000	EE. UU.	Cobre
Anglo American	52.000	UK	Diamantes, cobre, platino, mineral hierro, carbón
Fortescue Metals	51.000	Australia	Mineral de hierro
Newmont Goldcorp	50.000	EE. UU.	Oro
Southern Copper	47.000	EE. UU.	Cobre

Tabla 32. Capitalización bursátil de las diez primeras empresas mineras mundiales. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (Elements, 2021).

Las empresas mineras tras la pandemia de COVID-19 presentan un pronóstico alentador a medida que la economía se recupera. Se espera que el mercado alcance un valor de casi 1,86 billones de dólares para 2022, debido a la creciente demanda de minerales para las tecnologías de generación eléctrica mediante energías renovables (Venditti, 2021).

2.1.3. La tercera etapa: cierre y valores finales

La última fase del proceso minero se refiere al periodo que transcurre desde el inicio de la paralización de la producción hasta la finalización del compromiso adquirido con la Administración en la vigilancia y seguimiento ambiental del lugar de operaciones⁹¹. La huella que puede dejar la minería debería ser positiva, tanto en el entorno ambiental como en el social. Este sería el caso de un polo o clúster industrial.

⁹¹ Para más detalle sobre la rehabilitación de espacios mineros ver capítulo 3.

2.1.3.1. El cierre y los compromisos ambientales

En el pasado, en un proyecto minero, la planificación del cierre era responsabilidad de la gestión operativa de una empresa y se centraba en aspectos ambientales, entre los cuales el compromiso de la comunidad a menudo se reducía a procesos de consulta de información. En la medida en que la comunidad participe con ideas y sugerencias en la fase del proyecto de post-minería, las iniciativas previsiblemente serán mejor acogidas y tendrán mayor durabilidad.

Con una visión amplia, hoy se considera que, para que un proyecto minero contribuya positivamente al desarrollo de la zona donde se desenvuelve, los impactos y la clausura deben considerarse desde el comienzo (Tabla 33). Además del Plan de Cierre, existen obligaciones posteriores (post-minería) que repercuten en el coste de la fase final. La principal es el mantenimiento de las instalaciones integradas en el medio natural.

Instalación	Frecuencia de mantenimiento y seguimiento post-cierre						
	Mantenimiento (Mto)			Seguimiento (Segto)			
	Mto. Físico	Mto. Hidrológico	Mto. Biológico	Segto. Físico	Segto. Geoquímico y de calidad de aguas	Segto. Hidrológico	Segto. Biológico
Trabajo	Anual	Anual		Anual	Trimestral	Anual	
Áreas de mina recuperadas para el cierre	Quinquenal		Anual	Anual			Anual
Presa de estériles	Quinquenal	Anual		Anual	Trimestral	Anual	
Acopio de escombros	Quinquenal	Anual		Anual	Trimestral	Anual	
Estructuras hidráulicas para la gestión de aguas al cierre	Quinquenal	Anual		Anual	Trimestral	Anual	

Tabla 33. Conceptos de la fase final de la rehabilitación siguiendo el esquema de Anglo American, Walsh. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (Anglo American, Walsh, n.d.).

2.1.3.2. Costes y valor de la fase final

Los costes de estas últimas etapas del proceso minero son muy variados. Además del volumen de operación, existen notables diferencias dependiendo de la sustancia mineral, método y profundidad de la explotación, dificultad en el procesado, entorno natural y muchos más.

Un componente económico de la etapa de cierre es la garantía exigida por la Administración a la empresa minera, a fin de asegurar el compromiso adquirido por ella en el momento del otorgamiento de los permisos de actividad económica. Normalmente, el importe de la garantía financiera es función de los costes estimados para la ejecución del plan de cierre.

El valor de las instalaciones, una vez terminadas las operaciones es, en general, un flujo económico positivo en la fase de cierre o clausura de las instalaciones. Está constituido, fundamentalmente, por el valor de la venta de los equipos y la venta de la chatarra, sobre todo del cobre de la maquinaria. Pero por su incertidumbre, rara vez se tiene en cuenta en un proyecto de inversión. Existen también otros activos que raramente se ejecutan, tales como el suministro de agua, el terreno agrícola restaurado, edificios generales y otros. Los ayuntamientos o comunidades cercanas, algunas veces, son los beneficiarios y, cuando no, siguen atados a los avatares de la evolución de la propiedad.

Una adecuada gestión por parte de la propiedad minera y de las Administraciones en donde se desenvuelve, pueden generar clústeres o agrupaciones industriales. También, sin llegar a un entramado de clúster, los encadenamientos industriales generados por empresas locales de industria y servicios, a veces, consiguen independizarse de la actividad minera, sobreviviendo a ella y creando periodos de actividad económica estables⁹². Este ha sido el origen de ciudades industriales y agrupaciones económicas de envergadura (industria siderúrgica del País Vasco e industria cerámica de Castellón, por ejemplo).

2.2. Cadena de valor de la metalurgia

La metalurgia es la etapa posterior a la explotación minera y a la preparación y concentración de las menas. Empieza con el tratamiento de los concentrados mineros de los minerales metálicos para obtener primero el metal bruto y continúa, posteriormente, con la realización de las operaciones de afino para obtener el metal que finalmente se pone en el mercado.

Los minerales que contienen metales tienen dos características principales. La primera es, que la ley de metal en el mineral es muy variable, dependiendo del metal y el yacimiento del que se extrae. Por ejemplo, en las bauxitas (para obtener aluminio) la ley es del 55 %, en forma de alúmina, lo que no hace necesaria la concentración del mineral. Sin embargo, en las calcopiritas (para obtener cobre) la ley puede ser del 0,5 %, lo que exige su concentración.

La segunda característica es que, salvo en los metales nativos, los metales raramente están solos; lo normal es que estén acompañados de otros metales. Esto puede ser favorable (caso de la presencia de oro en el mineral de cobre) o, normalmente, una complicación, porque su presencia impurifica el metal que se está tratando de obtener.

Las grandes empresas mineras (Alcoa, Angloamerican, FreeportMacMoran, BHP y otras que facturan más de 20.000 millones de dólares anuales) tienen integrado el proceso metalúrgico hasta la obtención del metal comercial. Esta integración vertical hace que la empresa minera, que extrae el mineral en la mina con normalmente bajas leyes en metal (0,5-10 %), tenga que concentrarlo con operaciones mineralúrgicas (capítulo 3) para obtener una ley de metal que permita su entrada en el proceso metalúrgico (30-40 %).

Como se acaba de señalar, el precio del metal lo fijan las Bolsas de Metales. La ley de la oferta y la demanda, principalmente, marca el precio de los metales en las Bolsas. Los almacenes, los seguros y el mercado de futuros contribuyen a dar cierta estabilidad a los precios. El valor del concentrado depende de su ley en el metal y va subiendo a medida que se incrementa la ley hasta la del metal afinado que pueden tener una "ley de cinco nueves" (99,999 %).

Las plantas mineralúrgicas suelen estar en bocamina y lo razonable sería que las metalúrgicas estuvieran cercanas. Sin embargo, debido a que los concentrados se mueven por su elevado precio y que algunos procesos metalúrgicos (por ejemplo, proceso Bayer-Hall Héroult para la obtención de aluminio a partir de bauxitas) necesitan grandes cantidades de electricidad para sus operaciones de electrolisis, las plantas metalúrgicas pueden localizarse en ubicaciones no cercanas a la mina. Esto supone el transporte de concentrados desde los países productores a los países consumidores.

⁹² Es más probable que suceda cuando la empresa minera es líder tecnológico.

A modo de ejemplo, en la segunda mitad del pasado siglo, cuando aún no se había producido la primera gran crisis del petróleo de 1973 y la electricidad se consideraba abundante y barata, se construyeron complejos metalúrgicos de producción de aluminio (el segundo metal que más se produce en el mundo detrás del hierro) en países donde no había minas de bauxita y que estaban alejados de ellas. También en China se construyeron complejos metalúrgicos propiedad del Gobierno (donde no primaba el interés económico sino el estratégico) y que compraban los concentrados metálicos en cualquier parte del mundo donde estuvieran disponibles para producir el metal necesario para su industria.

Los procesos metalúrgicos, a pesar de estar en una fase avanzada de la cadena de valor (no teniendo en cuenta el reciclado), facilitan la posibilidad o no de abrir una mina, ya que si no hay un proceso metalúrgico para tratar el mineral no puede abrirse la mina. Además, los procesos metalúrgicos están en constante evolución y el desarrollo, que han tenido gracias a la innovación, ha permitido tratar escombreras que tenían metales que no se extrajeron en su momento porque no había tecnología disponible o no era atractiva económicamente.

El hecho de que los metales sean reciclables hace que la metalurgia secundaria, que se ha tratado en los capítulos cuarto y sexto, represente ya más del 50 % de la producción de los cuatro metales no féreos. La metalurgia secundaria se realiza en procesos de reciclado que empiezan con la recogida y concentración de chatarras de aparatos metálicos que han llegado al fin de su vida útil, en algunos países, con "sistemas integrados de recogida", en centros especializados donde además de concentrar se hace una selección de los distintos metales a reciclar. En las operaciones de selección se desechan otros materiales que acompañan a los metales. Una vez que se tienen las chatarras de los metales seleccionados se procede a las operaciones de fragmentación donde se trocean hasta el tamaño requerido en las operaciones posteriores.

Las operaciones de concentración se realizan para separar los distintos metales y mediante operaciones de separación magnética y otras se obtienen los metales, listos para entrar normalmente en plantas piro-metalúrgicas, reciclarlos y convertirlos nuevamente en metales útiles. Se trata así de una contribución de la metalurgia secundaria a la cadena de valor.

3. Polos, clústeres o ecosistemas industriales

Como se ha señalado, la actividad minera puede llevar a la creación de polos, clústeres o ecosistemas industriales⁹³ durante las diferentes fases de la actividad minera, que pueden sobrevivir a la propia actividad minera, creando un valor positivo para la zona, y que incluso se extienda más allá de la vida operativa de la mina. Existen varias definiciones del término clúster⁹⁴ que se indican a continuación.

De acuerdo con la plataforma europea para la colaboración de clústeres (ECCP) un clúster es un ecosistema regional de industrias relacionadas y de competencias que cubren un amplio abanico de interdependencias. Se definen como grupos de empresas, agentes económicos relacionados e instituciones ubicadas cerca unas de otras y que han logrado una escala suficiente para desarrollar experiencia especializada, servicios, recursos, suministradores y habilidades o competencias (*skills*).

⁹³ A efectos de este trabajo se emplean los términos polo industrial, clúster, ecosistema industrial y aglomeración de manera indistinta.

⁹⁴ Conviene distinguir los clústeres de las organizaciones clúster que son entidades jurídicas que apoyan el esfuerzo de colaboración, contactos (*networking*), aprendizaje e innovación (European Cluster Collaboration Platform (ECCP), n.d.).

Por su parte, Delgado et al. (2014) definen los clústeres como concentraciones geográficas de industrias relacionadas e instituciones asociadas. La aglomeración de actividades económicas relacionadas es un aspecto central de la geografía económica.

Para Porter (1998) los clústeres son concentraciones geográficas de empresas interconectadas, proveedoras de bienes y servicios especializados, empresas en industrias relacionadas e instituciones asociadas (por ejemplo, universidades, agencias de estandarización o asociaciones de comercio), que en un campo determinado compiten, pero también cooperan.

Otros autores han destacado factores que impulsan las aglomeraciones o las concentraciones, a saber: los enlaces *input-output*, la puesta en común de recursos humanos y la difusión del conocimiento ("*knowledge spillovers*") que están asociados o relacionados con ventajas de coste o de productividad para las empresas.

Los clústeres geográficos o de distrito han sido vistos como la configuración territorial con más probabilidades de aumentar los procesos de aprendizaje, especialmente los que influyen en la difusión de conocimiento y de la innovación. Las empresas que poseen una cierta proximidad geográfica se pueden beneficiar de la aglomeración y desarrollar infraestructuras de uso común promovidas por instituciones regionales.

Una de las principales causas a las que se atribuye el éxito de los clústeres se debe a que las empresas que desarrollan actividades similares y que están emplazadas en un mismo entorno geográfico se encuentran en una situación en la que cada una de sus acciones pueden ser observadas, analizadas, investigadas y comparadas por el resto.

Las instituciones regionales (universidades, institutos de investigación, centros tecnológicos y de asistencia técnica y otros más) facilitan el desarrollo de capacidades competitivas entre las empresas locales actuando de motores de intercambio de información y promoviendo procesos de colaboración.

Es importante, por su relación con la cadena de valor hacer referencia a los clústeres en Europa, que en muchas ocasiones van asociados a los ecosistemas industriales, entendiendo estos como el conjunto de agentes o actores que operan en la cadena de valor, desde las pequeñas *start-ups* hasta las grandes compañías, desde la academia y la investigación; a los proveedores de servicios y a los suministradores.

La literatura sobre ventajas competitivas de las aglomeraciones (clústeres) sugiere que en los lugares donde hay una masa crítica de empresas en torno a una actividad económica determinada se produce un proceso de mejora de las ventajas competitivas a partir de la interacción entre empresas o entre estas y las instituciones especializadas y los consumidores. Este proceso puede tomar distintas formas, como una mayor diferenciación de productos para insertarse en mercados más dinámicos; incorporación en los eslabones de mayor valor en la cadena; innovaciones para mejorar la eficiencia y productividad; o incluso cambios hacia actividades económicas derivadas que tengan mayores perspectivas de desarrollo.

3.1. Clústeres europeos y otras referencias internacionales

En un reciente trabajo que examina el panorama de los clústeres europeos, se señala que estos son un aspecto clave de la economía europea y que están concentrados en actividades relacionadas con el comercio y con la industria manufacturera. Estos clústeres facilitan un amplio rango de servicios, sobre todo

en funciones transversales, facilitando la colaboración entre sus miembros, apoyando la investigación, el desarrollo y la innovación, o promoviendo el acceso a la financiación, la internacionalización, la comunicación, el mercado interior, la localización de la marca ("*Location branding*") y la gestión de los derechos de propiedad intelectual (Franco et al., 2021).

En el mismo informe se pone de relieve la escasa relevancia de los clústeres relacionados con la minería y la metalurgia. El informe utiliza una clasificación que se basa en los códigos de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE) de dos dígitos⁹⁵. No obstante, figuran tres clústeres: (i) "Metaindustry cluster of advanced manufacturing of metal industry" en Asturias, (ii) "Steel Innovation Center/Polo del Acero" y (iii) "Iberian Sustainable Mining Cluster". Se puede señalar también el papel de ICAMYL (Centro Internacional de Materiales Avanzados y Materias Primas de Castilla y León) que participa en la estrategia de gestión eficiente de recursos industriales, eficiencia energética, eco-innovación y sustitución de materiales críticos. Su objetivo es promover el desarrollo de materiales avanzados para la industria de la región y la creación de riqueza sobre la base de las materias primas de Castilla y León, en línea con su Estrategia de Especialización Inteligente (RIS3).

En términos de empleo y número de clústeres, en el citado informe no figuran, dada su escasa relevancia en la UE, la minería de menas metálica (B07), ni actividades de servicios de soporte a la minería (B09). No obstante, sí figuran cadenas de valor relacionadas con la manufactura de metales básicos (C24)⁹⁶ y de productos metálicos fabricados, excepto maquinaria y equipos (C25), como se puede ver en el Gráfico 6.

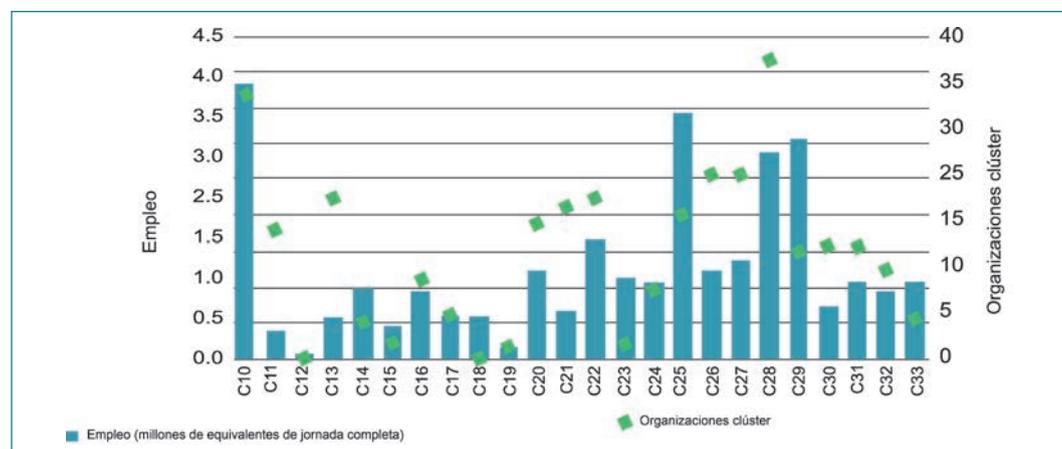


Gráfico 6. Empleo y organizaciones clúster en la industria de la UE-27 (2018). Fuente: traducido por los autores de (Franco et al., 2021).

En el ámbito internacional, una referencia de interés es el "Clúster Minero Canadiense". Entre los factores de éxito resultan relevantes el tamaño y la diversidad de los recursos minerales, la existencia de un marco legal estable (seguridad jurídica), la proximidad a los principales mercados, la estrecha vinculación con algunos centros de innovación tecnológica y el desarrollo de un sector de productores de maquinaria y equipos especializados en comunicación con las empresas mineras.

La descripción de la aglomeración en torno a la minería en Canadá incluye una diversidad extraordinaria de agentes especializados, incluyendo empresas mineras y sus proveedores, consultores y otros servicios profesionales, instituciones financieras, universidades, asociaciones y hasta la prensa especializada. Dis-

⁹⁵ Los relacionados con la cadena de valor de este estudio, serían: B07 Mining of metal ores; B09 Mining support service activities; C24 Manufacture of basic metals; y C25 Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment. Otro código relacionado con este trabajo sería el C27 Manufacture of electrical equipment.

⁹⁶ En este código se incluyen, por ejemplo, la fabricación de productos del primer procesado del acero, aluminio, plomo, zinc, latón, cobre y otros metales no féreos.

tintas instancias públicas impulsaron iniciativas para dotar al sector con infraestructura y conocimientos básicos, una visión estratégica común y proyectos de envergadura. La interacción entre todos los actores ha producido conocimiento y capacidades propias que distinguen a las empresas mineras canadienses de sus competidores a nivel mundial. El potencial de la aglomeración para desarrollar ventajas competitivas nuevas estaría, sobre todo, fuera de la cadena productiva central, en el ámbito de la aplicación del conocimiento sobre el medio ambiente.

El concepto y desarrollo del clúster minero en Canadá debe enmarcarse en su plan de minerales y metales (Minerals Canada, 2019). Dicho plan *"incluye la visión, principios y directrices estratégicas que el Gobierno, la industria y las partes interesadas pueden tratar de impulsar para lograr la competitividad de la industria y el éxito a largo plazo"*. La visión es que Canadá tenga una industria de minerales responsable, competitiva y sostenible que beneficie a todos los canadienses. Para lograr la visión, el plan contempla seis directrices estratégicas siendo una de ellas "ciencia, tecnología e innovación", donde se pretende desarrollar ecosistemas de innovación en el ámbito de la minería en todas las fases del ciclo o de la cadena de valor de los minerales en las que se promueven incentivos para apoyar un "superclúster", que aborde los grandes desafíos tecnológicos.

4. Conclusiones

Desde las primeras fases (incluida la investigación minera) se crea valor al identificar yacimientos minerales de interés para el mercado y se generan informes que tienen en sí mismo un valor que se acrecienta, cuando, como consecuencia de estos, las empresas y los interesados adquieren derechos que, a su vez, tienen también valor. En la fase previa a la explotación también se crea valor al desarrollar relaciones con el entorno y la Administración y en la elaboración de los estudios de impacto ambiental.

A medida que progresa la investigación y la exploración, el conocimiento de los recursos es, en general, cada vez mejor. El valor económico en esta fase depende, por un lado, del nivel de riesgo e incertidumbre y, por otro, del tipo de investigación o recurso sobre el que se trabaja, sea en zonas vírgenes no exploradas y con escaso conocimiento geológico, o en aquellas en las que ya ha habido investigaciones de detalle u operaciones mineras previas.

Un componente esencial en la creación de valor es lograr la rentabilidad de la inversión, márgenes operativos, márgenes brutos o beneficio de explotación, de forma similar a otras actividades industriales y económicas.

Una vez tomadas las decisiones de inversión, el desarrollo minero de la explotación supone un avance significativo en la creación de valor, ya que se inicia el proceso de producción y, por tanto, se elaboran productos tangibles de interés para el mercado. En esta fase son evidentes los encadenamientos hacia adelante: instalaciones mineralúrgicas y plantas metalúrgicas, transporte hacia los mercados; y hacia atrás, como con los suministradores y proveedores de insumos y de instalaciones industriales.

Es también aquí donde la interrelación de empresas, de instituciones y del territorio juegan un papel clave en la creación de valor que supera la concepción lineal de la cadena de valor, amparado y enmarcado en el concepto de clústeres.

La concepción de clústeres y el desarrollo de ecosistemas industriales son elementos clave para el desarrollo industrial y minero, para la adecuación de la formación, la obtención de financiación, el estímulo y orientación de la innovación, la ingeniería y la tecnología; y para la contribución a una economía sostenible y a un empleo de calidad a medio y largo plazo. El escaso número de clústeres en Europa y en España relacionados con la minería y la metalurgia, muestra, por una parte, la escasa implantación de estos; pero por otra, supone una gran oportunidad dado el potencial de estos. En este sentido el caso canadiense puede ser un ejemplo para estudiar y seguir.

Las etapas finales de cierre y postminería, en el marco de cumplimiento de las autorizaciones ambientales y administrativas y apoyadas en una concepción de clústeres, permite aportar valor y convertir lo que podrían ser pasivos ambientales en activos y en creación de nuevas industrias o actividades económicas.

La metalurgia empieza con el tratamiento de los concentrados mineros de los minerales metálicos para obtener primero el metal bruto y continúa, posteriormente, con la realización de las operaciones de afinado para conseguir el metal que finalmente se pone en el mercado.

Los procesos metalúrgicos aportan valor a la actividad minera. Se encuentran en constante evolución y desarrollo, y gracias a la innovación se ha podido tratar escombreras extrayendo metales que no se extrajeron en su momento porque no había tecnología disponible. Por otra parte, los metales, que son reciclables, resultan adecuados para la metalurgia secundaria aportando valor en una cadena cuyo origen no son las materias primas minerales primarias.

8

SOBRE LA MINERÍA Y LA METALURGIA EN ESPAÑA



1. Introducción

Como se ha puesto de manifiesto en el apartado sobre la vulnerabilidad europea, en la Introducción, la UE tiene una dependencia del suministro de materias primas minerales de terceros países muy elevada. A pesar de que hay producción de cobalto en Finlandia, o de hafnio en Francia, y de que en España la diversidad geológica da lugar a una variada e importante producción minera, el 95 % de las tierras raras que llegan a Europa proceden de China.

Los metales producidos en España son indispensables en la política de aseguramiento del suministro de las materias primas minerales. Esto se refiere tanto a los metales como el cobre, zinc y plomo de la IPB (Iberian Pyrite Belt) /FPI (Faja Pirítica Ibérica) como a los denominados tecnológicos (como el estaño, wolframio, tántalo y litio). Además, España tiene un importante potencial en minerales relacionados con la transición energética, habiéndose identificado en el territorio nacional 13 minerales útiles para la descarbonización (Gil, 2022), entre ellos, litio, cobalto, níquel, manganeso, cobre, wolframio y vanadio.

A pesar de ello, actualmente, hay alrededor de 30 proyectos mineros paralizados en España (Arce, 2021). Las consecuencias directas son según Arce (2021) que (i) anualmente se gastan casi 10.000 millones de euros en importar minerales y metales no ferrosos, según las cifras del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, y (ii) la industria está sometida a restricciones de suministro y a expensas de la estrategia comercial de países como China.

Si bien la economía española es altamente exportadora (Tabla 34) de productos del grupo 25 (i.e. sal, yeso), es importadora de productos del grupo 26⁹⁷. Además no se observan grandes cambios en la última década (2010-2020).

	2010		2015		2020	
	Exportaciones	Importaciones	Exportaciones	Importaciones	Exportaciones	Importaciones
Miles de euros						
25 Sal, yeso, piedras S/ trabajar	934.994,30	523.883,35	1.199.526,81	532.313,25	1.104.907,94	626.042,45
26 Minerales, escorias y cenizas	867.753,76	3.504.037,61	1.498.627,87	3.492.975,90	1.360.409,51	3.416.728,63
28 Productos químicos inorgánicos	767.330,91	1.795.353,89	1.183.639,86	2.037.399,57	1.246.837,75	1.882.695,25
Toneladas						
25 Sal, yeso, piedras S/ trabajar	13.985.601,51	7.250.542,06	20.977.101,99	5.610.319,82	22.855.502,24	8.162.241,36
26 Minerales, escorias y cenizas	779.158,72	12.393.567,33	2.469.436,11	13.680.211,85	2.232.863,52	11.080.150,77
28 Productos químicos inorgánicos	3.656.460,50	2.672.140,47	5.548.484,34	3.251.148,59	5.545.486,95	3.666.905,18

Tabla 34. Evolución de las exportaciones e importaciones de productos de los grupos 25, 26 y 28. Fuente: elaboración propia de los autores a partir Datacomex.

En 2020 los principales productos exportados en términos monetarios fueron los minerales de cobre, los cementos hidráulicos, el corindón artificial, las escorias, cenizas y residuos, los minerales del zinc y sus concentrados, los carbonatos y peroxocarbonatos y los sulfatos alumbres. En toneladas, estos fueron el yeso natural, anhidrita y yeso, los cementos hidráulicos, las castinas (fundente calcáreo que se emplea

⁹⁷ Grupos de la clasificación CNAE.

cuando el mineral que se trata de fundir contiene mucha arcilla), sulfatos alumbres, cantos, grava y piedras, el corindón artificial y el ácido sulfúrico.

En lo que a importaciones se refiere, en términos económicos se encuentran por importancia los minerales del cobre, del zinc, del hierro, los metales preciosos, elementos químicos radiactivos, minerales de aluminio y carbonatos. En toneladas, las mayores importaciones fueron de minerales de aluminio, de hierro, feldespato, leucita y nefelina, caolín y demás arcillas asociadas, minerales del cobre, cementos hidráulicos y minerales del zinc.

Teniendo en cuenta lo anterior y las necesidades planteadas en el capítulo segundo sobre el papel de las materias primas minerales en la transición energética y la digitalización de la economía, para cumplir los objetivos del Pacto Verde Europeo y el objetivo de descarbonización a 2050, además de los posibles acuerdos comerciales con terceros países suministradores y de la importancia del reciclado o recuperación, la capacidad de suministro propia de la UE resulta fundamental, teniendo en cuenta asimismo que existe un posible riesgo de suministro y abastecimiento.

En cuanto a los recursos en España, en el Mapa 5, se señalan los principales yacimientos de materias primas en el país.



Mapa 5. Principales yacimientos de materias primas en España. Fuente: IGN (2019).

Dado el potencial existente, convendría potenciar y facilitar el desarrollo de proyectos en España, en particular los relacionados con las materias primas minerales necesarias para la transición energética y la digitalización, tales como el litio y las tierras raras. En esta misma línea podría incluirse en la contabilidad nacional un apartado sobre el capital natural; capítulo que, a modo de ejemplo, ha sido incorporado recientemente como elemento de un esquema de competitividad territorial⁹⁸.

La “Hoja de ruta para la gestión sostenible de materias primas minerales” (Ministerio para la Transi-

⁹⁸ Para más detalle ver (Orkestra, 2021).

ción Ecológica y el Reto Demográfico, 2022), entre otras cuestiones señala que “es necesario mejorar el conocimiento de los recursos minerales autóctonos (primarios y secundarios) disponibles e identificar las materias primas prioritarias para la economía española en su conjunto”. Además, indica que el desarrollo de los recursos minerales autóctonos, además de garantizar una mayor seguridad de suministro, crea y mantiene cadenas de valor.

En el siguiente apartado se presenta información sobre la producción y los proyectos mineros en España. A continuación, se aportan datos sobre la metalurgia española, para tratar después la cadena de valor con información económica sobre las actividades minera y metalúrgica en España

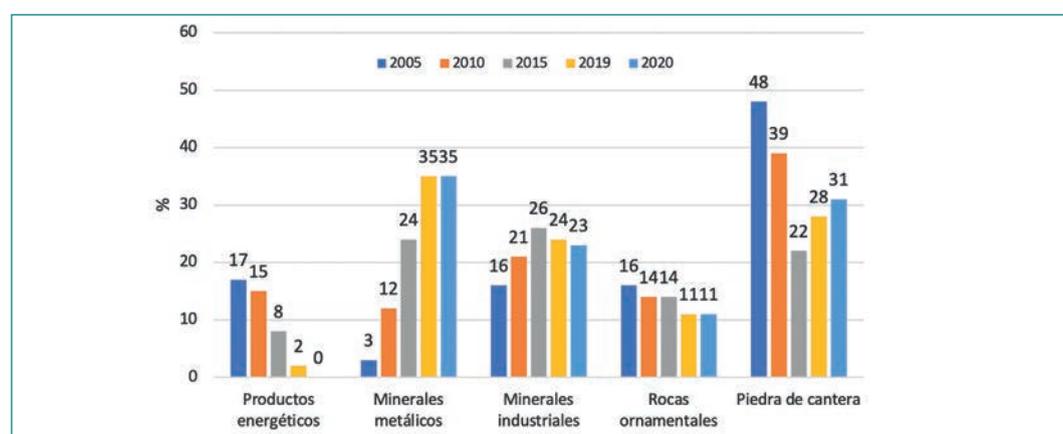
2. Sobre la producción minera

En conjunto, la producción minera española representó el 0,3 % del PIB nacional y la minería metálica alrededor del 0,1 %⁹⁹ (Secretaría de Estado de Energía, y Dirección General de Política Energética y Minas, 2019). La contribución de la minería energética al PIB ha caído los últimos años.

La producción minera nacional en el año 2020 alcanzó los 3.061 millones de euros, un 8 % inferior al valor de 2019. Desde 2018, cuando se consiguió el valor máximo, la producción ha ido cayendo. El año 2020 fue anómalo, como consecuencia de la situación generada por el COVID-19, por la reducción de la demanda, y la paralización de explotaciones.

En 2020 (Gráfico 7), el 31 % del valor de la producción minera fue de piedra de cantera (936,6 millones de euros), el 35 % de minerales metálicos (1.064,1 millones de euros), el 23 % de minerales industriales (695,5 millones), 11 % rocas ornamentales (351,1 millones de euros) y los productos energéticos fueron el resto (alrededor de 13,7 millones de euros).

Gráfico 7. Concentración porcentual del valor de la producción por subsectores. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas, 2020; Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas, 2022).



España destaca por ser el tercer país europeo por su potencial en materias primas críticas y el segundo en tierras raras en términos absolutos. El valor económico del conjunto de las materias primas críticas superó, en 2020, los 42 millones de euros, cifra ligeramente inferior a la conseguida en 2019, que fue de

⁹⁹ A modo de ejemplo, el mismo año el sector suministro de energía eléctrica, gas, vapor y aire acondicionado supuso el 2,94 % del VAB, la industria del papel el 0,35 % y el refino de petróleo el 0,29 %.

45,5, pero superior al valor total de la producción minera de algunas comunidades autónomas (Secretaría de Estado de Energía, y Dirección General de Política Energética y Minas, 2020).

En 2020 el mineral que más se produjo en España fue el yeso, con aproximadamente 13,4 millones de toneladas métricas, con un aumento del 19 % respecto al año 2019 . Al yeso le sigue la sal, cuya producción en 2019 ascendió a aproximadamente cinco millones de toneladas métricas (Secretaría de Estado de Energía, y Dirección General de Política Energética y Minas, 2020).

España cuenta con producción, entre otros, de espato flúor (fluorita), donde es el primer productor; celestina (estroncio), wolframio y tántalo. En el caso de la celestina, España es el único productor a nivel europeo y uno de los pocos a escala mundial, habiéndose desarrollado nuevas explotaciones de wolframio en el s. XXI. Igualmente es el único productor europeo de sepiolita. El tántalo apareció, en 2019, asociado a la minería del estaño (Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas, 2020). La producción de roca ornamental es también muy destacada, siendo el primer productor de pizarra de techar. Es el tercer productor de mineral de cobre, segundo de magnesita y de sales potásicas, y sexto de bentonita de Europa.

En la Tabla 35, se muestran datos sobre los proyectos en trámite, por Comunidad Autónoma, relacionados con la minería metálica, agrupados por metales, recogiendo información sobre la inversión y el empleo asociado. Puede verse que los proyectos en trámite suponen una inversión de cerca de 7.000 M€ y la creación de unos 30.000 puestos de trabajo entre directos e indirectos

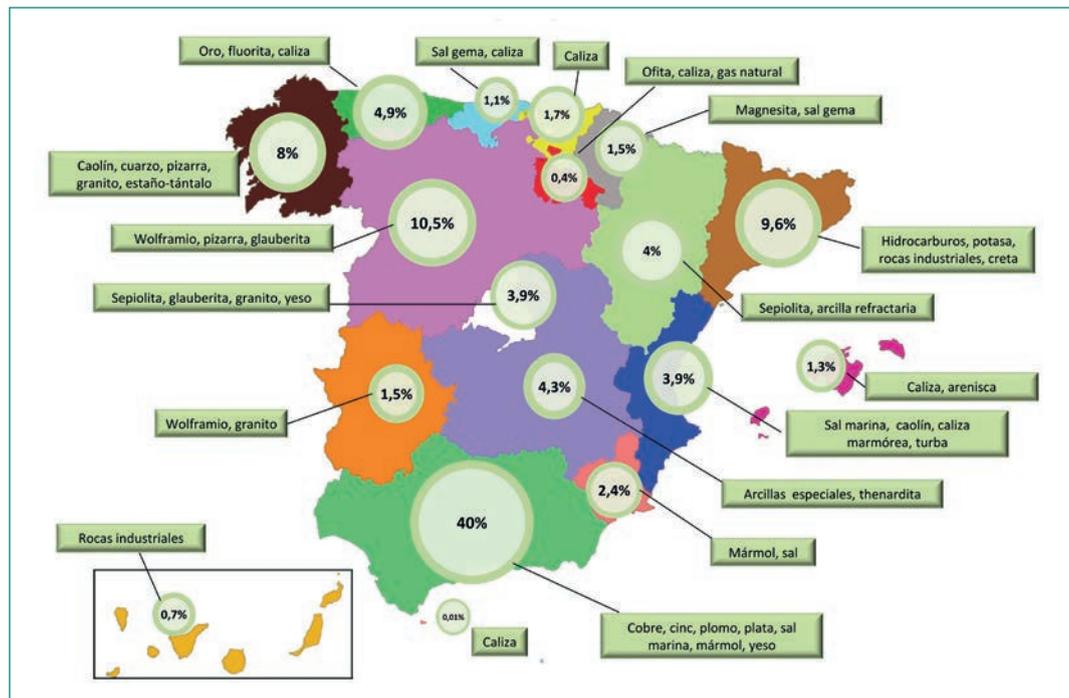
	Andalucía	Asturias	Castilla-León	Cataluña	Extremadura	Galicia	Madrid	Murcia	Total
Minerales Industriales		1		1			5		6
Minería Metálica (Au, Cu, Zn, Sn...)	7	4	4		11	3		1	30
Inversión aproximada (M€)	1.500	900	800	400	2.000	500	400	100	6.700
Puestos trabajo (directos+indirectos)	7.500	3.100	3.000	1.500	10.000	1.800	1.300	500	28.700

Tabla 35. Proyectos en trámite con la administración de las Comunidades Autónomas (CC.AA). Fuente: (Secretaría de Estado de Energía, y Dirección General de Política Energética y Minas, 2019).

La distribución del valor de la producción por el territorio varía entre CC.AA, como se observa en el Mapa 6. En Andalucía y Asturias (seguidas por Extremadura) se produce una gran parte de los minerales metálicos del país. En 2020, Andalucía, supuso alrededor del 40 % de la producción total. En lo que a minerales industriales se refiere (por ejemplo, caliza, arcillas, arena o grava), fueron Cataluña, Castilla y León, Madrid y Castilla-La Mancha las que aportaron el 70 % del total¹⁰⁰. En Galicia y Castilla y León, se extrajo el 63 % de las rocas ornamentales. Estas son también importantes en la Comunidad Valenciana, Extremadura, Andalucía y Murcia. Se extrae piedra de cantera en todas las CC.AA y en Ceuta, aunque pueden destacarse Andalucía, Cataluña y Castilla y León. En Almería la producción de yeso es muy importante, con alrededor del 60 % del total (Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas, 2020).

¹⁰⁰ En este análisis no se analiza la minería de productos energéticos. No obstante, puede decirse que la minería del carbón disminuyó y la del gas se mantuvo estable en los últimos años. Estas fuentes de energía se extrajeron en Cataluña, Andalucía y La Rioja (Viura).

Mapa 6. Distribución del valor de la producción minera por CC.AA. y principales minerales extraídos. Fuente: (Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas, 2020).



La minería metálica continúa siendo, como en los últimos años, el motor de la minería española. En conjunto, los proyectos de cobre, zinc y plomo presentan buenas características económicas, contando con las cotizaciones de metales que marcan la tendencia actual. Sin embargo, existen diferencias apreciables que, en gran parte, se relacionan con la gran variedad de características geoquímicas, mineralógicas, texturales y geométricas de los yacimientos.

En la Faja Pirítica Ibérica se mantienen en explotación tres minas subterráneas de sulfuros complejos, que obtienen concentrados de cobre, zinc y plomo, con importantes contenidos en plata, y otras dos a cielo abierto que producen cobre o concentrado de cobre. El proyecto de Atalaya Mining destaca por sus reducidos costes operativos totales respecto al cobre contenido en sus minerales, debido a sus bajos costes de extracción minera (gran volumen de movimiento mineral, baja ratio de desmonte o *stripping ratio*), acercándose a los característicos de un pórfido cuprífero clásico. El resto de los proyectos de la FPI se mantiene en valores muy semejantes (minería subterránea, complejidad y coste del sistema metalúrgico de Cobre las Cruces, CLC).

Han continuado también con su actividad la mina de oro (Asturias) y la de estaño-tántalo (Galicia). La producción de wolframio ha disminuido con el agotamiento de la mina de Los Santos, si bien han reiniciado su producción comercial otras dos explotaciones, una en Castilla y León y otra en Extremadura.

En Europa apenas se encuentran yacimientos de estaño con importancia económica. Solo se puede mencionar el depósito de Oropesa. Su explotación anual normalizada significaría un aporte de 2.000 - 4.000 toneladas de estaño al año. Además, como subproducto, también se produce estaño en depósitos de wolframio (Barruecopardo). Este proyecto no pertenece a la tipología más abundante en Europa incluida la Península Ibérica. Destaca por leyes relativamente altas y una parte importante del yacimiento es susceptible de ser explotado a cielo abierto, sin una excesiva ratio de desmonte. El proyecto se encuentra en su fase final de aceptación y su avance, una vez alcanzado el régimen de diseño, podría suponer el 1,4% de la producción mundial de estaño. Tras un repunte de los precios en 2013 el colapso de los precios del estaño ha inhibido tanto su investigación como la

reapertura de antiguos yacimientos. De esta forma, se debe esperar que otra subida en el precio de este metal pueda actuar como un incentivo para la exploración, aunque sea del tipo «*brownfield*»¹⁰¹.

En los últimos años, el atractivo de los precios, en España, ha empujado el desarrollo de tres nuevos proyectos de wolframio. Sumando algunos éxitos en Portugal, cuando se inicie la explotación de los proyectos, se producirá el 8 % del wolframio mundial, correspondiendo a España el 5,5 %. Los nuevos proyectos, en su mayoría, son proyectos abandonados después de un corto periodo de explotación. En España también existen otros proyectos con buenas expectativas, pero de momento están paralizados por motivos administrativos y de aceptación social. Es el caso de San Finx, Santa Comba, Morille y El Moto-Abenójar.

En el caso del litio, en la Península Ibérica, se plantean los proyectos de Valdeflórez y Las Navas en España y el proyecto Barroso en Portugal¹⁰². Los proyectos parecen no tener una total aceptación social.

Solo hay un proyecto de producción de oro en España, Orovalle, aunque también hay varios otros en estudio o en fase de exploración. Su producción, inferior a 100.000 oz Au/año, también incluye algo de cobre como subproducto. Los elevados precios del oro, sin duda, favorecerán la puesta en marcha de proyectos o la reactivación de los que están invernando.

2.1. Proyectos mineros en España. Situación actual

Los proyectos reconocidos en el territorio español se pueden clasificar según sean de minería metálica o no metálica y en las siguientes categorías: (i) proyectos en producción o que han parado o finalizado su vida productiva en el año 2019 (A), (ii) proyectos que, disponiendo de un informe técnico acreditado por un estándar internacional, han llegado a valorar acreditadamente sus recursos-reservas y se encuentran en estado de desarrollo (B) y (iii) proyectos que se encuentran en la situación B o, están a punto de alcanzarla, aunque no hayan comenzado la fase de desarrollo, o bien están a la espera de los permisos para hacerlo (C).

A continuación, se van a describir someramente los proyectos mineros relacionados con la cadena de valor de los metales y con los no metales (ver Tabla 36¹⁰³, Tabla 37 y Tabla 38)¹⁰⁴.

¹⁰¹ Cabe señalar que el extraordinario aumento del precio del estaño fue el motivo para que su minería se desarrollara de manera inusual en la década de los 70 del siglo pasado. Desde entonces, solo un corto pico de precio, alrededor de 2014, ha creado la esperanza de un nuevo desarrollo.

¹⁰² Además de estos dos proyectos existen otros proyectos de litio de menor entidad en España y Portugal.

¹⁰³ Los datos de empleo directo e indirecto de la Tabla 37 provienen de una búsqueda no exhaustiva en informes o webs de las empresas o en noticias de prensa sobre anuncios de proyectos. En el caso de Atalaya Mining (2022) la empresa encargó un estudio basado en la metodología input-output en el que se concluye que el empleo directo a tiempo completo fue de 318 personas, basado en un total de 485 contratos. El empleo indirecto asociado a la mina de Riotinto en las empresas que suministran bienes y/o servicios es de 1.361 empleos y el empleo inducido, generado por el consumo de bienes y servicios realizado por personas trabajadoras de las empresas que operan directa o indirectamente en la actividad de la mina, es de 676.

Las relaciones del empleo directo con el indirecto e inducido dependen en gran medida de la región. Moritz, T. et al. (2017) analizaron el impacto en el empleo de la minería en el norte de Suecia. Para ello desarrollaron una metodología basada en un análisis econométrico que muestra que un empleo en la minería resulta en la creación de otro empleo en otros sectores. El estudio puso también el énfasis en la creación de empleo en la fase de inversión, abogando por la creación de clústeres, teniendo en cuenta la tendencia a que la minería sea más intensiva en capital y tecnología.

Un enfoque también de interés es el realizado por IISD que indica que, de acuerdo con estimaciones, el sector contribuye con el 1-2 % del empleo directo en un país y cuando se considera el empleo indirecto e inducido la contribución pasa a ser del 3-15 % (IISD, 2019).

¹⁰⁴ No son tablas exhaustivas. Se recoge información de los proyectos que se consideran relevantes.

Tabla 36. Proyectos de minería metálica en España. Nota 1 (*): Para el estado, A = proyectos en producción o que han parado o finalizado su vida productiva en el año 2019; B = proyectos que, disponiendo de un informe técnico acreditado por un estándar internacional, han llegado a valorar acreditadamente sus recursos-reservas y se encuentran en estado de desarrollo, C = proyectos que se encuentran en la situación B o, están a punto de alcanzarla, aunque no hayan comenzado la fase de desarrollo, o bien están a la espera de los permisos para hacerlo; I = Investigación y P = Paralizado. Nota 2: (***) Producción anual en metal contenido en los concentrados vendibles y mineral ROM (enviado a la planta), (***) Inversión acumulada (inicial y de mantenimiento). Nota 3: La tabla no es exhaustiva debido en gran parte a que la información disponible en ocasiones no es lo suficientemente completa. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (Peña et al., 2021), (Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas, 2022), webs de las compañías propietarias y noticias de prensa.

METAL	Proyecto Minero	Estado (*)	Propiedad	Producción anual 2021 (t)**	Inversión***/ Empleo (directo e indirecto)
COBRE ¹⁰⁵	Cobre las Cruces ¹⁰⁶ (CLC)	A	First Quantum Minerals Ltd.	12.000 t Cu	1.100 M€ (280 + 520)
	Minas de Aguas Teñidas (MATSA) ¹⁰⁷	A	Sandfire Resources Ltd	66.000 t Cu 4,5 Mt/año	1.590 M€ (730)
	Riotinto	A	Atalaya Mining Plc	56.140 t Cu 15,8 Mt/año	358 ¹⁰⁸ M€ (485+632 ¹⁰⁹)
	Touro	B	Cobre S. Rafael. Atalaya Mining Plc	30.000 (prev)	220 M€ (400 + n.d.)
COBRE-Au (Zn+Pb) ¹¹⁰	Zarza y San Telmo (Tharsis)	I	Tharsis Mining and Metallurgy		
	Lomero Poyatos		Denarius Silver		
ZINC	Minas Aguas Teñidas (MATSA)	A	Sandfire Resources Ltd	93.000 4,5 Mt/a	Incluido en el Cu
	Los Frailes- Aznalcóllar	B	Grupo México (97,31%), y Magtel (2,69%)	96.000 Zn 35.000 Pb 4.200 Cu ¹¹¹	410 M€ (318 + 1361)
	Toral de Vados	C	Europa Metals Ltd./ Europa Metals Iberia S.L.	16.500t Zn ¹¹² 15.000t Pb 7 t Ag	71 M€ (200 + n.d.)
	PMR ¹¹³	B	First Quantum Minerals Ltd		500 (480 + 420)
PLOMO	Minas Aguas Teñidas (MATSA)	A	Sandfire Resources Ltd	12.000 t Pb 4,5 Mt/a	Incluido en el Cu
	Toral de Vados	C	Europa Metals	Ver Zn	
	Nuevo Linares	I	Kerogen Energy	25.000 (prev)	40 M€ (180 + n.d.)
NÍQUEL	Aguablanca	P	Narcea Recursos	4.100 t Ni (prev) 3.400 t Cu (prev)	
NIOBIO-TÁNTALO	Penouta	B	Strategic Minerals Europe/ Strategic Minerals Spain	246 t Sn 14t Tantalita 14t Columbita	40 M€
	Doade.	C	Strategic Minerals Spain	-	
ESTAÑO	La Parrilla	A	Iberian Resources Spain	400	Incluido en W
	Oropesa	B	Minas de estaño de España	2.440 t Sn 0,8 Mt/a	84 M€ (200 + n.d.)
WOLFRA MIO	Los Santos	P	Almonty		
	La Parrilla	P	Iberian Resources Spain	240 t WO ₃	90 M€ (160 + n.d.)
	Barruecopardo.	A	Saloro, SL.	2.600 t WO ₃ ¹²	70 M€ (180 + n.d.)
	San Finx.y	B	Rafaella Resources/ Pivotal Metals Ltd		
	Varilongo	C			
	Valtreixal.	C	Valtreixal Resources Spain S.L.	506 t WO ₃ 264 t Sn (prev.)	40 M€ (n.d.)
	Abénojar-El Moto	C	Mining Hill's S.L.	-	175+175
LITIO	San José	B	Extremadura New Energies (ENE) ¹¹⁴	19.500 t LiOH 2 Mt/año (prev)	532 M€ (400)
	Las Navas- Cañaverl	C	Lithium Iberia	30.000 LiOH 1,2 Mt/año (prev)	540 M€ (400+1.200)
	Doade-Presqueiras	C	Recursos Minerales Galicia		

¹⁰⁵ Existe también producción de cobre en Orovalle como se puede ver más adelante en la tabla. En 2021, la producción fue de 2.858 toneladas.

¹⁰⁶ En fase de paralización y construcción del nuevo proyecto subterráneo

¹⁰⁷ MATSA incluye tres minas: Aguas Teñidas, Magdalena y Sotiel. 2013-2021.

¹⁰⁸ Directo más indirecto.

¹⁰⁹ Para el caso de Cobre las Cruces ver el apartado del Zn.

¹¹¹ Producción estimada cuando se alcance el régimen normal de operación.

¹¹² Datos deducidos de la información pública del proyecto.

¹¹³ Referido a la producción de Zn de la refinera polimetalúrgica e incluye también Cu, Pb y Ag.

¹¹⁴ Infinity Lithium posee el 75 %.

TIERRAS RARAS	Matamulas	P	Quantum Minería	1.500 tTREO ¹¹⁵	60 M€ (115)
COBALTO	Se explora en Almería, Granada, León, Ciudad Real y Asturias				
GRAFITO	Existen pequeñas explotaciones abandonadas y no se explora				
ORO¹¹⁶	Orovalle	A	Orvana Minerals Corp,	1,47 t Au	(482 + >1000)
	Salave	C	Exploraciones Mineras del Cantábrico	2,43 t Au (prev)	400 M€ 150+(>1000)
	Corcoesto	P	Mineira de Corcoesto S.L.U/ Edgewater		170 M€ (217 + n.d.)
	Isabel	P	Edgewater		
PLATA	Orovalle	A	Orvana Minerals Corp,	2 t Ag	172 M€ 482
	Polimetálicos de la Faja Pírrica	A	Recuperada en la metalurgia del Cu, Pb y Zn	76 t Ag	
	Toral de Vados		Europa Metals	7 t Ag (prev)	
HIERRO¹¹⁷	Alquife	B	Minas de Alquife S.L.U	4.500.000 t min hierro (prev)	200 (1400 D+I)

Proyecto	Cantidad (Mt)				Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Ag (g/t)	Au (g/t)	Ni (%)
	Probadas+ probables	Medidas+ indicadas	Indicadas	Inferidas						
Atalaya Mining. Cerro Colorado 2021	197				0,42					
		258			0,40					
Atalaya Mining Nuevo Proyecto Riotinto										
San Dionisio (cielo abierto)		57,4			0,89	1,12	0,23			
San Dionisio (minería subterránea)				12,4	1,01	2,54	0,62			
San Antonio (minería subterránea)				11,8	1,32	1,79	0,99			
Atalaya Mining. Otros Proyectos de Investigación										
Masa Valverde			16,3		0,66	1,56	0,65	27	0,55	
				73,4	0,61	1,24	0,61	30	0,62	
Majadales				3,1	0,94	3,08	1,43	54	0,32	
Atalaya Mining. Touro		130			0,39					
				46,5	0,37					
Aznalcollar Los Frailes	115				0,33	4,64	2,83	72		
Agua Blanca	3,5				0,6					0,6
Tharsis Mining & Metallurgy										
La Zarza										
Sal Telmo										
Tharsis										
Denarius Metals. Lomero Poyatos				10,7	0,45	1,02	0,41	21	2	
Sandfire. MATSA										

Tabla 37. Proyectos mineros de la Faja Pírrica Ibérica salvo Touro. Fuente: elaboración propia de los autores.

¹¹⁵ Total de tierras raras contenidas.

¹¹⁶ Existen también los proyectos: Lomero Poyatos (C) de Denarius Silver; Alconchel (C) de Atalaya Mining y Narcea Recursos y Dominio de Tharsis (C) de Tharsis Mining and Metallurgy.

¹¹⁷ No se incluye el proyecto de Cehegín (Solid Resources Mines España/ Minework Technologies) por falta de información actualizada. Esta cantidad es el objetivo reconocido por la empresa. Sin embargo, Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas (2022) no daba producción alguna.

Tabla 38. Proyectos mineros no metálicos en España. Nota: D = directo, I = indirecto. Nota: existen otros minerales industriales de elevado valor unitario como el cuarzo que se explota en Galicia, por ejemplo. Fuente: elaboración propia de los autores.

Proyecto Minero	Estado (*)	Propiedad	Producción anual 2021 (t)	Inversión (M€)	Empleo (Directo/Indirecto)
ESTRONCIO (SO₄Sr)					
Minas de Monteive (Granada) Grupo Minero Aurora http://minasdemonteive.es/	A	Canteras Industriales, S.L. (Bruno, S.A.)	26.500 SO ₄ Sr (2020)	n.d.	8 / 24
Solvay Minerales Minas de Escuzar (Granada). https://www.kandelium.com/	A	Kandelium Minerales	88.500 SO ₄ Sr (2020)	n.d.	n.d.
FLUORITA					
Minersa. Mina Cucona, Mina Moscona (Corvera), Mina Emilio (Colunga), Grupo Viesca (Siero) y Grupo Villabona (Llanera). Asturias	A	Minerales y Productos Derivados SA	446.238 ROM 145.000 F ₂ Ca (Contenido)	n.d.	230 / 900
Minera de Orjiva (Sierra de Lújar / Sierra de Gádor)	A	Minera de Órgiva, S.L.	15,5 F ₂ Ca (Contenido)	n.d.	90 / 270
ROCAS FOSFÁTICAS					
Proyecto de Fontenarejos	C	Alcudia	800.00t ROM/año 140.000t de P ₂ O ₅ contenido	n.d.	n.d.
GRAFITO					
Mina de Guadamur (1919-1920, 310 t, 1947-1961, 4.500 t) y mina "La Española" (1943-1947, 530 t) (Toledo) (**)					
El Muyo, Madriguera, Becerril y Ayllón (Segovia)					
Peridotitas de la Serranía de Ronda (Málaga)					
Almonaster la Real, Cortegana, Aroche y Santa Ana la Real (Huelva)					
SALES POTÁSICAS					
Mina de Cabanasses (Suria) y mina de Vilafruns (Balsareny). Barcelona https://www.icliberia.com/	A	ICL Iberia Súrria & Sallent	1.000.000 (prev.)	n.d.	1.100 / 3.000
Mina Muga. Undués de Lerda y Sangüesa (Navarra) https://www.geoalcali.com/muga/	B	Geoalcali S.L.		600	800 / 2.400
MAGNESITAS					
Yacimiento Eugui (Navarra) https://www.magnesitasnavarras.es (***)	A	Magnesitas Navarras, S.A. Grupo mult. Roullie	171.000 MgO	n.d.	275 / 1.100
Yacimiento Borobia (Soria)	A	MAGSOR	106.400 MgO	34,5	85 / 165
Yacimiento Vila de Mouros (Lugo).	A	Magnesitas de Rubián	60.000 MgO	n.d.	50 / 150
ÓXIDOS ROJOS					
Minas de Ojo Negros (Teruel) https://promindsa.com/estrenamos-nueva-web/	A	Productos Minerales para la Industria, SA (PROMINDSA)	7.500 ROM 6.700 t Fe ₂ O ₃ contenido (2019)	n.d.	n.d.
Mina La Salvadora, Priego (Córdoba)	A	Óxidos Rojos Málaga, SA		n.d.	n.d.
Minas de Las Piletas Huéneja (Granada)	A	Óxidos Férricos, S.A.		n.d.	n.d.

3. Sobre la metalurgia española en 2021¹¹⁸

Íntimamente ligada a la actividad minera, se encuentra la metalurgia, que en España constituye una actividad de gran importancia industrial y económica como se verá más adelante. De hecho, la metalurgia muestra una gran actividad tanto la primaria (obtención del metal a partir del mineral que lo contiene) como la secundaria (obtención del metal a partir de las materias primas secundarias, por ejemplo, chatarras) (ver Figura 81).

Metalurgia férrea o siderurgia	Metalurgia no férrea
<ul style="list-style-type: none">• Plantas productoras de acero• Plantas de producción de laminados o de primera transformación	<ul style="list-style-type: none">• Aluminio• Cobre• Zinc• Plomo• Wolframio• Oro• Plata• Estaño• Otros metales en forma de óxidos

Figura 81. La metalurgia en España. Fuente: elaboración propia de los autores.

La metalurgia férrea o siderurgia en España está representada por 22 plantas que producen acero y 50 que lo laminan o realizan la primera transformación. Una de estas acerías es integral (Arcelor Mittal) y las demás son de horno de arco eléctrico. Aunque las acerías se encuentran repartidas por once Comunidades Autónomas, la mayor concentración se localiza en la cornisa cantábrica, fundamentalmente Asturias y el País Vasco (UNESID, 2021).

La producción de acero en España en 2021 fue de 12,7 millones de toneladas (9,1 millones producidas por Arcelor Mittal y 3,6 millones por las instalaciones restantes), que a precios del mercado resultó en una facturación de 23.350 millones de euros y generó unos 26.000 empleos directos y 78.000 indirectos.

Por su parte, Acerinox produjo cerca de 2 millones de toneladas de acero inoxidable en 2021. Su facturación aumentó un 45% con respecto al año 2020 gracias al incremento de precios (tanto de precio base como extra de aleación). Ferroatlántica (actualmente Ferroglobe), produjo ferroaleaciones (ferrosilicio, ferromanganeso y silicomanganeso) en sus cuatro plantas en España, que facturaron 370 M€ y generaron 1.000 empleos directos y 3.000 indirectos.

La metalurgia no férrea produjo en España en 2021 aluminio, cobre, zinc, plomo, wolframio, oro, plata y estaño. Además, se produjeron otros metales en forma de óxidos como la alúmina (Al_2O_3).

Alcoa, en el complejo metalúrgico de San Ciprián (San Cibrao, Lugo), tiene una capacidad de producción de 1,5 millones de toneladas al año de alúmina que destina a la producción de aluminio primario en plantas de Alcoa y de otros productores, así como a clientes externos (nacionales e internacionales) para aplicaciones no metalúrgicas como la industria cerámica y química. Por su parte, la planta de aluminio primario tiene una capacidad de 228.000 toneladas anuales¹¹⁹.

¹¹⁸ Los datos de este apartado proceden de los informes anuales de las empresas del año 2021. No se trata de un listado exhaustivo por lo que los datos no tienen que coincidir exactamente con los recogidos por el INE y que se presentan en el apartado 5.1.

¹¹⁹ La producción de aluminio en España, en el año 2019, fue de 230.000 toneladas (según datos de Statista).

El complejo San Cibrao emplea de manera directa aproximadamente a 1.050 personas, en torno a 450 en la planta de alúmina y cerca de 600 en la planta de aluminio. San Cibrao dispone de puerto, planta de obtención de Al_2O_3 , planta de obtención de aluminio a partir de bauxita importada; principalmente de las minas de Guinea (Boké).

De acuerdo con la web de Alcoa, la producción de aluminio se reanudará en enero de 2024 cuando está previsto que se reinicie el funcionamiento de las series de electrolisis. Se mantiene la actividad en fundición y en la planta de alúmina, para lo que la compañía ha facilitado el plan comercial durante estos años, a razón de 65.000 toneladas anuales de tocho y previsión de venta de 25.000 toneladas anuales de placa de aluminio.

En la metalurgia del cobre, se pueden distinguir empresas como Cobre las Cruces que tienen un proceso integral desde la minería a la fabricación de cátodos de cobre y las que fabrican cátodos y otros productos a partir de concentrados de cobre. Este es el caso de Atlantic Copper, con una producción de 270.000 toneladas de cátodos de cobre y una plantilla media de 755 personas en el año 2021.

La producción de cobre en España que se realiza por procedimiento pirometalúrgico la lleva a cabo Atlantic Copper, en Huelva. Utiliza concentrados minerales importados y locales de las minas que hay en la Faja Pirítica¹²⁰. La producción total en 2021 fue de 275.000 toneladas de cobre (primario) refinado (99,99 % de pureza) que a los precios con tendencia alcista del mercado internacional supusieron una facturación de 2.625 millones de euros. Los empleos directos generados ascendieron a 1.000 y a 3.000 los indirectos.

A las casi 300.000 toneladas de cobre de Atlantic Copper hay que añadir las procedentes, en general de concentrados importados, la producción de minería de CLC, MATSA, y Atalaya Mining, así como una pequeña cantidad en Orovalle. Igualmente, habría que añadir el cobre procedente del reciclado de chatarras.

En 2021, la producción de zinc en España fue de 106.000 toneladas a partir de concentrados minerales importados y la realizó la compañía Asturiana de Zinc, que dispone de unas instalaciones metalúrgicas en San Juan de Nieva en Castrillón (Avilés), con una capacidad de producción de 511.000 toneladas anuales de un zinc con una pureza del 99,995 %. Lo que la convierte en la metalurgia del zinc más relevante de Europa. La producción primaria más la producción secundaria de 35.600 toneladas supuso una producción total de 141.600 toneladas, una facturación de 354 millones de euros y 900 empleos directos y 2.700 indirectos. A la producción de metal procedente de concentrados en Asturiana de Zinc hay que añadir la producción de MATSA.

En España no hay producción primaria de plomo, solo se produce plomo secundario por procesos pirometalúrgicos. La producción fue de 28.000 toneladas que, a los precios de mercado, resultaron en 46 millones de euros generando 100 puestos de trabajo directos y 300 indirectos.

La producción de wolframio en España ascendió a 341 toneladas que, a los precios del mercado, resultaron en una facturación anual de 10,7 millones de euros, con 50 puestos de trabajo directos y 150 indirectos. Por su parte, la producción de oro fue de 2 toneladas que supusieron una facturación de 63 millones de euros, 60 puestos de trabajo directos y 180 indirectos.

La producción de plata alcanzó las 90,7 toneladas que, a los precios de mercado, representaron una facturación de 66,75 millones de euros, 30 puestos de trabajo directos y 90 indirectos.

¹²⁰ Cobre las Cruces produce el metal a partir de mineral español proveniente de su mina, por procedimiento hidrometalúrgico. Su producción alcanzó las 30.000 toneladas que representaron una facturación de 265 millones de euros dando empleo a 400 personas de manera directa y a 1.200 de manera indirecta. La empresa vio reducir su producción (los últimos 10 años fue de 70.000 toneladas) al agotarse la mina a cielo abierto y empezar la preparación de la futura mina subterránea. Actualmente, utiliza mineral acumulado de la mina a cielo abierto.

La producción de estaño en España fue de 147 toneladas que, a los precios del mercado, representaron 6,4 millones de euros y dieron trabajo a 50 personas directamente y a 150 indirectamente.

De manera global, la actividad metalúrgica en España produce 15,7 millones toneladas de metales, factura 28.287 millones de euros anuales y genera 31.890 empleos directos y 95.670 indirectos (es decir 127.200 empleos en total) (Tabla 39).

Actualmente en España hay proyectos en investigación que, de ponerse en operación, podrían, en algunos casos, considerarse con una actividad metalúrgica *ad-hoc* para la obtención de los metales a partir de los minerales que se extraigan. Esto redundaría en la integración en la cadena de valor con las ventajas ya examinadas en el capítulo anterior.

	Producción (miles t)	Facturación (millones de euros)	Empleo directo	Empleo indirecto
Acero	12.700	23.350	26.000	78.000
Acero inoxidable	2.000	0,37	1.000	3.000
Ferroaleaciones				
Al	494	1.235	2.300	6.900
Cu	335	3.155	1.400	4.200
Zn	141,6	354	900	2.700
Pb	28	46	100	300
W	0,341	10,7	50	150
Au	0,002	63	60	180
Ag	0,091	66,75	30	90
Sn	0,147	6,4	50	150
Al₂O₃	0,00064	256	-	-
Total	15.699	28.287	31.890	95.670

Tabla 39. Resumen de la actividad metalúrgica en España en 2021. Fuente: elaboración propia de los autores.

4. Aspectos económicos de la cadena de valor de la minería y la metalurgia en España. Principales variables económicas

A continuación, en la Tabla 40, se presentan datos de la encuesta industrial del Instituto Nacional de Estadística (INE) e información sobre variables relevantes en el análisis de la competitividad¹²¹ para la industria minera no energética y la metalurgia¹²².

¹²¹ Para más detalle sobre estas variables ver (Díaz et al., 2016).

¹²² Los sectores de la Clasificación Nacional de Actividad Económica (CNAE) seleccionados para cubrir la cadena de valor de la minería metálica y la metalurgia se refieren a las categorías: 07 (extracción de minerales metálicos), 08 (otras industrias extractivas), 09 (actividades de apoyo a las industrias extractivas) y 24 (metalurgia, fabricación de productos de hierro y acero y ferroaleaciones).

Tabla 40. Principales parámetros económicos de la minería no energética y la metalurgia en 2019¹²³. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (INE, 2022).

	Empleo (n.º)	Productividad (miles de euros/ empleado)	Costes Laborales por asalariado (miles de €)	Inversiones (miles de euros)	Ventas (miles de euros)	Exportaciones (miles de euros)
071 Extracción de minerales de hierro	50	106	44	1.268	9.962	3.780
072 Extracción de minerales metálicos no féreos	2.280	180	50	154.474	869.126	356.446
081 Extracción de piedra, arena y arcilla	10.916	52	33	111.728	1.733.539	169.535
089 Industrias extractivas no comprendidos en otras partes (n.c.o.p.)	3.021	104	50	118.349	899.856	486.014
099 Actividades de apoyo a otras industrias extractivas	959	63	47	6.748	163.111	30
241 Fabricación de productos básicos de hierro, acero y ferroaleaciones	23.097	75	53	409.344	12.059.602	5.622.670
242 Fabricación de tubos, tuberías, perfiles huecos y sus accesorios, de acero	6.429	58	47	59.375	1.798.114	943.495
243 Fabricación de otros productos de primera transformación del acero	3.287	60	40	19.551	1.312.793	353.032
244 Producción de metales preciosos y de otros metales no féreos	14.556	88	46	317.438	12.822.289	6.749.349
245 Fundición de metales	14.174	59	42	125.548	2.988.679	1.652.028
Total de la industria	2.311.811	69	38	31.035.780	681.317.560	227.859.186

En 2020, un total de 2.629 explotaciones tenían producción en España, de las cuales el 76,3 % se correspondía a la extracción de piedra de cantera, el 16,7 % a rocas ornamentales, el 6 % a minerales industriales, y el 1 % a energéticos y minería metálica (Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas, 2020). La principal caída en el número de empresas se ha producido en el sector 081 Extracción de piedra, arena y arcilla, donde 201 empresas cerraron en el período 2015-2019.

4.1. Empleo

Desde 2005, el sector minero español (Gráfico 8) ha perdido aproximadamente la mitad del empleo que generaba (38.011 en 2005 vs. 17.350 en 2019) (Statista, 2022a) y (Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas, 2020), llegando a suponer en 2019 el 0,75 % del empleo industrial. Entre 2016 y 2018 el empleo directo mantuvo una tendencia ligeramente creciente, para acusar un descenso en 2019, debido, principalmente, al cese de la minería de carbón.

En el sector minero hay empresas multinacionales, empresas estatales nacionales, empresas medianas, pequeñas y empresas *junior*. Cada una de ellas tiene su propia evaluación del riesgo empresarial y sus propias motivaciones de exploración (Regueiro y Espí, 2019).

En el caso de España, el tamaño medio¹²⁴ de las empresas de la industria es reducido, con apenas 12 empleados como promedio. Sin embargo, las empresas de los sectores industriales asociados a la cadena de valor de la minería y la metalurgia son, en general, de mayor tamaño, salvo en el caso de los sectores 071 Extracción de minerales de hierro y en el sector 081 Extracción de piedra, arena y arcilla.

Las empresas de mayor tamaño son las del sector 241 Fabricación de productos básicos de hierro, acero y ferroaleaciones, si bien perdieron tamaño entre 2015 y 2019. Por su parte, las empresas de los sectores

¹²³ Cada fila representa los totales de los sectores. La última fila (Total de la industria) recoge la suma de todos los sectores industriales del país.

¹²⁴ Estimado como cociente entre el número total de empleados del sector y el número de empresas.

072 Extracción de minerales metálicos no féreos y 244 Producción de metales preciosos y de otros metales no féreos han crecido durante el mismo período. En el caso de la minería metálica dos explotaciones cuentan con menos de 100 trabajadores, otra con menos de 500 y las otras cinco superan los 500 empleos (Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas, 2020).

Alrededor del 77 % de las explotaciones mineras contaba en 2020 con menos de 10 trabajadores, suponiendo un 28,2 % del empleo del sector minero. En comparación, las cinco explotaciones con más de 500 trabajadores generaban el 21 % del empleo. Si se tiene en cuenta el número de horas trabajadas, se observa que existe una cantidad significativa de empleo a tiempo parcial en la extracción de piedra de cantera, donde muchas explotaciones mantienen la actividad en función de la demanda, por lo que se trabaja de forma intermitente.

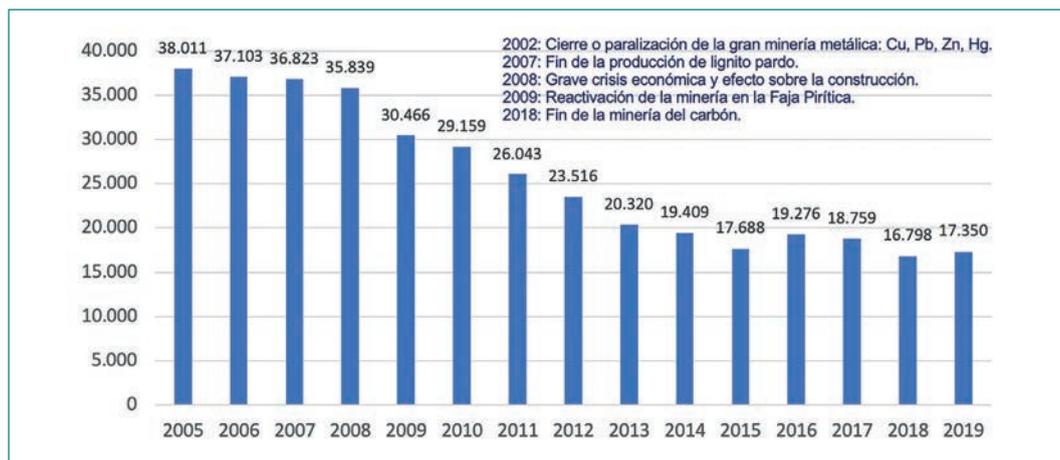


Gráfico 8. Número de trabajadores de la industria extractiva en España de 2005 a 2018. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (Statista, 2022a) y (Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas, 2020).

La mayor parte del empleo se concentra en las comunidades de Andalucía, con el 30 % del total, seguida de Castilla y León (11,3 %), Galicia (10,9 %) y Cataluña (10,7 %). La mayor parte de las plantillas es propia (Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas, 2020). En Andalucía la minería metálica ocupa al 62 % del empleo total¹²⁵; en Galicia la extracción de rocas ornamentales, especialmente la pizarra, da empleo al 60 % del total; en Cataluña la minería de potasas ocupa al 28 % del empleo minero.

En metalurgia, el número de empleados aumentó, fundamentalmente en el sector 241 *Fabricación de productos básicos de hierro, acero y ferroaleaciones*, que ganó 2.512 empleados.

Si se observa el número de horas trabajadas (expresado en miles de horas), se comprueba que existe empleo a tiempo parcial, un tema muy relevante en la explotación de piedra de cantera, donde la actividad depende, de manera bastante acusada, de la evolución de la demanda. Se debe señalar que en el caso de la minería metálica el volumen de personal propio (33,3 %) es inferior al de por ejemplo rocas ornamentales (85 %).

4.2. Productividad laboral

La productividad laboral del sector industrial¹²⁶ (Gráfico 9), medida en términos de valor añadido del sector por empleado, se ha mantenido estable en el período 2015-2019 en el entorno de los 67.000

¹²⁵ Andalucía dispone de un mapa de minerales críticos claves para el desarrollo de las tecnologías limpias (Smartgridsinfo, 2023).

¹²⁶ Representa el promedio de toda la actividad industrial, incluida la de los sectores objeto de análisis en detalle.

euros/ persona. Los sectores 072 *Extracción de minerales metálicos no féreos*, 244 *Producción de metales preciosos y de otros metales no féreos*, 089 *Industrias extractivas* y 241 *Fabricación de productos básicos de hierro, acero y ferroaleaciones*, han mantenido su productividad por encima del promedio industrial, con niveles muy elevados, habiendo superado en algunos casos los 200.000 euros/ persona.

Por su parte, los sectores 081 *Extracción de piedra, arena y arcilla*, el 242 *Fabricación de tubos, tuberías, perfiles huecos y sus accesorios, de acero* y el 245 *Fundición de metales* son los que menor productividad, en términos económicos, han tenido.

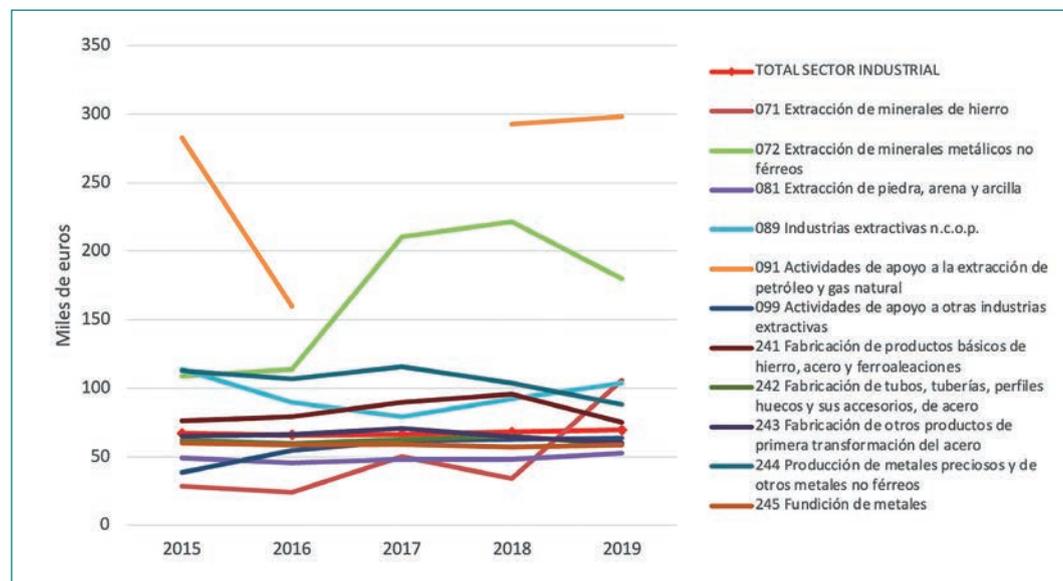


Gráfico 9. Evolución de la productividad laboral en miles de euros por persona. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (INE, 2022).

Como puede observarse, la minería tiene una elevada productividad laboral en comparación con otras industrias. Ello se debe a que el sector es intensivo en el uso de capital físico y se beneficia del capital natural (Australian Productivity Commission, 2008). El crecimiento a largo plazo de la productividad laboral se debe principalmente a una mayor inversión en capital.

4.3. Costes laborales por asalariado y costes laborales unitarios

La industria tiende a ser un sector con un nivel de costes laborales por asalariado en el entorno de los 35.000-40.000 euros, por encima de la renta per cápita promedio de España en 2020 de 27.057,16 euros. En 2019, únicamente el sector 081 *Extracción de piedra, arena y arcilla* tenía unos costes laborales por asalariado por debajo del promedio industrial. El resto de los sectores relacionados con la minería metálica y la metalurgia, tenían unos costes laborales por asalariado superiores.

Los empleados en minería generalmente están mejor pagados que otros trabajadores (Gráfico 10), debido en parte a unos niveles promedio superiores de habilidades entre los mineros y, en parte, a los peligros y las dificultades del trabajo en la mina, incluida la lejanía.

El indicador de costes laborales unitarios, calculado como el cociente entre el coste laboral por asalariado y la productividad, muestra lo que cuesta emplear a un trabajador en función de la productividad de la empresa. Los sectores 071 *Extracción de minerales de hierro*, 072 *Extracción de minerales metálicos no féreos*, 089 *Industrias extractivas* y 244 *Producción de metales preciosos y de otros materiales no féreos*

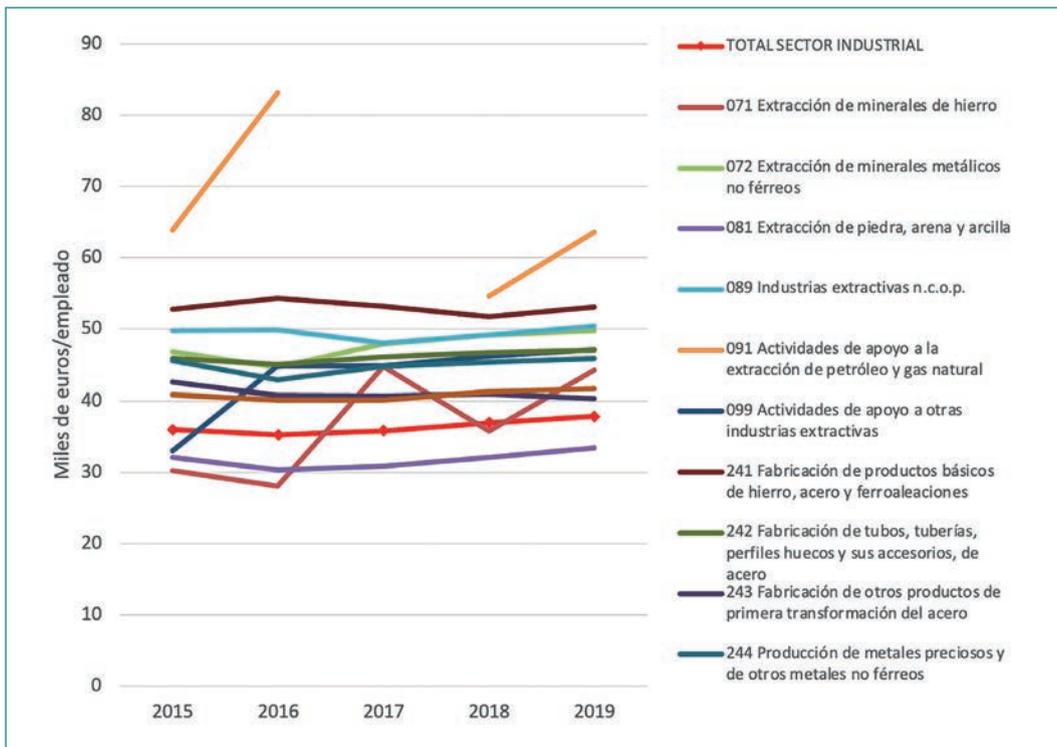


Gráfico 10. Evolución de los costes laborales por asalariado. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (INE, 2022).

son los que están en una situación mejor que el promedio industrial. El resto de los sectores debería plantearse la necesidad de mejorar esta ratio con el fin de garantizar su competitividad en el largo plazo.

4.4. Inversiones

Entre 2015 y 2019, las principales inversiones realizadas por los sectores objeto de estudio, que han representado entre el 4,3 y el 5,1 % de la inversión total de la industria, han sido principalmente en activos materiales y, en particular, en instalaciones técnicas, maquinaria y utillaje y elementos de transporte.

El principal sector inversor es el 241 *Fabricación de productos básicos de hierro, acero y ferroaleaciones*, seguido del 244 *Producción de metales preciosos y de otros metales no férricos* y 072 *Extracción de minerales metálicos no férricos*. Entre ellos llegaron a suponer el 66,4 % de la inversión de los sectores objeto de análisis. En todo caso, no cabe mencionar ninguna trayectoria histórica, al producirse aumentos y reducciones a lo largo del período, que dependen fundamentalmente de las dinámicas de cada sector (Gráfico 11).



Gráfico 11. Evolución de las inversiones por sector. Porcentaje sobre el total de la industria⁹⁶. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (INE, 2022).

¹²⁷ La industria incluye el conjunto de actividades manufactureras de un país.

Las inversiones en activos inmateriales en los sectores objeto de análisis son reducidas. En general, apenas han supuesto más del 10 % de la inversión total de estos. Como excepciones se encuentran en 2019 el sector 071 *Extracción de minerales de hierro* y 072 *Extracción de minerales metálicos no féreos*. Sin embargo, en el primer caso el volumen de inversiones totales fue relativamente reducido (1.268 millones de euros en total, frente a 31.035 millones totales de inversión en la industria el mismo año).

En el caso de la minería, las inversiones se produjeron fundamentalmente en el sector de los minerales metálicos, fundamentalmente cobre, oro/plata y wolframio. En el caso de los minerales no metálicos destacan las inversiones en sales potásicas, glauberita y sal gema. Las mayores inversiones se realizan en las fases de explotación y tratamiento, que representaron en 2019 cerca del 80 % del total nacional. En la fase de investigación, la mitad de las inversiones se realizaron en la minería del cobre.

4.5. Ventas/Exportaciones

En los cinco últimos años, en España, entre el 5,1 y el 5,5 % de las ventas del sector industrial procedieron de los sectores de extracción de minerales metálicos, otras industrias extractivas y de apoyo y de la metalurgia. Los sectores mineros representaron el 0,5 % de las ventas industriales, con un mayor peso del sector de otras industrias extractivas (que no incluyen ni la minería del carbón, gas ni crudo ni la minería metálica, pero sí la piedra, la arcilla y la arena), frente a un 4,5-5% las de la metalurgia. Como puede verse en el Gráfico 12 la evolución no ha sido homogénea, ni ha seguido una tendencia clara.

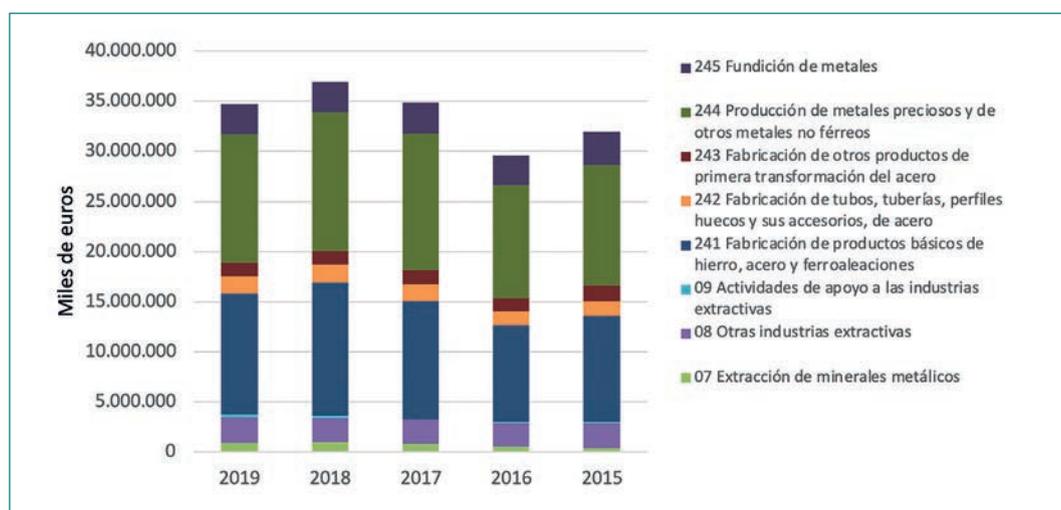


Gráfico 12. Evolución de las ventas por sector. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (INE, 2022).

Sin embargo puede decirse que, en el caso de la metalurgia, aproximadamente la mitad de las ventas se realiza en el propio país (frente al 65-70 % promedio de la industria), entre un 30 y un 35 % del total en países de la UE y el resto en terceros países. Ello pone de relieve un mayor carácter exportador de esta actividad que el resto de la industria nacional.

En el caso de la extracción de minerales metálicos, durante los años 2018 y 2019, las ventas en España rondaron el 60 %, apenas un 5 % se exportó a Estados miembro de la UE y el resto se vendió en terceros países. En otras industrias extractivas, los porcentajes de venta en España fueron muy superiores (alrededor del 75 % y el resto se repartió en un 14 % de ventas a otros Estados miembro de la UE y un 10 % al resto del mundo). La mayor parte de las ventas de las actividades de apoyo a las industrias extractivas se realizaron en el país (alrededor de un 91-98 %).

A diferencia de la industria extractiva, la metalurgia es una actividad claramente exportadora. Situaciones como la actual de importantes aumentos de los precios de la energía afectan a la capacidad competitiva que este sector ha mantenido hasta ahora. Igualmente afectan a la industria extractiva en general.

5. Conclusiones

España tiene producción y experiencia minera en metales básicos (como el cobre, zinc, plomo), en materiales tecnológicos (como estaño y wolframio/ tungsteno) y en metales preciosos (como el oro y la plata). Existe un significativo número de proyectos en fase de desarrollo, o pendientes de autorización o en fase de investigación. El potencial de desarrollo de proyectos mineros de materias primas minerales para la transición energética (i.e. litio, tierras raras) existe, a juzgar por algunos proyectos y por evaluaciones preliminares. Sin embargo, una serie de proyectos se encuentran paralizados por diferentes motivos. Como resultado, se deben desembolsar importantes volúmenes de fondos en adquirir materias primas en el exterior de las que, en ocasiones, se dispone, con el consecuente riesgo de sufrir rupturas en las cadenas de suministro.

Si se llegaran a poner en operación los actuales proyectos en fase de desarrollo o investigación en España y de la actividad metalúrgica *ad-hoc* para la obtención de algunos metales a partir de los minerales que se extraigan, esto redundaría en la integración en la cadena de valor con las ventajas correspondientes ya examinadas en el capítulo anterior.

La metalurgia férrea o siderurgia en España está representada por 22 plantas que producen acero y 50 que lo laminan o realizan la primera transformación. Por su parte, la metalurgia no férrea produjo en España en 2021 aluminio, cobre, zinc, plomo, wolframio, oro, plata y estaño. Además, se produjeron otros metales en forma de óxidos como la alúmina (Al_2O_3).

La minería y la metalurgia son sectores cada vez más automatizados e intensivos en capital. Los últimos años se ha observado una reducción del número de empleados, lo que en parte se ha podido deber a la disminución de la minería energética. En comparación con la industria en general, ambos sectores son altamente productivos y cuentan con unos niveles promedio de costes laborales por asalariado por encima del promedio industrial.

Los datos presentados muestran que ambos sectores deberían ser capaces de mantener su capacidad productiva y ampliarla, para evitar perder una valiosa oportunidad de desarrollar unas actividades industriales, en el contexto de la economía circular, y donde la normativa medioambiental y laboral establecen un marco riguroso que no se aplica en otros países desde los que se importan los minerales y/o productos del metal. Minerales y metales se demandan y demandarán como resultado de los procesos de transición energética y digitalización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



A

Accenture. (2020). The Circular Economy Handbook. Realizing the Circular Advantage. Challenges and Opportunities in the Metals and Mining Industry. Disponible en: <https://youtu.be/dORWEISM2iQ>. (Acceso: febrero de 2022).

Adánez, P. (2022). Caso de estudio: el sentido estratégico en algunos minerales. En *Minerales: una cuestión estratégica en el siglo XXI* Instituto Estratégicos de Estudios Estratégicos (IEEE). Cuadernos de Estrategia 209. Disponible en: [Cuaderno de Estrategia 209. Minerales: una cuestión estratégica en el siglo XXI \(ieee.es\)](#)

Agenda Pública. (2020). El Mundo hacia la Descarbonización Agenda Pública. 7 de noviembre de 2020. Disponible en: <https://agendapublica.es> (Acceso: 25 de junio de 2021).

Álvarez, E. (2023). Nuevas dependencias críticas. ¿Tenemos un plan? Dependencias científicas, tecnológicas, industriales, minerales y logísticas. Reflexiones en torno a la transición energética.

Álvarez, E., y Ortiz, I. (2016). La transición energética en Alemania (Energiewende). Política, transformación energética y desarrollo industrial. Bilbao. Orkestra. Disponible en: - ([deusto.es](#))

Amigo, P. (2022). Así se convirtió una mina de carbón en el lago más grande de España. Edcreativo. Disponible en: [Así se convirtió una mina de carbón en el lago más grande de España \(eldiario.es\)](#)

Andrea Blanco, E. (2020). Introducción a la mineralurgia. Universidad de Cantabria. Disponible en: [Tecnología mineralúrgica. Bloque I. Capítulo 1. Introducción a la mineralurgia \(unican.es\)](#)

Anglo American, Walsh. (n.d.). 6.0. Mantenimiento y monitoreo post cierre. Disponible en: [6.0 MANTENIMIENTO Y MONITOREO POST CIERRE - PDF Free Download \(docplayer.es\)](#)

Aquilar, J.A. (n.d.). Metalurgia extractiva del aluminio. Disponible en: [METALÚRGICA EXTRACTIVA DEL ALUMINIO \(url.edu.gt\)](#)

Araújo, K. (2014). The emerging field of energy transitions: Progress, challenges, and opportunities. *Energy Research & Social Sciences*, March, pp. 112-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.03.002>

Arce, M. (2021). Unos 30 proyectos mineros millonarios están paralizados en España por el "ecologismo hipócrita". *Libre Mercado*. Disponible en: [Unos 30 proyectos mineros millonarios están paralizados en España por el "ecologismo hipócrita" - Libre Mercado](#)

Atalaya Mining. (n.d.). Planta de tratamiento de agua ácida en Touro.

Atalaya Mining. (2022). "Estimación del impacto socioeconómico generado por la actividad de la Mina de Riotinto-Atalaya Mining 2021". Presentación. Disponible: [Documentos \(atalayamining.com\)](#)

Atlas Copco. (2007). Mining Methods in Underground Mining. 2nd Edition, Atlas Copco, Sweden. Editado por Mike Smith.

Australian Productivity Commission. (2008). Productivity in

the Mining Industry: Measurement and Interpretation. Staff Working Paper. Disponible en: [\(16\) \(PDF\) Productivity in the Mining Industry: Measurement and Interpretation \(researchgate.net\)](#)

Avendaño, P.J. (2017). Evaluación de factibilidad técnico-ambiental de una planta de extracción de tierras raras en Chile. Disponible en: [Evaluación de factibilidad técnico-ambiental de una planta de extracción de tierras raras en Chile \(uchile.cl\)](#)

Averda. (2022). Creating a circular economy in the mining sector. Recuperado en enero de 2022. Disponible en: <https://www.averda.com/>

B

Bakas, I., Herczeg, M., Blikra Ve, E., Fråne, A., Youhanan, L., y Baxter, J. (2016). Critical metals in discarded electronics – Mapping recycling potentials from selected waste electronics in the Nordic region Nord 2016:526. Disponible en: [Critical metals in discarded electronics: Mapping recycling potentials from selected waste electronics in the Nordic region \(diva-portal.org\)](#)

Balt, K. y Goosen, R.L. (2020). MSAHP: An approach to mining method selection. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Volume 120. August. DOI ID: <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/1072/2020>

Bartels, R., y Morrison, H. (2019). Gèrens Escuela de Postgrado ¿Puede la minería operar bajo la economía circular? La minería y los metales pueden ser ganadores en la economía circular. Recuperado en febrero de 2022. Disponible en: <https://gèrens.pe>

BBVA. (2023). ¿Qué es la minería sostenible? Desafíos de un sector estratégico. Disponible en: [¿Qué es la minería sostenible? Desafíos de un sector estratégico \(bbva.com\)](#)

Breton, T. (2022). Critical raw materials act: Securing the new gas & oil at the heart of our economy. I blog of commissioner Thierry Breton. Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/STATEMENT_22_5523

Bustillo, M. (2017). Mineral Resources. From Exploration to Sustainability Assessment. Springer. ISSN 2510-1315. DOI 10.1007/978-3-319-58760-8

Bustillo, M.; López, C.; Ruiz, J.; García, P. (2000). Manual de aplicaciones informáticas en minería. ISBN 10: 8493129216

C

CAETS. (2022). Towards low-GHG emissions from energy use in selected sectors. Pendiente de publicación.

Cámara Oficial Mineira de Galicia. (n.d.). España es el país europeo que más leyes aplica a la actividad extractiva. Disponible en: [España es el país europeo que más leyes aplica a la actividad extractiva - Cámara Minera \(camaraminera.org\)](#)

Campos-Martín, J.M., Chica, A., Domine, M.E., García, T., Pawelec, B., Pinilla, J.L., Rojas, S., Serra, J.M., y Suelves, I. (2020). Biocombustibles. N° 58- Grupo Español del Carbón. Disponible en: [BoletínGEC_058-art6.pdf \(gecarbon.org\)](#)

Carrara, S., Alves, P., Plazzotta, B. y Pavel, C. (2020). Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy sys-

tem, EUR 30095 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-16225-4, doi:10.2760/160859, JRC119941. Disponible en: [JRC Publications Repository - Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system \(europa.eu\)](#)

Castilla, J. y Herrera, J. (2012). El proceso de exploración minera mediante sondeos. Madrid. Disponible en: [El Proceso de Exploración Minera Mediante Sondeos - Archivo Digital UPM](#)

Cheatle, A. y Freele, E. (2020). Quo Vadis? Mining, metals, and minerals in a circular economy. *The Northern Miner*, 106. Disponible en: [Quo Vadis? Mining, metals and minerals in a circular economy - The Northern Miner](#)

CIM. (2014) Normes de définitions de l'ICM pour les ressources minérales et les réserves minérales. Disponible en: [cim-definicion-standards_2014_fr.pdf](#) (Acceso: octubre de 2022).

CIM. (2022). CIM Magazine, Taking a circular approach to mining operations. Disponible en: <https://magazine.cim.org/>. (Acceso: febrero de 2022).

Comisión Chilena del Cobre. (2009). Antecedentes para una Política Pública en Minerales Estratégicos: Litio (DE/12/09). Disponible en: [Antecedentes para una Política Pública en Minerales Estratégicos: Litio \(DE/12/09\) - PDF Free Download \(docplayer.es\)](#)

Comisión Chilena del Cobre. (2021). El mercado de litio. Desarrollo reciente y proyecciones al 2030. Disponible en: [Producción y consumo de litio hacia el 2030 edición 2021 versión def.pdf \(cochilco.cl\)](#)

Comisión Europea. (2020). Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Resiliencia de las materias primas fundamentales: trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>

Comisión Europea. (2021). Principios de la UE para unas materias primas sostenibles. Disponible en: [EU principles for sustainable raw materials - Publications Office of the EU \(europa.eu\)](#)

Compound Interest. (2022). The Chemical Elements of a Smartphone. Disponible en: <https://www.compoundchem.com/2014/02/19/the-chemical-elements-of-a-smartphone/>

Consejo de la UE. (2020). Acuerdo de París: el Consejo remite la comunicación sobre la contribución determinada a nivel nacional en nombre de la UE y de los Estados miembros. Disponible en: [Acuerdo de París: el Consejo remite la comunicación sobre la contribución determinada a nivel nacional en nombre de la UE y de los Estados miembros - Consilium \(europa.eu\)](#)

CRIRSCO (n.d.). Welcome to CRIRSCO. Disponible en: <https://www.crirSCO.com> (Acceso: octubre de 2022).

CRIRSCO. (2019). *International Reporting Template for the public reporting of Exploration Targets, Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves*. ICMM, International Council on Mining & Metals.

Crundwell, F.K., Moats, M.S., Ramachandran, V., Robinson, T.G. y Davenport, W.G. (2011). *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals*. Disponible en: [Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals | ScienceDirect](#)

CSA Global. (2022). Mineral resource evaluation of proyecto Masa Valverde. Huelva Province, Spain. NI 43-101 Technical Report. Disponible en: [CSA Global Report Template A4 United Kingdom 2021 \(atalayamining.com\)](#)

Cullbrand, K. y Magnusson, O. (2011). The Use of Potentially Critical Materials in Passenger Cars. Report No. 2012:13. ISSN: 1404-8167. Disponible en: [162842.pdf \(chalmers.se\)](#)

Cuyvers, L., Berry, W., Gjerde, K., Thiele, T. and Wilhem, C. (2018). *Deep seabed mining: a rising environmental challenge*. Gland, Switzerland: IUCN and Gallifrey Foundation. Disponible en: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2018-029-En.pdf>

D

De La Torre, L. y Espí, J.A. (2022). Factores fundamentales de la formación de precios en las materias primas minerales con visión estratégica internacional. En *IEEE Cuadernos de Estrategia en Minerales: una cuestión estratégica en el siglo XXI*. N° 209. Disponible en: [IEEE - CE 209 Minerales: Una Cuestión Estratégica en el siglo XXI](#)

De la Torre, L., Espí, J. A. y Romero, P. (2022) Calificaciones económicas y tecnológicas de la nueva minería metálica de Iberia basadas en criterios de sostenibilidad. Disponible en: <https://minasyenergia.upm.es/>

Delgado, M., Porter, M.E. y Stern, S. (2014). Defining clusters of related industries. NBER Working Paper Series. Disponible en: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w20375/w20375.pdf

DERA. (2016). *Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016*. – DERA Rohstoff informationen 28: 353 S., Berlin. Disponible en: https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Downloads/Studie_Zukunftstechnologien-2016.pdf;jsessionid=69AF-2CA7D-87C8AEE74782EFF3D20DB15.1_cid284?__blob=publicationFile&v=5

DERA. (2021). Raw materials for emerging technologies. A commissioned study. DERA Rohstoffinformationen. ISBN: 978-3-948532-62-8 (pdf), ISSN: 2193-5319. Disponible en: [DERA Rohstoffinformationen 50 \(2021\). Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021 \(deutsche-rohstoffagentur.de\)](#)

Díaz, A. C., Larrea, M., Kamp, B. y Álvarez, E. (2016). *Precios de la energía y competitividad industrial*. Orkestra. Bilbao. Disponible en: www.orkestra.deusto.es

E

E&MJ. (2021). *Global Mining Investment Outlook*. Disponible en: [2021 Global Mining Investment Outlook | E & MJ \(e-mj.com\)](#)

Eggert, R.G. (2010). Mineral exploration and development: risk and reward. International Conference on Mining, "Staking a Claim for Cambodia," Phnom Penh, Cambodia, 26-

- 27 May 2010. Disponible en: [MINERAL EXPLORATION AND MINE DEVELOPMENT: \(miningnorth.com\)](http://miningnorth.com)
- EIT Raw Materials (2022). Circular economy. Disponible en: Circular economy - EIT RawMaterials
- Elements. (2021). The biggest mining companies in the world in 2021. Disponible en: [The Biggest Mining Companies in the World in 2021 \(visualcapitalist.com\)](http://The Biggest Mining Companies in the World in 2021 (visualcapitalist.com))
- Elez, J. y Corral, F.J. (2019). Resumen del mercado mundial del grafito y prospectiva de los yacimientos españoles. *Boletín Geológico y minero* 130 (1) pp. 27-46.
- Ellen MacArthur Foundation. (2022). Circular economy introduction. Disponible en: <https://ellenmacarthurfoundation.org>
- El Valle del Boinás. (2023). Cortas de Boinás Este, Oeste y el Valle en extracción.
- Espí, J.A. y de La Torre, L. (2013). Factors influencing metal price selection in mining feasibility studies. *Mining Engineering*. Vol. 65, No. 8. Disponible en: Factors influencing metal price selection in mining feasibility studies - Archivo Digital UPM
- Espí, J.A., de La Torre, L. y Romero P. (2021). La minería metálica española del año 2020 y la definición económica, tecnológica y sostenible de sus proyectos. 2020. *Industria y Minería*. Revista del Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas de España, N.º 410. Disponible en: [Maquetación 1 \(germ.com\)](http://Maquetación 1 (germ.com))
- European Cluster Collaboration Platform. (ECCP). (n.d.). Map industrial clusters and partners. Disponible en: <https://reporting.clustercollaboration.eu/>
- European Commission. (2014). Commission Staff Working Document. Progress Report on the Roadmap to a Resource Efficient Europe Accompanying the document Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Towards a circular economy: a zero waste for Europe. Disponible en: [untitled \(parlament.gv.at\)](http://untitled (parlament.gv.at))
- European Commission. (2017). Moving towards a circular economy with EMAS. Bruxelles. European Commission –DG Environment – B1 Sustainable Production, Products & Consumption. doi:10.2779/463312. Disponible en: https://ec.europa.eu/environment/emas/pdf/other/report_EMAS_Circular_Economy.pdf
- European Commission. (2019). El Pacto Verde Europeo. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. 11 de diciembre de 2019. Disponible en: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es (Acceso: 10 de junio de 2021)
- European Commission. (2020a). Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Critical raw materials resilience: Charting a path towards greater security and sustainability. COM/2020/474 final. Brussels: Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>
- European Commission. (2020b). Critical materials for strategic technologies and sectors in the UE, a foresight. ISBN 978-92-76-15336-8. Disponible en: [CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf \(europa.eu\)](http://CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf (europa.eu))
- European Commission. (2021a). Circular Economy Action Plan. Disponible en: <https://ec.europa.eu/environment>
- European Commission. (2021b). EU policy on securing access to sustainable raw materials. EU principles for sustainable raw materials. Disponible en: Nyberg-2021.03.29-Webinar-Eurogypsum-2.pdf
- European Commission. (2021c). Guidelines for Mine Closure Activities and Calculation and Periodic Adjustment of Financial Guarantees. Disponible en: [Guidelines for mine closure activities and calculation an periodic adjustment of financial guarantees - Publications Office of the EU \(europa.eu\)](http://Guidelines for mine closure activities and calculation an periodic adjustment of financial guarantees - Publications Office of the EU (europa.eu))
- European Commission (2022a). Índice de la Economía y la Sociedad Digitales (DESI) 2022. España. Disponible en: [DESI 2022 España.pdf \(espanadigital.gob.es\)](http://DESI 2022 España.pdf (espanadigital.gob.es))
- European Commission. (2022b). *EU strategic dependencies and capacities: Second stage of in-depth reviews*. Brussels. Disponible en: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/48878>
- European Commission. (2023a). Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age. Disponible en: [The Green Deal Industrial Plan \(europa.eu\)](http://The Green Deal Industrial Plan (europa.eu))
- European Commission. (2023b). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020
- European Commission. (2023c). Annexes to the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020
- European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Bobba, S., Claudiu, P., Huygens, D., et al., (2018). Report on critical raw materials and the circular economy, Publications Office, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/167813>
- European Innovation Partnership on Raw Materials. (2021). Raw materials scoreboard. Belgium. Disponible en: https://www.eramin.eu/sites/default/files/docs/et0320656enn_en_.pdf
- European Institute of Innovation and Technology. (2021). EIT raw materials strategic agenda (2021-2027). Berlín. Disponible en: https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2021/04/Annex-1-EIT-RawMaterials_Strategic-Agenda_2021-2027.pdf
- European Parliament. (2021). New EU regulatory framework for batteries Setting sustainability requirements. Disponible en: [New EU regulatory framework for batteries \(europa.eu\)](http://New EU regulatory framework for batteries (europa.eu))

European Union External Action Service - EEAS. (2018). Economía circular: UE apuesta por este 'cambio de mentalidad' en la sociedad. Disponible en: <https://eeas.europa.eu>

Extremadura Energies. (n.d.). El proyecto. Disponible en: [El proyecto - Extremadura New Energies](#)

F

Foro Económico Mundial. (2016). Cartografía de la minería en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible: un atlas. Disponible en: [Mapping Mining to the SDGs: An Atlas | United Nations Development Programme \(undp.org\)](#)

Foro Nuclear (2020). El uranio. Reservas y suministro a las centrales nucleares. Disponible en: [¿Qué es el uranio? \(foronuclear.org\)](#)

Franco, S., Murciego, A., Salado, J.P., Sisti, E. y Wilson, J. (2021). In European Cluster Collaboration Platform (ECCP). (Ed.), European cluster panorama 2021. Leveraging clusters for resilient, green, and digital regional economies. Disponible en: https://clustercollaboration.eu/sites/default/files/2021-12/European_Cluster_Panorama_Report_0.pdf

Fraser Institute. (2018). Annual Survey of Mining Companies: 2017. Disponible en: [Annual Survey of Mining Companies: 2017 | Fraser Institute](#)

Fundación Chile. (2022). Uso sustentable de los recursos. Disponible en: <https://fch.cl/>

Fundación Cotec para la innovación. (2019). Informe Cotec Economía Circular (2019). Disponible en: <https://cotec.es/>

Fundación Naturgy. (2022). Reciclaje de fotovoltaica, eólica y baterías en Europa. Una oportunidad para la recuperación de materias primas críticas. Disponible en: [Reciclaje de eólica, fotovoltaica y baterías en Europa: una oportunidad para la recuperación de materias primas críticas - Fundación Naturgy \(fundacionnaturgy.org\)](#)

G

Garcés, I. (n.d.). La industria del Litio en Chile. Universidad de Antofagasta. Disponible en: https://intranetua.uantof.cl/salares/litio_y_derivados.pdf

Geoera. (2023). Establishing the European Geological Surveys Research Area to deliver a Geological Service for Europe. Disponible en: [GeoERA - Establishing the European Geological Surveys Research Area to deliver a Geological Service for Europe](#)

Gil, A. (2022). España halla 13 minerales útiles para descarbonización ¿seremos autosuficientes? Economía3. Disponible en: [España halla 13 minerales útiles para descarbonización ¿Suficiente? \(economia3.com\)](#)

Global Energy. (2021). Promete Biden reducir en un 50 % las emisiones de gases de efecto invernadero de EE.UU para 2030. 22 de abril de 2021. Disponible en: <https://globalenergy.mx/noticias/electricidad/electricidad-internacionales/promete-biden-reducir-en-un-50-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-de-ee-uu-para-2030/> (Acceso: 25 de Junio de 2021).

Gobierno de España, Vicepresidencia cuarta del Gobierno, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). I Plan de Acción de Economía Circular 2021-2023 de la estrategia española de Economía Circular. Disponible en: [i_plan_accion_eco_circular_2021_2023.pdf \(giec.es\)](#)

Gobierno de Perú y Ministerio de Energía y Minas. (2021). Boletín estadístico minero 2021. Disponible en: [Boletín Estadístico Minero Diciembre 2021 - Informes y publicaciones - Ministerio de Energía y Minas - Gobierno del Perú \(www.gob.pe\)](#)

Govreau, J.F. (2021). Global Mining Investment Outlook. (S. Fiscor, Ed.). Eng Min J 222(1):24-29 Disponible en: <https://www.e-mj.com/flipbooks/january-2021/?showpage=26>

Gutiérrez, J.E., Delgado, A., Cerdán, C. y Chapman, E. (2014). Conciliación en minería subterránea. Procedimientos y aplicaciones. Fortuna Silver Mines, Inc. Disponible en: [Conciliación en Minería Subterránea: Procedimientos y Aplicaciones \(slideshare.net\)](#)

H

Herrera, J. y Pla, F. (2006). Métodos de minería a cielo abierto. E.T.S.I. Minas (UPM). DOI:10.20868/UPM.book.10675

Hirsh, R. F. y Jones, C. F. (2014). History's contributions to energy research and policy, 1. 106-111. Energy Research and Social Sciences, 1, pp.106-111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.02.010>

Hood, C. (2011). Summing up the parts. Combining policy instruments for least-cost climate mitigation strategies (Information Paper ed.) International Energy Agency (IEA). Disponible en: [Summing the Parts: Combining Policy Instruments for Least-cost Climate Mitigation Strategies \(IEA, 2011\) | Partnership for Market Readiness \(thepmr.org\)](#)

Huang, Z. (1990). Lead-Zinc'90. The Minerals, Metals and Materials Society (TMS). Warrendale. En Sancho Martínez (2000). Metalurgia del zinc.

I

Iberdrola. (2021). Puertollano Green Hydrogen Plant. Iberdrola builds the largest green hydrogen plant for industrial use in Europe. Disponible en: [Puertollano green hydrogen plant - Iberdrola](#)

ICMM. (2012). In Brief. The role of mining in national economies. Mining's contribution to sustainable development. Disponible en: https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/social-performance/2012/research_romine-1.pdf

ICMM. (2020). Role of mining in national economies mining contribution index (MCI) 5th edition. "Role of Mining in National Economies" pdf. Disponible en: <https://www.icmm.com/en-gb/research/social-performance/mci-5-2020>

ICSG. (2022). The world copper factbook 2022. Disponible en: [Copper Factbook - International Copper Study Group \(icsg.org\)](#)

IDRA. (2022). Welcome to the era of giga press. Disponible en: [Gigapress | Die-casting machine | Idra Group](#)

IEA. (2021). The role of critical minerals in clean energy transitions. France. Disponible en: www.iea.org

Iglesias, C., Martínez, J. y Taboada, J. (2018). Automated vision system for quality inspection of slate slabs. *Computers in industry*. Vol 99, pp. 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.com-pind.2018.03.030>

IGME. (1997). Manual de evaluación técnico-económica de proyectos mineros de inversión.

IGN. (2019). España en Mapas. Una síntesis geográfica. pág. 276-277. Disponible en: [Instituto Geográfico Nacional \(ign.es\)](https://www.ign.es)

IHS Markit. (2022). The future of copper. Will the looming supply gap short-circuit the energy transition? Disponible en: [The-Future-of-Copper_Full-Report_14July2022.pdf \(ihsmarkit.com\)](https://www.ihsmarkit.com/future-of-copper-full-report-14-july-2022.pdf)

IIED. (2002). *Breaking New Ground: Mining, Minerals and Sustainable Development*. ISBN: 1853839078. Disponible en: <https://www.iied.org/9084iied>

IISD. (2019). Local Content Policies in the Mining Sector: Scaling up local procurement. Disponible en: [Local Content Policies in the Mining Sector: Scaling up local procurement | International Institute for Sustainable Development \(iisd.org\)](https://www.iisd.org/publications/local-content-policies-in-the-mining-sector-scaling-up-local-procurement)

INCOTEC. (2020). El papel de la digitalización de las empresas españolas y España Digital 2025. Disponible en: <https://www.incotec.es/blog/papel-digitalizacion-empresas-espanolas/>

INE. (2022). Estadística estructural de empresas: sector industrial. Resultados. Disponible en: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736143952&menu=resultados&idp=1254735576715

INFACT Project. (2018). Online-survey of public opinion in Finland, Germany, and Spain. Disponible en: https://www.infactproject.eu/wp-content/uploads/2018/06/INF_DIA_D_2.4_Survey_Public_Opinion_final.pdf

Inostroza Flores, N. (2017). Análisis Multivariable de generación de cortocircuitos y evaluación preliminar de tecnología mat® para su detección temprana. CODELCO División Chuquicamata. Disponible en: [Tesis_Analisis_multivariable_de_generacion.image.Marked.pdf \(udec.cl\)](https://www.udec.cl/tesis/tesis_de_generacion.image.Marked.pdf)

IRENA. (2022). Critical Materials For The Energy Transition: Rare Earth elements. Disponible en: [Critical Materials For The Energy Transition: Rare Earth elements \(irena.org\)](https://www.irena.org/publications/2022/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition-Rare-Earth-Elements)

J

Jackisch, R., Lorenz, S., Zimmermann, R., Möckel, R. y Gloaguen, R. (2018) Drone-Borne Hyperspectral Monitoring of Acid Mine Drainage: An Example from the Sokolov Lignite District. *Remote Sens*. <https://doi.org/10.3390/rs10030385>

Jacobs, J. y Weber-Youngman, R.C.W. (2017) A technology map to facilitate the process of mine modernization throughout the mining cycle. *The Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. V.117. July 2017. Disponible en: [A technology map to facilitate the process of mine modernization throughout the mining cycle \(scielo.org.za\)](https://www.scielo.org.za/journal/article/view/117-3)

Jares, I. (2022). 3D model for an uranium deposit. 160 pág. Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo. Trabajo fin de Grado.

JORC. (2012). *The JORC Code: Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves*. AusIMM The Minerals Institute.

K

Kesler, E. y Simon, A. (2015) *Mineral Resources, Economics, and the Environment*. Cambridge University Press, Cambridge. 434 p. Disponible en: [Geologos-22-3-Mineral-Resources.pdf](https://www.cambridge.org/core/books/mineral-resources-economics-and-the-environment)

L

Lacy, P.; Long, J.; Spindler, W. (2020). The circular economy handbook. *Realizing the Circular Advantage*. Palgrave Macmillan. <https://doi.org/10.1057/978-1-349-95968-6>

Larrea, M. y Cisneros, J. (2023). Evolución y riesgos asociados de los precios de materias primas críticas para la transición energética. *Boletín Económico de ICE*. 3155. Disponible en: [Ministerio de Industria, Comercio y Turismo - Revistas ICE](https://www.ice.es/revistas/boletin-economico)

Leonida, C. (2022). The Intelligent Miner. *Circular Mining: As Without, So Within*. Disponible en: <https://theintelligentminer.com/> (Acceso: February 2022).

Llamas, J.F. (2020). El cambio climático, las tecnologías limpias y la minería en Álvarez, R., Ordóñez, A. (Coords.) *Recursos minerales y medio ambiente: una herencia que gestionar y un futuro que construir: libro jubilar del profesor Jorge Loredó* ISBN 978-84-17445-95-9, págs. 265-276.

López Jimeno, C. (2007). El recorrido de los minerales. Comunidad de Madrid.

López Jimeno, C. (2022). La cuarta revolución industrial y la digitalización en el sector extractivo. Fuego editores. *Rocas y Minerales* 596. Abril. Disponible en: [La cuarta revolución industrial y la digitalización en el sector extractivo - Issuu](https://www.fuegoeditores.com/la-cuarta-revolucion-industrial-y-la-digitalizacion-en-el-sector-extractivo)

López Jimeno, C.; García, P. y Pazos, D. (2022). *Manual de minería a cielo abierto*. Grupo de proyectos de ingeniería.

López-Jimeno, E. (2022). 130 años de la historia de la minería metálica. Madrid. Disponible en: [130 Años de Historia en la Minería Metálica a Cielo Abierto by ingeominas.es - Issuu](https://www.ingeominas.es/130-anos-de-la-historia-de-la-mineria-metalica)

M

Mancini, L., Vidal Legaz, B., Vizzarri, M., Wittmer, D., Grassi, G. y Pennington, D. (2019). Mapping the role of Raw Materials in Sustainable Development Goals, EUR 29595 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-08385-6, doi:10.2760/026725, JRC112892. Disponible en: [JRC Publications Repository - Mapping the role of Raw Materials in Sustainable Development Goals \(europa.eu\)](https://publications.jrc.ec.europa.eu/publication/?id=JRC112892)

Martínez, P. (2019). *Tecnología Mineralúrgica. Tema 1. Introducción*. Universidad Politécnica de Cartagena.

McKinsey & Company (2020). The mine-to-market value chain: A hidden gem. Disponible en: [The mining value chain: A hidden gem | McKinsey](https://www.mckinsey.com/industries/mining-and-metals/our-insights/the-mine-to-market-value-chain-a-hidden-gem)

McKinsey & Company (2021). Net-zero power. Long duration energy storage for a renewable grid. Disponible en: [Net-zero power: Long-duration energy storage for a renewable grid | McKinsey](https://www.mckinsey.com/industries/renewable-energy/our-insights/net-zero-power-long-duration-energy-storage-for-a-renewable-grid)

Miller, C. A., Richter, J. y O'Leary, J. (2015). Socio-energy systems design: A policy framework for energy transitions. *Energy Research and Social Sciences*, 6, pp.29-40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.11.004>

Minerals Canada. (2019). The Canadian minerals and metals plan. doi:978-0-660-29369-1. Disponible en: https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/CMMP/CMMP_The_Plan-EN.pdf

Minería Sostenible de Galicia. (2022). Plataforma Minería Sostenible. Disponible en: <https://minariasostenible.gal/es/inicio/>

MinEx Consulting. (2017). Recent Trends and Outlook for Global Exploration. PDAC 6th March 2017. Disponible en: [Recent Trends and Outlook for Global Exploration – MINEX CONSULTING](#)

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2022). Hoja de ruta para la gestión sostenible de Materias Primas Minerales. Disponible en: [Hoja de ruta para la gestión sostenible de materias primas minerales \(miteco.gob.es\)](#)

Miteco. (2020). Plan nacional integrado de energía y clima 2021-2030. Madrid. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/images/es/pniecconpleto_tcm30-508410.pdf

Moratilla, Y. (n.d.). Materias primas críticas/estratégicas.

Moritz, T., Ejdemo, T., Soderholm, P. y Warell, L. (2017). "The local employment impacts for mining: an econometric analysis of job multipliers in northern Sweden". *Mineral Economics* (2017) 30:53-65. DOI: 10.1007/s13563-017-0103-1.

Morris, A. (2020). The circular economy and mining – myths and opportunities. Disponible en: <https://www.ausimm.com/bulletin/bulletin-articles> (Acceso: enero de 2022).

Moss, R.L., Tzimas, E., Willis, P., Arendorf, J., Espinoza, L.T., et al., (2013). Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Disponible en: <http://www.reeminerals.no/images/Marketing/Presseartikler/Critical Metals Decarbonisation small.pdf>.

Mundo GEO. (2021). Las materias primas críticas de la Unión Europea. Disponible en: https://www.mundo-geo.es/conocimiento/materias-primas-criticas-union-europea_236241_102.html

N

Naciones Unidas. (n.d.) Objetivos de Desarrollo Sostenible. Disponible en: [Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible \(un.org\)](#)

Naciones Unidas. (2021). Acción por el Clima. «El Acuerdo de París.» n.d. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement> (Acceso: 20 de junio de 2021).

Narrea, O. (2018). La minería como motor de desarrollo económico para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 8, 9, 12 y 17. Primera edición Lima, septiembre 2018. Consorcio de Investigación Económica y Social-CIES. Disponible en: agenda_2030_la_mineria_como_motor_de_desarrollo_economico_para_el_cumplimiento_de_los_ods_89_12_y_17.pdf (up.edu.pe)

Neves, C. (2022). MES and Integrated CAPA. Critical Manufacturing. Disponible en: [Critical Manufacturing - MES and Integrated CAPA](#)

Nordensvärd, J. y Urban, F. (2015). The stuttering energy transition in Germany: Wind energy policy and feed-in tariff lock-in. *Energy Policy*, Volume 82, pp. 156-165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.03.009>

NI 43-401. (2011). *National Instrument 43-101 Standards of Disclosure for Mineral Projects, Form 43-101F1 Technical Report and Related*.

Nova Copper. (2016). Files NI. 43-101. Technical Report on the Bornite Project, Alaska. Disponible en: <https://trilogymetals.com/news-and-media/news/novacopper-files-ni-43-101-technical-report-on-the-bornite-project-alaska-1/>

Nuclear Energy Agency (2020). Uranium 2020: Resources, Production and Demand. IAEA and NEA. Disponible en: [Nuclear Energy Agency \(NEA\) - Uranium 2020: Resources, Production and Demand \(oecd-nea.org\)](#)

O

O'Connor, P. A. (2010). Energy transitions. The Pardee Papers, N° 12, November. Disponible en: [The Pardee Papers, No. 12, November 2010 | The Frederick S. Pardee Center for the Study of the Longer-Range Future \(bu.edu\)](#)

One Stone Consulting. (2021). Importance of the exploration companies to the mining industry. Disponible en: https://www.at-minerals.com/en/artikel/at_Importance_of_the_exploration_companies_to_the_mining_industry_3374779.html

Ore Reserves Engineering. (2022). Technical Report on the Riotinto Copper Project, ORE, 2022). Disponible en: [Microsoft Word - Technical Report on the Riotinto Project - Sept2022_FINAL \(atalayamining.com\)](#)

Orica (2022). Sistemas de iniciación. Disponible en: [Sistemas de Iniciación \(oricamining.com\)](#)

Orkestra. (2021). Informe de competitividad del País Vasco. Construir la competitividad al servicio del bienestar. Disponible en: [Informe de Competitividad del País Vasco 2021 - Orkestra Instituto Vasco de Competitividad \(deusto.es\)](#)

OVACEN. (2013). Infografías en energías renovables. Aprende a base de imágenes. Disponible en: [Infografías en energías renovables aprende a base de imágenes \(ovacen.com\)](#)

P

PDAC. (2021). Mineral Finance 2022: A Critical Year for the Mineral Industry. Disponible en: [Mineral Finance 2022 \(pdac.ca\)](#)

Peelman, S., Sun, Z.H.I, Sietsma, J. y Yang, Y. (2015). Leaching of rare earth elements: past and present en Borges de Lima, I. y Leal Filho, W. (Eds.). *Rare Earths Industry Technological, Economic and Environmental Implications*. Elsevier. Chapter 21, 1st Edition. Disponible en: [\(10\) LEACHING OF RARE EARTH ELEMENTS: REVIEW OF PAST AND PRESENT TECHNOLOGIES | Request PDF \(researchgate.net\)](#)

Peña, C., Espí, J. A., Maldonado, A. y Coullaut, J. L. (2021). La minería metálica y subterránea española del año 2020-21 y su situación después del COVID-19. *Industria y Minería*. Revista del Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas de España, N.º 412.

PERC asbl. (2021). *PERC Reporting Standard: Pan-European Standard for the Public Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves*.

Piceros, E. (n.d.). *Metalurgia extractiva del litio*. Universidad Arturo Prat. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Iquique, Chile. Disponible en: [Metalurgia Del Litio | PDF | Litio | Batería \(electricidad\) \(scribd.com\)](#)

Pinchuk, A., Tkalenko, N. y Marhasova, V. (2019). Implementation of Circular Economy Elements in the Mining Regions. En I. Symposium (Ed.). 105, pág. 6. E3S Web Conf. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910504048>

Piron, G. (2019). *La guerra de los metales raros. Les Liens qui Libèrent*. ISBN: 978-84-9942-843-7.

Plataforma Minería Sostenible de Galicia (n.d.). *Minería Sostenible de Galicia*. Disponible en: <https://minariasostible.gal/es/inicio/>

Porter, M.E. (1998). *Clusters and the New Economics of Competition. Government Policy and Regulation*. Disponible en: [Clusters and the New Economics of Competition \(hbr.org\)](#)

Prego, R. (2019). ¿Qué sabemos de las tierras raras? CSIC.

Prego, R. (2021). Las tierras raras, una pieza clave en el puzzle de la energía. En Instituto Español de Estudios Estratégicos; Comité Español del Consejo Mundial de la Energía y Club Español de la Energía, Energía y Geostrategia 2021. Disponible en: [IEEE - Las tierras raras, una pieza clave en el puzzle de la energía \(reedición\).- Ricardo Prego Reboredo](#)

ProfesionalesHoy. (2021). Sandvik lanza el nuevo jumbo de túneles automatizado DT923i. Disponible en: [Sandvik lanza el nuevo jumbo de túneles automatizado DT923i | Canteras y Explotaciones \(profesionaleshoy.es\)](#)

Q

Quezada, F. (n.d.). Obtención del cobre. Fernando Quezada Pérez. Disponible en: [Fernando Quezada Pérez MV71 - ppt video online descargar \(slideplayer.es\)](#)

R

Rademaekers, K., Widerberg, O., Svatikova, K., van der Veen, R., Triple E Consulting Eleonora Panella, Milieu Ltd. (2015). *Technology options for deep-seabed exploitation. Tackling economic, environmental, and societal challenges*. STOA. European Parliament Research Service. DOI 10.2861/464059

Regueiro, M. y Espí, J. A. (2019). The returns on mining exploration investments. *Boletín Geológico y Minero*, 130 (1), 161-180. doi:DOI: 10.21701/bolgeomin.130.1.010

Regueiro, M. y Alonso-Jiménez, A. (2021). Minerals in the future of Europe. *Mineral Economics*, 34, 209-224. doi:<https://doi.org/10.1007/s13563-021-00254-7>

Reinsel, D., Gantz, J. y Ryding, J. (2018). *Data Age 2025: The digitalization of the world from edge to core*. International Data Corporation, No. November 2018, p. 28. Disponible en: [The Digitization of the World from Edge to Core \(seagate.com\)](#)

Rendu, J. (2014). *An introduction to Cut-off grade estimation, 2nd ed.* Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc (SME).

Reuter, M.A. y Schaik, A.V. (2015). Product-Centric Simulation-Based Design for Recycling: Case of LED Lamp Recycling. *J. Sustain. Metall.* (2015) 1:4-28. <https://doi.org/10.1007/s40831-014-0006-0>

Ritchie, H. (2020). Where do global greenhouse gas emissions come from? Our World in Data. Disponible en: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-seg-ráfico> Gráfico 5ctor

Ritchie, H. y Roser, M. (2020). How are greenhouse gas emissions and concentrations changing? Disponible en: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>

Rodríguez, G. (2016). Selección del método de minado según Nicholas. Disponible en: [Selección del método de minado según Nicholas - Centro Geotécnico Internacional \(centrogeotecnico.com\)](#)

Rodríguez-Terente, L.M. (2007). *Las Mineralizaciones Auríferas de la Granodiorita de Salave, Tapia de Casariego (Asturias)*. Tesis.

Rogge, K. S., Kern, F. y Howlett, M. (2017). Conceptual and empirical advances in analyzing policy mixes for energy. *Energy Research & Social Sciences*, Volume 33, pp. 1-10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.025>

Rubel, H., Schmidt, M. y Meyer, A. (2017). The Urgency—and the Opportunity—of Smart Resource Management. BCG. Disponible en: [The Urgency—and the Opportunity—of Smart Resource Management \(bcg.com\)](#)

Rzhevsky, V.V. (1987). *Opencast Mining Technology and Integrated Mechanization*.

S

Sagredo Gómez, F.A. (2021). Alternativa tecnológica para el ahorro de agua y aumento en la recuperación de cobre en procesos hidrometalúrgicos. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/182258/Alternativa-tecnologica-para-el-ahorro-de-agua-y-aumento-en-la-recuperacion-de-cobre-en-procesos-hidrometalurgicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sancho, J.P., del Campo, J.J. y Grijothheim, K.G. (1994) *La Metalurgia del aluminio*. Aluminium-Verlag. ISBN: 9783870172398

Sancho, J., Verdeja, L.F. y Ballester, A. (2000). *Metalurgia Extractiva. Vol II. Procesos de Obtención*. Editorial Síntesis, S.A. ISBN 9788477388036

Schäfer, B. (2022). First French presidency conference: A stronger industry for a more autonomous Europe. A keynote speech. Paris. Disponible en: <https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2022/01/EIT-RawMaterials-CEO-Bernd-Schafer-speech-at-first-French-Presidency-Conference.pdf>

Schüler, D., Carstens, J. y Farooki, M. (2018). STRADE. Strategic dialogue on sustainable raw materials for Euro-

pe. Towards new paths of raw material cooperation - renewing EU partnerships. Germany. Disponible en: https://www.stradeproject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/STRADE_Final_Report_2018.pdf

Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas. (2020). Estadística minera de España 2019. Disponible en: <https://energia.gob.es/mineria/Estadistica/Paginas/Consulta.aspx>

Secretaría de Estado de Energía, Dirección General de Política Energética y Minas. (2022). Estadística minera de España 2020. Disponible en: <https://energia.gob.es/mineria/Estadistica/Paginas/Consulta.aspx>

Sinclair, R.J. (2005). The Extractive Metallurgy of Zinc. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy 2005. First Edition, June 2005. ISBN 1 920806 34 2

Smartgridsinfo. (2022). Alianza entre la UE y EE. UU. para fortalecer la cadena de suministro de baterías sostenibles. Disponible en: <https://www.smartgridsinfo.es/2022/03/17/alianza-entre-ue-eeuu-fortalecer-cadena-suministro-baterias-sostenibles>

Smartgridsinfo. (2023). Andalucía dispone de un mapa de minerales críticos clave para el desarrollo de las tecnologías limpias. Disponible en: [Andalucía dispone de un mapa de minerales críticos claves para el desarrollo de las tecnologías limpias • SMARTGRIDSINFO](#)

Smil, V. (2010). Energy transitions: History, requirements, prospects. Santa Barbara, California. Praeger.

S&P Global Market Intelligence (2021). World Exploration Trends. March 2021. Disponible en: [World Exploration Trends 2021 Report | S&P Global Market Intelligence \(spglobal.com\)](#)

Spindler, W., Long, J. y Morrison, H. (2020). From Business as Usual to Business for the Future. The case for circularity in metals and mining. Disponible en: <https://www.accenture.com/naturalresources>

SRK consulting. (2016a). Operating costs for miners. Memo. Disponible en: <https://www.srk.com/en/publications/operating-cost-for-miners>

SRK consulting. (2016b). Reconciling AISC to Mineral Property Valuations. Denver Gold Group Presentation. Disponible en: <https://www.denvergold.org/other-events/reconciling-aisc-to-mineral-project-valuations/>

Statista. (2022a). Número de trabajadores de la industria extractiva en España de 2005 a 2018. Disponible en: [Minería e industria extractiva: número de trabajadores España 2020 | Statista](#)

Statista. (2022b). Volumen de producción de materias primas minerales en España en 2019. Disponible en: [Materias primas minerales: producción en España en 2020 | Statista](#)

Statista (2022c). Market size of selected metals worldwide as of August 2019 <https://www.statista.com/statistics/655194/commodity-metals-global-market-size/>

SveMin. (2021). Climate ambitions and metal needs – opportunities for Sweden and the Swedish mining industry. Sweden. Disponible en: <http://www.euromines.org/>

[files/climate_ambitions_and_the_need_for_metals_eng_booklet_0.pdf](#)

T

Tejera, J.L. (2022). La cadena de valor de los metales y de su minería y metalurgia en el marco de la economía circular.

The Platform for Accelerating the Circular Economy - PACE. (2019). The Circularity Gap Report. CIRCLE Economy. Disponible en: <https://circulareconomy.europa.eu>

The World Bank. (2020). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. Disponible en: [Climate-Smart Mining: Minerals for Climate Action \(worldbank.org\)](#)

Torrubia, J.; Valero, A.; Valero, A.; Lejuez, A. (2023). Challenges and Opportunities for the Recovery of Critical Raw Materials from Electronic Waste: The Spanish Perspective. Sustainability. 15(2), 1393; <https://doi.org/10.3390/su15021393>

U

UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development). (2020). Digital economy growth and mineral resources. Implications for Developing Countries. N° 16. 2020. Disponible en: [Digital economy growth and mineral resources: implications for developing countries \(unctad.org\)](#)

UNE. (2019a). Norma UNE 22480 "Sistema de gestión minero-mineralúrgica-metalúrgica sostenible. Requisitos".

UNE. (2019b). Norma UNE 22470 "Sistema de gestión minera sostenible. Indicadores".

UNESID. (2021). Plantas de producción y transformación de acero en España. Disponible en: <https://unesid.org/produccion-de-acero/>

Unión Europea. (2021). La Década Digital de Europa: Metas digitales para 2030. Disponible en: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital-decade-digital-targets-2030_es

Universidad Andina Simón Bolívar (n.d.). La UASB aportando al desarrollo. Disponible en: [La UASB aportando al desarrollo – Universidad Andina Simón Bolívar](#)

US. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries (2022). Lithium. Disponible en: [Mineral Commodity Summaries 2022 - Lithium \(usgs.gov\)](#)

V

Valero, A. y Valero, A. (2021). Thanatia. Los límites minerales del planeta. Icaria-Más madera.

Valero, A., Valero, A. y Calvo, G. (2021). Thanatia. Límites materiales de la transición energética. Prensas de la Universidad de Zaragoza.

Venditti, B. (2021). Biggest Mining Companies in the World in 2021. Disponible en: <https://elements.visualcapitalist.com/the-biggest-mining-companies-in-the-world-in-2021/>

Vicepresidencia Primera del Gobierno, Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital. (2022). España Digital 2026. Disponible en: [España Digital 2026 \(mineco.gob.es\)](https://www.mineco.gob.es)

Vicepresidencia tercera del Gobierno, Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (n.d.). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Disponible en: [Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero \(GEI\) \(miteco.gob.es\)](https://www.miteco.gob.es)

Vicepresidencia Tercera del Gobierno. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (2022). *Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales*. Madrid. Disponible en: [Hoja de Ruta para la gestión sostenible de las Materias Primas Minerales \(miteco.gob.es\)](https://www.mineco.gob.es)

W

Wade, K. (2016). The impact of climate change on the global economy. Schroders. Disponible en: <https://www.schroders.com/de/SysGlobalAssets/digital/us/pdfs/the-impact-of-climate-change.pdf>

Waldron Arentsen, G. (2020). Tesis: "Nueva ruta de procesos para la obtención de carbonato de litio grado técnico mediante la reacción reversible de carbonato-bicarbonato". Dpto. de Ingeniería Metalúrgica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción. Disponible en: "<http://repositorio.udec.cl/handle/11594/493>" Repositorio Bibliotecas UdeC: Nueva ruta de procesos para la obtención de carbonato de litio grado técnico mediante la reacción reversible de carbonato-bicarbonato. Wilkomirsky, I. director de tesis.

Walser, G. (2000). Economic impact of world mining. World Bank Group Mining Department, Washington, D.C., United States of America. Disponible en: [Economic impact of world mining|INIS \(iaea.org\)](https://www.iaea.org)

Weyer, S., Simoes, J.P., Reuter, Y., Hansen, F., Solver, C., Meisch, C. y Schmitz, A. (2019). Digital Solutions for Modern and Efficient Ironmaking. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/338422633_Digital_Solutions_for_Modern_and_Efficient_Ironmaking [accessed Nov 06 2022].

Wills, B. (2006). *Will's Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Elsevier.

Wills, B.A. y Finch, J. A. (2016). *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Eighth Edition. Ed. Elsevier.

Wilkomirsky, I. (1999). Us Pat. 5, 993, 759, "Production of lithium carbonate from brines".

World Steel Association. (2020a). Steel industry co-products. Public Policy Paper. Disponible en: [Steel-industry-co-products.pdf \(worldsteel.org\)](https://www.worldsteel.org)

World Steel Association. (2020b). 54th ECCA Autumn Congress Online (23-24 November 2020). Disponible en: <https://www.worldsteel.org/wp-content/uploads/54th-ECCA-autumn-congress-online-23-24-November-2020.pdf>

World Steel Association. (2022). Life cycle thinking. Disponible en: [Life cycle thinking - worldsteel.org](https://www.worldsteel.org)

Y

Young, A., Barreto, M.L. y Chovan, K. (2021). "Towards a circular economy approach to mining operations. Key concepts, drivers and opportunities". December 2021 Enviro Integration Strategies. Disponible en: [Towards a Circular Economy Approach to Mining Operations \(circulareconomyleaders.ca\)](https://www.circulareconomyleaders.ca)

WEBS

<https://www.atlantic-copper.es/>

<https://www.911metallurgist.com/blog/copper-mining-extraction-process-flow-chart>

<https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/deep-sea-mining>

<https://www.rumbominero.com/noticias/mineria/hoy-sustentaran-primera-tesis-peruana-de-mineria-espacial-en-la-unmsm/attachment/mineria-espacial/>

<https://www.experienciaindustrial.es/maquinaria-de-explotacion-minera/>

https://www.cat.com/es_ES/products/new/equipment/draglines/draglines/18429930.html

<https://www.mch.cl/2020/09/10/el-nuevo-dozer-cat-d9-reduce-costos-de-aplicaciones/>

<https://www.extractiveshub.org/topic/view/id/21/chapterId/268>

ANEXO 1
MINERALES
CRÍTICOS
DE LA UE

La Tabla 41 recoge la evolución del listado de materias primas críticas de la UE.

Tabla 41. Evolución del listado de materias primas críticas para la UE. Nota: en azul están las nuevas incorporaciones a los listados. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (European Commission 2020a) y (European Commission, 2023b).

2011	2014	2017	2020	2023 (propuesta)
Antimonio	Antimonio (estibina)	Antimonio	Antimonio	Antimonio
Berilio	Berilio	Barita	Barita	Arsénico
Cobalto	Boratos	Berilio	Bauxita	Barita
Fluorita	Carbón coquizable	Bismuto	Berilio	Bauxita
Galio	Cobalto	Borato	Bismuto	Berilio
Germanio	Cromo	Cobalto	Borato	Bismuto
Grafito	Espato flúor (fluorita)	Carbón coquizable	Cobalto	Boro
Indio	Galio	Espato flúor	Carbón coquizable	Cobalto
Magnesio	Germanio	Galio	Espato flúor	Carbón coquizable
Niobio	Grafito natural	Germanio	Galio	Cobre
Metales del grupo del platino	Indio	Hafnio	Germanio	Feldespatos
Tierras raras	Magnesio	Helio	Hafnio	Espato de flúor
Tántalo	Magnesita	Indio	Indio	Galio
Tungsteno	Metales del grupo de platino	Magnesio	Litio	Germanio
	Niobio	Grafito natural	Magnesio	Hafnio
	Rocas fosfatadas	Caucho natural	Grafito natural	Helio
	Silicio metálico	Niobio	Caucho natural	Litio
	Tierras raras ligeras	Rocas fosfatadas	Niobio	Magnesio
	Tierras raras pesadas	Fósforo	Fosforita	Manganeso
	Wolframio	Escandio	Fósforo	Grafito natural
		Silicio metálico	Escandio	Níquel (baterías)
		Tantalio	Silicio metálico	Niobio
		Wolframio	Estroncio	Roca de fosfato
		Vanadio	Tantalio	Metales del grupo de platino
		Metales del grupo del platino	Titanio	Escandio
		Tierras raras pesadas	Wolframio	Silicio metálico
		Tierras raras ligeras	Vanadio	Estroncio
			Metales del grupo del platino	Tántalo
			Tierras raras pesadas	Tierras raras pesadas
			Tierras raras ligeras	Tierras raras ligeras
				Titanio
				Wolframio
				Vanadio

ANEXO 2

**TECNOLOGÍAS
HABILITADORAS PARA
LA DIGITALIZACIÓN**

A continuación, se presenta en la Tabla 42 de forma sintética una breve descripción de las tecnologías habilitadoras para la digitalización.

Tecnología	Características
Sensores	<p>Los sensores son dispositivos cuyo objetivo es captar variables físicas o químicas de un entorno. Son comunes y conocidos los sensores que miden variables como temperatura, humedad, presión, aceleración, fuerzas, distancias, campos magnéticos o ultrasonidos.</p> <p>Actualmente los retos con relación al desarrollo tecnológico de sensores se refieren a la reducción del tamaño, la integración de capacidades de comunicación, en muchos casos inalámbrica, cierta capacidad de procesado y la disponibilidad de una fuente de energía independiente.</p>
Internet de las cosas (IoT)	<p>Hoy en día, no existe una definición consensuada del IoT, pero podría expresarse como: "el paradigma tecnológico que permite dotar de conectividad a Internet a cualquier objeto sobre el que se puedan medir parámetros físicos o actuar, así como a las aplicaciones y tratamiento de datos inteligentes relativos a ellos".</p>
Sistemas ciberfísicos	<p>Los sistemas CPS engloban tecnología, <i>software</i>, sensores, procesadores y técnicas de comunicación que permiten la interacción entre los objetos físicos y el mundo computacional o por medio de redes. Para comprender este concepto se puede recurrir a un ejemplo: un tipo de neumático desarrollado por la empresa Michelin, incorpora sensores combinados con un sistema de lectura y transmisión de la información que, mediante su procesado, permite el ahorro de combustible. Los neumáticos están provistos de un microchip y de un sistema de control de presión.</p> <p>La diferencia entre el IoT y los CPS se puede describir de la manera siguiente: el IoT es una infraestructura que recoge información en el mismo espacio físico, es decir conecta objetos entre sí, como puede ser un reloj inteligente con un teléfono inteligente, pero en el propio ámbito físico. Mientras que los CPS utilizan sensores y conexiones a la nube para ajustar activamente un objeto físico a un estado actual, creando una sinergia entre el espacio físico y el virtual mediante la integración analógica y <i>hardware</i> computacional.</p>
Conectividad	<p>Es la capacidad de un dispositivo (ordenador personal, periférico PDA, móvil, robot, electrodoméstico, automóvil, etc.) de poder ser conectado, generalmente a un ordenador personal u otro dispositivo electrónico, en forma autónoma. La conectividad permite la transmisión de la información de forma segura, a través de unas infraestructuras de comunicaciones fijas o móviles, en cualquier momento (de forma permanente y en tiempo real) y en cualquier lugar (de forma ubicua). Por lo tanto, un aspecto fundamental para garantizar el correcto funcionamiento del IoT es la infraestructura de comunicaciones en la que se apoya.</p>
Realidad aumentada	<p>Consiste en la superposición de información digital sobre un escenario real, permitiendo proyectar sobre la realidad del entorno o contexto, tanto objetos (estáticos o dinámicos) como cualquier otro tipo de información adicional de carácter digital. Para lograr esa visualización se necesita disponer de aplicaciones y dispositivos como móviles o gafas inteligentes.</p> <p>Una de las principales aplicaciones de esta tecnología en el ámbito industrial consiste en introducir textos explicativos sobre imágenes de realidad aumentada, constituyendo prácticamente un manual de instrucciones digital e interactivo.</p>
Simulación	<p>La simulación es una tecnología que permite trasladar el mundo real al mundo virtual, creando modelos 3D sobre los cuales se puede experimentar. Cualquier objeto, máquina, línea de montaje, incluso plantas de producción pueden tener su "doble digital".</p>
Robótica colaborativa	<p>La robótica colaborativa se refiere a la capacidad de hibridar las posibilidades de un robot con la inteligencia y habilidades que tiene una persona. El uso de esta nueva familia de robots permite ganar en flexibilidad ya que es posible reconfigurarlos y reutilizarlos para el desarrollo de distintas operaciones en diferentes lugares de una instalación productiva.</p>
Fabricación aditiva	<p>El término comprende un conjunto de tecnologías cuyo funcionamiento consiste en la adición sucesiva de material a escala micrométrica, depositando con precisión y fabricando capa a capa de tal manera que la superposición de estas capas da lugar a sólidos tridimensionales.</p>
Big data	<p>Es el conjunto de métodos y tecnologías que hace referencia a la adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos que, por volumen, frecuencia o tipología requieren ser tratados de forma no convencional. Implementa mecanismos para la optimización de la captura, almacenamiento, búsqueda, compartición, análisis y visualización de los datos. Hablar de Big Data implica manejar lo que los expertos denominan las 5 V, es decir: (i) <i>volumen</i>: cada vez es más masiva la recogida de datos, (ii) <i>variedad</i>: cada vez hay más fuentes de las que proceden esas cantidades ingentes de datos debido al mayor número de dispositivos conectados, (iii) <i>velocidad</i>: la rapidez en recibir y gestionar los datos es fundamental, pues esa inmediatez es la que puede permitir el procesamiento de esa información y la toma de decisiones, (iv) <i>veracidad</i>: es la pureza o confianza que emanan de los datos evitándose la imprevisibilidad y (v) <i>valor</i>: se refiere a la capacidad de saber qué datos son los que se deben utilizar en cada momento.</p>
Cloud computing	<p><i>Cloud computing</i> es la disponibilidad bajo demanda de recursos de computación como servicios a través de Internet.</p>
Ciberseguridad	<p>La Ciberseguridad consiste en "la protección de activos de información, a través del tratamiento de las amenazas que ponen en riesgo la información que es procesada, almacenada y transportada por los sistemas de información que se encuentran interconectados".</p>

ANEXO 3

**DESCRIPCIÓN
DE MÉTODOS DE
EXPLOTACIÓN
MINERA**

Un método de explotación se puede definir como el procedimiento utilizado (secuencia espacial y temporal) para llevar a cabo la extracción del mineral, dependiendo de las características del yacimiento y las condiciones operativas. Cabe señalar que se distingue entre método de explotación y sistema de explotación. El sistema de explotación se refiere a los equipos que se emplean en la ejecución de las operaciones del ciclo de producción (arranque, carga y transporte) y su acoplamiento.

Las variables que condicionan la elección de un método de explotación se pueden agrupar en tres categorías (Figura 82): (i) características del yacimiento, (ii) condiciones del entorno y (iii) parámetros de la explotación.

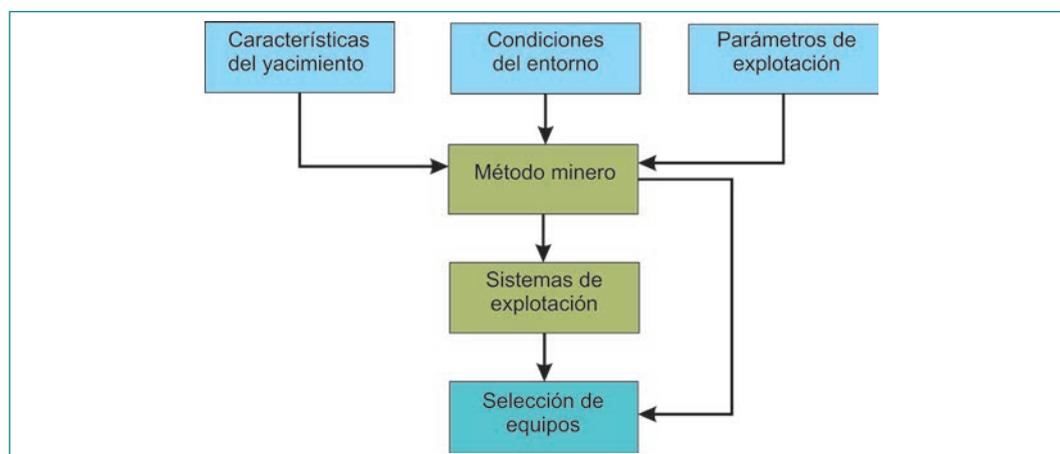


Figura 82. Variables que influyen en la elección del método de explotación. Fuente: (López Jimeno et al., 2022).

En relación con los métodos de explotación y las variables que influyen en su elección, las que más condicionan esta elección son las características naturales del yacimiento, ya que no se pueden modificar. La Figura 83 recoge las características de los yacimientos (forma, relieve, proximidad a la superficie, potencia, inclinación, complejidad y distribución de la mineralización) según Rzhevsky (1987), características que condicionan la elección del método de explotación más apropiado.

Forma	<ul style="list-style-type: none"> • Isométricos, como los depósitos masivos. • Estratificados y filonianos, se presentan en dos direcciones • Columnares, se extienden en una dirección. • Intermedios o mixtos.
Relieve del terreno	<ul style="list-style-type: none"> • Planos. • En ladera. • Montañosos.
Proximidad a la superficie	<ul style="list-style-type: none"> • Superficiales: 30-60 m. • Medios: 60-200 m. • Profundos: 200-300 m. • Muy profundos: > 300 m.
Inclinación	<ul style="list-style-type: none"> • Horizontales. • Tumbados: 10-15° a 20-35°. • Inclinaos: 25-35° a 70-80°. • Verticales: 70-90°.
Complejidad de las mineralizaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Simples. • Complejas.
Distribución de las mineralizaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Uniforme. • No uniforme

Figura 83. Clasificación de un yacimiento en función de sus características. Fuente: elaboración propia de los autores a partir de (Rzhevsky, 1987).

Los métodos de explotación de recursos minerales sólidos se clasifican en primer término en tres grandes grupos: (i) métodos a cielo abierto, (ii) métodos subterráneos y (iii) métodos como la lixiviación, la gasificación del carbón y el dragado. En este anexo se describen los métodos a cielo abierto y subterráneos de uso más habitual. Se hace referencia también a la explotación de recursos marinos, por tratarse de un ámbito que se encuentra actualmente en fase de investigación y desarrollo.

Métodos de explotación a cielo abierto

Los métodos de explotación a cielo abierto se basan en acceder al yacimiento desde la superficie¹²⁸. El hueco minero se va conformando al ejecutar bancos de explotación de forma descendente. En minería a cielo abierto es necesario extraer el material que rodea al mineral o roca útil (material que no tiene valor y que se conoce en el argot minero como estériles de los hastiales¹²⁹). La variable que mide la cantidad de estéril que es necesario extraer por unidad de mineral, es el ratio de desmonte (*stripping ratio*) y mide la relación estéril a mineral (en t/t, m³/t o m³/m³) de una explotación. Por lo tanto, también es necesario aplicar el ciclo de producción (operaciones de arranque, carga y transporte) al estéril, en este caso derivando el transporte a escombreras.

Dado que la extracción del estéril (arranque, carga y transporte a escombrera) solo supone costes (salvo casos de revalorización de residuos mineros), el valor de la ratio condiciona la viabilidad económica de la explotación si la cantidad de estéril a extraer por tonelada de mineral es excesiva. Cada explotación es única, pero, con carácter general, la minería a cielo abierto tiene un límite de profundidad: (i) por viabilidad técnica (garantizar la estabilidad de los huecos mineros), (ii) económica (asumir el coste asociado a una mayor profundidad de las operaciones) y/o (iii) ambiental (garantizar una adecuada gestión de un volumen cada vez más elevado de residuos mineros). Si el yacimiento continúa en cantidad y calidad apropiadas en profundidad, se puede valorar finalizar la extracción por minería a cielo abierto y comenzar la extracción por minería subterránea.

Los métodos de explotación a cielo abierto más comunes son: (i) cortas, (ii) descubiertas, (iii) terrazas, (iv) minería de contorno, (v) canteras y (vi) graveras. La Figura 84 ilustra diferentes métodos de explotación a cielo abierto para diferentes tipos de yacimientos.

En las cortas, la explotación se lleva a cabo por banqueo descendente, de forma que el hueco minero tiene la forma de un tronco de cono invertido. Es un método que se usa intensivamente para extraer recursos mineros metálicos, aplicándose desde la década de los años sesenta en yacimientos de carbón y minerales industriales. La profundidad que pueden alcanzar estas explotaciones es elevada (la más elevada de la minería a cielo abierto), llegando en algunos casos a unos 1.000 m de profundidad (cabe citar como ejemplos ilustrativos de cortas la mina de Chuquicamata en Chile o Bingham Canyon en EE. UU, que con 1.200 m de profundidad es actualmente la mina a cielo abierto más profunda de mundo.

En cuanto al equipamiento empleado para realizar la operación de arranque si el material es muy duro se realiza mediante perforación y voladura. Los explosivos utilizados son emulsiones e hidrogeles a granel y *heavy anfo*, iniciados con detonadores no eléctricos con multiplicador de pentolita y detonadores electróni-

¹²⁸ Para más detalle ver (Herrera y Pla, 2006).

¹²⁹ Los hastiales son los contactos físicos de un yacimiento con el material que lo rodea. El contacto superior se denomina *techo* del yacimiento y el inferior, *muro* del yacimiento.

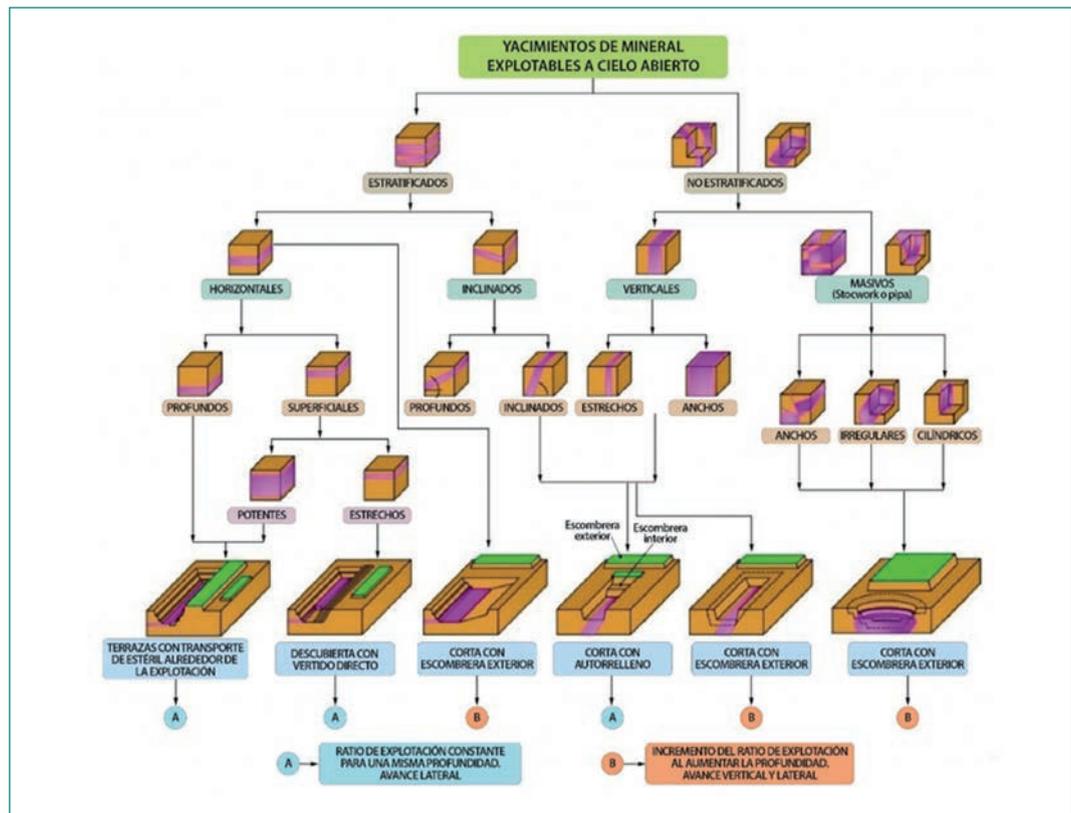


Figura 84. Métodos de explotación para diferentes tipos de yacimientos y evolución ratios de estéril/mineral. Manual minería a cielo abierto. Fuente: (López Jimeno et al., 2022).

cos. La carga se realiza con excavadoras de cables de hasta 60 m³, palas de ruedas con cazo de hasta 50 m³ y excavadoras hidráulicas de 45 m³. El transporte se realiza con volquetes diésel, eléctrico o mecánicos. La tendencia actual es a emplear volquetes autónomos y troles con baterías para la eliminación del motor diésel, así como machacadoras semimóviles para eliminar el transporte en rampa en explotaciones cada vez más profundas. Como equipamiento auxiliar se emplean tractores de orugas y ruedas para el mantenimiento de los frentes de carga y vertederos, y motoniveladoras para el mantenimiento de las pistas de transporte.

La descubierta se aplica en la extracción de yacimientos horizontales de origen sedimentario (carbones fundamentalmente), con un recubrimiento inferior a 50 metros. Consiste en el avance unidireccional de un módulo con un único banco desde el que se efectúa el arranque del estéril y el vertido de este al hueco generado por la extracción del módulo anterior, *descubriendo* así el mineral. Entre las ventajas de este método cabe señalar que la rehabilitación del espacio afectado por la explotación es relativamente rápida, dado que se realiza transferencia del estéril que se extrae al hueco generado en la fase anterior, de forma que no es necesario habilitar escombreras externas a la explotación, salvo para el estéril extraído en el primer módulo. Dependiendo del sistema de explotación que se use para arrancar, cargar y transferir el estéril se habla de sistema continuo (arranque con rotopala y vertido directo o indirecto al hueco o mediante cintas transportadoras, método también conocido como terrazas) y discontinuo (arranque y vertido del estéril con dragalinas).

Las terrazas se usan para extraer yacimientos de lignito pardo con varias capas, típicos de Centro Europa, India y Australia. En España se empleó el método en las minas de Puentes de García Rodríguez y Meirama, (ambas en la provincia de A Coruña), con producciones de 16 y 4 Mt/año, respectivamente. Tanto el arranque como el transporte se realizan en continuo, el primero mediante rotopala y el transporte por cintas de gran capacidad, con la transferencia del estéril al hueco, bien de forma directa por medio de un puente, o bien por el exterior, con cintas móviles y apiladores.

La minería de contorno se aplica para extraer yacimientos de carbón con las siguientes características: (i) capas horizontales, (ii) aumento de la ratio estéril/mineral a partir del afloramiento, (iii) espesores de capa reducidos y (iv) yacimientos de una capa. La minería de contorno se basa en realizar minería de transferencia del estéril al hueco generado por la explotación.

Las canteras se emplean fundamentalmente para extraer áridos y roca ornamental. Cabe indicar que en el caso de la roca ornamental (pizarra, mármol y granito) el ciclo de producción es diferente al resto de rocas y minerales, dado que en el caso de las rocas ornamentales no se pretende fragmentar la roca, sino extraer grandes bloques para poder elaborar a partir de estos placas de diferentes dimensiones y acabados superficiales.

En las graveras los materiales detríticos, como son las arenas y las gravas, albergados en depósitos de valle y terrazas de los ríos, son objeto de una explotación intensa debido a la demanda de dichos materiales por el sector de la construcción. Las arenas y los cantos rodados se encuentran poco cohesionados, por lo que las labores de arranque se efectúan directamente por equipos mecánicos. Las explotaciones suelen llevarse a cabo en un solo banco, con una profundidad inferior, por lo general, a 20 m. Cuando las formaciones se encuentran en niveles altos, se utilizan equipos convencionales, como son las palas cargadoras de ruedas y los volquetes. Sin embargo, es frecuente que los materiales se presenten en contacto con el subálveo o los acuíferos infrayacentes, empleándose entonces otros equipos mineros como son las dragas y las dragalinas.

En la Figura 85 se presentan dos ejemplos ilustrativos de dos métodos de explotación por minería a cielo abierto.



Figura 85. Ejemplos de métodos de explotación por minería a cielo abierto. A. Corta Atalaya y B. Áridos do Mendo. Fuente: Atalaya Mining y Áridos do Mendo.

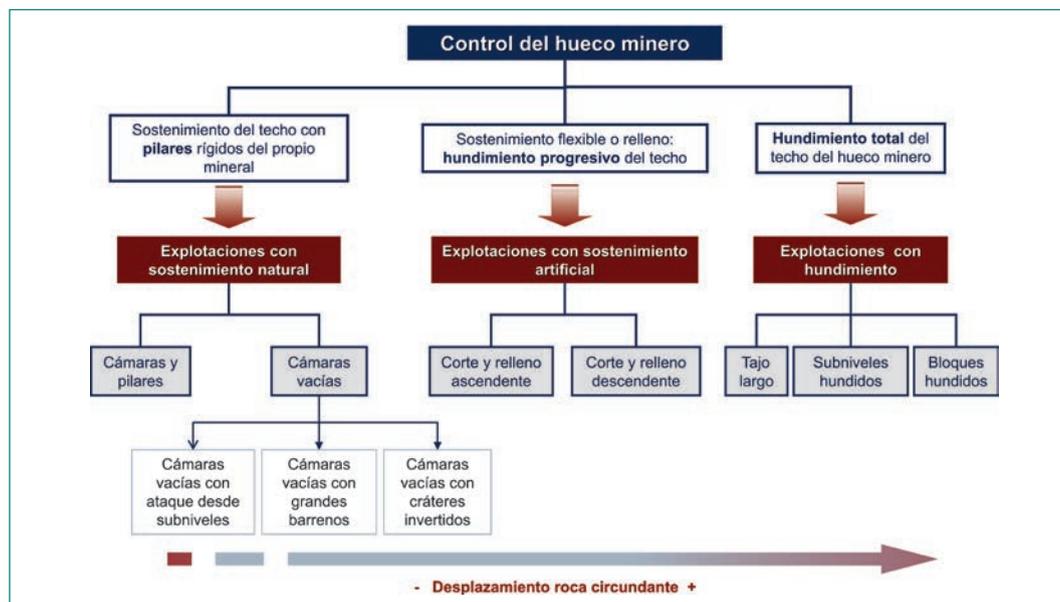
Métodos de explotación subterráneos

Cuando el yacimiento se encuentra a gran profundidad no es viable ni técnica ni económicamente extraer el mineral desde la superficie, por lo que se accede al mineral a través de lo que se conocen como *labores de acceso* (galerías inclinadas, en espiral o pozos verticales), sin retirar el recubrimiento de estéril que cubre el mineral. Este es el caso de la minería subterránea.

En la Figura 86 se presenta una clasificación de los métodos de explotación en minería subterránea. El criterio para la clasificación es el mecanismo empleado para controlar la estabilidad de la excavación que se genera con la extracción del mineral o roca útil. Se consideran tres estrategias geomecánicas para controlar el hueco minero, que se corresponden con los tres grupos de métodos: (i) dejar parte del mineral sin explotar para garantizar la estabilidad del techo de la excavación, (ii) extraer todo el mineral y colocar

en su lugar un material denominado *relleno (fill)* y (iii) permitir que las tensiones que se acumulan alrededor de la excavación se liberen en forma de deformaciones, dejando que el techo de la excavación se hunda (hundimiento controlado).

Figura 86. Clasificación de los principales métodos de explotación en minería subterránea en función de la estrategia geomecánica de control del techo de la explotación. Fuente: elaboración propia de los autores.



A continuación, se presenta en la Tabla 43 una breve descripción de los principales métodos de explotación minera, algunos de los cuales se presentan con más detalle en la Tabla 44.

Tabla 43. Descripción y comparación general de los métodos. Fuente: modificado y traducido por los autores de (Balt y Goosen, 2020).

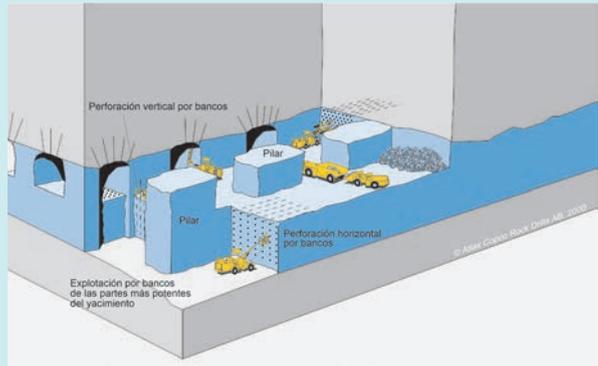
Método	Descripción
1. Cámaras y pilares / Room and Pillar (R&P)	Método de explotación que consiste en dejar pilares del propio mineral para garantizar la estabilidad de la explotación. Las dimensiones de los pilares y las cámaras (conformadas por la extracción del mineral) dependen de las características del mineral, del espesor del recubrimiento y de las tensiones sobre la roca. Este método generalmente se aplica en yacimientos tipo capa con inclinaciones menores a 30°. En cuanto al sistema de explotación, depende del material a extraer. Cuando el material es duro se emplea en el arranque, perforación y voladura. En el caso de materiales blandos (caso del carbón), se pueden emplear equipos de excavación mecánica en el arranque.
2.A Cámaras vacías con subniveles transversales / Transverse Open Stopping (TOS)	Se trata de una variante dentro del grupo de métodos por cámaras vacías, aplicable a yacimientos potentes y de buena calidad geomecánica. La extracción se realiza desde galerías (todas las galerías que están en la misma cota conforman un subnivel) en retirada desde el techo al muro mediante tiros largos de voladura, perforados a partir de una serie de cortes transversales paralelos, en el cuerpo del mineral. Las galerías tienen dirección perpendicular a la dirección del yacimiento, de ahí la terminología de <i>subniveles transversales</i> . A diferencia del método de subniveles hundidos aquí el hueco se sostiene sin hundirse, dejando volúmenes de mineral sin extraer (que se denominan también pilares), lo que requiere condiciones geomecánicas buenas, tanto del mineral como de los hastiales.
2. A. Cámaras vacías con subniveles longitudinales / Longitudinal Open Stopping (LOS)	Se trata de una variante dentro del grupo de métodos por cámaras vacías, aplicable a yacimientos estrechos y de buena calidad geomecánica y fuerte buzamiento. La extracción se hace por niveles (galerías) en retirada desde los extremos de bloques definidos de mineral a través de tiros largos, paralelos a techo y muro, perforados desde el frente del mineral en los niveles. Requiere buenas condiciones geomecánicas de mineral y hastiales, dado que se dejan volúmenes de mineral (que se denominan pilares) para garantizar la estabilidad de la explotación. Los subniveles tienen dirección la misma dirección que la dirección del yacimiento, de ahí la terminología de <i>subniveles longitudinales</i> .

<p>2.B. Cráteres invertidos / Vertical Crater Retreat (VCR)</p>	<p>Se trata de una variante dentro del grupo de métodos por cámaras vacías que se usa para extraer yacimientos de fuerte pendiente. El arranque del mineral se efectúa por rebanadas ascendentes mediante el empleo de voladura con cargas esféricas. Parte del mineral volado permanece en la cámara para evitar el hundimiento de las paredes mientras dura el arranque de la cámara. La extracción del material fragmentado, entre un 30 y 40 % de la voladura, se realiza a través de una galería de base por medio de un sistema de galerías transversales. La perforación se ejecuta desde un nivel superior con taladros verticales y con equipos de martillo en fondo DTH, de diámetros mayores a 6 pulgadas. Tras la apertura de los transversales, en el nivel inferior se introduce en los taladros carga suspendida de explosivo para que actúe como cargas esféricas. El mineral disparado en rebanada cae en la cámara, ascendiéndose sucesivamente hasta dejar en la parte superior un pilar corona, el cual se dispara al abandonar la cámara. Los yacimientos deben tener una potencia mínima de 2 m, una inclinación superior a 50° con contactos bien definidos entre mineral y estéril.</p>
<p>3. Corte y relleno (ascendente o descendente) / Cut & fill (C&F)</p>	<p>La característica de este método es el uso del relleno como medio de sostenimiento de la excavación. El mineral se arranca por rebanadas horizontales en sentido ascendente o descendente. Una vez fragmentado el mineral, este se extrae completamente de la cámara a través de coladeros o rampas, efectuándose a continuación el relleno del espacio abierto con material que se conoce como <i>relleno</i>.</p> <p>El <i>relleno</i> puede ser estéril procedente de las labores de preparación, material de superficie o material producto de los relaves de la planta de tratamiento. El relleno debe tener una determinada calidad geomecánica. Hay tres tipos de relleno, de creciente calidad geomecánica: manual, neumático e hidráulico. El relleno hidráulico se drena para eliminar el agua, quedando así un relleno compacto en pocas horas (24-48 horas), pudiéndose aumentar la consistencia con la adición de cierta cantidad de cemento.</p> <p>En las explotaciones por corte y relleno ascendente (<i>overhand cut&fill</i>) una vez extraída una rebanada horizontal se rellena y se procede a extraer la que se encuentra por encima. Se trabaja, por tanto, sobre el material de relleno y por debajo del mineral <i>in situ</i>.</p> <p>En las explotaciones por corte y relleno descendente (<i>underhand cut&fill</i>) una vez extraída una rebanada horizontal se rellena y se procede a extraer la que se encuentra por debajo. Se trabaja, por tanto, por debajo del relleno y sobre el mineral <i>in situ</i>. En estas explotaciones se precisa una buena consistencia del relleno, mediante uso de cemento.</p> <p>Los métodos con corte y relleno incorporan una operación más al ciclo de producción (arranque, carga, transporte y <i>relleno</i>), por lo que son, en líneas generales, los métodos de explotación más costosos. De ahí que sea necesario garantizar su viabilidad económica en base a una buena ley del yacimiento.</p>
<p>4. Tajo largo / Longwall stopping (LW)</p>	<p>Método de explotación para yacimientos estrechos de bajo buzamiento, en el que se excavan un frente de explotación largo (hasta 150 m). El mineral se arranca por medios mecánicos (rozadoras, cepillos o equipos mecanizados de bajo perfil). Se requieren minerales de baja resistencia, capaces de ser arrancados mecánicamente y materiales de techo que hundan bien. El techo de la explotación se hunde a medida que avanza la explotación. El método se puede aplicar para yacimientos de media o fuerte pendiente, pero en este caso es necesario rellenar el hueco generado por la extracción.</p>
<p>5. Subniveles hundidos / Sublevel Caving (SLC)</p>	<p>La explotación se realiza a través de galerías horizontales a intervalos verticales fijos en forma descendente. Las galerías que están a la misma cota conforman un subnivel. La distancia entre los subniveles oscila entre 8 y 60 m. Cada uno de ellos se desarrolla según un conjunto de galerías que cubren la sección completa del mineral y según sea el sistema de perforación en abanico, anillo o en paralelo. Cuando se usa perforación en paralelo, la distancia entre subniveles es mayor y solo se trabaja en dos subniveles, uno de perforación y otro de extracción, siendo la voladura una aplicación en banco a cielo abierto a las explotaciones subterráneas. Este método se aplica en yacimientos con potencias mayores a 3 m y con una inclinación superior a 50°, con contactos bien definidos entre el mineral y el estéril. Es uno de los métodos de minería más flexibles y versátiles que se pueden emplear con éxito para cuerpos de mineral potentes.</p>
<p>6. Bloques hundidos / Block Caving Method (BCM)</p>	<p>Método de minería subterránea para yacimientos de grandes dimensiones y con características geomecánicas particulares (yacimientos que tienen un determinado nivel de fragmentación natural), en el que el mineral se va fragmentando (hundiendo) al retirar la parte inferior del mismo. El mineral fragmentado se carga por la parte inferior mediante tiros muy largos de voladura controlada. Precisa mucha infraestructura previa, pero es muy económico dado que la fragmentación del material se produce por hundimiento natural. Como inconveniente cabe señalar la ocurrencia de fuerte subsidencia en superficie.</p>
<p>Subniveles rellenos / Drift and fill mining (D&F)</p>	<p>Minería subterránea para yacimientos estrechos de poco buzamiento que se explotan a través de una serie de pequeñas galerías, cada una de las cuales se rellena antes de extraer la siguiente. El hecho de hacer excavaciones pequeñas (galerías) y rellenarlas, hace que se pueda emplear en yacimientos que tienen mineral y hastiales de mala calidad.</p>

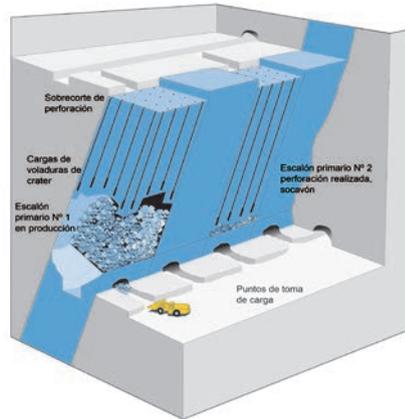
Tabla 44. Métodos de explotación subterránea.

Fuente: elaboración propia de los autores y figuras traducidas y modificadas de (Atlas Copco, 2007).

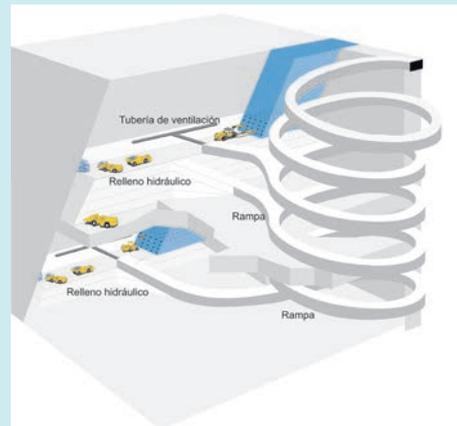
Método de explotación por cámaras y pilares. Aplicación a yacimiento tabular con poca pendiente. En este caso, la operación de arranque se realiza con voladura. En el esquema se observan los jumbos que están realizando la labor de perforación de barrenos. El material una vez fragmentado es cargado por palas LDH sobre volquetes de perfil bajo, que realizan la operación de transporte. En la figura también se observa un equipo de colocación de bulones (elementos de sostenimiento del techo de las cámaras que garantizan la estabilidad local de las excavaciones).



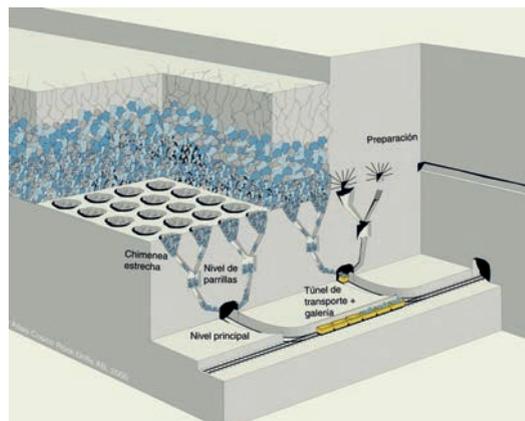
Método de explotación de cámaras vacías por Vertical Crater Recreat (VCR). La cámara se conforma mediante el arranque por voladura de rebanadas horizontales. Para garantizar la estabilidad de la cámara mientras esta se ejecuta se deja el mineral fragmentado dentro de la cámara un tiempo. En la figura se representa cómo se conforman dos cámaras, dejando un volumen de mineral entre ellas para garantizar la estabilidad de la explotación.



Método de explotación por corte y relleno ascendente (overhand cut&fill mining). Acceso a las cámaras por rampa en espiral ejecutada a muro del yacimiento. Se representa un ejemplo de mecanización integral de las operaciones de arranque (perforación y voladura), carga (palas LHD) y transporte (volquetes de perfil bajo).



Método de explotación por bloques hundidos (block caving)



La Figura 87 muestra un ejemplo de mina subterránea, donde se presentan el acceso a las galerías y la planta de procesado *ad-hoc*.



Figura 87. Proyecto de minería subterránea de San José Valdeflores. Fuente: (Extremadura Energies, n.d.).

En relación con la elección del método de explotación más apropiado, la UBC (Universidad de British Columbia, Canadá) estableció la clasificación de los métodos de explotación y más recientemente Balt y Goosen (2020) optimizaron su aplicación en el denominado Method Selection with Analytic Hierarchy Process (MSAHP).

Minería submarina

El incremento de la demanda en los próximos años de recursos minerales hará que previsiblemente cada vez se hable más de la minería en las denominadas "zonas periféricas", que son aquellas zonas no convencionales del planeta que podrían tener un gran potencial como fuente de materias primas en un futuro cercano. En este contexto se encuentra la minería de las aguas profundas, dentro y fuera de las jurisdicciones nacionales, que ofrece oportunidades para la exploración y posible explotación de metales como el Ni, Cu, Co y las tierras raras.

Las profundidades marinas son el ecosistema más grande de la tierra, pero sigue siendo uno de los menos explorados debido a las dificultades tecnológicas. La minería submarina se enfrenta a enormes desafíos ya que debe llevarse a cabo en las profundidades del océano, en condiciones ambientales extremas utilizando tecnología remota. Las condiciones extremas que se presentan se refieren a la presión hidrostática (~500 veces la presión atmosférica), la oscuridad total, las temperaturas extremas (desde los 2 °C en el fondo del océano hasta los 400 °C, en respiraderos hidrotermales), el conocimiento limitado de los ecosistemas y las consecuencias de la minería sobre ellos (por ejemplo, la toxicidad potencial de los metales que se liberarán en el océano), las corrientes variables (con el tiempo y la profundidad del agua), las características variables del fondo marino y la potencial actividad volcánica.

Además, existen brechas de conocimiento que se refieren actualmente a la concentración y el tamaño de los recursos. Hoy en día, el interés comercial se concentra en tres tipos de yacimientos, para proporcionar metales y elementos de TR o REE: (i) nódulos polimetálicos o de manganeso, (ii) sulfuros hidrotermales polimetálicos¹³⁰ (SMS) y (iii) costras de ferromanganeso con alto contenido en cobalto. Estos depósitos se distribuyen a lo largo de todos los fondos oceánicos.

¹³⁰ Seafloor massive sulphides.

Para hacer frente a los desafíos, se están diseñando métodos modernos de minería en aguas profundas en consulta y cooperación con otros sectores involucrados en actividades en dichas aguas, incluido el tendido de cables oceánicos, el dragado y la extracción de petróleo y gas en alta mar. Todos están contribuyendo, directa e indirectamente, a desarrollar la tecnología necesaria.

La extracción de rocas y minerales en aguas profundas normalmente tiene cuatro componentes principales: (i) equipo de extracción operado a distancia (excavadoras para desagregar los depósitos y recolectoras submarinas), (ii) sistema de transporte vertical (sarta de tuberías o elevador), (iii) plataforma de superficie o buque minero y (iv) sistema de eliminación.

En la Figura 88 pueden verse los componentes de un proyecto de minería de nódulos polimetálicos. Los componentes principales incluyen el colector en el lecho marino, el sistema de elevación vertical, el buque de minería de superficie, los graneleros y la planta de procesamiento en tierra. El mapeo hidroacústico multihaz con un sistema montado en el casco de una embarcación proporciona información sobre la topografía del fondo oceánico y la profundidad del agua (batimetría), y las características del fondo oceánico (roca dura, sedimentos, nódulos). Los sistemas de remolque profundo y los vehículos submarinos autónomos (AUV) pueden acercarse al fondo del océano y, por lo tanto, proporcionar una resolución más alta (una huella menor).

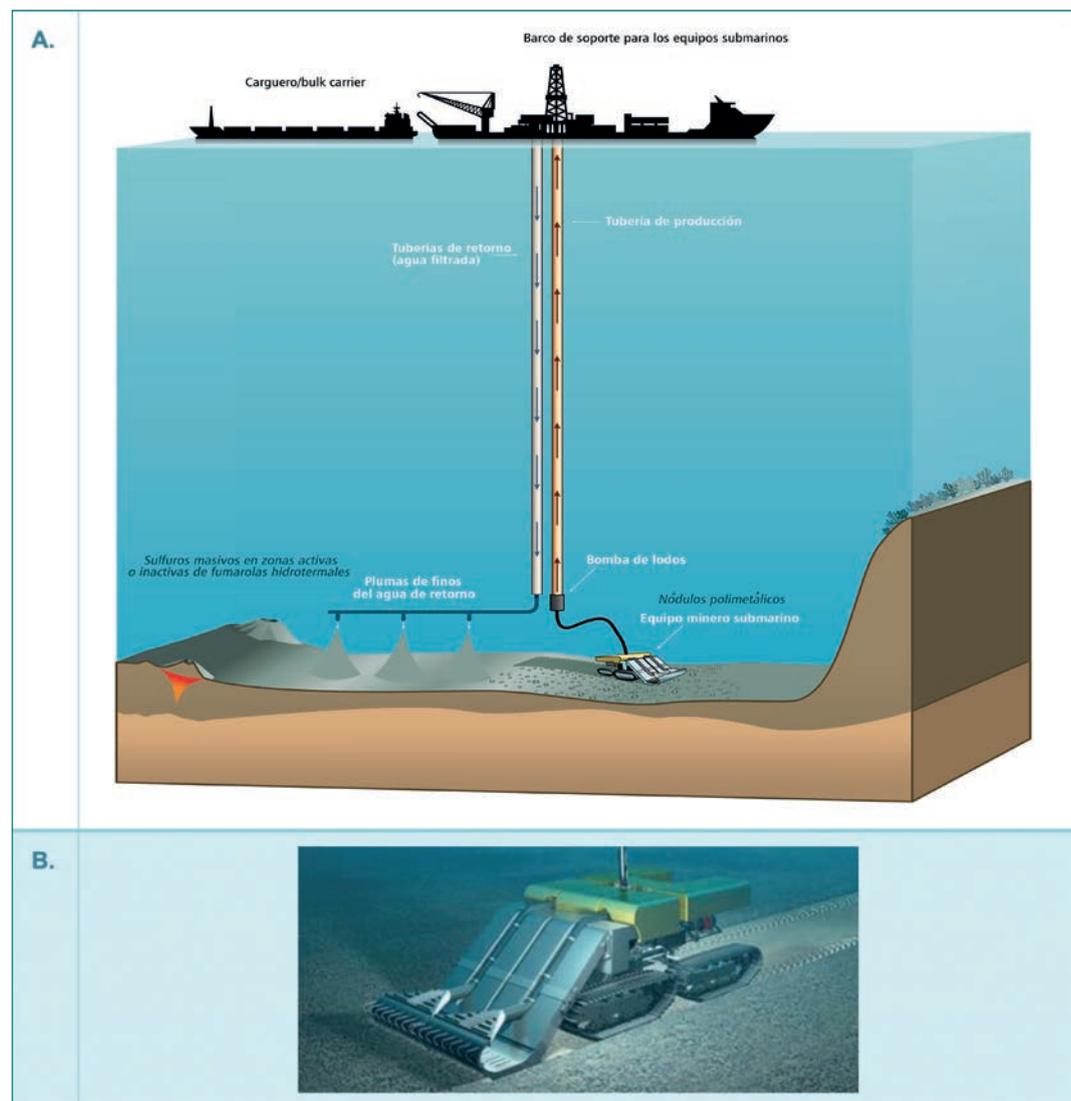


Figura 88. A. Esquema de la exploración y minería en aguas profundas de nódulos polimetálicos, **B.** Impresión artística de un colector (o rastreador) de nódulos del fondo marino a escala reducida. Fuente: traducido y modificado por los autores de (Cuyvers et al., 2018).

En la Tabla 45 se muestran métodos de extracción para minería en aguas profundas, señalando su nivel de madurez tecnológica (TRL, *Technology Readiness Level*, por sus siglas en inglés), clasificándose a partir de una escala de 1 a 9, donde 1 es el valor más bajo posible. Como se observa todos los métodos están en el rango inferior de la escala, lo que indica que deben producirse mejoras tecnológicas significativas para que la minería submarina se convierta en una alternativa realista a la minería terrestre.

Tipo de depósito	Técnica	Observaciones	Nivel de desarrollo (valor máximo 9)
Extracción			
Sulfuros masivos	Cortadores de tambor (vehículos con control remoto)	Tecnología basada en la empleada en minería terrestre de carbón. Se han realizado experimentos hasta 1600 m de profundidad, pero no se recogió material	3
Sulfuros masivos	Cortadores auxiliares (control remoto)	Se trata de equipos que facilitan la excavación de los cortadores de tambor	2
Sulfuros masivos	Cabeza de corte giratoria (control remoto)	Dispositivo de corte formado por una cabeza de corte giratoria, de manejo más flexible que los cortadores de tambor. Es necesario realizar más pruebas para valorar si se puede aplicar en aguas profundas.	2
Sulfuros masivos	Cuchara bivalva (control remoto)	No se utiliza para excavar los sulfuros, sino más bien para eliminar las capas superiores de los depósitos. Su aplicabilidad para recoger roca es incierta, así como su viabilidad económica.	2
Nódulos polimetálicos	Colectores pasivos	Tiene como ventajas un diseño sencillo y bajos costes de explotación. Sin embargo se descarta su uso debido a la dificultad para controlar la calidad y cantidad de los nódulos recogidos, además de los grandes riesgos medioambientales en forma de sedimentos	5
Nódulos polimetálicos	Colectores hidráulico	Se basa en aplicar (pulverizar) agua de mar para separar los nódulos del lecho marino, lo que implica un impacto ambiental limitado. Se han probado colectores hidráulicos para profundidades someras	4
Corteza ferromanganeso		Debido a las dificultades de extracción de este recurso, no se ha demostrado que sea una opción económicamente atractiva.	1
Sistema de elevación			
Minerales de fondo marino	Sistema continuo de cangilones	El método se probó por primera vez en 1972, pero se abandonó debido a la falta de control del sistema y al gran impacto ambiental.	5
Minerales de fondo marino	Sistema de elevación neumática	El sistema se basa en inyectar aire comprimido en una tubería para bombear el material hasta la superficie. Se ha probado en aguas muy profundas, pero es un sistema muy vulnerable a la obstrucción y requiere grandes cantidades de energía.	5
Minerales de fondo marino	Sistema de elevación por bombeo hidráulico	Sistema sencillo y fiable con gran capacidad de elevación, a menudo aplicado durante la perforación de petróleo y gas. El concepto parece prometedor para minería de aguas profundas, pero es necesario seguir investigando más allá de la fase de prototipo	3
Minerales de fondo marino	Sistema de elevación por cable	Similar a un sistema de extracción terrestre, más sencillo que los sistemas hidráulicos o neumáticos. La cuestión radica principalmente en si será lo bastante eficaz para ser comercialmente viable	2
Plataformas superficiales			
Minerales de fondo marino	Deshidratación	Una de las técnicas más sencillas para aumentar el valor del mineral, aspecto determinante para la viabilidad económica de la minería de aguas profundas. El sistema es bien conocido y debería ser fácilmente aplicable a buques o plataformas marinas	7
Deposición			
Residuos, relaves		Dado que aún no se han llevado a cabo operaciones comerciales a gran escala, se trata de un ámbito desconocido. Se necesita un plan claro para la manipulación de los residuos.	1

Tabla 45. Tecnologías de extracción para minería en aguas profundas y nivel de preparación tecnológica. Nota: El nivel de preparación tecnológica varía de 1 a 9 (a mayor valor, mayor preparación). Fuente: modificado y traducido por los autores de Ecorys en (Rademaekers et al., 2015).

Los avances tecnológicos podrían permitir la extracción de recursos minerales de aguas profundas, pero el alto nivel de inversiones necesarias plantea dudas sobre su viabilidad económica. Hasta la fecha, la explotación de minerales de aguas profundas sigue siendo un potencial más que una realidad.

Además, cabe indicar, en relación a la explotación de minerales en los fondos marinos que la "*Estrategia de la UE sobre la biodiversidad a 2030*" establece que no se deben crear explotaciones minerales en los fondos marinos antes de que se hayan investigado suficientemente sus efectos, se conozcan los riesgos, y pueda demostrarse que las tecnologías y las prácticas operativas no van a producir daños graves para el medio ambiente. En relación a este punto en marzo de 2022 se ha aprobado el Real Decreto que recoge como un nuevo criterio de compatibilidad con las estrategias marinas la aplicación de los principios de cautela y precaución citados en la estrategia europea, para las actuaciones de minería submarina en nuestro país.

ANEXO 4

NORMATIVA
MEDIOAMBIENTAL

Tras las conclusiones extraídas de la investigación minera y, una vez decidido que existen reservas suficientes susceptibles de ser recuperadas con las mejoras técnicas disponibles, se procede a iniciar los trámites, también ambientales, para conseguir todas las autorizaciones o el “permitting” que llaman los anglosajones. Además del documento técnico que describe el proyecto de explotación del recurso es necesario presentar a la Administración, para su evaluación, dos documentos técnicos determinantes: el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y el Plan de Restauración. Se recoge a continuación la estructura y contenido que deben recoger ambos documentos (Figura 89 y 90).

Figura 89. Estructura y contenido del EIA.
Fuente: Cámara Oficial de Minería de Galicia (COMG).

FASE 1: DEFINICIÓN DEL ESTADO PREVIO (LÍNEA DE BASE)

1. Estudio arqueológico
2. Estudio línea base suelo
3. Estudio socioeconómico del entorno
4. Estudio de línea de base de balance de carbono

FASE 2: HUELLA FINAL PROYECTO

1. Definición de corta
2. Caracterizar residuos
3. Definir sistema de gestión de aguas: proyectos de captación de aguas, proyecto autorización puntos de vertido de aguas. cánones
4. Definir corta final
5. Línea base de hidrogeología e hidrología
6. Caracterización geotécnica de los emplazamientos elegidos para ubicar balsas y escombreras del sistema
7. Definición del proceso productivo

FASE 3. PROYECTO DE EXPLOTACIÓN Y PLAN DE RESTAURACIÓN

1. Volúmenes y caracterización de residuos mineros
2. Reservas minerales a partir de la estimación de recursos
3. Definición del proceso metalúrgico
4. Procedimiento de control y seguimiento.
5. Definición del proyecto constructivo y de gestión de las instalaciones de residuos mineros (vinculado a puntos anteriores, así como a una investigación geotécnica
6. Anteproyecto de cierre y clausura de las instalaciones de residuos mineros
7. Restauración geomorfológica
8. Medidas previstas para la rehabilitación del espacio natural afectado por la investigación y explotación
9. Medidas previstas para la rehabilitación de los servicios e instalaciones anejos a la explotación.

FASE 4: IMPACTOS: ESTUDIOS ESPECÍFICOS

1. Modelización impacto acústico
2. Modelización impacto calidad del aire
3. Estudio vibraciones
4. Estudio de impacto socioeconómico
5. Estudio de impacto e integración paisajística
6. Análisis de riesgos ambientales
7. Compensación de Huella de Carbono

Introducción y descripción del proyecto

1. PARTE I: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ENTORNO DE LA ACTIVIDAD MINERA
2. PARTE II: MEDIDAS PREVISTAS PARA LA REHABILITACIÓN DEL ESPACIO NATURAL AFECTADO POR LA INVESTIGACIÓN Y EXPLOTACIÓN
3. PARTE III: MEDIDAS PREVISTAS PARA LA REHABILITACIÓN DE LOS SERVICIOS E INSTALACIONES ANEJOS A LA EXPLOTACIÓN.
Edificios auxiliares y demoliciones
4. PARTE IV: PLAN DE GESTIÓN DE RESIDUOS
 - a. Alcance
 - b. Objetivos
 - c. Información general de las operaciones de extracción y tratamiento
 - d. Descripción de la actividad que genera los residuos y manipulación prevista
 - e. Volumen estimado de residuos mineros
 - f. Caracterización de los residuos mineros
 - g. Instalaciones de residuos mineros
 - h. Afección al medio ambiente y a la salud humana por el depósito de residuos mineros
 - i. Procedimientos de control y seguimiento
 - j. Definición del proyecto constructivo y de gestión de las instalaciones de residuos mineros
 - k. Anteproyecto de cierre y clausura de las instalaciones de residuos mineros
 - l. Restauración geomorfológica
 - m. Estudio de las condiciones del terreno afectado por la instalación de residuos (estudio geotécnico)
5. PARTE V: MINERÍA CIRCULAR
 - a. Puesta en valor de los estériles: mediante desarrollo de proyectos de IDi en aplicaciones y procesos de recuperación.
 - b. Puesta en valor de espacios: Identificación de necesidades/oportunidades de los grupos de interés.
 - c. Proyectos de absorción de Carbono con rehabilitaciones ecológicas.
6. PARTE VI: CALENDARIO DE EJECUCIÓN Y PRESUPUESTO
7. SOLICITUD DE LICENCIA Y EJECUCIÓN DE OBRAS

Figura 90. Estructura y contenido del Plan de restauración. Fuente: COMG.

En la Tabla 46 se recoge la legislación de ámbito estatal aplicable al desarrollo de proyectos mineros. Además, existe abundante normativa de corte autonómico que se debe cumplir relacionada con el agua, las emisiones a la atmósfera, los residuos, cuestiones de emergencia, etc.

Fecha	Denominación	Temática
21-jul-73	Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas	Sectorial
09-ago-74	Decreto 3025/1974 Sobre limitación atmosférica producida por vehículos automóviles	Atmósfera (polvo y gases)
06-feb-75	Decreto 833/1975, de 6 de febrero, de desarrollo de la ley 38/72 de 22 de diciembre de protección del ambiente atmosférico	Atmósfera (polvo y gases)
25-ago-78	Real Decreto 2857/1978, de 25 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento General para el Régimen de la Minería	Sectorial
21-dic-83	Real Decreto 3255/1983, de 21 de diciembre, por el que se aprueba el Estatuto del Minero	Sectorial
26-dic-84	Real Decreto 2366/1984, de 26 de diciembre, sobre reducción de la edad de jubilación de determinados grupos profesionales incluidos en el ámbito del Estatuto del Minero, aprobado por el Real Decreto 3255/1983, de 21 de diciembre	Sectorial
02-abr-85	Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, aprobación del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera	Sectorial
13-sep-85	Orden de 13 de septiembre de 1985 por la que se aprueban determinadas Instrucciones Técnicas Complementarias de los capítulos III y IV del RGNBSM	Sectorial
19-mar-86	Orden de 19 de marzo de 1986 por la que se aprueban las normas complementarias para el desarrollo y ejecución del Real Decreto 3255/1983, de 21 de diciembre, Estatuto del Minero, en materia de seguridad e higiene	Sectorial

Tabla 46. Legislación de ámbito estatal, tanto transversal como sectorial, aplicable al desarrollo de proyectos mineros. Fuente: COMG.

11-abr-86	Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas	Aguas
22-mar-88	Orden de 22 de marzo de 1988 por la que se aprueban instrucciones técnicas complementarias de los capítulos II, IV y XIII del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera	Sectorial
20-jul-88	Real Decreto 833/1988, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos	Residuos
16-abr-90	Orden de 16 de abril de 1990 por la que se aprueban las instrucciones técnicas complementarias del capítulo VII del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera	Sectorial
03-sep-90	Orden 03/09/1990 sobre el cumplimiento de la Directiva 88/76/CEE sobre emisiones de gases de escape procedentes de vehículos automóviles	Atmósfera (polvo y gases)
16-oct-92	Orden 16/10/1992 sobre el cumplimiento de la Directiva 91/441/CEE, sobre emisiones de gases de escape procedentes de vehículos automóviles	Atmósfera (polvo y gases)
20-oct-94	Real Decreto 2085/1994, de 20 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Petrolíferas.	Almacenamiento de Productos Químicos (APQ)
08-nov-95	Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales	Prevención de Riesgos Laborales (PRL)
17-ene-97	Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención	PRL
14-abr-97	Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.	PRL
14-abr-97	Real Decreto 487/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la manipulación manual de cargas que entrañe riesgos, en particular dorso lumbares, para los trabajadores.	PRL
24-abr-97	Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases.	Residuos
12-may-97	Real Decreto 665/1997, de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo	Atmósfera (polvo y gases)
14-may-97	Decreto 130/1997, de 14 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de ordenación de la pesca fluvial y de los ecosistemas acuáticos continentales	Aguas
30-may-97	Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual	PRL
20-jun-97	Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, aprobado mediante Real Decreto 833/1988, de 20 de julio	Residuos
18-jul-97	Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo	PRL
05-sep-97	Real Decreto 1389/1997, de 5 de septiembre, por el que se aprueban las disposiciones mínimas destinadas a proteger la seguridad y la salud de los trabajadores en las actividades mineras	PRL
15-sep-97	Real Decreto 1427/1997 Aprobación de la ITC MI-IP 03 "Instalaciones petrolíferas para uso propio"	Almacén Productos Químicos (APQ)
30-abr-98	Real Decreto 782/1998, de 30 de abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases.	Residuos
07-may-99	Real Decreto 769/1999 de 7 de mayo, por el que se dictan las disposiciones de aplicación de la Directiva del Parlamento Europeo y de Consejo, 97/23/CE, relativa a los equipos de presión y se modifica el Real Decreto 1244/1979, de 4 de abril que aprobó el Reglamento de aparatos a presión.	Seguridad industrial
27-jul-99	Orden 27/07/1999, por la que se determinan las condiciones que deben reunir los extintores de incendios instalados en vehículos de transporte de personas o de mercancías.	Seguridad industrial
27-ago-99	Real Decreto 1378/1999 de medidas para la eliminación y gestión de los policlorobifenilos y policloroterfenilos y aparatos que los contengan	Residuos
01-oct-99	Real Decreto 1523/1999, de 1 de octubre, de modificación del Reglamento de instalaciones petrolíferas, aprobado por RD 2085/1994, de 20 de octubre, y las ITC MI-IP03, aprobada por el RD 1427/1997, de 15 de septiembre, y MI-IP04, aprobada por el RD 2201/1995, de 28 de diciembre y su corrección de errores	APQ
08-oct-99	Real Decreto 1566/1999, de 8 de octubre, sobre los consejeros de seguridad para el transporte de mercancías peligrosas por carretera, por ferrocarril o por vía navegable	APQ
06-abr-01	Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE APQ-1, MIE APQ-2, MIE APQ-3, MIE APQ-4, MIE APQ-5, MIE APQ-6 y MIE APQ-7	APQ

20-jul-01	Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas	Aguas
08-feb-02	Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos	Residuos
22-feb-02	Real Decreto 212/2002, de 22 de febrero, regulación de las emisiones sonoras en el entorno debidas a determinadas máquinas de uso al aire libre	Atmósfera (ruido y vibraciones)
02-ago-02	Real Decreto 842/2002 de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.	Seguridad industrial
19-nov-02	Orden TAS/2926/2002, de 19 de noviembre, por la que se establecen nuevos modelos para la notificación de los accidentes de trabajo y se posibilita su transmisión por procedimiento electrónico	PRL
28-feb-03	Real Decreto 255/2003, de 28 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos	Residuos
27-mar-03	Directiva 2002/96/CE de 27 de enero de 2003, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)	Residuos
23-may-03	Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, de modificación del RD 849/1986, de 11 de abril por el que se aprueba el reglamento del dominio Público Hidráulico que se desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas	Aguas
12-jun-03	Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.	PRL
17-nov-03	Ley 37/2003 de ruido	Atmósfera (ruido y vibraciones)
12-dic-03	Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales	PRL
30-ene-04	Real Decreto 171/2004, de 30 de enero, por el que se desarrolla el artículo 24 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, en materia de coordinación de actividades empresariales	PRL
03-dic-04	Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales. CORRECCIÓN de errores y erratas del Real Decreto 2267/2004, 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.	Seguridad industrial
14-ene-05	Real Decreto 9/2005 Relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios estándares para la declaración de suelos contaminados	Medio ambiente
04-nov-05	Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas	PRL
16-dic-05	Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental	Atmósfera (ruido y vibraciones)
30-dic-05	Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso.	Residuos
23-ene-06	Orden ITC/101/2006, de 23 de enero, por la que se regula el contenido mínimo y estructura del documento sobre seguridad y salud para la industria extractiva	Sectorial
24-feb-06	Real Decreto 228/2006, de 24 de febrero, por el que se modifica el Real Decreto 1378/1999, de 27 de agosto, por el que se establecen medidas para la eliminación y gestión de los policlorobifenilos, policloroterfenilos y aparatos que los contengan.	Residuos
10-mar-06	Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido	PRL
28-abr-06	Real Decreto 524/2006, de 28 de abril, por el que se modifica el Real Decreto 212/2002, de 22 de febrero, por el que se regulan las emisiones sonoras en el entorno debidas a determinadas máquinas de uso al aire libre.	Atmósfera (ruido y vibraciones)
02-jun-06	Real Decreto 679/2006, de 2 de junio, por el que se regula la gestión de los aceites industriales usados	Residuos
13-nov-06	Resolución de 13 de noviembre de 2006, de la Dirección General de Desarrollo Industrial, por la que se amplían los anexos I, II y III de la Orden de 29 de noviembre de 2001, por la que se publican las referencias a las normas UNE que son transposición de normas armonizadas, así como el período de coexistencia y la entrada en vigor del mercado CE relativo a varias familias de productos de construcción	Sectorial
23-mar-07	Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia	Emergencias
20-abr-07	Real Decreto 508/2007 de 20 de abril, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento E-PRTR y de las autorizaciones ambientales integradas	Medio ambiente

20-jul-07	Real Decreto 1027/2007 (RITE) de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.	Climatización
30-ago-07	Orden ITC/2585/2007, de 30 de agosto, por la que se aprueba la Instrucción técnica complementaria 2.0.02 «Protección de los trabajadores contra el polvo, en relación con la silicosis, en las industrias extractivas», del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera	Sectorial
19-oct-07	Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas	Atmósfera (ruido y vibraciones)
23-oct-07	Ley 26/2007, de Responsabilidad Medioambiental	Medio ambiente
15-nov-07	Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera	Atmósfera (polvo y gases)
13-dic-07	Ley 42/2007, de 13 de diciembre, de Patrimonio Natural y Biodiversidad	Medio ambiente
01-feb-08	Real Decreto 106/2008, de 1 de febrero, sobre pilas y acumuladores y la gestión ambiental de sus residuos	Residuos
01-feb-08	Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.	Residuos
07-may-08	Orden ITC/1316/2008, de 7 de mayo, por la que se aprueba la instrucción técnica complementaria 02.1.02 «Formación preventiva para el desempeño del puesto de trabajo», del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.	Sectorial
09-jun-08	Resolución de 9 de junio de 2008, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se aprueba la especificación técnica número 2000-1-08 «Formación preventiva para el desempeño del puesto de operador de maquinaria de transporte, camión y volquete, en actividades extractivas de exterior» de la instrucción técnica complementaria 02.1.02 «Formación preventiva para el desempeño del puesto de trabajo», del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera	Sectorial
09-jun-08	Resolución de 9 de junio de 2008, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se aprueba la especificación técnica N.º 2001-1-08 «Formación preventiva para el desempeño del puesto de operador de maquinaria de arranque/carga/viales, pala cargadora y excavadora hidráulica de cadenas, en actividades extractivas de exterior» de la Instrucción técnica complementaria 02.1.02 «Formación preventiva para el desempeño del puesto de trabajo», del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.	Sectorial
05-sep-08	Real Decreto 1468/2008, de 5 de septiembre, por el que se modifica el Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la norma básica de autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia	Emergencias
10-oct-08	Real Decreto 1644/2008, de 10 de octubre, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas.	PRL
12-dic-08	Real Decreto 2060/2008, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias.	Seguridad industrial
22-dic-08	Real Decreto 2090/2008, de 22 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo parcial de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental	Medio ambiente
20-may-09	Orden ARM/1312/2009 de 20 de mayo, por la que se regulan los sistemas para realizar el control efectivo de los volúmenes de agua utilizados por los aprovechamientos de agua del dominio público hidráulico, de los retornos al citado dominio público hidráulico y de los vertidos al mismo.	Aguas
09-jun-09	Orden ITC/1607/2009, de 9 de junio, por la que se aprueba la Instrucción técnica complementaria 02.2.01 «Puesta en servicio, mantenimiento, reparación e inspección de equipos de trabajo» del Reglamento general de normas básicas de seguridad minera	Sectorial
12-jun-09	Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras	Sectorial
25-nov-09	Reglamento 1221-2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de noviembre de 2009, relativo a la participación voluntaria de organizaciones en un sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS), y por el que se derogan el Reglamento (CE) n.º 761/2001 y las Decisiones 2001/681/CE y 2006/193/CE de la Comisión	Medio ambiente
26-mar-10	Real Decreto 367/2010 de 26 de marzo, de modificación de diversos reglamentos del área de medio ambiente para su adaptación a la Ley 17/2009, de 23 de noviembre, sobre el libre acceso a las actividades de servicios y su ejercicio, y a la Ley 25/2009, de 22 de diciembre, de modificación de diversas leyes para su adaptación a la Ley de libre acceso a actividades de servicios y su ejercicio.	Residuos
05-nov-10	Real Decreto 1436/2010, de 5 de noviembre, por el que se modifican diversos reales decretos para su adaptación a la Directiva 2008/112/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, que modifica varias directivas para adaptarlas al Reglamento (CE) n.º 1272/2008, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas.	Medio ambiente

18-nov-10	Resolución de 18 de noviembre de 2010, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se aprueba la especificación técnica número 2003-1-10 «Formación preventiva para el desempeño de los puestos de trabajo encuadrados en los grupos 5.1 letras a), b), c) y 5.2 letras a), b), d), f) y h) de la Instrucción Técnica Complementaria 02.1.02 «Formación preventiva para el desempeño del puesto de trabajo», del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera»	Sectorial
18-nov-10	Resolución de 18 de noviembre de 2010, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se aprueba la especificación técnica número 2004-1-10 «Formación preventiva para el desempeño de los puestos de trabajo encuadrados en los grupos 5.4 letras a), b), c), d), e), f), g), h), j), k), l), m), y 5.5 letras a), b) y d) del apartado 5 de la Instrucción Técnica Complementaria 02.1.02 «Formación preventiva para el desempeño del puesto de trabajo», del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera»	Sectorial
18-nov-10	Resolución de 18 de noviembre de 2010, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se aprueba la especificación técnica número 2010-1-01 «Inspección de cargadoras sobre ruedas» de la instrucción técnica complementaria 02.2.01 «Puesta en servicio, mantenimiento, reparación e inspección de equipos de trabajo» del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera, aprobada por la Orden ITC/1607/2009, de 9 de junio.	Sectorial
28-ene-11	Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire	Atmósfera (polvo y gases)
28-ene-11	Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación	Atmósfera (polvo y gases)
04-feb-11	Real Decreto 139/2011, de 4 de febrero, para el desarrollo del Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial y del Catálogo Español de Especies Amenazadas	Medio ambiente
05-abr-11	Orden ITC/933/2011, de 5 de abril, por la que se aprueba la Instrucción Técnica Complementaria 2.0.03, "protección de los trabajadores contra el polvo, en las actividades de la minería de las sales solubles sódicas y potásicas" del Reglamento general de normas básicas de seguridad minera.	Sectorial
28-jul-11	Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados	Residuos
04-may-12	Real Decreto 777/2012, de 4 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por las actividades mineras	Sectorial
04-may-12	Real Decreto Ley 17/2012, de 4 de mayo, de medidas urgentes en materia de medio ambiente.	Medio ambiente
06-jul-12	Real Decreto 1038/2012, de 6 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas	Atmósfera (ruido y vibraciones)
19-dic-12	Ley 11/2012, de 19 de diciembre, de medidas urgentes en materia de medio ambiente.	Medio ambiente
05-abr-13	Real Decreto 238/2013 de 5 de abril, por el que se modifican determinados artículos e instrucciones técnicas del RITE, aprobado por el RD 1027/2007 de 20 de julio	Climatización
11-jun-13	Ley 5/2013, de 11 de junio, por la que se modifican la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.	Medio ambiente
06-sep-13	Real Decreto 670/2013 de 6 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, en materia de registro de aguas y criterios de valoración de daños al dominio público hidráulico.	Aguas
01-oct-13	Orden AAA/1783/2013, de 1 de octubre, por la que se modifica el anejo 1 del Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases, aprobado por Real Decreto 782/1998, de 30 de abril.	Residuos
18-oct-13	Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.	Medio ambiente
09-dic-13	Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental	Medio ambiente
14-feb-14	Real Decreto 97/2014, de 14 de febrero, por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español.	APQ
09-may-14	Real Decreto 337/2014 de 9 de mayo, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23	Seguridad industrial
16-oct-14	Resolución de 16 de octubre de 2014, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se aprueba la especificación técnica número 2005-1-11 «Cartilla de formación personal del trabajador y Libro de registro de cursos recibidos» de la instrucción técnica complementaria 02.1.02 «Formación preventiva para el desempeño del puesto de trabajo», del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.	Sectorial

16-oct-14	Resolución de 16 de octubre de 2014, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se modifica la especificación técnica número 2001-1-08 «Formación preventiva para el desempeño del puesto de operador de maquinaria de arranque/carga/viales, pala cargadora y excavadora hidráulica de cadenas, en actividades extractivas de exterior», de la instrucción técnica complementaria 02.1.02 «Formación preventiva para el desempeño del puesto de trabajo», del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.	Sectorial
27-oct-14	Orden AAA/2056/2014 de 27 de octubre, por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y de declaración de vertido	Aguas
20-feb-15	Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos	Residuos
13-mar-15	Real Decreto 180/2015, de 13 de marzo, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado	Residuos
09-jul-15	Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil	Emergencias
11-sep-15	Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental	Aguas
21-sep-15	Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, aprobación medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves	Emergencias
12-feb-16	Ley 56/2016, de 12 de febrero, por el que se transpone la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, en lo referente a auditorías energéticas, acreditación de proveedores de servicios y auditores energéticos y promoción de la eficiencia del suministro de energía.	Eficiencia energética
08-abr-16	Real Decreto 144/2016, de 8 de abril, por el que se establecen los requisitos esenciales de salud y seguridad exigibles a los aparatos y sistemas de protección para su uso en atmósferas potencialmente explosivas y por el que se modifica el Real Decreto 455/2012, de 5 de marzo, por el que se establecen las medidas destinadas a reducir la cantidad de vapores de gasolina emitidos a la atmósfera durante el repostaje de los vehículos de motor en las estaciones de servicio.	Seguridad industrial
15-jul-16	Real Decreto 294/2016, de 15 de julio, por el que se establece el procedimiento para la gestión de los derechos mineros y de los derechos del dominio público de hidrocarburos afectados por el cambio del sistema geodésico de referencia.	Sectorial
20-ene-17	Real Decreto 20/2017, de 20 de enero, sobre los vehículos al final de su vida útil.	Residuos
17-feb-17	Real Decreto 115/2017, de 17 de febrero, por el que se regula la comercialización y manipulación de gases fluorados y equipos basados en los mismos, así como la certificación de los profesionales que los utilizan y por el que se establecen los requisitos técnicos para las instalaciones que desarrollen actividades que emitan gases fluorados.	Climatización
22-may-17	Real Decreto 513/2017, de 22 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios	Emergencias
23-jun-17	Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10.	APQ
07-jul-17	Real Decreto 706/2017, de 7 de julio, por el que se aprueba la instrucción técnica complementaria MI-IP 04 «Instalaciones para suministro a vehículos» y se regulan determinados aspectos de la reglamentación de instalaciones petrolíferas	APQ
31-jul-17	DECISIÓN DE EJECUCIÓN (UE) 2017/1442 DE LA COMISIÓN de 31 de julio de 2017 por la que se establecen las conclusiones sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) conforme a la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo para las grandes instalaciones de combustión	MTD
14-sep-17	Resolución de 14 de septiembre de 2017, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se aprueba la especificación técnica 2012-01-17 «Inspección de volquetes de bastidor articulado sobre ruedas», de la instrucción técnica complementaria 02.2.01 «Puesta en servicio, mantenimiento, reparación e inspección de equipos de trabajo», aprobada por la Orden ITC/1607/2009, de 9 de junio, del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.	Sectorial
14-sep-17	Resolución de 14 de septiembre de 2017, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se aprueba la especificación técnica 2011-01-17 «Inspección de volquetes de bastidor rígido sobre ruedas», de la instrucción técnica complementaria 02.2.01 «Puesta en servicio, mantenimiento, reparación e inspección de equipos de trabajo», aprobada por la Orden ITC/1607/2009, de 9 de junio, del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera	Sectorial
10-oct-17	Orden APM/1007/2017, de 10 de octubre, sobre normas generales de valorización de materiales naturales excavados para su utilización en operaciones de relleno y obras distintas a aquéllas en las que se generaron	Residuos
23-oct-17	Real Decreto 920/2017, de 23 de octubre, por el que se regula la inspección técnica de vehículos.	Medio ambiente
02-nov-17	Orden PRA 1080/2017, de 2 de noviembre, por la que se modifica el anexo I del Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.	Medio ambiente

05-dic-18	Ley 9/2018, de 5 de diciembre, por la que se modifica la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, la Ley 21/2015, de 20 de julio, por la que se modifica la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes y la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.	Medio ambiente
25-ene-19	Real Decreto 18/2019, de 25 de enero Comercio Derechos Emisión de GEI periodo 2021-2030	Medio ambiente
06-mar-20	Orden TED/252/2020, de 6 de marzo, por la que se modifican las Instrucciones Técnicas Complementarias 02.0.01 «Directores Facultativos» y 02.1.01 «Documento sobre Seguridad y Salud», y por la que se deroga la Instrucción Técnica Complementaria 09.0.10 «personal de montaje, explotación y mantenimiento», del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera	Sectorial
26-may-20	Real Decreto 542/2020, de 26 de mayo, por el que se modifican y derogan diferentes disposiciones en materia de calidad y seguridad industrial.	Seguridad industrial
26-may-20	Decreto 96/2020, de 29 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 7/2008, de 7 de julio, de protección del paisaje de Galicia.	Paisaje
02-jun-20	Real Decreto 553/2020, de 2 de junio, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado	Residuos
22-dic-20	Real Decreto 1154/2020, de 22 de diciembre, por el que se modifica el Real Decreto 665/1997, de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo	Atmósfera (polvo y gases)
13-abr-21	Real Decreto 265/2021, de 13 de abril, sobre los vehículos al final de su vida útil y por el que se modifica el Reglamento General de Vehículos, aprobado por el Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre.	Residuos

ANEXO 5

**DESCRIPCIÓN
DE PROCESOS
METALÚRGICOS**

Metalurgia del aluminio¹³¹

Por reservas y contenidos de Al_2O_3 la mena para la obtención del aluminio es la bauxita (40-50 % Al_2O_3 ; <20 % Fe_2O_3 ; 3-10 % SiO_2), que es un material terroso, de color rojo parduzco, gris pardo o amarillento. Se trata de una mezcla de hidróxidos de aluminio: gibbsita¹³² bohemita¹³³ y diásporo¹³⁴; junto con otros minerales como arcillas, sílice, cuarzo libre, hidróxidos y óxidos de hierro y rutilo (TiO_2).

Actualmente, el aluminio se produce por el tándem de procesos Bayer y de Hall-Héroult. En el primero se obtiene la alúmina (Al_2O_3) a partir de la bauxita y, en el segundo, el aluminio metal a partir de la alúmina por electrolisis ígnea. Partiendo de 4 kg de bauxita mediante el proceso Bayer se obtienen 2 kg de alúmina, con los cuales se obtiene 1 kg de aluminio¹³⁵.

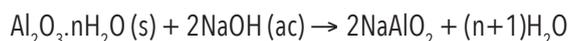
Proceso Bayer

Patentado en 1889 por K. J. Bayer, como todos los procesos hidrometalúrgicos, el proceso Bayer es cíclico y no es único, hay tantos como menas de aluminio. Sin embargo, y a grandes rasgos, se pueden definir dos tipos. Por un lado, está el proceso Bayer de baja temperatura o Bayer americano, que trata bauxitas de naturaleza gibbsítica. El de alta temperatura o europeo, trata bauxitas de alto contenido en monohidrato, tipo bohemita. En la Figura 91 se muestra un diagrama de flujo con las etapas básicas del proceso.

Figura 91. Etapas del proceso Bayer. Fuente: elaboración propia de los autores.



- (i) Molienda y preparación. Recibida la bauxita se almacena en parques para su homogeneización. La bauxita con bajo contenido en agua se tritura (<1 cm) y luego pasa a los molinos de bolas y barras donde se lleva a cabo la molienda en húmedo (con el licor gastado o pobre proveniente de la etapa de precipitación), obteniéndose una pulpa, que se muele a tamaños de 300 μm -2 mm. Esta pulpa se lleva a unos tanques de retención donde se homogeneiza y se mantiene caliente y en suspensión mediante la inyección de vapor. En esta etapa se elimina la sílice soluble ($\text{Si} < 1,5\%$). Luego se envía a digestión.
- (ii) Digestión. En el proceso de digestión la pulpa se ataca con el licor pobre procedente de la precipitación, ajustando el contenido en sosa de forma que se obtenga a la salida una relación alúmina/cáustico de 0,68-0,70 g Al_2O_3 / g Na_2CO_3 . La temperatura y la presión del proceso lo marca el tipo de bauxita y los tiempos de digestión varían en función del contenido en sílice. La reacción que tiene lugar puede representarse del modo siguiente:



De esta manera, la alúmina es puesta en disolución, dejando como residuo sólido la mayoría de las impurezas que acompañan a la bauxita (principalmente óxidos de hierro y titanio).

¹³¹ Este apartado, en general sigue a Sancho et al. (1994).

¹³² Trihidrato de aluminio, $\text{Al}(\text{OH})_3$, 34,6 % de contenido medio de aluminio.

¹³³ Monohidrato de aluminio, $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$, 45 % de contenido medio de aluminio.

¹³⁴ Monohidrato de aluminio, $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$, 45 % de contenido medio de aluminio.

¹³⁵ La producción del aluminio en plantas integrales (producción de alúmina, aluminio y pre-transformación) intenta cumplir los siguientes requisitos, que es complicado que se den todos a la vez: (i) poca distancia a las minas de bauxita, (ii) poca distancia electrolisis/fundición, (iii) cercanía de combustible y energía eléctrica abundante, con seguridad de suministro y a un precio competitivo, (iv) cercanía a los reactivos (sosa, etc.), (v) mano de obra barata, (vi) infraestructura adecuada y (vii) puertos marítimos de gran capacidad.

El licor que sale de los digestores pasa por varias etapas de descompresión y recuperación de calor en intercambiadores¹³⁶. Cuando la pulpa digerida y evaporada alcanza los 100 °C se transfiere a la separación de lodos (decantación).

- (iii) Decantación. La pulpa que proviene de la digestión se somete a la separación de las arenas, limos y lodos que contiene. Las arenas se pueden separar en un clasificador tipo hidrociclón y una vez lavadas, se pueden utilizar posteriormente para cierto tipo de filtros. Los limos más finos se sedimentan en unos decantadores mediante la ayuda de floculantes sintéticos en cantidades pequeñas (algunos gramos por tonelada de barro). Los lodos decantados (25 % sólidos) se envían por bombeo al circuito de lavado de lodos. Funciona a contracorriente, dejando unos lodos rojos que se envían al embalse de lodos rojos (donde se consolidan con aditivos).
- (iv) Clarificación. Tras la decantación, el licor que sobrenada o flota, que tiene todavía sólidos, se envía a un tanque para su clarificación. La clarificación se realiza mediante filtros. Tras pasar por los filtros de arena la pulpa queda prácticamente libre de sólidos y clarificada.
- (v) Precipitación del hidrato. Se trata de una etapa clave del proceso en la que se precipita la alúmina de la solución¹³⁷. La precipitación se lleva a cabo mediante enfriamiento y dilución. A pesar de bajar la temperatura del licor hasta los 75 °C, es difícil que se produzca una precipitación espontánea, por lo que debe favorecerse mediante la siembra de cristales de hidrato, obteniéndose de ese modo la granulometría deseada. El hidrato que precipita es el trihidrato ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). El producto precipitado se denomina hidrargirita, bayerita o gibbsita.

El equilibrio de la reacción tarda mucho en realizarse, y el rendimiento va a depender de las condiciones de operación. Se debe buscar (i) la mayor cantidad de hidrato de grano grueso, (ii) la mayor producción de hidrato y (iii) una textura de grano adecuado.

La precipitación puede llevarse a cabo en forma discontinua, en un solo paso o en doble paso. Para precipitar en un solo paso, se añaden los gérmenes gruesos y finos de forma conjunta, separándose los precipitados gruesos en el clasificador primario, que se secan y calcinan. La precipitación en doble paso supone dos tipos de germen, el grueso y el fino. El germen grueso se emplea para nuclear el producto final, mientras que el fino se emplea para producir germen grueso.

La tendencia es a la precipitación continua empleando numerosos tanques (12-16) por los que circula el licor. En los de cabeza (70 °C) se añade germen fino y en los intermedios (50 °C) el germen grueso, favoreciéndose en los primeros precipitadores la aglomeración, mediante una elevada temperatura (70 °C), y obteniéndose los dos tercios de hidrato precipitado. En los precipitadores intermedios y finales baja la temperatura hasta los 50 °C, lo que conduce a un incremento del rendimiento.

- (vi) Clasificación y lavado. El hidrato se clasifica en los tanques de sedimentación en función de diámetros crecientes: grueso (producto al calcinador), medio (núcleos de germen grueso) y fino (germen fino). El germen grueso se lava para eliminar el licor que arrastra. Se llevan a cabo filtrados y lavados, obteniéndose una torta que contiene un 10 -15 % de agua y que se envía a la última etapa de calcinación.
- (vii) Calcinación. El trihidrato, una vez separado, se seca y se calcina en horno rotativo o en horno de

¹³⁶ Los bajos costos térmicos que hoy día tiene el proceso Bayer son debidos, en buena parte, a un diseño conveniente de los recuperadores del calor de la pulpa caliente para calentar los licores de retorno

¹³⁷ La reacción es la siguiente: $2\text{NaAlO}_2(\text{ac}) + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 2\text{NaOH}(\text{ac})$.

lecho fluido. El secado se hace aprovechando los gases calientes del calcinador. Luego se envía a un horno donde se calina a 900- 1.200 °C obteniéndose la alúmina (Al_2O_3) según la reacción: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$; obteniéndose el producto que alimentará las cubas de electrolisis.

Proceso Hall Héroult

El método mundialmente utilizado en la producción de aluminio es el proceso Hall Héroult (patentado a finales del siglo XIX en EE. UU. y en Francia simultáneamente). Se trata de un procedimiento de electrolisis ígnea de la alúmina en un baño de criolita fundida ($3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$), que es el medio iónico en el que se va a producir la electrolisis ígnea o de sales fundidas (el aluminio no se puede obtener por electrolisis de una solución acuosa de una sal porque el potencial de reducción normal del aluminio es menor que el del hidrógeno. Así, la solución acuosa con iones Al^{3+} y H^+ , cuando se electroliza, los iones H^+ se descargan en el cátodo, en lugar de los iones Al^{3+} , que permanecen en solución, desprendiéndose hidrógeno)¹³⁸.

Si se introducen dos electrodos en el baño y se aplica una diferencia de potencial, que supere la tensión de descomposición, las polarizaciones en los electrodos y las caídas óhmicas, se producen una serie de reacciones tanto en el cátodo como en el ánodo que constituyen el proceso de electrolisis. La aproximación de los ánodos al cátodo forma el arco eléctrico que mantiene fundido el baño de sólidos a 1.010 °C y permite la migración del aluminio hacia el cátodo que está en el fondo de la cuba.

La electrolisis es un proceso continuo¹³⁹, habiéndose desarrollado sistemas de alimentación continua tanto en las cubas Söderberg como en las precocidas. La alimentación se realiza de forma discontinua a intervalos de horas entre ambas. Parte de la alúmina se disuelve y otra se deposita sobre el talud y el cátodo o crisol de la cuba desde donde se disuelve progresivamente. Periódicamente, al menos una vez al día, se interrumpe la aportación de alúmina hasta que se produce el denominado "efecto anódico o embalaje", que consiste en el aumento de la tensión (diferencia de potencial ánodo/o) de la celda de electrolisis, lo que indica que la alúmina disuelta en el electrolito alcanza un porcentaje inferior al necesario. Tras romper la capa de polarización anódica, formada por descomposición de las sales fluoradas que constituyen el electrolito, por medios mecánicos (burbujeo de gas), se reanuda la aportación de alúmina y el proceso de electrolisis.

La unidad elemental del proceso de obtención de aluminio es la cuba electrolítica. Tres partes constituyen la cuba: cátodo¹⁴⁰, ánodo¹⁴¹ y electrolito.

¹³⁸ También se adicionan fluoruro de aluminio, fluoruro de calcio y carbonato de litio, con el fin de satisfacer propiedades tales como: buena solubilidad de la alúmina, temperatura de solidificación lo más baja posible, menor densidad que el aluminio líquido (que permite separar físicamente el electrolito del metal, diferencia de densidades máxima), buena conductividad eléctrica para minimizar las pérdidas óhmicas, poca solubilidad del aluminio, buena estabilidad termodinámica, baja viscosidad (un aumento de la viscosidad disminuye la difusión y el transporte de aluminio hacia el cátodo) y bajo precio. Por ejemplo, el LiF y MgF_2 reducen la temperatura de fusión de la criolita pura, si bien disminuyen la solubilidad del electrolito.

¹³⁹ El rendimiento de corriente (o rendimiento de Faraday), que se define como la relación entre el peso de aluminio realmente producido y el que se debería producir de acuerdo con las leyes de Faraday, industrialmente se sitúa en el 84-94 %, lo que depende de la temperatura, la densidad de corriente, la distancia interpolar, la composición del electrolito y el diseño de la cuba. El mecanismo principal de pérdida de rendimiento de corriente es la redisolución del aluminio en el electrolito y su posterior reoxidación con los gases anódicos.

¹⁴⁰ El cátodo horizontal es de carbón y está constituido por bloques preformados, unidos entre sí y al revestimiento lateral por medio de la denominada pasta de juntas, también de carbón. En su parte inferior, los bloques de carbón llevan adosados, bien sea mediante fundición o pasta de carbón, unas barras de acero colectoras de la corriente. Sobre los bloques se encuentra la "piscina" de aluminio líquido que, por tanto, esta polarizada negativamente y cuya superficie constituye la denominada superficie catódica efectiva. Es el recipiente que contiene el metal y el baño fundido a la temperatura de 950 °C donde tiene lugar la reacción catódica. Tiene como misiones ser conductor para el aporte electrónico a la reacción catódica y, a la vez, ser un horno resistente al aluminio y a las sales fundidas de base criolita.

En la reacción catódica el catión aluminio se encuentra formando complejos del tipo Al-O-F cargados negativamente. El Na^+ está presente como catión libre. Dado que el aluminio no se encuentra libre, sino formando complejos, han de ser estos los que participan en la reacción catódica: $2\text{AlF}_6^{3-} + 6\text{Na}^+ + 6e^- \rightarrow 2\text{Al} + 6(\text{Na}^+, \text{F}^-) + 6\text{F}^-$. El exceso de iones F^- desplaza el equilibrio hacia la izquierda con lo que la reacción total se escribe como: $\text{AlF}_6^{3-} \leftrightarrow \text{AlF}_4^- + 2\text{F}^-$; y $3\text{AlF}_4^- + 6\text{Na}^+ + 6e^- \leftrightarrow 2\text{Al} + 6(\text{Na}^+, \text{F}^-) + 2\text{AlF}_6^{3-}$

¹⁴¹ El ánodo también de carbón se encuentra suspendido a poca distancia de la superficie del aluminio líquido. La distancia entre ambos electrodos es de 4-5 cm (distancia interpolar), existiendo continuidad eléctrica por la presencia del electrolito de sales fundidas (criolita mayoritariamente).

Atendiendo al ánodo, existen dos tipos (Figura 92): (i) cubas precocidas: formadas por varios ánodos individuales que se fabrican en otra zona distinta de la zona de electrolisis y ya vienen coquizados, de ahí el nombre de precocidos (lo único que hay que hacer es reemplazar un ánodo gastado por uno nuevo); y (ii) cubas Söderberg: el ánodo se forma por autococción en la propia cuba. Se añaden para ello pastillas de coque y brea dentro de un recinto delimitado por una envolvente metálica denominada coraza. Es la propia temperatura del proceso la que provoca la fusión, destilación parcial de la brea y cocción de la pasta formándose el ánodo cocido. La entrada de corriente se produce por medio de unos conductores de acero conocidos como agujas que se insertan en la pasta.

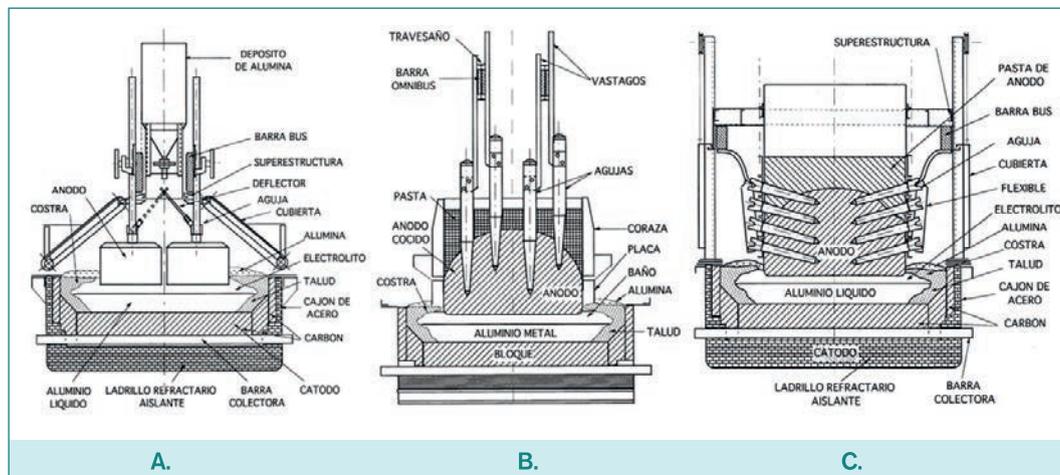


Figura 92. Tipos de ánodos: **A.** precocidos **B.** Söderberg: agujas verticales **C.** Söderberg: agujas horizontales. Fuente: (Sancho et al., 1994).

Los ánodos se van quemando y hay que reponerlos frecuentemente por lo que las plantas de aluminio tienen también una fábrica de ánodos.

La alúmina se disuelve en el electrolito, para ello se introduce en la cuba bien rompiendo periódicamente la costra mediante martillos neumáticos o mediante cuchillas accionadas por cilindros. También es posible la alimentación en continuo o el picado puntual.

El aluminio producido se deposita en el cátodo debido a que tiene mayor densidad que el baño. La altura de metal se basa en el equilibrio térmico y en la magnetohidrodinámica del sistema, y se mantiene estable con extracciones periódicas del metal. El sobrecalentamiento del aluminio con respecto a su temperatura de fusión (del orden de 300 °C) asegura que se mantiene líquido hasta su transporte a la fundición.

El aluminio metal obtenido en las cubas de electrolisis debe retirarse cada 24 horas. La colada se realiza por sifonado de cada cuba. El metal se carga en una "cuchara" común que se lleva a la nave de fundición, que tiene como función el tratamiento y solidificación del metal en las mejores condiciones para obtener un lingote semielaborado o un lingote limpio, homogéneo, con la composición y formato adecuados.

La primera fase es el desnatado, es decir la eliminación de las impurezas y la alúmina que suben a la superficie del metal que se encuentra en la cuchara. La siguiente es la de desgasificar el hidrógeno (presente en el metal fundido debido a la reacción del aluminio a altas temperaturas con la humedad y gases del ambiente). Este hidrógeno se disuelve en el metal y su solubilidad disminuye con la temperatura

En la reacción anódica tiene que existir concentración suficiente de alúmina en el electrolito (2 % para densidades de corriente industriales de 0,7 A·cm²). La única especie iónica que contiene oxígeno es el ion $Al_2OF_6^{4-2x}$, que es el único que experimenta la reacción anódica. La reacción anódica global para $x = 3$ es la siguiente: $3Al_2OF_6^{2-} + 6F^- \rightarrow 3O + 6AlF_4^- + 6e^-$. De la reacción anterior $3AlF_4^-$ se emplean en la reacción catódica y los otros 3 reaccionan con el $6F^-$ de la reacción catódica para dar: $3AlF_4^- + 6F^- \rightarrow 3AlF_6^{3-}$. Los $3AlF_6^{3-}$ de la última reacción se unen a otro AlF_6^{3-} de la reacción catódica para dar en presencia de alúmina: $4AlF_6^{3-} + Al_2O_3 \rightarrow 3Al_2OF_6^{2-} + 6F^-$. El oxígeno liberado se combina con el carbono del ánodo para generar el dióxido de carbono. La reacción global es la siguiente: $Al_2O_3 + (3/2)C \rightarrow 2Al + (3/2)CO_2$

dando malas propiedades al metal acabado, al que fragiliza y de oxidar elementos en solución como el sodio y limpiar impurezas sólidas presentes en el caldo.

Las partículas o inclusiones pueden producir defectos o causar problemas, tanto en los productos como en los procesos, tales como mal acabado superficial, defectos en el aluminio brillante, porosidad interna, maquinabilidad difícil, etc. Las partículas incorporadas pueden tener naturaleza diferente, productos de oxidación (alúmina y otros óxidos), u otras como trozos de material refractario o escorias. Las inclusiones se pueden eliminar mediante hornos a altas temperaturas, sin embargo, un filtrado es la mejor manera de obtener el producto colado fino. Los filtros son cerámicos (carburo de silicio) que actúan, bien creando con el tiempo de colada una capa de partículas retenidas que hacen el filtro más fino o bien reteniendo las partículas el propio filtro.

Previamente a la colada se adicionan una serie de aleantes, modificadores y afinantes con el fin de modificar las propiedades del producto final. Se buscan dos tipos de propiedades: propiedades necesarias del producto final (resistencia, conductividad térmica y eléctrica, dureza, resistencia a la corrosión, tenacidad a la fractura, etc.) y propiedades necesarias para la fabricación (ductilidad, colabilidad, contracción volumétrica (rechupes) o agrietabilidad). La Figura 93 recoge una imagen resumen de la metalurgia del aluminio.

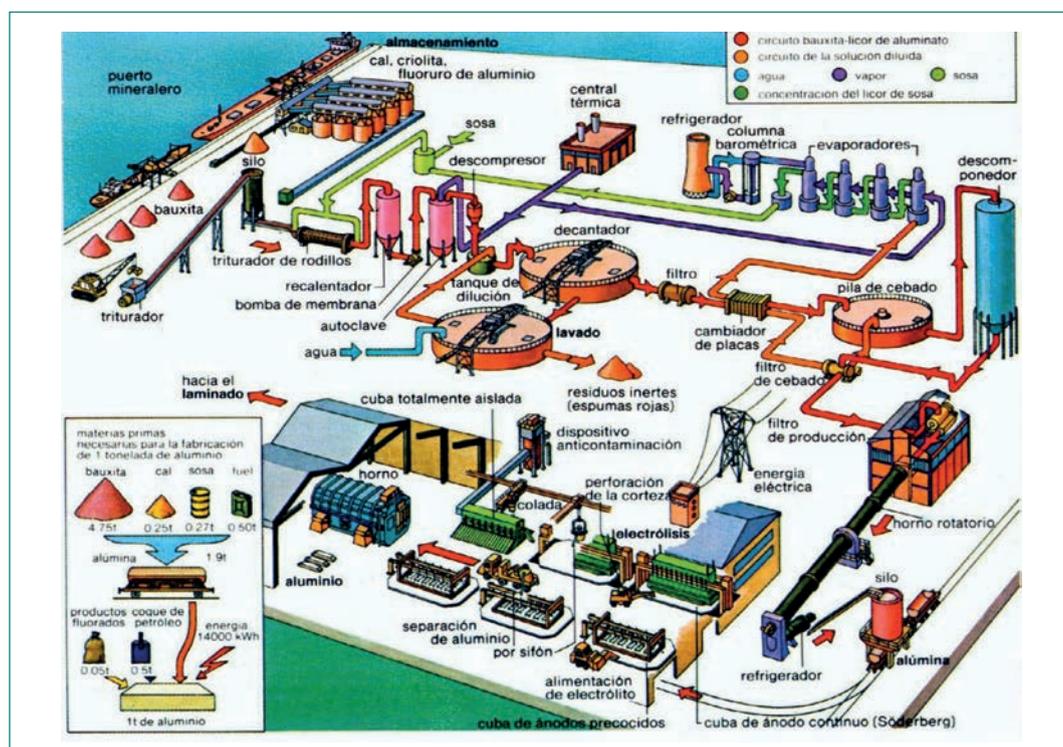


Figura 93. Metalurgia del aluminio. Fuente: (Aguilar, n.d.).

Metalurgia del cobalto

Las operaciones esenciales de producción de cobalto se realizan según las siguientes rutas: (i) producción de cobalto en el procesamiento de minerales que contienen cobre o níquel, (ii) concentración de material que contenga cobalto durante tratamientos hidrometalúrgicos o pirometalúrgicos de cobre o níquel, (iii) purificación de soluciones mediante técnicas de separación en estado líquido, como precipitación selectiva, extracción con disolventes, intercambiadores de iones y (iv) producción de cobalto

metálico, cobalto en polvo, cobalto precipitado por procesos independientes como electrorrefinación, electroobtención o reducciones/precipitaciones.

A continuación, se va a describir brevemente el proceso de obtención de cobalto metálico a partir de los minerales de sulfuro de cobalto y cobre (mineral de carrolita, Co_2CuS_4 y calcocita, Cu_2S), que se están explotando en varias minas de la República Democrática del Congo y Zambia. La metalurgia del cobalto tiene procesos tanto de la vía pirometalúrgica como de la hidrometalúrgica. Las etapas se recogen en la Figura 94.



Figura 94. Fases de la metalurgia del cobalto. Fuente: elaboración propia de los autores.

En la Figura 95 se proporciona un diagrama de flujo para un proceso típico de producción de cobalto de alta pureza a partir de un concentrado de sulfuro de cobalto-cobre según la fuente citada. El proceso de tostación de concentrados tiene como fin obtener un calcinado de sulfato soluble, en lugar de óxidos insolubles, para lo cual la temperatura elegida en el horno de tostación de lecho fluido es de 695-705 °C. Un 90 % de los sulfuros se oxidan a sulfatos solubles en lugar de a óxidos¹⁴².

El calcinado de sulfato se enfría de 700 °C a 75 °C y se envía a la planta de lixiviación de cobalto-cobre, que trabaja con tanques abiertos Pachuca agitados por aire, utilizando como agente lixivante el refinado de extracción por solventes de cobre (aproximadamente) $\sim 30 \text{ g H}_2\text{SO}_4/\text{l}$ + ácido sulfúrico fresco (obtenido a partir del gas de tostación)¹⁴³.

El producto obtenido es una solución de sulfato que contiene $\sim 22 \text{ g l/Cu}$, 7 g Co/l y $< 50 \text{ ppm}$ de sólidos (después de sedimentación, filtración y clarificación), cuyo destino es la etapa de extracción por solventes, donde se separa el Cu^{2+} del Co^{2+} . El residuo formado por el calcinado sin disolver se envía a lavado y disposición final.

Para la precipitación de hidróxido de cobalto, $\text{Co}(\text{OH})_2$, de alta pureza la solución de partida es el refinado procedente de la extracción con solvente ($\sim 7 \text{ g Co/l}$) (alrededor del 30 % del flujo de refinado, el resto vuelve a la etapa de lixiviación del calcinado).

Antes de la precipitación del hidróxido se procede a la eliminación de las "impurezas" como el cobre,

¹⁴² El proceso se controla mediante el contenido de O_2 del gas de entrada (30 % en volumen de O_2 , 70 % en volumen de N_2 (aire enriquecido con oxígeno)) y la cantidad de H_2O en la suspensión de alimentación.

¹⁴³ El pH se mantiene por debajo de 1,5, lo que se logra agregando ácido sulfúrico fresco, según sea necesario.

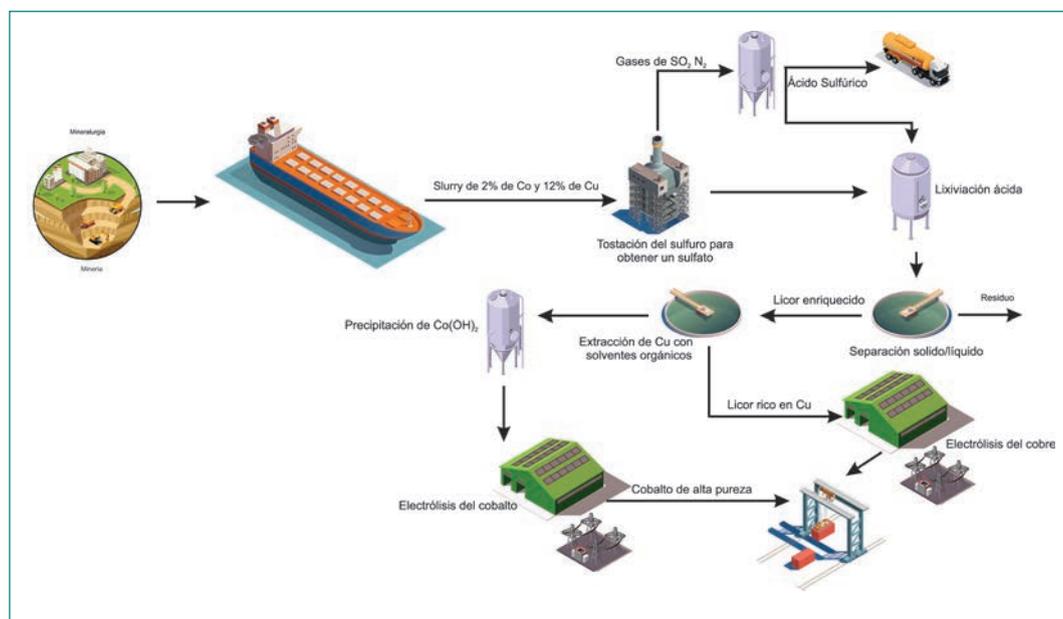


Figura 95. Producción de cobalto de alta pureza a partir de concentrado de sulfuro de cobalto-cobre. Fuente: elaboración propia de los autores.

zinc y hierro (purificación del refinado rico en cobalto)¹⁴⁴. Una vez llevada a cabo la eliminación de las impurezas, la precipitación del hidróxido de cobalto tiene lugar elevando el pH hasta 8,8 con cal viva.

Antes de pasar a la obtención del cobalto por electrólisis, es necesario preparar el electrolito utilizando como materiales de partida el $\text{Co}(\text{OH})_2$ de alta pureza preparado como se ha descrito anteriormente y el electrolito gastado reciclado del propio proceso de electrólisis de cobalto. El procedimiento es disolver el $\text{Co}(\text{OH})_2$ en el electrolito gastado, agregando ácido sulfúrico para controlar que el pH se encuentre entre 6,2 y 6,5 (para evitar que se disuelva el $\text{Zn}(\text{OH})_2$).

Con el fin de eliminar los sólidos no disueltos se usan clarificadores y filtros. La eliminación de los sulfuros solubles y de la materia orgánica arrastrada, se realiza haciendo pasar la solución filtrada a través de columnas de carbón. Para la eliminación del níquel se recicla el 20 % de la solución a través de una columna de intercambio iónico. Finalmente, el producto que se obtiene es el electrolito de sulfato de cobalto (>20 g Co/l).

A partir del electrolito mediante el proceso de electrólisis¹⁴⁵ se obtiene cobalto metálico de alta pureza (99,65-99,7 % Co). La recuperación de cobalto del concentrado a metal es de, aproximadamente, el 62 %. Los cátodos se trituran en escamas de 0,02 m – 0,04 m en una trituradora de rodillos. Para obtener metal de cobalto puro, el hidrógeno gaseoso se elimina mediante desgasificación al vacío a 800-840 °C en hornos eléctricos de ~1 m de diámetro y 7 m de altura.

Como se ha comentado, el cobalto también se puede obtener como subproducto de la metalurgia de níquel, partiendo de depósitos de sulfuro y de laterita¹⁴⁶.

¹⁴⁴ La eliminación de cobre se realiza mediante extracción con disolvente secundario con LIX 984N, la del hierro y el cobre residual elevando el pH a 3,5 con piedra caliza y cal viva. Por su parte, la eliminación del zinc se realiza reciclando el 30 % de la solución a través de una planta de extracción por solventes de Zn (usando D2EHPA). La final del hierro tiene lugar elevando el pH hasta 6,7.

¹⁴⁵ Los ánodos de las cubas de electrólisis tienen unas dimensiones de 1m x 1m y se fabrican a partir de una aleación cuya composición es 94% Pb, 6% Sb. Por su parte, los cátodos, que son de las mismas dimensiones que los ánodos, son de acero inoxidable 316L. El voltaje aplicado es de 4-4,5 V y la densidad de corriente es de 300 A/m² de superficie del cátodo.

¹⁴⁶ Para más detalle ver Crundwell et al. (2011).

Metalurgia del uranio

El uranio es un elemento químico metálico de color gris de la serie de los actínidos, siendo unas 500 veces más abundante que el oro en la corteza terrestre. El uso más importante que tiene es el de servir como combustible en los reactores nucleares para generar electricidad¹⁴⁷.

Para utilizar el uranio como combustible nuclear, hay que someter al mineral a una serie de procesos físico-químicos, ya que es necesario aumentar la proporción del isótopo U-235, el único fisionable, desde el 0,7 % en el que se encuentra en la naturaleza hasta entre el 3 y el 5 %. Este proceso se denomina enriquecimiento.

Tras la etapa de exploración, minería a cielo abierto o subterránea y tratamiento del mineral, en la que a través de procesos físico-químicos se obtiene del uranio natural el concentrado de uranio U_3O_8 , conocido como *yellow cake*, llega la etapa de primera conversión, en la que el concentrado de uranio se transforma en UF_6 gaseoso para poder pasar a la siguiente etapa de enriquecimiento, que se realiza por difusión o por centrifugación y consiste en el aumento de la proporción del isótopo U-235, desde el 0,7 % en el que se encuentra en la naturaleza hasta un 5 % como máximo.

Terminado el enriquecimiento, se inicia la etapa de segunda conversión para pasar el uranio en estado gaseoso a estado sólido, concretamente en forma de polvo de dióxido de uranio, UO_2 . A continuación, comienza la etapa de fabricación de elementos combustibles, que es la única etapa que se realiza en España en la fábrica de Juzbado (Salamanca).

Del polvo de UO_2 mediante prensado y sinterizado se obtienen pastillas cerámicas de forma cilíndrica de unos 8 mm de diámetro y 10 mm de altura, que se introducen en unas vainas tubulares, de diámetro interno ligeramente superior a 8 mm y una longitud de unos 4 m, fabricadas en una aleación especial de zirconio denominada zircalloy. Las barras se agrupan en estructuras paralelepípedicas rígidas formando el elemento combustible. Su función principal es mantener las barras a una distancia apropiada para que circule el refrigerante entre ellas y reciba el calor generado en la reacción de fisión nuclear en cadena. En la Figura 96 se muestra la primera parte del ciclo: de la naturaleza al reactor, con las diferentes etapas de la transformación del mineral en combustible nuclear.

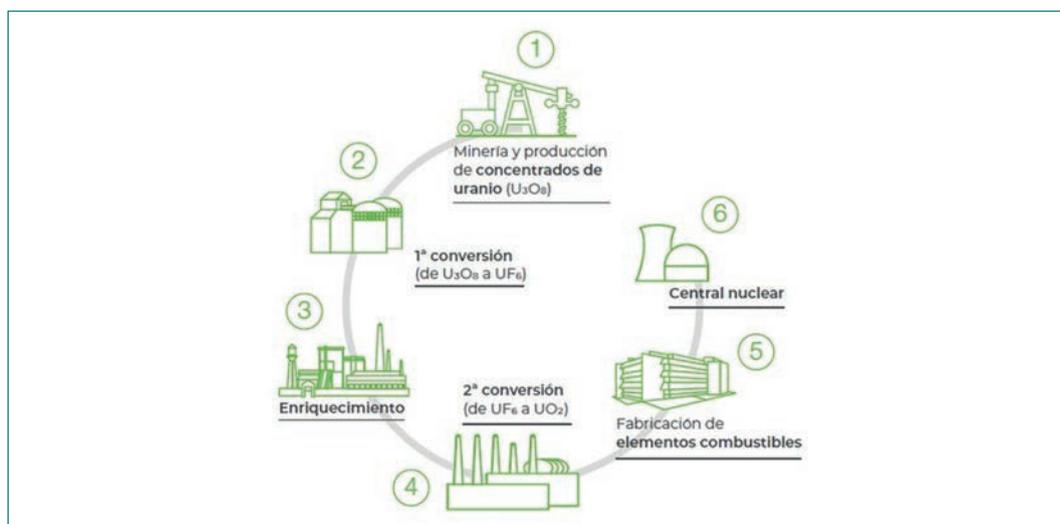


Figura 96. Primera parte del ciclo: de la naturaleza al reactor. Fuente: (Foro Nuclear, 2020).

¹⁴⁷ De acuerdo con la Nuclear Energy Agency (2020), existen más de 6,14 millones de toneladas de recursos recuperables identificados a precios inferiores a 130 \$/kgU y más de 8 millones a precios inferiores 260 \$/kgU. España cuenta con las reservas de uranio más importantes de la UE, con capacidad para cubrir su demanda nacional.

Una vez que el combustible ha permanecido durante tres ciclos de operación (unos 5 años) todavía conserva el 95 % del U-235 enriquecido; el 1 % es plutonio y el resto son actínidos menores, productos radiactivos de vida larga y de vida corta y productos estables de fisión. En caso de que se considere la reutilización del U-235 remanente y del Pu-239 generado, se procede a la reelaboración o reciclado del combustible para su uso en otro tipo de centrales nucleares, ya que conserva más del 90 % de su capacidad energética inicial.

El combustible reelaborado se conoce como MOX (abreviatura de Mezcla de Óxidos) compuesto por una mezcla de óxido de uranio natural, uranio reprocesado y óxido de plutonio. Con esta operación se separan estos dos elementos de los productos de fisión, que constituyen los residuos de alta actividad. Esta opción, en la que se reutiliza el combustible, es conocida como ciclo cerrado. Si se opta por no reutilizar los recursos energéticos contenidos en el combustible irradiado, se procede a la gestión de este como residuo radiactivo de alta actividad, ya que los productos de fisión quedan confinados en él. Tras una estancia inicial en la piscina de la propia central nuclear se depositará inicialmente en un Almacén Temporal Individualizado (ATI) en seco y, posteriormente, en principio, en un Almacén Temporal Centralizado (ATC). El destino final del combustible irradiado es su aislamiento definitivo en un Almacén Geológico Profundo (AGP). Esta opción es conocida como ciclo abierto.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aleación (*alloy*): es la mezcla de un metal principal puro con otros elementos para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del metal principal. Variando la composición de las aleaciones se puede conseguir un rango de propiedades diferentes para una amplia gama de aplicaciones. El acero y otras aleaciones férreas son las más consumidas debido a la gran variedad de propiedades que presentan, a la facilidad en su producción y al coste de fabricación. Otro ejemplo es el cobre metálico con pequeñas cantidades de berilio, que aumentan mucho la dureza y resistencia.

Algoritmo (*algorithm*): un algoritmo es un procedimiento de *software*, i.e. un conjunto de instrucciones diseñadas para realizar una tarea específica. Dado que puede haber más de un camino para completar una tarea, cualquier algoritmo puede ser modificado a lo largo del tiempo para mejorar su rendimiento, su eficiencia o su precisión.

Automatización (*automation*): la automatización, en el ámbito industrial, es el uso de sistemas o elementos computarizados y electromecánicos para controlar maquinarias o procesos industriales.

Big data: todo aquel conjunto de métodos y tecnologías que hace referencia a la adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos que, por volumen, frecuencia o tipología requieren ser tratados de forma no convencional. Implementa pues mecanismos para la optimización de la captura, el almacenado, búsqueda, compartición, análisis, y visualización de los datos.

Biometalurgia: es la rama de la biotecnología que estudia las aplicaciones y el potencial económico entre el mundo de los minerales ricos en metales y el mundo de las bacterias. Abarca procesos relativamente sencillos pero multidisciplinarios, que posibilitan la extracción, separación, purificación y recuperación de metales críticos de forma económica y sostenible.

Brownfield: los proyectos de exploración *brownfield* se centran en yacimientos adyacentes a un proyecto minero ya existente. Suelen existir datos geológicos disponibles sobre esos yacimientos de manera que el riesgo de la inversión en el proyecto es mucho menor que en la exploración *greenfield*.

Calcinación: proceso que tiene por objeto descomponer un compuesto (carbonato, sulfato, hidróxido, etc.) en sus óxidos formadores, para eliminar las sustancias volátiles que pueda contener, haciendo uso del calor.

Capex (*Capital expenditures*): gastos en los que una empresa incurre para la adquisición de activos destinados a permanecer más de un año en la empresa.

Ciberseguridad: conjunto de prácticas, procesos y tecnologías de seguridad aplicadas a la transformación digital para gestionar el riesgo. Permite la protección de las infraestructuras, de los sistemas y aplicaciones, de los dispositivos y en la transmisión de información; evitando el acceso de personas no autorizadas a los sistemas, asegurando la disponibilidad de recursos e información y garantizando integridad en los datos. La ciberseguridad es necesaria por el uso, procesamiento, almacenamiento y transmisión de información en las organizaciones e infraestructuras industriales. La evolución de los sistemas (de físicos a *cloud*) expone a las empresas a mayores amenazas, siendo los ataques cada vez más frecuentes, especialmente en la industria, y con un mayor nivel de profesionalización.

Clark o Número de Clark-(Clarke): es la abundancia media de un elemento químico en la corteza terrestre. El término se aplica a valores específicos o valores promedio.

Cloud: el *cloud* o la nube es un espacio virtual de proceso y almacenamiento de datos y *software* en centros de proceso de datos repartidos geográficamente de forma agnóstica para el usuario, que únicamente ve un interfaz de acceso desde su terminal de control.

Cloud computing (computación en la nube): es la prestación de recursos *hardware* y *software*, en forma de servicios predefinidos o parametrizables, a través de la red, en tiempo real y con posibilidades de conectividad simultánea de usuarios. Los servicios proporcionados van desde el almacenamiento, la computación de datos, la accesibilidad y la construcción de aplicaciones desde el lado *hardware*, hasta servicios de aplicaciones finales. Según el nivel de utilidad del servicio *cloud*, existen infraestructuras, plataformas o *software* como servicio (IaaS, PaaS, SaaS).

CNAE: acrónimo de Clasificación Nacional de Actividades Económicas. Permite la clasificación y agrupación de las unidades productoras según la actividad que ejercen de cara a la elaboración de estadísticas.

Concentrado: producto final obtenido en las plantas de proceso mineralúrgico en el cual el mineral sólido todo-uno que se extrae de la mina es tratado con el objetivo de separar los minerales de mena de la ganga y concentrar el o los componentes metálicos valiosos de la mena.

Conectividad: capacidad de un dispositivo (ordenador personal, periférico PDA, móvil, robot, electrodoméstico, automóvil, etc.) de poder ser conectado, generalmente a un ordenador personal u otro dispositivo electrónico, sin la necesidad de un ordenador, es decir en forma autónoma. Asimismo, es el grado de conexión entre entidades sociales, gubernamentales y educativas. La conectividad permite la transmisión de la información de forma segura, a través de unas infraestructuras de comunicaciones fijas o móviles, en cualquier momento (de forma permanente y en tiempo real) y en cualquier lugar (de forma ubicua).

Connected factory: las fábricas inteligentes o conectadas están constituidas por una red de dispositivos conectados que ofrecen nuevas formas dinámicas de detectar aspectos de demanda, reconfigurar las cadenas de suministro y rediseñar los procesos de fabricación en un flujo de información a tiempo real y que afecta a cualquier elemento de la cadena de valor borrando los límites entre demanda, diseño, fabricación y suministro.

Depósito o yacimiento mineral: parte de la corteza terrestre en la cual, debido a la acción de procesos geológicos y geoquímicos, se ha producido una acumulación anormal de una materia prima mineral, que, por sus características de cantidad, calidad y condiciones, presenta potencial para ser extraída con beneficio económico.

Diagrama de McKelvey: es un diagrama que se emplea para diferenciar entre recursos y reservas y las diferencias que pueden existir entre ellas. Como parámetros para diferenciar entre ellas se encuentran el grado de certeza y la rentabilidad del depósito.

Dron: es una aeronave no tripulada o un robot volante, dirigido por control remoto. Habitualmente, incorporan cámaras o sensores para la captación de imágenes o datos de un lugar o instalación concretos.

Electroafino o afino electrolítico: el afino electrolítico es similar al proceso de electrolisis y se utiliza para la producción de metales de pureza muy elevada. El metal por afinar constituye el ánodo; el cátodo está formado por una lámina fina del metal puro y el electrolito está constituido por una disolución de una sal del metal. Cuando pasa la corriente eléctrica a través del electrolito, el ánodo disminuye de peso en la misma proporción que aumenta el cátodo, mientras que la disolución queda inalterada.

Electrobtención: proceso que consiste en recuperar el metal desde una solución de lixiviación debidamente acondicionada (electrolito) y depositarlo en un cátodo, utilizando un proceso de electrolisis.

Para ello se hace circular a través de la solución una corriente eléctrica continua de baja intensidad. La electroobtención es un proceso de una gran importancia económica, ya que permite recuperar metales, como cobre, zinc, oro y plata, a partir de recursos lixiviables que de otra forma serían inviábiles.

Electrolisis de sales fundidas: proceso que tiene por objeto obtener un metal a partir de uno de sus compuestos disueltos en un electrólito fundido y que utilizando el paso de la corriente eléctrica a través de la solución, los iones del metal son reducidos. Por ejemplo, se usa en la obtención del aluminio por electrolisis de la alúmina disuelta en un baño de criolita (Na_3AlF_6 , hexafluoraluminato de sodio) fundida.

Electrometalurgia: rama de la metalurgia en que se obtiene la deposición de un elemento determinado desde una solución (acuosa o de sales fundidas) que lo contiene, mediante la aplicación de una corriente eléctrica (electrolisis).

Elemento químico: cada una de las formas fundamentales de la materia. Se presenta siempre como átomos (partícula más pequeña en que un elemento puede ser dividido sin perder sus propiedades) de un mismo y único tipo y que, por lo tanto, no pueden ser descompuestos en sustancias más simples empleando reacciones químicas.

Estéril: rocas que son extraídas en las operaciones mineras pero que no contienen mineral o lo contienen en cantidades por debajo de la ley de corte, y cuyo destino final son las escombreras mineras. También se refiere a los residuos de las plantas mineralúrgicas (relaves, colas o *tailings*).

Explotación minera o mina: proceso o conjunto de procesos por el cual se extrae un material natural terrestre del que se puede obtener un beneficio económico: puede ser desde agua, hasta diamantes, por ejemplo. Se lleva a cabo mediante pozos (caso del agua o del petróleo y gas, entre otros) o minas (subterráneas o a cielo abierto)

Factor de Concentración (FC): es el grado de enriquecimiento que tiene que presentar un elemento con respecto a su concentración normal en la corteza terrestre (Clark) para que sea susceptible de ser explotable, es decir:

$$FC = \frac{\text{Ley de Corte}}{\text{Clark}}$$

Así, por ejemplo, el oro se encuentra en las rocas de la corteza en una proporción media o Clark de 0,004 ppm, mientras que en los yacimientos de la cuenca de Witwatersrand (República Sudafricana) su ley de corte es de 7 g/t (1.750 veces mayor).

Factores modificadores (*modifying factors*): son consideraciones utilizadas para convertir Recursos Minerales en Reservas Minerales. Estas incluyen, pero no se limitan a, factores mineros, de procesamiento, metalúrgicos, de infraestructura, económicos, de comercialización, legales, ambiental, sociales y de gobernanza ("ESG", por sus siglas en inglés) y reglamentarios (PERC asbl, 2021).

Fusión: operación en la que se obtienen, en un horno adecuado trabajando a la temperatura necesaria, varios materiales fundidos: metal, escoria o mata. Es una de las operaciones más utilizadas en metalurgia extractiva. Por ejemplo, se usa para la obtención del arrabio o hierro sucio en el horno alto (fusión reductora) o como paso previo en la obtención del cobre (fusión neutra: fusión a mata). La escoria se forma al reaccionar la ganga contenida en el mineral con un fundente (ácido o básico) que se añade al proceso a tal efecto.

Ganga: el concepto de ganga está asociado al de mena o minerales de mena. Los minerales de ganga son aquellos minerales que acompañan a la mena, pero que no presentan valor económico. Los minerales de ganga pueden rodear o estar finamente mezclados con los minerales de mena y están representados principalmente por silicatos, carbonatos, fluoruros, sulfuros, etc. Para un yacimiento mineral en particular, la concentración de minerales de mena en la ganga y el potencial para poder ser separados de esta, determinan la viabilidad económica de la explotación de ese yacimiento. Conviene resaltar que minerales considerados como ganga en determinados momentos se han transformado en menas al conocerse alguna aplicación nueva para los mismos.

Los minerales de mena se separan de los minerales de ganga mediante procesos de mineralurgia, por medio de los cuales se obtienen concentrados del elemento o elementos de interés. En la Figura 97 se muestra un ejemplo de los minerales mena y ganga en el yacimiento de San Dionisio (Minas de Riotinto, Huelva).

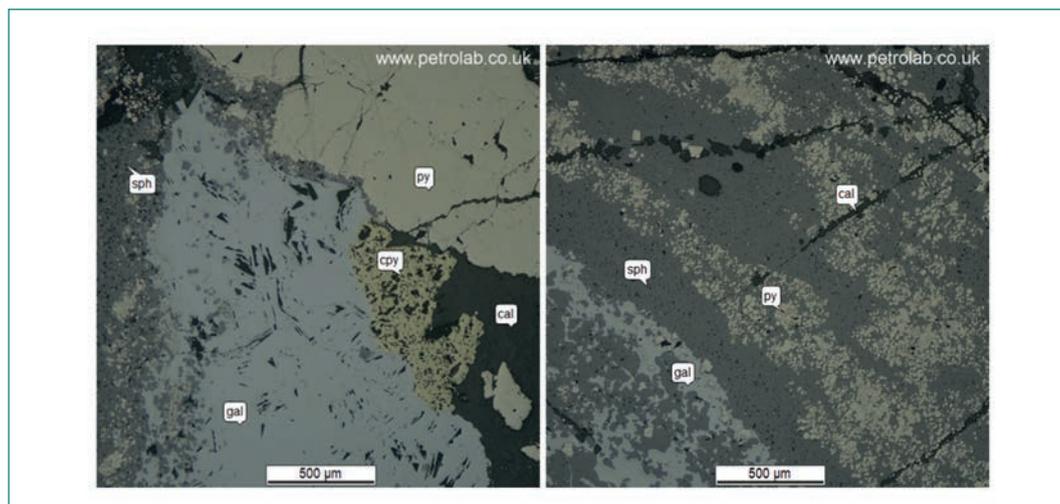


Figura 97. Microfotografías de la mineralización del yacimiento de San Dionisio (Minas de Riotinto, Huelva) mostrando galena masiva (gal) junto con esfalerita (sph) y calcopirita (cpy) asociadas que representan los minerales de mena de Pb y Zn y Cu, junto con calcita minoritaria (cal) y pirita (py) como ganga. Fuente: Microfotografías cortesía de Atalaya Mining SLU.

Geofísica: ciencia que estudia las propiedades físicas de la Tierra. Los métodos de prospección geofísica están basados en un conjunto de técnicas no destructivas que permiten estudiar el subsuelo hasta ciertas profundidades. Estos métodos estudian las variaciones y distribución en profundidad de las propiedades físicas de los materiales de la Tierra y se han utilizado tradicionalmente para la exploración de materiales con interés económico como el agua, los metales o los hidrocarburos.

Geomecánica: ciencia que estudia el comportamiento mecánico de los materiales geológicos, en respuesta a los cambios de esfuerzos, presión, temperatura y otros parámetros ambientales. En este ámbito su foco de estudio es la relación entre esfuerzo y deformación, sea esta elástica, plástica o de rotura y sus consecuencias en cada etapa del ciclo de desarrollo de un yacimiento, desde la exploración hasta el abandono.

Geoquímica: ciencia que estudia el origen, distribución y evolución de los elementos químicos (y sus isótopos) en la Tierra, contenidos en los minerales formadores de las rocas y en los productos derivados de ellas, así como en los seres vivos, el agua y la atmósfera. La prospección geoquímica es la aplicación de los principios y datos geoquímicos y biogeoquímicos, con el fin de detectar yacimientos económicos de minerales, petróleo y gas.

GPS (Global Positioning System). Es un sistema que permite localizar cualquier objeto (una persona, un vehículo, etc.) sobre la Tierra con una precisión de hasta centímetros (si se utiliza GPS diferencial), aunque lo común son unos pocos metros.

Greenfield: exploración de tipo básico en zonas todavía vírgenes. Se centra en el descubrimiento de nuevos yacimientos minerales en áreas no exploradas previamente y sin descubrimientos previos, pero que muestran unas condiciones geológicas favorables. En algunos casos se subdividen en: (i) proyectos de exploración *grassroot*: son proyectos de exploración muy incipientes en los que se desarrolla una idea conceptual del yacimiento en base a indicios y se invierte para comprobar si es cierto (son proyectos de muy alto riesgo y las actividades que se suelen acometer son prospecciones geológicas, geofísicas y geoquímicas cuya finalidad es determinar posibles objetivos para la realización de sondeos) y (ii) proyectos de exploración avanzada, que son aquellos proyectos de exploración en los que ya se ha definido un recurso con expectativas razonables de ser viable económicamente en el futuro.

Hidrometalurgia: rama de la metalurgia extractiva que aborda aquellos procesos que utilizan el agua (reacciones en fase acuosa) o los disolventes ácidos o básicos para extraer selectivamente los metales de los minerales que los contienen y que trabaja a bajas temperaturas.

Industria 4.0: se refiere a la cuarta revolución industrial, que se basa en la disponibilidad en tiempo real de toda la información relevante al producto, proporcionada por una red accesible a la cadena de valor, así como la capacidad para variar el flujo de valor óptimo en cualquier momento. Esto se logra a través de la digitalización y la unión de todas las unidades productivas de una economía. Para ello es necesaria la fusión de tecnologías tales como Internet de las Cosas (IoT), computación y *cloud*, *big data* y ciberseguridad, así como las complementarias: móvil, *analytics*, M2M, impresión 3D, robótica y comunidad/compartición. En definitiva, se trata de la aplicación de nuevos paradigmas tecnológicos a la industria digitalizada para su interconexión y la creación de fábricas inteligentes mediante la introducción de los conceptos relativos al IoT.

Informes públicos (public reports): documentos técnicos elaborados con el fin de informar a los inversores o posibles inversores y a sus asesores profesionales sobre los resultados de la exploración (incluidos los objetivos de exploración), los recursos o las reservas minerales. Incluyen, entre otros, los informes anuales y trimestrales de la empresa, los comunicados de prensa, los memorandos informativos, los documentos técnicos, las publicaciones en el sitio web y las presentaciones públicas (PERC asbl, 2021).

Inteligencia Artificial (IA) (Artificial Intelligence (AI)): en las ciencias de la computación la IA es el conjunto de sistemas o la combinación de algoritmos con el propósito de crear máquinas que imitan la inteligencia humana para realizar tareas y pueden mejorar a medida que recopilan información. La inteligencia artificial no tiene como finalidad reemplazar a los humanos, sino mejorar significativamente las capacidades y contribuciones humanas.

Internet: red basada en el conjunto de protocolos IP que interconecta equipos con capacidad de comunicación a nivel mundial.

Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT): paradigma tecnológico que define la dotación de conectividad a internet de cualquier objeto sobre el que se puedan medir parámetros físicos o actuar, así como las aplicaciones y tratamiento de datos inteligentes relativos a los mismos.

Investigación Minera (IM): conjunto de técnicas (geológicas, geoquímicas y geofísicas) empleadas para identificar y evaluar aquellos lugares de la corteza terrestre donde la concentración de un elemento esté muy por encima del valor medio, lo que ocurre donde existe una mineralización de ese elemento.

Ley de corte (cut-off grade): generalmente se define como la cantidad mínima de metal o elemento de valor que debe contener una tonelada de material para que este sea enviado a la planta de procesa-

miento (Rendu, 2014). El material con una ley por encima de la ley de corte es considerado mineral y el material con una ley menor que la ley de corte es considerado estéril.

Se trata de un valor que marca un umbral económico (discrimina entre estéril y mineral), y define la rentabilidad y también la vida de la mina. Depende de factores geológicos, como la mineralogía y la presencia de elementos penalizantes o impurezas en la mena, económicos, como el precio de metales, políticos y fiscales, tipos de interés o gastos de capital, y también factores mineros como los costes de extracción (cielo abierto o minería subterránea). Existen varios métodos para estimar la ley de corte teniendo en cuenta costes y beneficios. En la actualidad el método de determinación más aceptado por la industria es aquel que tiene como objetivo el de maximizar el Valor Actual Neto (VAN) de la operación.

Ley media: concentración media que presenta el elemento químico de interés minero en el yacimiento.

Lixiviación: proceso hidrometalúrgico mediante el cual tiene lugar el ataque químico (se provoca su disolución), en fase acuosa, del metal valioso contenido en el mineral, para ser recuperado en etapas posteriores. Puede ser ácida, básica o neutra dependiendo del carácter del reactivo químico utilizado, que a su vez es función de la ganga. En la lixiviación del cobre se utiliza una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4).

M2M (Machine to Machine): término de uso previo al de IoT y que define las comunicaciones entre dispositivos conectados. A diferencia del IoT, en el M2M no se privilegia la apertura de los datos y protocolos ni el procesado aportado por tecnologías de *big data* e inteligencia empresarial.

Macizo rocoso: forma en que se presentan las rocas en el medio natural. Un macizo rocoso está formado por uno o varios tipos de rocas y por discontinuidades (planos de estratificación, juntas, fallas, pliegues y otros caracteres estructurales).

Mata: es la fase semimetálica más pesada, y que contiene la mayoría de los sulfuros, que es el resultado de la primera fusión de la mena y es donde se concentra el metal, por ejemplo, el cobre.

Materia prima mineral: aquella sustancia o elemento que se obtiene a partir de rocas o minerales para el aprovechamiento de sus propiedades y de los compuestos que de ellos se obtienen.

Mena: es la parte de un yacimiento mineral constituida por el mineral o minerales de interés económico. En general, es un término que se refiere a minerales metálicos y que designa al mineral del que se extrae el elemento o elementos químicos de interés a los que se les denomina minerales de mena. Así, un mineral de mena es un mineral del que se puede extraer un elemento, generalmente un metal, por contenerlo en cantidad suficiente para ser aprovechado. Por ejemplo, en una mineralización de zinc (Zn), la mena sería el conjunto de minerales portadores de Zn: esfalerita, smithsonita, hemimorfita, etc.

Metal: cada uno de los elementos químicos buenos conductores del calor y de la electricidad, con un brillo característico y normalmente sólidos a temperatura ambiente (excepto el mercurio).

Metalogénesis o Metalogenia: rama de la Geología que estudia la génesis de los yacimientos minerales (metálicos y no metálicos) en la corteza terrestre en base a su origen, evolución y contexto geológico, de manera que permite mostrar en un mapa las áreas susceptibles de contener concentraciones minerales y que son denominadas cartas metalogénicas. La carta metalogénica pretende mostrar las mineralizaciones en una región en concreto y su relación con eventos geológico-tectónicos, agrupando e interpretando datos para definir las reglas de su distribución, siendo su utilidad más importante la definición de guías de mineralización y de zonas potenciales para la exploración.

Metalotermia: proceso en el que un metal desplaza a otro de sus compuestos al ser más reactivo. Por ejemplo, en la obtención del titanio se utiliza magnesio para reducir el tetracloruro de titanio.

Metalurgia: ciencia y tecnología de los metales y de sus aleaciones. Estudia el comportamiento químico y físico de los elementos metálicos, compuestos metálicos y sus aleaciones, incluyendo todos los procesos y técnicas para producir metales y aleaciones con formas y propiedades adecuadas para su uso comercial. La metalurgia extractiva es la rama de la metalurgia relacionada con el procesamiento de las menas para la extracción de metales y su concentración a través de procesos físicos, químicos y electrolíticos.

La metalurgia extractiva engloba: (i) la pirometalurgia, que involucra el tratamiento térmico de los minerales, produciendo una transformación química y física en estos de manera que los metales pueden ser recuperados a través de procesos de tostación o fundición, (ii) la hidrometalurgia que solubiliza los metales en soluciones acuosas, (iii) la electrometalurgia, que consiste en la producción de depósitos metálicos mediante la aplicación de una corriente eléctrica continua, (iv) la biometalurgia, que engloba procesos biotecnológicos que involucran la interacción de microorganismos y metales o minerales ricos en metales como son los procesos de *bioleaching* (lixiviación bacteriana para la recuperación de metales en minerales y estériles), o la bioremediación que se centra en la eliminación o extracción de contaminantes peligrosos como los metales pesados en áreas contaminadas y (v) la geometalurgia, combinación de la geología, geoestadística y metalurgia extractiva para crear modelos predictivos de un yacimiento mineral durante su extracción para optimizar su tratamiento.

Mineral: sustancia inorgánica, natural, de composición química definida dentro de ciertos límites, con propiedades características y con cierta estructura cristalina. Normalmente los minerales son sólidos, aunque hay excepciones. En la naturaleza hay varios miles de especies minerales diferentes descritas, aunque las más importantes económicamente no superan el centenar.

Desde el punto de vista minero, es cualquier sustancia, extraída por su valor, que se encuentra de forma natural en o sobre la Tierra, en o bajo el agua o en relaves (*tailings*), residuos o acopios, y que ha sido formada por o sometida a un proceso geológico, pero excluye el agua, el petróleo y el gas (PERC asbl, 2021). En la Figura 98 se muestran ejemplos de este tipo de minerales.



Figura 98. Ejemplos de minerales: hematites, bauxita y calcopirita. Fuente: elaboración propia de los autores.



Figura 99. Ejemplos de minerales industriales. Fuente: elaboración propia de los autores.

Dentro de los minerales, se encuentran los denominados minerales industriales, que son todas las rocas y minerales, predominantemente no metálicos que, por sus propiedades físicas o químicas, y no por la energía generada o por los metales extraídos, pueden ser utilizados en procesos industriales. Los minerales industriales tienen múltiples funciones, como materia prima, como componente especial de una formulación o aditivo, directamente después de ser extraído o después de un tratamiento. En la Figura 99 se muestran ejemplos de minerales industriales.

Mineralización: ocurrencia de un mineral o combinación de minerales en masa, o depósito (yacimien- to), de interés económico. El término es planteado para cubrir todas las formas en que la mineralización pueda ocurrir, sea por clase de depósito, modo de ocurrencia, génesis o composición (JORC, 2012).

Mineralurgia: conjunto de operaciones industriales relacionadas con el tratamiento/transformación del material todo-uno procedente de las actividades de extracción mineras para los procesos siguientes a los que se destina sin alterar la composición química de las sustancias que lo integran.

Mineralurgia de concentración: operación del todo-uno extraído de la mina al concentrado; reú- ne un conjunto de técnicas de tratamiento físico-mecánico y físico-químico orientadas a preparar el to- do-uno extraído de la mina y concentrar la mena, con el fin de obtener productos con valor comercial y transformables por metalurgia. La planta mineralúrgica suele estar en las inmediaciones de la explota- ción minera.

Mineralurgia de transformación: en la operación mineralúrgica se produce una transformación sustancial del mineral o roca, obteniéndose un producto no metálico. El producto minero, tal como sale de cantera o de la planta mineralúrgica, si no es de carácter metálico, a menudo necesita otros tratamientos antes de ser aprovechable. Por ejemplo, las rocas ornamentales necesitan corte y tratamientos superficiales de la superficie de corte, los áridos reducción de tamaño y clasificación, la perlita o la vermiculita necesitan de una expansión térmica para obtener áridos ligeros, la caliza hay que calcinarla para obtener cal ($\text{CaCO}_3 + \text{calor} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). Dentro de este concepto se incluye la industria del cemento, del vidrio, del yeso, de la magnesita, etc.

Mixtos (middlings): partículas obtenidas de la molienda/fragmentación de mineral que no son ni mineral limpio liberado (concentrado) ni ganga; son fragmentos de tipo mixto (mineral y ganga). En la Figura 100 se muestran los tipos de partículas producto del proceso de molienda. El objetivo de la mo- lienda es la liberación del mineral de interés de la ganga al tamaño de partícula lo más grueso posible. Si la cantidad de mixtos obtenidos es muy alta se requiere una molienda a un tamaño más fino para conseguir una mayor liberación del mineral de interés.



Figura 100. Tipos de partículas producto de la molienda de mineral. Fuente: traducido y modificado por los autores de (Wills, 2006).

Norma UNE: las normas UNE (UNE, Una Norma Española) son un conjunto de normas tecnológicas creadas por los Comités Técnicos de Normalización (CTN), de los que forman parte todas las entidades y agentes implicados e interesados en los trabajos del comité. Por regla general estos comités suelen estar formados por la ENAC (Entidad Nacional de Acreditación), fabricantes, consumidores y usuarios, administración, laboratorios y centros de investigación.

OPEX (OPerating Expense): es un coste recurrente para el funcionamiento de un producto, negocio o sistema. Puede traducirse como gasto de funcionamiento, gastos operativos o gastos operacionales. Es un parámetro clave junto al CAPEX.

Persona Competente (Competent Person): profesional de la industria minera, registrado o con licencia de una Organización Profesional Reconocida ('RPO', por sus siglas en inglés) en la lista de organizaciones profesionales acreditadas, con procesos disciplinarios aplicables, incluyendo los poderes para suspender o expulsar a un miembro. Una Persona Competente debe acreditar un mínimo de cinco años de experiencia relevante en el tipo de mineralización o yacimiento mineral que se esté considerando y en la actividad que dicha persona esté realizando (Definición 3.6 CRIRSCO, 2019)

Persona Cualificada (Qualified Person): persona con un título universitario o acreditación equivalente, en un área de geociencia o ingeniería relacionada con la exploración o minería de minerales. Acredita al menos cinco años de experiencia en exploración minera, desarrollo u operación de minas, o evaluación de proyectos minerales, o cualquier combinación de estos, que sea relevante para su título profesional o área de práctica. Tiene experiencia relevante para el tema del proyecto minero y el informe técnico y pertenece a una asociación profesional reconocida (NI 43-401, 2011).

Pirometalurgia: rama de la metalurgia extractiva que emplea el calor y, por tanto, altas temperaturas, para obtener el metal de los minerales que lo contienen. Es la metalurgia más antigua, aunque ha evolucionado constantemente. Hoy se utiliza con eficiencia y ventaja sobre la hidrometalurgia en la obtención de metales como el cobre o el plomo, aunque está perdiendo aplicación frente a la hidrometalurgia, que utiliza bajas temperaturas.

Planta mineralúrgica: instalación o grupo de instalaciones donde se realiza el tratamiento del mineral todo-uno que sale de la mina. También se denomina planta de procesamiento o de beneficio, ya que se refiere a las instalaciones donde tienen lugar las operaciones para el beneficio del mineral o de los elementos de interés económico: plantas de concentración de minerales, plantas de lavado de carbones, plantas de tratamiento de minerales industriales o plantas de procesamiento de áridos.

Precipitación: proceso cuyo objetivo es separar el metal valioso de la disolución, en forma elemental (casi siempre) o en forma oxidada (en raras ocasiones).

Purificación y/o concentración: proceso que se realiza sobre la disolución obtenida en la etapa de lixiviación. Su objetivo es retirar determinadas impurezas de la disolución.

Ratio de desmonte (Stripping ratio): En minería a cielo abierto es la relación o cociente de dividir la cantidad de estéril por el mineral; se expresa en m^3 / t o en t / t .

Realidad Aumentada (RA): término que se usa para describir el conjunto de tecnologías que permiten que un usuario visualice parte del mundo real a través de un dispositivo tecnológico con información gráfica añadida por este. El dispositivo, o conjunto de dispositivos, añaden información virtual a la información física ya existente, es decir, una parte virtual aparece en la realidad. De esta manera los elementos físicos tangibles se combinan con elementos virtuales, creando así una realidad aumentada en tiempo real.

Realidad virtual: entorno de escenas u objetos de apariencia real, generado por un *software* especializado, y que permite al usuario interactuar con ese entorno en mayor o menor grado. Se combinan objetos físicos con objetos virtuales en una aplicación que combina la información real obtenida con la virtual para emular la realidad.

Recurso mineral: concentración u ocurrencia de material sólido de interés económico dentro o sobre la corteza terrestre en tal forma, ley (o calidad) y cantidad que hay expectativas razonables para una eventual extracción económica. La ubicación, cantidad, ley (o calidad), continuidad y otras características geológicas de un recurso mineral son conocidas, estimadas o interpretadas a partir de evidencias y conocimiento geológico específico, incluyendo muestreo. Los recursos minerales se subdividen en orden de creciente confianza geológica en las categorías Inferidos, Indicados y Medidos (JORC, 2012).

Recurso Mineral Indicado: parte de un recurso mineral para el cual la cantidad, ley (o calidad), densidades, forma y características físicas se estiman con suficiente confianza para permitir la aplicación de *factores modificadores* en suficiente detalle para sustentar la planificación de su extracción y la evaluación de la viabilidad económica del yacimiento (JORC, 2012). Un recurso mineral indicado tiene un menor nivel de confianza que el que se le aplica a un recurso mineral medido y solo puede ser convertido a una reserva mineral probable.

Recurso Mineral Inferido: parte de un recurso mineral en la que la cantidad y ley (o calidad) se estima sobre la base de evidencia geológica y muestreo limitados. La evidencia geológica es suficiente para suponer, pero no verificar, la continuidad geológica y de ley (o calidad). Se basa en información de exploración, muestreo y pruebas recogidas a través de técnicas apropiadas de ubicaciones tales como afloramientos, trincheras, excavaciones, labores y sondeos (JORC, 2012). Tiene un nivel de confianza más bajo que el que se aplica a un recurso mineral indicado y no se debe convertir a reserva mineral. Es razonable esperar que la mayoría de los recursos minerales inferidos pudieran ser elevados a la categoría de recursos minerales indicados como resultado de exploración continuada.

Recurso Mineral Medido: parte de un recurso mineral para la cual la cantidad, ley (o cantidad), densidades, forma y características físicas se estiman con confianza suficiente para permitir la aplicación de *factores modificadores* para sustentar la planificación detallada de su extracción y la evaluación final de la viabilidad económica del yacimiento (JORC, 2012). Un recurso mineral medido tiene un mayor nivel de confianza que el que se aplica tanto a un recurso mineral indicado como a un recurso mineral inferido. Puede ser convertido a una reserva de mena probada o bajo ciertas circunstancias a una reserva mineral probable.

Red: dispositivos interconectados capaces de intercambiar datos de una forma estándar.

Rehabilitación: tratamiento del terreno afectado por las actividades mineras de forma que se devuelva el terreno a un estado satisfactorio, en particular en lo que se refiere, según los casos, a la calidad del suelo, la fauna, los hábitats naturales, los sistemas de agua dulce, el paisaje y los usos beneficiosos apropiados.

Reserva Mineral: una reserva mineral o de mena es la parte económicamente explotable de un recurso mineral medido y/o indicado. Incluye dilución de materiales y tolerancias por pérdidas que se puedan producir cuando el material es minado o extraído y es definido por estudios apropiados a nivel de Factibilidad o Pre-Factibilidad que consideran la aplicación de *factores modificadores* y demuestran que, al momento de reportar, la extracción podría ser razonablemente justificada (JORC, 2012).

Reserva Probable: parte económicamente explotable de un recurso mineral indicado y en algunas circunstancias recurso mineral medido. La confianza en la aplicación de los *factores modificadores* a una reserva probable es menor que una aplicada a una reserva probada (JORC, 2012).

Reserva Probada: parte económicamente explotable de un recurso mineral medido. Una reserva de mena probada implica un alto grado de confianza en los *factores modificadores* (JORC, 2012).

RFID (Radio Frequency Identification): tecnología de campo cercano para la lectura de dispositivos de identificación. Se usa principalmente en sistemas de acceso, pago, *ticketing*, etc.

Roca: material sólido formado por cristales o granos de uno o más minerales. Su composición y estructura es variable. Las rocas están formadas por minerales esenciales que permiten clasificarlas, y minerales accesorios. Según su origen, se clasifican en ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Hay rocas cuyo valor reside en que contienen determinados minerales, que es lo que se pretende aprovechar de la roca, y otras en que la roca en sí misma tiene valor, como es el caso del mármol, granito, pizarra, carbón, caliza, o de los áridos (caliza, arena y grava, dolomía). En la Figura 101 se muestran algunos ejemplos de rocas.



Figura 101. Ejemplos de rocas: caliza, granito y pizarra. Fuente: elaboración propia de los autores.

Sensor: aunque un sensor es un componente electrónico capaz de transformar una medida física en electrónica, se aplica el término de forma más global para definir a objetos conectados dotados de sensores y, en ocasiones, actuadores. En muchas ocasiones se usa "sensor" de forma indistinta con "objeto conectado" o "dispositivo IoT". Los sensores son dispositivos que permiten detectar características físicas o químicas de su entorno y sus variaciones. Los *wearables*, por ejemplo, son un tipo de dispositivo que incorpora un microprocesador y uno o varios sensores y que acompaña al usuario y puede interactuar con el mismo. Algunos ejemplos son: monitores de actividad, relojes o gafas inteligentes, etc.

Sísmica: la prospección sísmica utiliza el mismo principio y leyes físicas de la sismología, con la diferencia de que la fuente generadora de energía es una perturbación artificial y que se propaga por el subsuelo en forma de ondas en función de las propiedades elásticas del medio. El procesamiento e interpretación de la información obtenida (distintas formas de onda, tiempos de trayecto, etc.), permiten detectar la forma de las estructuras geológicas y sus profundidades.

Smartphone: teléfono inteligente. dispositivo de uso personal con capacidades extendidas a las básicas de un teléfono móvil (voz y mensajería), permitiendo la ejecución de aplicaciones y generación y reproducción de contenidos multimedia.

Subproducto (By-product): en minería son materiales subsidiarios que se extraen en yacimientos en los que otros materiales son los que predominan, suelen ser minerales de interés económico, pero por su ley, valor o dificultad de explotación pueden no ser mena en sí mismos y no son el objeto principal de la explotación (explotar el yacimiento por su sola existencia) pero facilitan la rentabilidad de la explotación en su conjunto al aumentar el valor económico de la producción. La existencia de subproductos en algunos yacimientos hace viable la explotación minera, como en la minería de los fosfatos el uranio o el vanadio, el cadmio o el mercurio contenido en yacimientos de sulfuros con altos contenidos en esfalerita, o el manganeso contenido en los pórfidos cupríferos, son, a menudo, subproductos valiosos.

Tailings (colas de proceso, relaves¹⁴⁸ o estériles de proceso): residuos estériles resultantes de la separación de la fracción del mineral con valor económico (minerales de mena) de la no económica (ganga) en las plantas mineralúrgicas. Estos residuos están formados mayoritariamente por partículas de ganga de tamaño limo-arcilla y suelen contener proporciones variables de agua dependiendo del método utilizado para su almacenamiento.

TIC: Tecnologías de la Información y la Comunicación. Término empleado para referirse al sector que cubre las empresas dedicadas al desarrollo *software* y *hardware* en todas sus vertientes.

Todo-uno (ROM, Run Of Mine): en minería es el producto de la explotación del yacimiento, representado por la mezcla de mena y ganga, caracterizado por una ley determinada, y con el que se alimenta a la planta mineralúrgica o planta de procesamiento. Se caracteriza por el tonelaje por unidad de tiempo y las diferentes leyes de los elementos de interés.

Tostación: operación mediante la cual un sulfuro, al reaccionar con el oxígeno del aire, se transforma en un óxido. Por ejemplo, la tostación de los minerales sulfurados de cobre para producir óxido de cobre o la tostación de los minerales sulfurados de zinc para producir óxido de zinc. Normalmente es una operación previa a la de fusión. También puede realizarse una tostación sulfatante en vez de oxidante.

Volatilización: operación que conduce a un metal (reductora), un compuesto (oxidante), un haluro (de haluros) o un carbonilo metálico (de carbonilos) en forma gaseosa. Por ejemplo, en la metalurgia del zinc por vía seca, el metal se obtiene como un gas por reducción del óxido.

Wearable: dispositivo del IoT personal que puede llevarse sobre uno mismo y asistirnos con información relativa a nuestro día a día.

WiFi: protocolo de interconexión inalámbrica para redes IP definido en el protocolo IEEE 802.11 y que cuenta con distintas versiones en función de la tasa de datos, mecanismos de seguridad y frecuencias de uso.

5G: próxima generación de estándares de telefonía móvil. En el mundo del IoT se prevé la definición de clases de comunicación acordes a las necesidades de este sector en coste de dispositivo, comunicación y gasto energético.

¹⁴⁸ Denominación que procede de *tailings*, se tiende a emplear en América Latina principalmente. Su empleo en España es reducido.

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ACATECH	Academia Alemana de Ciencias e Ingeniería
Ag	Plata
AGP	Almacén Geológico Profundo
AHS	<i>Autonomous haulage system</i> / Sistemas de transporte autónomo
AIE/IEA	Agencia Internacional de la Energía / <i>International Energy Agency</i>
Al	Aluminio
Al ₂ O ₃	Alúmina
APQ	Almacén de Productos Químicos
AQL	Inspección basada en muestras
ASEAN	Asociación de Naciones de Asia Sudoriental
ATC	Almacén Temporal Centralizado
ATI	Almacén Temporal Individualizado
Au	Oro
AUV	Vehículos submarinos autónomos
B	Boro
Ba	Bario
BCM	<i>Block Caving Method</i> / Bloques hundidos
BDG	<i>Black Dragon Gold</i>
Be	Berilio
BOM	Lista de materiales/ <i>Bill-Of-Materials</i>
Br	Bromo
C	Carbono
C&F	<i>Cut & fill</i> / Corte y relleno (ascendente o descendente)
Ca	Calcio
Ca ₅ Cl(PO ₄) ₃	Crolopatita
CAPA	Acciones preventivas y de conexión
CAPEX	CAPital EXpenditures
CC.AA	Comunidades Autónomas
Cd	Cadmio
Ce	Cerio
CH ₄	Metano
CIM	<i>Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum</i>
CLC	Cobre Las Cruces
CNAE	Clasificación Nacional de Actividades Económicas
Co	Cobalto
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CODEIME	Conferencia de Directores/as de las Escuelas de Ingeniería de Minas y Energía
COMEX	Bolsa de metales de Nueva York
COMG	Cámara Oficial de Minería de Galicia
COP	Conference Of the Parties
COVDM	Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano
cp	Calcopirita
CPS	<i>Cyber Physical System</i> / Sistemas Ciberfísicos
Cr	Cromo
CRIRSCO	<i>Combined for Mineral Reserves International Reporting Standards</i>
Cs	Cesio
CTN	Comité Técnico de Normalización
Cu	Cobre
3D	Tridimensional

D&F	<i>Drift and fill mining</i> / Subniveles rellenos
DAFO	Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades
DCF	<i>Discounted Cash Flow</i> / Cash flow descontado
DESI	<i>Digital Economy Society Index</i> / Índice de economía y sociedad digital.
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyze, Improve, Control</i>
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DOE	Diseño de experimentos
DTH	Down the hole
Dy	Disprosio
EBITDA	<i>Earnings Before Interest Taxes Depreciation and Amortization</i> / Beneficio antes de intereses, impuestos, depreciación y amortización
EC	Economía Circular
ECCP	<i>European Strategic Cluster Partnerships</i> / Plataforma Europea para la Colaboración de Clústeres
EDAR	Estaciones depuradoras de aguas residuales
EE. UU.	Estados Unidos
ef	Esfalerita
EFG	<i>European Federation of Geologists</i> / Federación Europea de Geólogos
EGDI	European Geological Data Infrastructure
EHEHPA	Ácido di-2-etil-hexil fosfórico-mono-2 etil-hexil-éster
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
EIT	<i>European Institute of Innovation and Technology</i> / Instituto europeo para la innovación y la tecnología
EMC	Exploraciones Mineras del Cantábrico
ENAC	ENTidad Nacional de Acreditación
EO	Electro Obtención
EOL	End Of life
ERMA	<i>European Raw Materials Alliance</i> / Alianza europea para las materias primas
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i> / Medioambiental, social y gobernanza
FC	Factor de Concentración
Fe	Hierro
FE	Factor de Enriquecimiento
FMI	Fondo Monetario Internacional
FPI/IPB	Faja Pirítica Ibérica / <i>Iberian Pyrite Belt</i>
FQM	First Quantum Minerals
FRX	Fluorescencia de los Rayos X
g/t	Gramo por tonelada
Ga	Galio
GD	Identificador de grupo
GDI	Grupo de interés
Ge	Germanio
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GeoERA	<i>European Geological Surveys Research Area</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i> / Sistema de información geográfica
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HCl	Ácido clorhídrico
HDEHP/ DEHPA	Di(2-etil-hexil) hidrógeno fosfato
He	Helio
HFC	Hidrofluorocarburos
Hg	Mercurio

HREE	<i>High Rare Earth Elements</i> / Tierras raras pesadas
IA/AI	Inteligencia artificial / <i>Artificial Intelligence</i>
ICAMYL	Centro Internacional de Materiales Avanzados y Materias Primas de Castilla y León
ICMM	International Council on Mining and Metals
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
IM	Investigation Minera
IMEB	Iberian Mining Engineers Board
In	Indio
INE	Instituto Nacional de Estadística
IoT	<i>Internet of the Things</i> / Internet de las Cosas
Ir	Iridio
IRE	Indian Rare Earths
ISF	<i>Imperial Smelting Furnace</i>
ISP	<i>Imperial Smelting Process</i>
JORC	<i>Joint Ore Reserves Committee</i>
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
K	Potasio
KOH	Hidróxido de potasio
La	Lantano
LBMA	London Bullion Market Association
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> / Análisis de Ciclo de Vida
LCE	Carbonato de litio equivalente
LED	Light Emitting Diode
LFP	Lithium Ferrum Phosphate
Pala LHD	<i>Load-Haul-Dump</i> / Pala de carga, transporte y vertido
Li	Litio
LME	<i>London Metal Exchange</i> / Bolsa de metales de Londres
LOF/LOM	<i>Life of Mine</i> / Vida de la mina.
LOS	<i>Longitudinal Open Stopping</i> / Cámaras vacías con subniveles longitudinales
LPPM	<i>London Platinum and Palladium Market</i>
LREE	<i>Light Rare Earth Elements</i> / Tierras raras ligeras
LTE	<i>Long term evolution</i>
LW	<i>Longwall stopping</i> / Tajo largo
M€	Millones de euros
M US\$	Millones de dólares de EE. UU.
M2M	Machine to Machine
M3	Michigan Micro Mote
MATSA	Minas de Aguas Teñidas S.A.
M.C.	Mensaje clave
MCA	Minería a cielo abierto
MCC	Mejores Condiciones Conocidas
MCI	<i>Mining contribution index</i> / Índice de Contribución Minera
MEM	Microelectromecánico
Mg	Magnesio
MGP/ PGM	Metales del Grupo del Platino / <i>Platinum Group Metals</i>
Mintell4EU	<i>Mineral Intelligence for Europe</i>
m-IoT	<i>Metaurgical Internet of the Things</i> / Internet de las cosas metalúrgico
MITRED	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno

MOX	Mezcla de Óxidos
MPF	Materias Primas Fundamentales
MPS	Materias Primas Secundarias
MS	Minería subterránea
MSAHP	Method Selection with Analytic Hierarchy Process
Mt	Millones de toneladas
MTD	Mejores técnicas disponibles
Mtpa	Millones de toneladas por año
MWD	Measuring While Drilling
N ₂ O	Óxido nitroso
Na	Sodio
Na ₃ AlF ₆	Criolita / Hexafluoraluminato de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
Nb	Niobio
n.c.o.p.	No comprendidos en otras partes
Nd	Neodimio
n.d.	No disponible
NDC	<i>Nationally Determined Contributions</i> / Compromisos de reducción de emisiones
NEA	<i>Nuclear Energy Agency</i>
Ni	Níquel
NI	<i>National Instrument</i>
NIMBY	<i>Not In My Back Yard</i> / No en mi patio trasero
Np	Neptunio
NPI	Introducción de nuevos productos
NRGI	<i>Natural Resource Governance Institute</i> / Instituto de Gobernanza de Recursos Naturales
NYMEX	<i>New York Mercantile Exchange</i> / Bolsa mercantil de Nueva York
O	Oxígeno
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de Naciones Unidas
OPEX	OPERating EXPense
Os	Osmio
OSCE	Organización para la Seguridad y la Cooperación en Europa
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
OTC	<i>Over The Counter</i>
oz.	Onza
oz/t	Onza por tonelada
PACE	<i>The Platform for Accelerating the Circular Economy</i>
Pb	Plomo
PDA	Personal Digital Assessment
PDAC	Prospectors & Developers Association of Canada
Pd	Paladio
PEA	<i>Preliminary Economic Assessment</i>
PERC	<i>Pan European Reserves & Resources Reporting Committee</i>
PERTE	Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica
PFC	Perfluorocarburos
PHVA	Planificar-Hacer-Verificar-Actuar
PI	Producto Industrial
PIB	Producto Interior Bruto
PMR	<i>PolyMetallurgical Refinery</i>

PNIEC	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
Pr	Praseodimio
PRL	Prevención de riesgos laborales
Pt	Platino
PVE	Pacto Verde Europeo
py	Pirita
QA/QC	Quality Assurance & Quality Control
R&P	<i>Room & pillar</i> / Cámaras y pilares
RA	Realidad Aumentada
RAI	Real Academia de Ingeniería
RAM	<i>Random Access Memory</i> / Memoria de acceso aleatorio
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
RETECH	Redes Territoriales de Especialización Tecnológica
RFID	Radio Frequency IDentification
RGNBSM	Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera
Rh	Rhodio
RIS3	Estrategia de Especialización Inteligente
RMI	<i>Raw Materials Initiative</i> / Iniciativa Europea de Materias Primas
ROM	<i>Run of Mine</i> / Todo-uno
RPO	Organización Profesional Reconocida
S&P	<i>Standard & Poor's</i>
Sb	Antimonio
SDS	<i>Sustainable Development Scenario</i>
Se	Selenio
s.f.	Sin fecha
SF ₆	Hexafluoruro de azufre
Si	Silicio
SLC	<i>Sublevel Caving</i> / Subniveles hundidos
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
Sm	Samario
SMS	<i>Seafloor massive sulphides</i> / Sulfuros hidrotermales polimetálicos
Sn	Estaño
SOB	Instrucciones de trabajo
SPC	Control estadístico de procesos
Sr	Estroncio
STEM	<i>Science Technology Engineering Maths</i>
STEPS	<i>Stated Policies Scenario</i>
STRADE	<i>Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe</i>
SX	Solventes
T&D	Transporte y distribución
Ta	Tántalo
Tb	Terbio
TBP	Tributil fosfato
TCTC	Trituradoras en Corta y Transporte con Cintas
Te	Teluro
Th	Torio
Ti	Titanio
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
TOS	<i>Transverse Open Stopping</i> / Cámaras vacías con subniveles transversales
TR/ REE	Tierras raras / <i>Rare Earth Elements</i>

TREO	Tierras Raras Contenidas
TRL	<i>Technology Readiness Level</i> / Nivel de madurez tecnológica
TROCI	Oxiclорuros de tierras raras
TR ₂ O ₂ S	Oxisulfuros de tierras raras
U	Uranio
UBC	<i>University of British Columbia</i>
UE	Unión Europea
UNE	Una Norma Española
US\$	Dólares estadounidenses
V	Vanadio
VAN	Valor Actual Neto
VCR	<i>Vertical Crater Retreat</i> / Cráteres invertidos
W	Wolframio / Tungsteno
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>
WGI	<i>Worldwide Governance Indicators</i> / Indicadores de Gobernanza Mundial
XRF	Analizadores portátiles de fluorescencia de rayos X
ZB	Zettabytes
Zn	Zinc
Zr	Circonio
2DS	<i>2 Degree Scenario</i>
≈	Aproximadamente
%	Porcentaje

AUTORES

Elena Alonso Prieto

Ingeniera de Minas por la Universidad de Oviedo. Doctora por la Universidad de Vigo. Profesora Titular del área de Explotación de Minas en la Universidad de Vigo desde 2007.

Su actividad investigadora se desarrolla en el Grupo de Investigación "Gestión Segura y Sostenible de Recursos Minerales" (GESSMIN) de la Universidad de Vigo. Sus líneas de investigación son: (i) diseño de explotaciones mineras, (ii) comportamiento y caracterización de macizos rocosos, (iii) análisis de tensiones y deformaciones en excavaciones subterráneas y a cielo abierto y (iv) riesgos en explotaciones mineras. Actualmente está en posesión de tres sexenios de investigación.

Fue gestora de Proyectos de Investigación de la Xunta de Galicia del programa IN.CI.TE en el sector "Recursos Energéticos y Mineros" desde 2008 a 2013. Actualmente es coordinadora del Máster Universitario en Ingeniería de Minas y directora de la Escuela de Ingeniería de Minas y Energía.

Está especialmente comprometida en realización de actividades de divulgación científica en centros de secundaria y bachillerato, fomento e incentivo de vocaciones STEM y actividades de construcción de valores igualitarios.

Eloy Álvarez Pelegry

Doctor Ingeniero de Minas por la Universidad Politécnica de Madrid, Licenciado en Ciencias Económicas y Empresariales por la Universidad Complutense de Madrid y Diplomado en "Business Studies" por la London School of Economics. Es Académico de número de la Real Academia de Ingeniería (RAI) desde 2012 y actualmente, Profesor "Ad Honorem" en la ETSIME de Madrid.

Su carrera se ha orientado al campo de la energía. Tiene una larga trayectoria ejecutiva en el ámbito empresarial y ha desarrollado simultáneamente una trayectoria en el ámbito académico como profesor asociado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, en la UCM y director académico en el Club Español de la Energía. Fue director de la Cátedra de Energía de Orkestra, en la Universidad de Deusto. Es autor/coautor de varios libros y de numerosos artículos, informes y otras publicaciones.

Es vicepresidente de Euro-CASE y miembro del Comité de Energía de CAETS. Pertenece también a diversas instituciones en España, como el Instituto Español de Ingeniería, el Real Instituto Elcano y el Club Español de la Energía.

Francisco Blanco Álvarez

Profesor Titular del Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Oviedo. Doctor Ingeniero de Minas por la Universidad de Oviedo con las especialidades de Laboreo y Explosivos y de Metalurgia y Mineralurgia. Su actividad docente, durante casi 40 años, ha estado relacionada fundamentalmente con los materiales no metálicos.

Su labor investigadora se ha centrado principalmente en dos campos, por un lado, materiales de construcción y, por otro, medio ambiente y gestión de recursos.

Fruto de su investigación ha dirigido cuatro tesis doctorales, participado en 21 proyectos de investigación o contratos con empresas e instituciones y es coautor de 36 publicaciones en revistas nacionales e internacionales.

José Antonio Espí Rodríguez

Doctor Ingeniero de Minas por la Universidad Politécnica de Madrid. Desde 1970 ha trabajado en multitud de proyectos como jefe de Exploración, director de Producción, director de Proyecto y director de I+D en empresas como ENADIMSA, Minas de Almagrera, Promotora de Minas y Carbones y PRESUR. Su campo profesional abarca desde la exploración minera hasta todas las etapas del ciclo de la explotación de recursos minerales. Ha trabajado en ese campo como director de proyectos y de I+D en varias empresas del antiguo INI y en otras privadas.

De 1998-2017 Profesor Titular y Catedrático de universidad, en la Escuela de Ingenieros de Minas de Madrid, dentro de la Cátedra de Yacimientos Minerales, alternando esa dedicación con otros trabajos de investigación, además de participar en diversos proyectos CYTED, Curso de Doctorado Conjunto de la UPM en Iberoamérica, Proyecto Alfa en Iberoamérica y asesoría en proyectos mineros en España y fuera de ella.

Jubilado en 2018. Continúa publicando trabajos sobre economía y sostenibilidad del aprovechamiento de los recursos primarios.

Juan Herrera Herbert

Doctor Ingeniero de Minas, por la Universidad Politécnica de Madrid, desarrolla una intensa actividad en proyectos internacionales de innovación en el campo de las materias primas y la doble transición europea hacia una economía digital y descarbonizada, actividad que compatibiliza con la docencia en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid.

En el ámbito académico imparte docencia en los campos de Laboreo de Minas, Tecnología Minera, Diseño y Planificación Minera, Ventilación Minera, Tecnología de Sondeos de Investigación y Producción y Producción de Hidrocarburos en distintas titulaciones de Grado y Máster de la UPM. Es autor y coautor de más de 30 libros relacionados con diferentes aspectos de la Ingeniería Minera, muchos de los cuales han sido usados como libros de texto y publicaciones de referencia en otras universidades de España, Sudamérica y África.

Macarena Larrea Basterra

Investigadora de Orkestra-IVC, Universidad de Deusto, es Doctora en Promoción y Desarrollo de Empresas por la Universidad del País Vasco. Su investigación se ha centrado principalmente en las políticas energéticas, climáticas e industriales, especialmente en Europa, España y la CAPV. Ha participado en proyectos que analizan los precios de la energía, los retos de la transición energética en diferentes países (Alemania, Francia, Reino Unido y Chile) tanto en electricidad, como en gas; la tendencia a la descarbonización, la fiscalidad energética y la financiación verde, entre otros; en colaboración con diferentes instituciones.

Previamente a Orkestra estuvo trabajando en la Cátedra de Estudios Internacionales de la UPV y obtuvo una beca de Especialización de Profesionales en las áreas de Asuntos Europeos y Cooperación Interregional. Es licenciada en Administración y Dirección de Empresas con especialidad en Logística y Tecnología por la Universidad Comercial de Deusto y Máster en Gestión de Empresas Marítimo-Portuarias.

Carlos López Jimeno

Doctor y Catedrático de Explotación de Minas (1992) en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid. Ha sido consultor en diversas empresas, como la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras S.A. y Estudios y Proyectos Mineros, S.A., fundador de las revistas Ingeopres y Rehabitec News.

Durante dieciséis años y medio ha sido director general de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid y vicepresidente de la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.

Ha impartido numerosas conferencias en congresos y Jornadas relacionadas con la minería y la energía y es editor y autor de más de 130 manuales, guías, etc., que versan sobre temas relacionados con la minería y la energía.

Antonio Luis Marqués Sierra

Doctor en Ingeniería de Producción, Minero-Ambiental y de Proyectos por la Universidad de Oviedo. Ingeniero de Minas por la Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo e Ingeniero Geólogo por la Escuela Politécnica Superior Guillermo Schulz de Mieres. Máster Interuniversitario en Dirección de Proyectos. Investigador en varios proyectos vinculados a la contaminación asociada a la minería del mercurio, gestión de impactos mineros a nivel de cuenca hidrográfica, desarrollo de capacidades interregionales en torno a los recursos estratégicos en minería metálica, en proyectos de Cierre de Minas y actualmente en proyectos de caracterización de residuos industriales, de construcción y demolición para nuevos usos en el marco de la sostenibilidad

Ha trabajado como becario de investigador en la Universidad Politécnica de Atenas y como investigador en las Universidades de Oviedo y de León. Ha participado en 38 contratos con empresas e instituciones y es coautor de 2 libros..

Luis de la Torre Palacios

Doctor Ingeniero de Minas por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía.

Durante 20 años ha trabajado en el sector energético, desde U. Fenosa, Endesa o la CNE. Cuenta con demostrada capacidad en gestión de activos, desde la dirección de grandes proyectos llave en mano internacionales de Oil&Gas, la Operación y Mantenimiento de plantas industriales y centrales de generación, hasta la gestión de carteras industriales/logísticas en fondos de inversión.

Actualmente, colabora con la gestora de inversiones líder en inversión sostenible a nivel mundial (ROBE-CO), es director de la Cátedra Robeco en Sostenibilidad y Recursos, y profesor en el máster de riesgos de la Universidad de Murcia, publicando en revistas científicas (Resources Policy o Mineral Economics), prensa nacional y otras instituciones en el ámbito de la sostenibilidad, la energía, economía de los recursos naturales no renovables, geopolítica, etc.



Real
Academia
de Ingeniería



Las materias primas minerales en la transición energética y en la digitalización

El papel de la minería y la metalurgia

Transición energética y digitalización son dos realidades ineludibles, en Europa, donde serán necesarias cantidades de minerales y metales crecientes. Por ello, es cada vez más evidente la necesidad de cadenas de suministro seguras y resilientes.

En este libro se examina la cadena de suministro desde su origen, es decir desde la investigación minera. Se analiza la minería, con sus diversos métodos y sistemas de explotación, así como la preparación y concentración de menas, para llegar a los procesos metalúrgicos de extracción de metales, para la fabricación de los componentes y equipos necesarios para la doble transición.

Igualmente se presenta la cadena de suministro, y se profundiza en los aspectos económicos e industriales de la misma, para convertir las cadenas de suministro en cadenas de valor en el contexto de la economía circular y la sostenibilidad. También se dedica un capítulo a la situación y a las posibilidades de España.

Asimismo, se recogen los principales mensajes clave y recomendaciones, con los puntos más relevantes y una serie de propuestas de medidas y actuaciones.

www.raing.es

ISBN 978-84-95662-88-0

