

La minería metálica española del año 2020 y la definición económica, tecnológica y sostenible de sus proyectos

J. Antonio Espí, Luis de la Torre, Paulo Romero
IMEB Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas de España

El periodo que se analiza corresponde a uno de los más dramáticos de la economía española de los últimos años. Sin embargo, la minería metálica, de manera general, ha tenido un buen comportamiento, a pesar de que, a las restricciones impuestas por la Covid-19, se ha unido un periodo de tránsito a una nueva configuración. El análisis ha introducido una metodología que une, mediante indicadores de eficacia, los tres aspectos fundamentales de la moderna actividad industrial. A partir de ello, fundamentalmente, aparecen los resultados de una eficaz gestión empresarial en el sur de España (IPB) y una incertidumbre sobre la evolución de otra minería mucho más pequeña, la de los metales denominados tecnológicos.

The period under analyzed corresponds to one of the most dramatic in the Spanish economy in recent years. However, in general, metal mining has performed well, despite the restrictions imposed by Covid-19. In addition, a transit period has been added to a new configuration. The analysis has introduced a methodology that unites, through efficiency indicators, the three fundamental aspects of modern industrial activity. From this, fundamentally, appear the results of an effective business management in southern Spain (IPB) and an uncertainty about the evolution of another much smaller mining, referring to the technological metals.

I. ANÁLISIS GLOBAL

1. El nuevo periodo de producción

Al abordar el análisis de una nueva situación, inevitablemente se piensa que el periodo considerado posee algo de singular. Sin embargo, por esta vez, no existe duda que la bisagra entre dos situaciones bastante diferentes se sitúa en el año 2020. Por ello (Tabla 1), tomando el año 2019 como referencia, se añade una compara-

ción con el anterior (2018) y, también, un pronóstico para el año de la pandemia (2020). Afortunadamente, este último se encuentra avalado por la mayoría de las empresas que, a pesar de la difícil situación, se han atrevido a formular sus objetivos.

2. Agrupación de los metales producidos en España

La primera idea para su agrupación deriva de su consistencia metalogenética; es decir,

pertenecen a modelos geológicos comunes. Además, hay una agrupación de usos, que se puede ver con la óptica de **Stephen Kesler** (2015) en su libro *Mineral Resources, Economics and the Environment*, en su Capítulo 8, titulado “Hierro, acero y metales ferroaleados”. En este libro, con la denominación de “elementos tecnológicos”, se describen los principales recursos, así como las condiciones tecnológicas y económicas de los metales básicos (por ejemplo, aluminio y cobre) y

Palabras clave: minería española, indicadores económicos, indicadores tecnológicos, indicadores de sostenibilidad, valoración minera

Keywords: Spanish mining, economic indicators, technological indicators, sustainability indicators, mining valuation methodologies

Tabla 1. Producción minería metálica española 2018-2020

Año	2018	2019	2020 (Previsión)
Metales básicos			
Cobre			
Cobre Las Cruces CLC	69.720 t	48.090 t	61.000 t
Aguas Teñidas MATSA	73.400 t	70.0000 t*	50.000 t
Riotinto ATALAYA	42.114 t	44.950 t	56.000 t
Orovalle	2.477 t	2.272 t	1.100 t
Total cobre	187.714 t	165.812 t*	168.100 t
Zinc			
Aguas Teñidas MATSA	106.350 t	105.000 t*	72.000 t
Plomo			
Aguas Teñidas MATSA	9.930 t	10.000 t*	6.700 t
Metales tecnológicos			
Estaño			
Penouta	80,7 t	100 t*	100 t*
La Parrilla	-	-	52 t*
Total estaño	80,7 t	100 t*	152 t*
Wolframio			
La Parrilla	-	15 t	190 t
Los Santos	1.079 t	868 t	-
Barruecopardo	-	-	30 t*
Total wolframio	1.079 t	883 t	220 t*
Tántalo			
Penouta			
Metales preciosos			
Oro			
Orovalle	0,93 t	2,00 t	0,80 t
Plata			
Orovalle	5,1 t	5,5 t	4,4 t
Otros	82,6 t	79,0 t*	72,0 t*
Total plata	87,7 t	84,5 t*	76,4 t*

(*) Estimadas

otros menos comunes (por ejemplo, litio, tierras raras). Es decir, para los metales agrupados según su utilidad, combinan su descripción tecnológica con su sentido metalogenético.

Finalmente, en cuanto a la producción española, decidimos separar nuestra propia producción de metales en cuatro grupos.

2.1 Metales básicos (Cu-Zn-Pb-Ni)

Un metal básico es un metal común y económico. No existe ninguna definición rigurosa acerca de este grupo de metales. Generalmente, se conside-

ran de carácter básico el aluminio, cobre, zinc, plomo y níquel. Para el caso español, solo se pueden considerar, en razón de su importancia económica, el cobre, zinc y plomo, ya que el níquel ha dejado de extraerse hace muy pocos años, y el aluminio no posee yacimientos de importancia.

En principio, los minerales básicos se producen en relativamente grandes cantidades, y suelen poseer una “vida de las reservas” de más de 100 años. Sin embargo, las concentraciones valoradas de plomo y zinc poseen vidas de tan sólo 20 a 25 años. En este el caso, esta

cantidad ha seguido siendo la misma desde más de 50 años, a pesar de un elevado aumento en la producción. Esta estabilidad significa un equilibrio dinámico entre el consumo y el descubrimiento de nuevas reservas de los dos metales en los últimos 50 años. Obviamente, resulta mucho más importante y constante el esfuerzo necesario para mantener un equilibrio dinámico para los minerales básicos de vida más breve que para los de muy larga vida útil. (Wellmer y Becker-Platen, 2002).

2.2 El grupo W-Sn-Ta-Li-TR-Co

Las tecnologías nuevas y emergentes, en particular las vinculadas a las energías renovables, el transporte y las TIC (tecnologías de la información y la comunicación), ha provocado una demanda de metales tales como el litio, el wolframio, el cobalto, las tierras raras y otros. En Europa existe una fuerte llamada al abastecimiento responsable de minerales para tecnologías verdes y, hasta cierto punto, la minería de España puede contribuir de manera notable a la producción que necesita.

L. de la Torre y J. A. Espí (2018-2020), en sus artículos sobre el tema, se refirieron a ellos denominándolos escasos. Así, y a pesar de las notables diferencias que existen entre ellos en cuanto a sus propiedades y, en ocasiones, en sus formas de aparición en la corteza terrestre, sí presentan similitudes:

- Generalmente, estos metales no son críticos en el sentido definido en la línea de Materias Primas de la UE, sino más bien escasos, al

apartarse notablemente de su abundancia en la naturaleza. Aparecen en la vida industrial debido a las necesidades tecnológicas actuales, pero ya eran antes demandados (litio, cobalto, tierras raras).

- Su producción todavía es limitada. Casi todos se mueven alrededor de 100.000 toneladas (o menos) por año.
- Poseen un valor limitado. El valor de su producción mundial, generalmente, es inferior a los 10.000 millones de dólares al año, frente al valor de mercado de otros metales, como el cobre, que es de 140.000 mill. \$/año.
- En la naturaleza aparecen en forma de pequeños depósitos minerales, o que aún no son bien conocidos y suelen encontrarse acompañando a otros metales de mayor importancia económica.
- Para ellos existe la posibilidad de sustituciones y reciclaje y, también, de cartelización, cuando no de monopolio.

Sin embargo, el grupo Sn-W-Ta-Li (que son los de producción actual española) aparece una asociación natural de tipo geológico, al menos, para las condiciones más frecuentes. En resumen, el grupo de metales WSnTaLi forma parte de los metales escasos con afinidad con el hierro (acero) para producir aleaciones o mejora superficial (estaño en la fabricación de hojalata, tungsteno, niobio) y también pertenece al grupo de metales de carácter tecnológico, especialmente el tántalo y el litio, de extraordinario interés (Tkaczyk AH, 2018).

2.3 Los metales preciosos (Au-Ag)

Los metales preciosos han sido denominados así por su elevado precio. Son metales nobles, de alto brillo, muy estables (poco alterables) y fáciles de trabajar en orfebrería, habiéndose utilizado para tal fin desde la antigüedad. Son aquellos metales que se presentan de forma habitual en la naturaleza en estado libre, es decir, no se encuentran combinados con otros elementos químicos. Eso no impide que se hallen en forma de óxidos (combinados con oxígeno) o unidos a otros elementos.

En la actualidad, en España, tan solo existe un proyecto productor de oro, a pesar de que las posibilidades de tener producciones apreciables de este metal son bastante altas. La plata es un elemento que acompaña inevitablemente a los minerales de cobre y de zinc. Por ello, y sobre todo en la Faja Pirítica Ibérica (IPB), la plata contribuye de manera muy desigual a la economía de los procesos de producción de estos dos metales.

2.4 Otros metales (Fe-U)

Cada uno de ellos no tiene asociación posible con otros. Es más, **Kesler** asimila metales minoritarios compatibles con el hierro para denominarlos metales férreos. El uranio, bajo ese prisma, es un metal energético, ya que es uno de los combustibles de las centrales nucleares.

3. El valor y la importancia de la producción de los minerales metálicos. El PIB minero español y otros índices

Vista en su conjunto, la producción de la minería metálica es-



Fig. 1. La minería española de los últimos años, especialmente de la FPI puede ser un referente de la aplicación tecnológica a nivel mundial. Un ejemplo: la metodología subterránea aplicada por MATSA en sus explotaciones.

pañola sigue diferenciándose del resto de sustancias minerales, suponiendo en el año 2018 el 35% del total (1.218 millones de euros, *Estadística Minera de España*, 2018). Esto supone alrededor del 0,1% del PIB nacional (Tabla 2), mientras que todo del valor de la minería española representa el 0,3% del PIB. Además de esta situación, los proyectos vigentes, y algunos que se incorporarán en breve, sobresalen por la magnitud de su facturación individual, el nivel tecnológico desplegado y, algunas veces, por su posición en los indicadores de sostenibilidad y circularidad de sus economías, como veremos más adelante.

En el año 2020, el año de la pandemia, algo ha cambiado. La necesaria renovación en el mundo de los metales básicos del proyecto de **Cobre Las Cruces** se ha precipitado a partir del deslizamiento ocurrido en su corta y la necesidad de ir cerrando sus *stocks* con vistas a la nueva mina. La solución más probable, referente a su próxima renovación, será la estrategia de trabajar con los últimos acopios de mineral de cobre y la extensión de su actividad a dos años más, introduciendo mineral ya tratado. A

corto plazo, aun si se obtienen los permisos de actividad, la producción española se resintirá respecto a la producción de cobre, aumentando, sin embargo, su presencia en el mundo del zinc.

Por otra parte, el proyecto de **Los Frailes** ayudará a recuperar niveles en la producción del cobre, aunque quien más lo notará será el zinc (con las nunca vistas 7.000 toneladas diarias de producción subterránea). Todo ello, en el caso de que por fin lleguen los permisos de explotación, una vez solucionado el asunto de la propiedad.

La marcha meteórica de **Atalaya Mining** también tenderá a suplir la ausencia momentánea de las abultadas producciones de **CLC**, aunque, una vez alcan-

zada la minería de los 15 millones de toneladas, parece difícil seguirla aumentando. Sin embargo, el de momento frustrado proyecto de **Touro**, en A Coruña, podría ser otra baza para la industria minera del cobre español. Cerrando el círculo de los metales básicos en la IPB, los esfuerzos actuales de **MATSA** se dirigen a mantener el ritmo de producción impuesto con su planta de 4,5 millones de toneladas/año. De esta manera, y sin que la empresa sea más explícita, se barajan varias posibilidades, tanto en la IPB española como en la portuguesa.

Otra cosa ha sido el relevo de la minería de los metales escasos o tecnológicos. El cierre de **Los Santos**, único productor de wolframio, no ha coincidido con la plena producción de otros

proyectos como **La Parrilla**, **Barruelopardo** y **Penouta**. Sus comienzos han sido muy difíciles y, actualmente, sus producciones son poco más que testimoniales. Además, cada uno de ellos posee problemas muy dispares y conflictivos. También resulta muy lamentable el rechazo administrativo y de opinión pública de dos proyectos ampliamente demandados por la UE, el de **Matamulas** (tierras raras, en Ciudad Real) y el de **Valdeflórez** (litio en Cáceres). Si ponemos estos nuevos proyectos como ejemplo de la nueva minería demandada a nivel europeo y nacional, poco se podría esperar de este sector.

Por último, **Orovalle** se afianza en la producción de oro en España, sin llegar a las 100.000 onzas/año, mientras que el rechazo del proyecto de **Corcoesto** trae más problemas de imagen sobre otra provincia metalogenética todavía no explotada, en la que los altos precios del oro podían ayudar a un nuevo esquema de desarrollo.

El año 2019, que es la parte central de este estudio, presenta un valor de la producción de la minería metálica un 3,6% inferior al del año anterior. Las causas hay que buscarlas en la menor producción de cobre, a causa, sobre todo, del accidente en la corta de **Cobre Las Cruces**, mientras que **Atalaya Mining** seguía imparables hacia los 15 millones de toneladas/año, que conseguirá dentro de poco. Además, en los metales tecnológicos, todavía no se había producido el cierre de la mina de wolframio de **Los Santos**, mientras que las nuevas sustituciones (**Penouta**, **Barruelopardo** y **La Parrilla**) mostraban un apreciable retraso. La buena marcha de **Orovalle**

Tabla 2. Valor de la producción minera y metálica española en el periodo 2018-2020

Año	2018	2019**	2020 (Previsión)
Metales básicos			
Total cobre	187.714 t	165.812 t	168.100 t
Valor		986,6 M\$	1.053,9 M\$
Total zinc	106.350 t	105.000 t	72.000 t
Valor		192,1 M\$	162,0 M\$
Total plomo	9.930 t	10.000 t	6.700 t
Valor		22,5 M\$	15,1 M\$
Valor metales básicos		1.201,2 M\$	1.231,0 M\$
Metales tecnológicos			
Total estaño	80,7 t	100 t	152 t
Valor		1,8 M\$	2,8 M\$
Total wolframio	1.079 t	883 t	220 t
Valor		22,9 M\$	5,4 M\$
Valor metales tecnológicos		24,7 M\$	8,2 M\$
Metales preciosos			
Total oro	0,93 t	2,00 t	0,80 t
Valor		88,6 M\$	42,6 M\$
Total plata	87,7 t	84,5 t	76,4 t
Valor		39,4 M\$	43,9 M\$
Valor metales preciosos		123,9 M\$	86,5 M\$
Total minería metálica	1.401* M\$	1.349,8 M\$	1.325,7 M\$

(*) Estadística Minera de España 2018; (**) Propuesta de valor. NSR (Net Smelting Return) a 2019 del: Cobre (5.590 \$/t), zinc (1.830 \$/t), plomo (2.250 \$/t), estaño (18.400 \$/t), wolframio (260 \$/mt), oro (1.580 \$/onz), plata (14,1 \$/onz)

Tabla 3. Valor producción de los metales sobre el PIB nacional

Año	2018	2019	2020 (Previsión)
Valor de la producción de metales	1.218 M€	1.173 M€	1.070 M€
PIB nacional	1.202.193 M€	1.244.757 M€	1.136.463* M€
% del PIB	0,101%	0,094%	0,094%
% del PI**	0,63%	0,59%	0,59%

(*) estimado al 3º trimestre 2020; (**) Producto Industrial, considerando el valor industrial igual al 16,1% de la economía nacional (2018)

ha ayudado a la contención del valor acumulado de la producción metálica de la minería española. Las cotizaciones de los metales, en general, no han sido la causa fundamental de las variaciones en el valor de la producción de los minerales metálicos.

El año 2020 es otra cosa. A los cortes de producción provocados por las primeras restricciones de actividad debidas a la Covid-19 se han unido otros importantes factores de variación. En principio, se salvó la producción de **Cobre Las Cruces**, en proceso de cierre, utilizando los stocks acumulados en planta, a la espera de su paso a una nueva minería. **MATSA** se ha defendido, pero ha tenido que asimilar su cierre temporal ligado a la evolución de la pandemia. **Atalaya Mining** ha superado la prueba incrementando su producción tan pronto ha podido, generando al final 13.000 toneladas más de cobre que en el año 2018. Todo ello, unido a una cambiante, pero mejora final, de las cotizaciones de los metales básicos, ha provocado un leve incremento en el valor de estos metales al final de año.

El mal inicio de todos los proyectos de metales tecnológicos se explica por la unión de las circunstancias adversas debidas al desarrollo de la pandemia, al empeoramiento de las cotizaciones de estos metales en sus correspondientes mercados y, además, a los bajos rendimientos en planta de los jóvenes proyectos. De esta manera, en su primer año, el valor de producción de este subsector es casi testimonial. Por último, el corte de producción se ha dejado sentir en la mina de oro de **Orovalle**, reduciendo su

producción a menos de la mitad, aunque el altísimo precio del oro ha aliviado una parte de su descenso.

Todo ello ha resultado en una casi inapreciable reducción del valor de producción del orden del 1,8% (Tablas 2 y 3). Esto conviene verlo como un éxito, aunque para el año 2021 queda por suplir la desaparición (casi total) del valor del cobre de **CLC**. Con ello, quedará una brecha hasta que el nuevo proyecto de esta compañía empiece a funcionar y, quizás, con más suerte, el proyecto de **Los Frailes** se pueda unir a la producción habitual de la IPB. Además, se espera la nueva producción de los tres proyectos de wolframio y estaño.

4. Europa y la minería española

4.1 La actual minería europea

En la Unión Europea (UE), la producción de minerales está representada por un pequeño grupo de estados miembros. Por ejemplo, Polonia representa el 56% de la producción de cobre de la UE; Suecia aporta el 90% de la producción de mineral de hierro, Grecia y Finlandia proporcionan, cada una, cerca de la mitad de la producción de níquel. Suecia representa el 43% e Irlanda el 32% de la producción de plomo y zinc de la UE, respectivamente (**STRADE** 2018). Esta producción también procede, de forma muy contundente, de

grandes empresas. Por ejemplo, la producción de cobre de Polonia se explica en gran parte por **KGHM** y **LKAB**, que representan la mayor parte del mineral de hierro producido en Suecia. En la Península Ibérica, la presencia de las multinacionales **Lundin**, **First Quantum** y el **Grupo Mubadala** es la responsable de la mayor parte de la producción actual de metales básicos.

En el marco de la Iniciativa de Materias Primas de la UE, se ha establecido como un objetivo claro asegurar el suministro de materias primas a partir de fuentes nacionales e internacionales. La escasa atracción de inversiones en exploración durante las últimas décadas se cita como una de las principales razones por las que no se han agregado nuevas capacidades de producción a la UE.

Además, **STRADE** señala que el número de proyectos activos que avanzan desde la prospección hasta la obtención de permisos de explotación resulta bastante limitado, por debajo de 200 para los Estados miembros de la UE. Lo que es aún más preocupante es que el número de proyectos en la etapa de exploración avanzada sea cerca de la mitad de los que están en producción. Un sector minero saludable debe tener forma de pirámide, donde existe la mayor cantidad de proyectos en la etapa de exploración para formar la base, redu-



Fig. 2. CLC es un ejemplo de “world class” a nivel europeo que puede ser sustituido por otro proyecto también innovador.

ciéndose a un número menor de proyectos operativos en la cúspide. Afortunadamente, en la minería ibérica existe un apreciable número de proyectos que aguardan sus posibilidades de realización a corto plazo y son las condiciones no económicas las que retrasan su puesta en marcha.

En España, como en Europa, bastantes yacimientos se han explotado a apreciables profundidades, y una parte importante de la minería cercana a la superficie se ha agotado por completo. Es seguro que la futura actividad minera involucre la extracción de depósitos profundos, que son intensivos en capital y requieren tecnologías avanzadas.

STRADE (2018) vuelve a reconocer que el potencial geológico por sí solo no puede servir como medio para atraer inversores. Una empresa minera, generalmente, busca legislaciones favorables para abordar su actividad principal. Es decir, que para abordar la exploración y, a su vez, aumentar el número de proyectos mineros, el atractivo potencial geológico debe combinarse con estándares regulatorios que puedan atraer empresas de exploración y minería.

4.2 El apoyo de la UE a la minería propia

La política de materias primas de la UE esbozada por la Iniciativa de Materias Primas (RMI) se estableció en 2008, centrándose en tres pilares para asegurar el suministro seguro de materias primas que la UE necesita:

- (i) El suministro de las materias primas de los mercados globales;
- (ii) El suministro sostenible de materias primas a partir de sus propios recursos y,
- (iii) La mejora de la eficiencia en el abastecimiento de recursos a partir de materias primas secundarias, según los principios de una economía circular.

Fundamentalmente, la Unión Europea ha apoyado al sector minero a través de la convocatoria Horizonte 2020 y del Séptimo Programa Marco, financiando proyectos centrados en técnicas, sociales, políticas y de gobernanza en materias primas.

El mismo informe de **STRADE**, 2008, resume el plan estratégico europeo en dos puntos muy claros:

- Reducir la dependencia de las importaciones y promover la producción propia, diversificando el abastecimiento de materias primas y mejorando la eficiencia de los recursos (incluido el reciclaje) y encontrando otras materias alternativas.
- Mitigar los impactos ambientales, sociales y sanitarios negativos relacionados con el aprovechamiento propio.

5. Resumen de la situación de los mercados de metales en el año 2019 y en el final de 2020

5.1. Los metales básicos (Cu, Zn, Pb, Ni)

En 2019, las posiciones de los mercados de los metales básicos han sido variadas y volátiles. Si bien prevalecen las incertidumbres, parecía existir un optimismo en cuanto a que 2020 sería un año ligeramente mejor para los mercados de metales no ferrosos. A más largo plazo, en 2021, también existe la posibilidad de nuevas mejoras, especialmente si, como muchos esperan, se negocia con éxito un acuerdo comercial entre Estados Unidos y China. Además, esto se hará con la colaboración de varios bancos centrales, que podrán estimular con éxito la demanda de estos metales.

Quizás el más débil de los metales base ha sido el zinc, contagiado por la debilidad global de la demanda del acero galvanizado. Su crecimiento se vio afectado negativamente por una desaceleración en las economías globales; en particular, por un debilitamiento de la actividad manufacturera en todo el mundo.

China es lugar hacia donde los analistas miran el futuro de los mercados de metales no ferrosos. Existe una preocupación general por la desaceleración general de su crecimiento. A pesar de la intención de su gobierno de duplicar su PIB entre 2010 y 2020, el crecimiento del PIB chino promedió alrededor del 6,2% en 2019, y se prevé que caiga por debajo del 6% en 2020. En 2019, el sec-

tor de la construcción chino no se desarrolló tan bien como lo había hecho en 2018 y el sector automotriz, al igual que el mercado del automóvil en la mayoría de las principales regiones del mundo, creció más suavemente de lo esperado.

5.1.1 El cobre

La demanda. En el año 2019, la optimista demanda china y las preocupaciones por el lado de la oferta impulsaron el precio del cobre a su máximo en dos años. La oferta actual del mercado del cobre se sitúa en 4,4 millones de toneladas por debajo de la disponibilidad de hace unos años. El gasto de **CAPEX** para el sector de metales básicos se ha reducido en más del 10% en 2020, ya que los proyectos y las expansiones de las minas existentes se han retrasado por razones relacionadas con la pandemia.

Según **Investing News** (2020), en términos de demanda, el mercado del cobre es una historia de dos mundos: China y el resto del Planeta. China está absorbiendo importaciones, ya que muchos sectores están creciendo con solidez, incluidos los de la construcción y el automóvil. Además, ahora está impulsando el gasto para mejorar su red eléctrica. Mientras tanto, el resto del mundo todavía está luchando por salir de



la depresión de la Covid-19. Según el **ICSG**, excluyendo a China, se estima que el uso de cobre refinado ha disminuido alrededor del 9 por ciento a nivel mundial.

Pero los anteriores analistas (**Investing News**, 2020) creen que lo peor ya ha pasado, por lo que la trayectoria de la demanda global debería ser de apoyo en el futuro. En términos generales, por ahora, esperan un mercado equilibrado para el cobre, pero eso deja los precios vulnerables a las redadas especulativas.

Los precios. Varios factores han convergido para respaldar los precios, incluidas las preocupaciones actuales sobre la oferta, en parte debido a disputas laborales, una demanda mejor de lo esperado en China (el principal consumidor) y las esperanzas de estímulo de EEUU. Según el **Grupo Internacional de Estudio del Cobre (ICSG)**, las paradas resultantes de la pandemia, combinadas con problemas operativos y condiciones climáticas adversas en algunas minas importantes, llevaron a una disminución del 20% en la producción minera peruana (segundo productor mundial) durante la primera mitad de 2020. Como referencia, a final de año 2020, los precios apenas se mueven del entorno de 6.600\$/t Cu.

Para los analistas, y de manera muy generalizada, los precios del cobre deberían bajar a finales de año, en el contexto de un apetito mundial todavía débil por el metal rojo. De cara al futuro, la capacidad de producción limitada y la creciente demanda de cobre en nuevas tecnologías, como vehículos eléctricos y proyectos de ener-

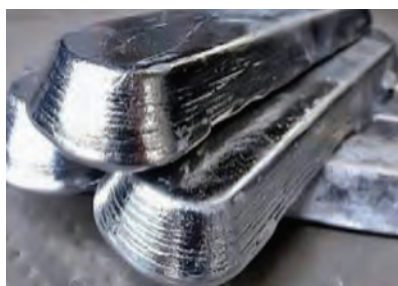
gía verde, deberían mantener los precios relativamente optimistas. Sin embargo, a nivel mundial, la reintroducción de las medidas de bloqueo debido a las infecciones por la Covid-19 es un riesgo clave para estas expectativas.

Pronóstico para el futuro suministro del cobre.

Si bien el sentimiento negativo no es injustificado, los analistas piensan que se está enmascarando lo que parece ser un mercado mundial del cobre cada vez más ajustado (**Investing News Network**, INN, 2020). El mercado ha estado y sigue siendo deficitario, con un crecimiento muy lento de la producción primaria y del cobre refinado. Todo a pesar de que para el año 2019 el **ICSG** informó que la producción minera había disminuido en un 0,5% y que la producción de cobre refinado había aumentado apenas en un 0,5%. Esto ha reducido la cartera de desarrollo de proyectos para el cobre y ha ajustado el panorama de la oferta para el próximo año.

5.1.2 El zinc y el plomo

La demanda. Un analista económico dice que, en estos tiempos, el zinc presenta un contraste evidente con el cobre, observando que, después de tres años, se pasó de un crecimiento que va de cero a negativo, tanto en la producción de mina como en la producción de metal refinado. Esto comenzó a cambiar en el año 2019, debido a la puesta en marcha de varios proyectos mineros y, también, al reinicio de algunas minas antiguas. Esto, sin embargo, se produce cuando la demanda de zinc está siendo golpeada por una solicitud de aceros galvanizados más suave



(construcción y automotrices), así como las expectativas de que los inventarios de zinc pudiesen aumentar en 2020.

Mientras que en 2019 existía un déficit de 178.000 toneladas de zinc, el **ILZSG (International Lead and Zinc Study Group)** de 2020 pronostica un superávit de 192.000 t Zn en 2020, lo que, sin duda, ejerce una presión a la baja sobre los precios internacionales. Así, en los últimos meses, con los precios del zinc cayendo por debajo de los 2.300 \$/t y las cargas de tratamiento (TC) alrededor de 290-400 \$/t Zn, ha surgido la especulación sobre el cierre de algunas minas.

El zinc y Europa. Un factor clave en el consumo de zinc es la evolución de la producción de automóviles, y Europa es uno de sus principales actores. Durante 2019, los cambios en las regulaciones ambientales, combinados con un débil crecimiento económico, han dado lugar a unas ventas muy moderadas. Aunque se espera que el impacto de las regulaciones ambientales en algunos mercados, especialmente los de China, disminuya, en otros, como la UE, el sector seguirá enfrentándose a desafíos importantes. En Europa, es probable que en 2020 esto dé como resultado un crecimiento pequeño o nulo en la producción automotriz general y que continúe el proceso de reubicación

de la capacidad de los países de alto costo a los países de menor costo de Europa central y oriental.

Los precios. Es muy probable que el mercado de zinc se encuentre sobreabastecido, debido al agudo impacto de la demanda al que se enfrentó en el primer semestre de 2020. Después de tocar un mínimo de 1.773 \$/t Zn a finales de marzo, los precios del zinc han tendido lentamente al alza (**P. Barrera. Investing News, 2020**). En el segundo trimestre, el precio del zinc encontró soporte a medida que la economía china se ha acelerado y la oferta ha caído, debido a las restricciones de la Covid-19 y, también, a los problemas relacionados con los precios bajos. Los principales países productores de zinc, como Perú, han visto cómo sus gobiernos han tomado medidas estrictas para contener el virus, con bloqueos que afectan el suministro del zinc. A mediados de año, los precios se negociaban a 2.057 \$/t Zn en la **Bolsa de Metales de Londres**.

Pronóstico para el futuro suministro del zinc. Después de un pequeño déficit, el zinc avanza hacia un superávit. La producción de acero de China está creciendo, pero el acero galvanizado disminuye. Es probable que los precios del zinc sigan cayendo a corto plazo, debido a la moderada demanda y la recuperación de la oferta del zinc refinado. A más largo plazo, algunos analistas pronostican que los precios se mantendrán en una tendencia bajista gradual, a medida que el saldo de producción cambie a superávit, debido a la disminución de la demanda, respaldada por un lento crecimiento en la produc-

ción mundial de acero.

Sobre el plomo, China domina absolutamente el mercado y será un exportador neto muy pronto, enfrentándose a los desafíos de demanda en el futuro.

5.1.3 El níquel

La demanda. Actualmente no hay escasez de níquel: el problema es el tipo de níquel que necesita la industria de las baterías de ion-litio. La industria de las baterías necesita níquel de Clase 1 para producir sulfato de níquel. Los productores, actualmente, dependen de las minas de sulfuros de níquel o las operaciones de HPAL (*High Pressure Acid Leach*) y de las existencias de níquel de Clase 1. El níquel Clase 2, que es el más barato y más fácil de extraer, y que actualmente se utiliza para fabricar níquel-arrabio (NPI) para alimentar a la industria del acero inoxidable, no es económicamente viable para producir sulfato de níquel. Ha de ser el que procede de los yacimientos de sulfuros (Clase 2), con concentrados del 6%, o más, de níquel.

El níquel y Europa. El mineral de níquel se extrae en Finlandia, Grecia, Francia (Nueva Caledonia) y, en menor escala, en España (ahora paralizada). En Europa, como en la mayor parte del mundo, el mineral que contiene níquel, generalmente, se funde para producir un producto crudo con destino a la in-



dustria del acero (*ferroníquel*), o bien para posteriores refinados hacia el níquel metal o sus productos químicos.

La UE utiliza aproximadamente 700 Kt de níquel por año. La mayor parte se destina a la producción de más de 8 Mt de acero inoxidable, aproximadamente el 35% de todo el acero inoxidable. Con los precios del cobalto ahora mucho más bajos que hace dos años, la presión inmediata para recurrir a los cátodos con un mayor porcentaje de níquel ha disminuido. Eso, junto con la eliminación de los subsidios en China, ha ayudado a enfriar este giro hacia cátodos mayoritarios en níquel, aunque todavía es una tendencia que, probablemente, continúe materializándose en el futuro.

Los precios. Los precios del níquel en la **Bolsa de Metales de Londres (LME)** han bajado más del 13% en 2020, y el sulfato de níquel que se usa en las baterías también ha disminuido un 6% en lo que va del año. Sin embargo, más del 70% de la demanda procede del acero inoxidable. La demanda de la batería de ión-litio está realmente por encima de lo que el mercado del acero inoxidable va a requerir. Hoy, tan solo el 5% del níquel se destina a las baterías. Sin embargo, la enorme participación del sector del acero inoxidable en el consumo de níquel disminuirá en la próxima década, debido a la creciente importancia del sector de las baterías. A final de año (2020), la cotización del níquel se situaba alrededor de los 15.800 \$/t Ni.

Efectos de la pandemia. El brote de coronavirus ha cambiado la mayoría de las previsiones para las ventas de vehícu-

los eléctricos (EV) a corto plazo, a medida que la industria automotriz enfrenta desafíos en toda su cadena de suministro. Aun así, el movimiento hacia la electrificación parece ahora imparable, y las materias primas utilizadas en las baterías EV continúan bajo el foco de atención en todo el mundo. Pero, a medida que las químicas se trasladan a cátodos con mayor contenido de níquel, el suministro del metal para este segmento podría estar bajo presión en los próximos años.

Pronóstico para el futuro suministro de níquel. El espacio del níquel ha visto retrasos en los proyectos, debido al entorno actual de bajos precios y, más recientemente, al brote de coronavirus, que ha afectado las operaciones en Indonesia, el país asiático que es el mayor productor mundial de níquel. Es probable que la demanda siga siendo alta, ya que la producción de acero inoxidable se mantiene fuerte y los vehículos eléctricos (EV) continúan aumentando en importancia. Sin embargo, a corto plazo, las baterías solo representarán una porción muy pequeña del mercado. El impulsor de la demanda seguirá siendo el acero inoxidable.

5.1.4 Consecuencias para la minería española de los metales básicos

Como es bien sabido, la fortaleza de este sector, sobre todo la del cobre, impulsada por la demanda china, ha sido la clave del impulso y la estabilidad de la gran minería de la IPB (Faja Pirítica Ibérica). Esta situación parece mantenerse, incluso para el grupo zinc-plomo, propiciando el relevo de los antiguos proyectos en el sur

de España. Además, esta resistencia ante el descalabro de la economía mundial provocado por la extensión de la pandemia, y su pronta recuperación sectorial están salvando del desastre al sector primario español y, sobre todo, al minero de gran envergadura, que coincide con la producción de los metales básicos.

5.2 Los metales tecnológicos (Sn, Ta, W, Li, TR y Co)

Aceptando la asimilación de un conjunto de metales, siempre escasos, que presentan las características definidas en este texto como demandados por sectores de tecnologías avanzadas, consideramos aquellos con producción actual en España o que están a punto de lograrlo: estaño, tántalo-niobio, wolframio y litio. Además, también hablaremos de los que, pertenecientes a este grupo, presentan indicios y condiciones favorables para su aprovechamiento económico (tierras raras y cobalto). Para ello, solo tendremos en cuenta aquellos proyectos que estén soportados en la actualidad por compañías que inviertan en la exploración y valoración de estos recursos.

5.2.1 El estaño

La demanda. La última estimación de **ITA (International Tin Association)** señala que, en 2019, el uso de estaño refi-



nado disminuyó un 5,4% hasta 359.200 toneladas. La encuesta sugiere una mayor contracción en la demanda de estaño durante 2020, atribuida principalmente a la pandemia de Covid-19. La soldadura aún representa la mayor participación en el uso de estaño, aumentando ligeramente al 49% en 2020. Las previsiones para 2020 indican una disminución promedio mundial del 8,1%, relacionada con la pandemia.

El estaño y Europa. Después de varios fracasos, el único proyecto de estaño de importancia en Europa será el español de **Oropesa**. Después de haber renovado su estructura empresarial y elementos, su actual propietaria está esperando las aceptaciones administrativas y completando el conocimiento del yacimiento mediante nuevos sondeos de valoración. A pleno rendimiento, el proyecto cubriría el 4% de las necesidades de estaño europeas.

Los precios. Según la directora de consultoría de **CRU Group** (compañía de asesoramiento en el mercado de la minería y metales), los precios aún están en camino de ver una ligera recuperación este año, a pesar del impacto a corto plazo que el brote de coronavirus Covid-19 podría tener en el mercado. Anteriormente, la falta de demanda de estaño ha ejercido una presión evidente sobre los precios, que cayeron más del 11% a medida que 2019 llegaba a su fin. La responsable fue la baja demanda de la soldadura, que representa alrededor del 50% del total.

Investing News cree que, a medio plazo, y según el **CRU Group**, los precios del estaño podrían estabilizarse en los

20.000 \$/t Sn. En términos de factores que hay que tener en cuenta, la analista de **CRU Group** indica los recortes de producción y capacidad inactiva; las tensiones comerciales, especialmente en el noreste de Asia; los indicadores de demanda, incluidas las ventas de semiconductores.

Pronóstico para el futuro suministro del estaño. Para un futuro muy próximo, las preguntas clave que determinarán las perspectivas de la industria serían tales como: ¿la miniaturización de la electrónica seguirá afectando la demanda de estaño o su efecto se está desvaneciendo? Mientras tanto, el estaño aparece en bastantes producciones innovadoras, tales como las baterías de ion-litio, otras tecnologías de baterías, materiales termoeléctricos, generación de hidrógeno, pilas de combustible, catalizadores de captura de carbono y tratamiento de aguas y otras. Muchos analistas piensan que el estaño todavía juega un papel fundamental en toda la tecnología moderna y tiene una plaza importante que desempeñar en el espacio de los vehículos eléctricos y otras aplicaciones, como son las células fotovoltaicas.

5.2.2 El tántalo

La demanda. Existen muy pocos países productores de tántalo. La mayor parte se extrae en Ruanda y en la RDC, áreas conocidas por problemas relacionados con minerales en conflicto. Juntos representan alrededor del 60 por ciento de la producción mundial. Frecuentemente, los depósitos minerales de tántalo contienen otros metales comercialmente valiosos, como el litio, el cobalto y el es-



taño. En consecuencia, estos minerales, a menudo, se recuperan como un coproducto. En 2019, la demanda de tántalo había aumentado a 1.800 toneladas. **Roskill** pronostica tasas de crecimiento anual de 3,3% hasta 2026, basado en un crecimiento muy rápido en las superaleaciones para turbinas de gas terrestres y aeroespaciales. **Investing News** (2020).

La industria electrónica utiliza este metal para fabricar condensadores y ve una demanda moderada, debido a los altos precios. Como resultado, aunque el tántalo tiene propiedades atractivas, especialmente la de permitir la miniaturización, existen materiales alternativos que pueden usarse para fabricar condensadores. Hay especialistas que creen que, por más de 100\$/kg de Ta₂O₅, el mercado de condensadores no puede absorber ese coste.

El factor precio. La industria del tántalo es muy pequeña e, históricamente, ha visto cambios rápidos en el equilibrio del mercado, con movimientos de precios muy volátiles. El mercado global para el tántalo no es importante en términos de tonelaje (1.800 t Ta₂O₅). Con el aumento de la producción australiana y la oferta de los grandes productores, los precios del tántalo respondieron con una fuerte caída, bajando hasta los 54\$/lb Ta₂O₅ en el

tercer trimestre de 2019, desde 100\$/lb Ta₂O₅ a mediados de 2018. Ahora se espera que crezcan menos rápidamente, debido a las contribuciones de subproductos a bajo coste. Hoy se cotiza alrededor de los entre 110\$/kg Ta₂O₅.

El tántalo y Europa. A pesar de los factores favorables, el tántalo apenas ha despertado interés en Europa en los últimos años. Ni siquiera de su prospección. Es casi imposible estimar cuánto tántalo se consume en la UE. Las unidades de tántalo importadas a la UE para su procesamiento, a menudo, se consumen en otros lugares y son comunes las transferencias de material dentro de las empresas.

Pronóstico para el futuro suministro del tántalo. Si bien el tántalo es esencial para la electrónica moderna y muchos otros productos, el mercado del tántalo es extremadamente pequeño. En términos de demanda, **Roskill** prevé que la necesidad de productos de tántalo aumentará un 4,6% anual entre 2019 y 2029, aunque variarán las tasas de crecimiento para los mercados individuales.

Las empresas del tántalo puro son escasas y distantes entre sí, porque se produce muy poco metal y una parte importante de su producción se realiza por mineros artesanales y minería de pequeña escala. En general, el crecimiento estará respaldado por la demanda del sector automotriz y el segmento de condensadores de tántalo.

5.2.3 El wolframio

La demanda. A nivel mundial, la demanda de wolframio está impulsada por cuatro tipos de grupos de productos: carburos

cementados, aleaciones de acero, productos de fábrica y productos químicos. Los carburos cementados dominan el mercado con una gran diferencia, con aplicaciones importantes como herramientas de corte, minería y perforación en petróleo y gas y otras máquinas-herramienta.

La demanda de productos de wolframio todavía se estima con un crecimiento moderado, pero permanente. A medio y largo plazo, seguirá siendo un material indispensable para aceros para herramientas, aceros de alta velocidad y aceros y aleaciones resistentes a la deformación. Sin embargo, esta demanda depende del comportamiento de muchas actividades industriales.

El wolframio y Europa. Actualmente hay cinco proyectos en funcionamiento en Europa, pero la producción de cada uno representa menos del 1% de la producción mundial total (**McLeod Ch.**, 2017). Entre ellos:

- **Barruecopardo** (España) no ha alcanzado todavía un nivel estable de producción, pero se espera que, una vez superada esta etapa inicial, sea un productor notable a nivel mundial.
- **La Parrilla** (España), en principio, debería ser un gran éxito, pero sus comienzos



han tropezado con varias dificultades. Su producción debería rondar las 2.000 toneladas de WO₃, pero todavía se encuentra muy lejos de esa cantidad.

Los precios del wolframio. En junio de 2018, el wolframio alcanzó un máximo de 350 \$/mtu (1 mtu son 10 kg WO₃). En la segunda mitad de 2018, el regreso de los productores al mercado, además de las preocupaciones sobre las conversaciones comerciales entre los EEUU y China, causó una caída de precios por debajo de 300\$/mtu. Esta tendencia a la baja continuó hasta enero, antes de que los precios se estabilizaran en marzo de 2019 en alrededor de 275\$/mtu. En la actualidad, los precios se encuentran sobre los 250 \$/mtu.

A corto plazo, se espera que el precio del wolframio recupere sus precios anteriores, en línea con el continuo crecimiento de la demanda. Se estima que su uso se incremente en aplicaciones de electrónica, petróleo y gas, industria aeroespacial, construcción y minería, aumentando así sus precios. **Roskill** también cree que existe un déficit potencial de oferta, ya que parece que la producción en las explotaciones existentes disminuirá: las leyes de mineral de algunos de los grandes productores rusos y chinos están cayendo a medida que se agotan sus recursos.

Es importante destacar que no hay planes en China (la gran dominadora del mercado) para lanzar nuevas minas de wolframio, a fin de reemplazar los depósitos agotados. Por lo tanto, dependerá del resto del mundo compensar ese déficit poten-

cial de oferta. **Roskill** cree que los proyectos mineros más avanzados son el proyecto de **Barruecopardo**, de **Saloro**, y el proyecto de **La Parrilla**, de **W Resources**, en España.

Pronóstico para el futuro suministro del wolframio. El wolframio se conoce como un metal industrial, debido a su uso principal en materiales para herramientas. Esto ha significado tradicionalmente que posee un mercado bastante estable, creciendo en línea con el PIB y la actividad manufacturera mundial.

Respecto al importantísimo productor de wolframio, China, las nuevas regulaciones han afectado particularmente a sus centros productores de Jiangxi, Hunan y Fujian (**Roskill**, 2019). En un informe reciente, **Roskill** afirma que las regulaciones ambientales más estrictas en China, junto con el agotamiento de sus minas, pueden crear un déficit de wolframio si en los próximos años no se ponen en marcha nuevos proyectos (**Williams G.**, 2019). Con una alta conductividad eléctrica y térmica y un coeficiente de expansión térmica comparable con el silicio, el wolframio está evolucionando para desempeñar un papel vital en la producción de microelectrónica moderna.

5.2.4 El litio

El litio es un elemento relativamente raro en la corteza terrestre y se encuentra en yacimientos de roca dura y algunas salmueras. Aproximadamente la mitad de la producción actual de litio procede de depósitos convencionales de *roca dura*, mientras que la otra mitad deriva de la extracción de litio disuelto en salmueras. Am-

bas posibilidades están en permanente cambio. El atractivo actual del litio, sin ninguna duda, se refiere al ser la estrella de los acumuladores eléctricos de mayor éxito.

La demanda. China domina el sector químico y representa más del 60% de la capacidad de producción de baterías para su industria de vehículos eléctricos. Sin embargo, parece que muchos países se están dando cuenta de la realidad de la revolución energética y están comenzando a considerar el desarrollo de sus propias cadenas de suministro.

En la actualidad, la fuente de producción de litio y su demanda están relativamente equilibradas. Además, en un futuro cercano, las fuentes de suministro de litio se diversificarán aún más, con la incorporación de litio de salmueras de pozos petroleros, arcillas con litio y otros tipos de yacimientos. Realmente, no existen grandes diferencias en las posibilidades de producción de los países involucrados en el suministro. Además, hoy en día, las diferencias en los costos de producción entre el mineral sólido explotado con métodos convencionales y el litio extraído por bombeo en las salmueras, no son insalvables, ya que las dos se dirigen hacia productos finales diferentes.



El litio y Europa. La capacidad de fabricación de baterías de Europa alcanzó el 6,6% en 2018, y se espera que aumente a 17,2% en los próximos 10 años, pero aún no está claro dónde estas megafactorías obtendrán las materias primas y dónde las refinarán.

Una estrategia integrada verticalmente tendría sentido para Europa occidental y los Estados Unidos. De hecho, a medida que la capacidad de fabricación de baterías en Europa comience a aumentar, la industria querrá que las cadenas de suministro sean lo más cortas posible. En Europa, se plantean varios proyectos de producción para la producción de litio para el automóvil eléctrico, pero la disminución de los precios del litio y la ausencia de capacidad de refinado europea se interponen en el camino.

Los precios del litio. El pico más importante en las cotizaciones del litio ocurrió entre 2015 y 2019. Fue un período estrecho donde, basado en supuestas demandas para la producción de baterías VE, el mercado reaccionó de manera muy sensible, pensando que la cadena de suministro no podría satisfacer la enorme demanda que se avecinaba. Una vez que estos desequilibrios han disminuido, el precio del litio se ha moderado rápidamente. A largo plazo, los modelos de pronóstico de la demanda y en los supuestos de producción de VE enchufables, se prevén serios problemas en la cadena de suministro para satisfacer una producción excesiva: el litio aumentó su demanda de 21.000 t LCE (carbonato de litio equivalente) en 2007 a 125.000 t LCE en 2017 (+ 500%). El precio, hacia el final del año 2020,

se sitúa en 7.000 \$/t LCE o 9.000 \$/ t hidrox. Li.

Pronóstico para el futuro suministro del litio. En principio, la disponibilidad actual de este elemento no es un factor que limite la producción a gran escala de automóviles eléctricos, ya que actualmente se reconocen 40 millones de toneladas (USGS, 2019). Lo que de verdad puede reducir la velocidad de fabricación de baterías son los cuellos de botella en la cadena de distribución de litio.

Sobre el futuro del litio, en general, se pronostica que la demanda continuará creciendo, a fin de satisfacer la producción de baterías para vehículos eléctricos, y es probable que los precios del litio sigan siendo relativamente fuertes. Canadá, Argentina y Chile están aumentando su producción, pero especialmente Australia, que ha comenzado dos megaproyectos cambiando la tasa de aumento de litio en el mercado para alcanzar un suministro global de más de 200.000 toneladas, incluido un notable aumento en la producción china. En el mediano plazo, **Morgan Stanley** predice que el exceso de suministro de litio puede hundir sus precios en los mercados mundiales de productos básicos. Un ejemplo de ello es la bajada del año 2019.

Hoy, el mercado tiene un exceso de oferta (**De la Torre, L. y Espí, J.A.**, 2018) y, probablemente, tomará un año o más para que ese exceso se consuma. Pero, según **Investing News** (2020), después de eso, la demanda crecerá a un ritmo mucho más rápido y se requerirá capacidad adicional a partir de 2024. Esas inversiones deben realizarse hoy.

5.2.5 Las tierras raras

La demanda. Aunque los elementos de tierras raras son relativamente abundantes en la corteza terrestre, no lo son tanto en forma de depósitos de minerales explotables. Existe una evidente concentración de la producción. China acapara el 63% del total mundial. También existen limitaciones de su sustitución. Cuando China comenzó a restringir el suministro de tierras raras, las compañías electrónicas japonesas, como respuesta, hicieron esfuerzos para reducir su uso.

Por otra parte, existe de una adecuada cadena de suministro. China domina la producción hasta tal punto que sus prácticas de exportación resultaron en una decisión de la **OMC** en 2014, viéndose obligada a eliminar sus cuotas de exportación. Estados Unidos y la Unión Europea han tomado conciencia, y ahora apoyan abiertamente los esfuerzos por descubrir nuevos depósitos.

No todas las tierras raras son iguales. Las tierras raras se utilizan en una variedad de tecnologías diferentes, y la demanda es mayor para algunas que para otras. Se pueden dividir en categorías *pesadas* y *ligeras*, según su peso atómico, y las tierras raras pesadas, a menudo, son las más buscadas, pero las ligeras también pueden ser importantes. Por ejemplo, el neodimio y el praseodimio,



que se utilizan en los imanes permanentes, entran en la categoría de ligeras. Los dos elementos pueden tener precios elevados y han estado en el centro de atención en el último año, debido a un mayor cuidado al espacio del vehículo eléctrico.

Los precios de las tierras raras. La concentración de diferentes tierras raras varía dentro de cada depósito dado, pero, generalmente, un yacimiento está dominado por tierras raras pesadas o ligeras, con algunos elementos mucho más abundantes. Tanto el cerio como el lantano, que se utilizan en la fabricación de acero y en los catalizadores industriales, entre otras aplicaciones, tienen un exceso de suministro y, como consecuencia, su precio es bastante más bajo que la mayoría de las tierras raras de los imanes.

Los precios del neodimio experimentaron un alza en el final de 2017, relacionada con una mayor restricción del mercado, después de una serie de inspecciones ambientales en China, lo que han provocado cierres sostenidos y su comercio especulativo, que ha agravado la situación. Es probable que la represión ambiental en China continúe impactando el sector global de tierras raras, en gran parte, porque China es el líder mundial en producción. Este país también se está volviendo cada vez más restrictivo respecto a la cantidad de tierras raras que exporta, optando por reducir los envíos al extranjero a favor del uso de su producción propia o su almacenamiento.

Las tierras raras y Europa. Actualmente, Europa no posee su-

ministro primario de tierras raras. Sin embargo, en el pasado, en Finlandia, estos los elementos se han extraído a escala industrial como subproductos, y se han señalado depósitos potencialmente explotables en varios países europeos. Se están investigando varios proyectos de tierras raras en etapa avanzada. Los más conocidos se encuentran en Suecia (**Norra Kärr**) y Groenlandia (**Kvanefjeld**). Dado su tamaño y leyes, estos proyectos podrían asegurar el suministro europeo de REE en las próximas décadas.

Pronóstico para el futuro suministro de tierras raras. Si bien la mayoría de las tierras raras tienen un excedente de oferta general, especialmente el cerio y el lantano, se estima que la oferta y la demanda del neodimio alcanzaron el equilibrio a partir de 2017, lo que hace que el mercado sea más sensible a las interrupciones en el suministro. Es probable que las continuas medidas energéticas contra el medio ambiente en China continúen impactando el sector global de tierras raras. China también se está volviendo cada vez más restrictiva en la cantidad de tierras raras que exporta, optando por reducir los envíos al exterior a favor del uso de los materiales en el país, o bien, de su almacenamiento (**Investing News. Georgia Williams, 2019**)

Los efectos de la pandemia. Según **Adamas Intelligence** (2020), los primeros seis meses de 2020 estuvieron dominados por el impacto de la pandemia, que hizo que los mercados se desplomaran a nivel mundial, a medida que aumentaba la incertidumbre. De esta manera, las perspectivas para la demanda de tierras raras



parecían excepcionalmente sombrías, pero al final, ha comenzado a recuperarse, especialmente en Europa y China. La demanda está actualmente en camino de una caída del 10%. En consecuencia, los precios del neodimio, praseodimio y didimio se han visto afectados negativamente.

5.2.6 El cobalto

La demanda. Los últimos años han provocado un cambio gradual en la demanda de cobalto. El cobalto metálico, que se utiliza en la fabricación de superaleaciones para motores a reacción, álabes de turbinas y otros productos, ha sido tradicionalmente la parte más importante del mercado del cobalto. Ahora son los productos químicos de cobalto, como el sulfato de cobalto y el óxido de cobalto, los que constituyen el 63% del mercado.

En el lado de la oferta del cobalto, no existen concentraciones de incuestionable envergadura. Además, las tipologías de yacimientos, aunque extensas en su conjunto, tan solo existen no más de cinco con interés económico. Los *Sediment Hosted* de cobre forman, sin lugar a dudas, el modelo genético de mayor interés, contando con más de la mitad de la producción mundial. Por ello, no debe de extrañar la concentración geográfica de las producciones

de cobalto, centrándose en el interior de África. En el resto de los casos, se encuentran asociados a otros metales, de los cuales depende en su extracción económica.

Los factores políticos. Hay que darse cuenta de que China produce el 80% de los productos químicos de cobalto del mundo y que gran parte de su materia prima (más del 90% de su suministro) procede de concentrados de la RDC. Cualquier cambio en el país productor puede tener un impacto real en los precios de los productos químicos de cobalto. Ante la creciente demanda, ¿China seguirá gobernando el mercado o los productores europeos de cobalto podrán crear algún tipo de competencia?

El cobalto y Europa. Durante el año 2017 se produjo una verdadera revolución, a raíz del inicio de **Tesla** en la producción de la batería del modelo 3. Estas baterías han sido descritas como las más densas en energía del mundo, así como las más baratas que existen. En Europa, **Volkswagen** hace tiempo que se preparó para incorporarse de manera decidida en el mercado de vehículos eléctricos (EV). Para ello cuenta con el apoyo de la principal productora de cobalto del mundo, la empresa **Glencor**. Pero la demanda de cobalto en Europa aumenta a medida que los fabricantes de piensan en la producción de baterías EV. **BMW, Mercedes-Benz, Audi, Jaguar, Land Rover** y otros piensan que un objetivo de evolución plena podría alcanzarse tan pronto como para el año 2025.

Los precios. El proceso de reducir la dependencia del cobalto ya comenzó con el aumento de

la batería de ión-litio de aluminio y el cobalto por el níquel, que se está favoreciendo para muchas aplicaciones de EV y almacenamiento de energía, debido a la menor cantidad de cobalto en sus productos químicos. Varias empresas mineras junior han identificado claramente la demanda de nuevas fuentes de cobalto y los proyectos primarios de cobalto están empezando a atraer más atención. Debido a que el cobalto se extrae principalmente como subproducto del cobre y el níquel, los precios más altos no necesariamente tienden a estimular el suministro. Sin embargo, hasta hace poco, el cobalto producido con ganancias extraordinarias provocó que los productores hicieran lo posible para aumentar la producción. Ello ha provocado la caída de las cotizaciones del cobalto que todavía permanece. Entonces, aunque una gran proporción del suministro de cobalto existente sigue siendo incierta, y es difícil obtener nueva capacidad debido a la escasez de recursos primarios de cobalto, el riesgo para la cadena de suministro de la batería de ion-litio permanece, y es probable que los precios continúen en su estado de caída moderada. A finales del año 2020, el precio del cobalto rondaba los 33.000 \$/t Co.

Pronóstico sobre el suministro futuro del cobalto. Es importante comprender que en una batería de ion-litio no existe realmente metal de cobalto. Son los productos químicos de cobalto los que aparecen en estas baterías, entre los cuales el sulfato de cobalto es una de las materias primas preferidas para los fabricantes de cátodos.

La guerra para la eliminación de cobalto en las baterías está

declarada desde hace ya tiempo. Las nuevas baterías de **Tesla** dependerán de innovaciones como una química baja en cobalto y sin cobalto, y el uso de aditivos, materiales y recubrimientos químicos que reducirán el estrés interno y permitirán que las baterías almacenen más energía por períodos de tiempo más largos. Pero la situación no está tan clara. Con los precios del cobalto ahora mucho más bajos que hace dos años, la presión inmediata para recurrir a los cátodos con mayor cantidad de níquel sobre la de cobalto ha disminuido.

5.3 Los metales preciosos (Au y Ag)

5.3.1 El oro

La demanda. Si nos referimos como indicador de la situación a la demanda mundial en los mercados del oro del segundo trimestre de 2020, ésta cayó un 6% hasta las 2.076 t Au. La pandemia fue, nuevamente, la principal influencia en el mercado del oro en el segundo y tercer trimestre, reduciendo severamente la demanda de los consumidores y brindando apoyo a la inversión.

La respuesta global a la pandemia por parte de los bancos centrales y los gobiernos, en forma de recortes de tasas e inyecciones masivas de liquidez, impulsó flujos récord de 734



toneladas de oro hacia ETF respaldados por oro (los ETFs son cestas de activos que cotizan en mercados secundarios como si fueran acciones). Estos flujos ayudaron a elevar el precio del oro, que ganó un 17% en dólares estadounidenses durante el primer semestre de 2020, alcanzando máximos históricos. El suministro de oro también se vio afectado por la pandemia, cayendo un 6% hasta las 2.192 toneladas, ya que tanto la producción de la mina como el reciclaje se vieron afectados por las paralizaciones en muchas explotaciones mineras.

Los precios. El oro alcanzó un nuevo récord histórico en agosto, cuando superó los 2.060 dólares la onza. Pero ese alto umbral resultó insostenible, ya que los precios retrocedieron al rango de 1.900 \$/onz a 1.950 \$/onz en septiembre. Si bien el periodo por encima de los 2.000 dólares fue lucrativo para los inversores en oro, evidenció una economía mundial con problemas y los desafíos creados por la pandemia mundial prolongada.

Pronóstico para el futuro suministro del oro. Ahora, en un complicadísimo momento, existen variadas opiniones acerca de la evolución de los mercados y de las próximas producciones de oro. Sin embargo, no hay que olvidar que ambos son aspectos de la misma cosa y que, a precios exorbitantes del metal, los recursos y con ellos la capacidad de producción también pueden crecer exponencialmente. A la larga, nadie se beneficiaría de una situación explosiva de la minería de este metal precioso, menos aún si aplicamos el punto de vista ambiental, pues al dispa-

rado movimiento de rocas y minerales provocado por la demanda creciente de todos los metales se une a la bajada de sus leyes. Un desastre ambiental sobre un bien que es, hasta cierto punto, prescindible.

5.3.2 La plata

La demanda. Tan solo el 28% de la plata procede de actividades mineras donde este metal es la principal fuente de ingresos. El 72% restante proviene de proyectos donde la plata es un subproducto de la extracción de otros metales, como el cobre, plomo y zinc. Por ello, los ingresos de las empresas enfocadas en la producción primaria tienden a verse mucho más afectadas por los precios de la plata que las empresas que la producen como subproducto (**World Silver Survey, 2020**). Muchas veces resulta complicado el conocimiento de la verdadera economía de la plata por la variada dependencia de su uso, desde industrial hasta como metal noble, especulativo o de inversión, además de su componente suntuario en la joyería.

La plata y Europa. La producción minera europea apenas cubre el 7,1% del total mundial. De los 14 países productores, los líderes son Polonia, con el 67,9% del total europeo, y Suecia, con el 21%. También son significativas las producciones

de Finlandia (2,6%), Bulgaria (2,1%), Portugal (2,0%), Grecia (1,9%) España (1,1%) y Rumania (1,0%). En Europa apenas existen proyectos que produzcan plata como el primer metal. En la mayoría de los casos, la plata se obtiene como un importante subproducto de las minas de cobre. Esto también se aplica a las minas de Polonia, que logran un buen quinto lugar en el *ranking* internacional detrás de México, Perú, China y Rusia.

Los precios. En el año 2020, una vez afectada la economía mundial por la pandemia Covid-19, las preocupaciones sobre una recuperación económica más prolongada motivaron una extraordinaria subida en las cotizaciones del oro y de la plata. Así, el oro subió a 1.976 \$ la onza de oro, mientras que el metal hermano, la plata, se mantuvo 24,5 \$/onza de plata.

En agosto, la plata llegó a subir abruptamente hasta 29,1 \$/onz Ag, alcanzando un máximo de siete años. El director del **Silver Institute** (2020) ve a la plata como la verdadera ganadora por su relación de la plata/oro, ya que la plata también es un componente del avance tecnológico o de la energía verde, sectores que serán promocionados una vez se acabe el estado de anomalía que vivimos. Dado que continúa manteniéndose en el nivel de 24 \$/onz Ag, el caso de que la plata suba hacia 2021 es convincente, ya que muchos inversores, con la plata, buscan protegerse contra la inflación con más que solo con el oro.

Pronóstico para el futuro suministro de la plata. Según **Investing News, 2020**, la pandemia

de Covid-19 tendrá un impacto significativo en los costes de producción de la plata. Los precios de los metales ya han caído significativamente, dado que el brote pesa sobre la demanda de productos básicos. El coste de cerrar y luego reabrir las operaciones mineras se traducirá en mayores costes para los activos afectados. Habrá cierto alivio con los precios más bajos del petróleo, junto con un dólar estadounidense fuerte.

5.4 Otros metales (Fe, U)

5.4.1 El hierro

La demanda. La demanda de mineral de hierro está estrechamente relacionada con la industria del acero, que representa el 98% del consumo mundial. El crecimiento mundial del mineral de hierro se expande y contrae en línea con el desarrollo mundial. Las altas tasas de crecimiento del PIB, debido a los bajos costos de la energía, especialmente el gas natural barato, podría dar lugar a un posible crecimiento en la demanda de acero. El proceso de reducción directa/horno de arco eléctrico ofrece la mejor posibilidad de expandir el procesamiento de acero, ya que es el que requiere menos capital para la reducción directa.

Los precios del mineral de hierro. El precio de los productos del mineral de hierro se basa, principalmente, en su contenido de hierro y en el coste del transporte. Existen diferentes calidades de mineral, y estas características afectan al precio. Los precios de referencia del mineral se fijan en el mercado de exportación por vía marítima y, generalmente, se basa en los precios negociados





por los tres grandes productores mundiales (**Vale**, **BHP Billiton** y **Rio Tinto**).

El mineral de hierro solo contribuye entre el 10 y el 15% del coste total de la fabricación de acero. Los costes de envío forman un componente muy importante y podrían representar el 50% del precio de mineral de hierro en algunas rutas comerciales. Por lo tanto, existe una fuerte tendencia al envío de mineral de alta ley. Los precios del mineral de hierro en el tercer trimestre de 2020 fueron aproximadamente 124 \$/dmu (*dry metric ton unit*), comparados con los 93\$/dmu del mismo periodo del pasado año. Se prevé que este crecimiento más débil, junto con el crecimiento continuo de la producción de mineral de hierro en todo el mundo, provocará una ligera caída de los precios.

Europa y el mineral de hierro.

En Europa Occidental tan solo se encuentra un productor de importancia a escala mundial, la **LKAB** sueca, con tres minas en operación. Esta empresa suministra productos de alta calidad, como pellets, alcanzando una producción de 30Mt/a. Hay opiniones que apuntan hacia que Europa debería intentar influir en la utilización de la capacidad global, alentando la acumulación de capacidad adicional de producción de mineral de hierro más allá del alcance de los tres grandes productores. De este modo, Europa podría seguir el ejemplo

de China, que ya es extremadamente activa en la financiación de proyectos de expansión de mineros junior y en el desarrollo de proyectos de minería en todo el mundo.

Pronóstico para el futuro suministro del hierro. Los principales factores que influyen en el desempeño de la industria de la minería global de mineral de hierro durante los próximos cinco años, probablemente, seguirán siendo tendencias en la producción de acero, además de las condiciones de oferta y demanda. Se espera la desaceleración de la actividad de fabricación y construcción intensivas en acero en las grandes economías en desarrollo, como la de China e India, a causa de la lenta recuperación posterior a la pandemia de la Covid-19.

A pesar de la disminución en los precios del mineral de hierro en los últimos tiempos, los grandes actores de la industria planean aumentar la oferta, a fin de conseguir acaparar la participación de mercado de los productores más pequeños. Se espera que la demanda siga siendo alta durante muchos años, dados sus múltiples usos en infraestructuras, transporte y fabricación. Los planes de inversión a largo plazo de los tres principales productores muestran que tienen la intención de reducir aún más los costes y aumentar la producción de manera contundente.

5.4.2 El uranio

La demanda. La mayoría de los depósitos de mineral de uranio poseen leyes promedio superiores al 0,10% de óxidos de uranio. Hoy en día, algunas minas canadienses tienen enormes cantidades de mineral, de

hasta un 20% de ley promedio de uranio. Sin embargo, otras explotaciones pueden operar con acierto con minerales de muy baja ley, hasta alrededor de 0,02% U₃O₈. El proyecto de la mina española de la empresa **Berkeley** se encuentra a caballo de estas dos situaciones, ya que une una respetable concentración de uranio con unos muy bajos costes de operación.

Parte del uranio también se recupera como subproducto con el cobre, como en la mina **Olympic Dam**, en Australia, o como subproducto del tratamiento de otros minerales, como los minerales auríferos de Sudáfrica, o de los depósitos de fosfato, como Marruecos y Florida.

El uranio y Europa. No cabe duda de que la baza más importante de suministro de uranio primario para la UE es la puesta en marcha del yacimiento salmantino de **Retortillo**. Su producción, de llevarse a cabo, supondría ser la quinta mina de uranio del mundo y casi el 5% del suministro mundial.

Los precios. En el año 2020, el uranio alcanzó unos precios que hace años no se veían. Después de llegar en mayo a 33,93 dólares la libra de U₃O₈, el precio continuó con una tendencia a la baja en el tercer trimestre, pero siempre por encima del valor de



los 24,0 \$/lb U₃O₈ que tenía en enero. Esto ha sido provocado por una menor demanda. Gran parte del aumento del precio a comienzos de año fue el resultado de bloqueos y restricciones por la Covid-19 en países de producción clave, como Canadá y Kazajistán.

Según un especialista, el entorno de precios más altos visto a través de la pandemia podría indicar un nuevo umbral para el uranio, especialmente si los planes de energía verde continúan incorporando la energía nuclear en la generación de electricidad.

Pronóstico para el futuro suministro del uranio. El suministro de uranio se abastece de la actividad minera y los inventarios existentes, en gran parte de las armas nucleares desmanteladas. Desde 1980, el uranio apto para armas en los EEUU y la ex Unión Soviética se ha mezclado para reutilizarlo como combustible de reactor, como parte de los acuerdos de desarme nuclear. Este flujo constante de suministro ha mantenido los precios del uranio, y su producción minera, artificialmente bajos.

El suministro de la producción minera satisface aproximadamente el 85% de la demanda actual de uranio, y el resto se



Fig. 3. MATSA: preparación de testigos de sondeos.

cubre con arsenales comerciales, arsenales de armas nucleares, plutonio y uranio reciclados del reprocesamiento de combustible usado, y algo del re-enriquecimiento de uranio empobrecido. Sin embargo, estos suministros se están agotando y, según **UxC** (empresa especializada de análisis de mercados), la producción caerá hasta 23 millones de libras de U₃O₈ en 2030, desde un estimado de 49,7 millones de libras de U₃O₈ en 2018. Aunque este flujo de suministro seguirá desempeñando un papel significativo en el corto y mediano plazo, su impacto, probablemente, disminuirá a largo plazo, requiriendo más inversión en nueva producción minera para satisfacer la esperada demanda futura.

6. La exploración minera y sus actores

Tal como ha ocurrido siempre, los informes nacionales, e incluso los regionales, no se ocupan de recoger y asimilar los esfuerzos e iniciativas, tanto regionales como centrales, sobre la exploración minera en nuestro territorio. La ausencia de esta información resulta capital para pulsar lo que será la minería futura, las fuentes de atracción de capitales externos y la solvencia de nuestros proyectos. Desgraciadamente, el mismo servicio geológico nacional, el **IGME** parece no darse cuenta de ello, cuando, quizás, sería el único organismo nacional con sensibilidad y medios para resolverlo.

En realidad, las categorías de exploración que aparecen en España obedecen a los siguientes perfiles:

- Exploración o investigación derivada de las actividades

de las empresas con producción minera. En general, son empresas mineras que, una vez alcanzado su régimen de producción nominal, se preocupan por alargar su vida útil. Es el caso de las grandes multinacionales que operan en la IPB. Sus objetivos no son solo los de ampliar sus recursos, sino también los de encontrar nuevos yacimientos ligados al principal (*brownfields*) próximos o incluso alejados, pero siempre en la misma provincia metalogénica. Es el caso de **MATSA**, pero también, y ahora, los de **Atalaya Mining**, con la adquisición de **Masa Valverde**.

- Actividades de exploración en varios grupos de cierta envergadura relacionados o no con la minería y con especial interés en el descubrimiento de nuevos proyectos. Existen muy pocos casos, y el más representativo es **SACYR**, con su filial minera **Valoriza**, que ha ejercido su actividad por toda España y en diversas provincias metalogénicas.
- Empresas de pequeño o mediano tamaño, *junior* (extranjeras y nacionales), empeñadas en lograr éxitos en la exploración de antiguos proyectos malogrados por la evolución de los precios de las materias primas. Casi siempre corresponden a la búsqueda de los metales tecnológicos o los preciosos. Sus objetivos casi nunca son los de *greenfields* y más bien corresponden a revitalización de antiguas explotaciones desechadas por dificultades relacionadas con las cotizaciones de los metales. De esta manera, to-

dos los metales de esta categoría (estaño, wolframio, litio, cobalto, oro y plata) poseen pequeños grupos que trabajan sobre nuevos descubrimientos, mientras que su objetivo final se comparte entre la explotación de sus hallazgos o su venta a empresas económicamente más potentes.

7. Calificación económica, tecnológica y sostenible de la minería: conceptos y métodos de medida

Quizás el primer factor que hay que considerar en la calificación de la minería de un país sea el potencial geológico que envuelve la aparición y la calidad de sus yacimientos minerales. La combinación del potencial geológico y las condiciones operativas de los proyectos definen la competitividad de sus actividades mineras. Para ello, probablemente, la encuesta anual de empresas mineras de **Fraser Institute** sea la más utilizada, a fin de definir su atractivo minero. Naturalmente, los resultados de la encuesta son muy sensibles a factores que muchas veces no se hayan totalmente definidos. El *Índice de Percepción de Políticas* del **Instituto Fraser** clasifica los países en función de factores tales como las regulaciones administrativas, las normativas ambientales, el régimen tributario, la resolución de disputas, las condiciones socioeconómicas y de desarrollo comunitario y otros más.

Los cinco principales países dentro de esta categoría incluyen tres estados miembros de la UE (Irlanda, Suecia y Finlandia). Portugal, España y Polonia se encuentran entre los treinta primeros, mientras que otros

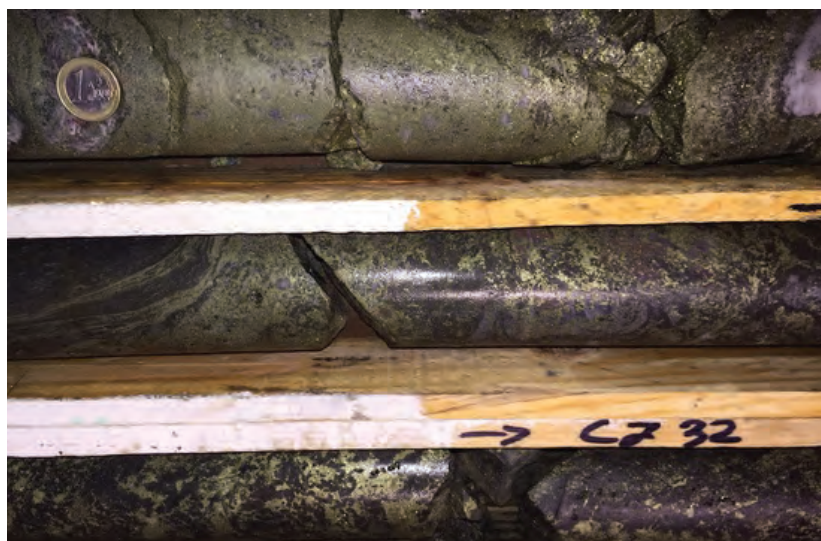


Fig. 4. Proyecto ALCONCHEL ("ironstone de cobre-oro").

estados miembros se sitúan bastante más alejados.

La clasificación del *Índice de Percepción de Políticas* para las jurisdicciones de la EU28 es mucho más alta, en relación con su clasificación en el *Índice de Atractivo de Inversión*, y también con el *Índice de Potencial Mineral de Mejores Prácticas* del **Instituto Fraser (BPMPI)**. España posee 24 y 38, Francia tiene 62 y 79 en percepción de políticas y atractivo de inversión, respectivamente. Esto se debe a la percepción relativamente baja del potencial mineral en los países de la UE, y solo Finlandia (12), Suecia (18) e Irlanda (30) figuran en la clasificación de los 30 primeros países (**STRADE** 2018).

Respecto al coste, **STRADE** (No. 08/2016) analiza sus componentes, empleando una metodología que consiste en puntuar el coste en \$/lb de metal, tratando de reflejar su competitividad. El país con los costes más altos recibe una puntuación de 100, mientras que el país con la calificación más baja recibe un cero. Con el fin de combinar las puntuaciones de diferentes metales en cada

categoría de coste, se construye una calificación promedio total ponderada y referida a la importancia del metal en la producción de la UE.

Dentro de la política europea de asegurar el suministro de materias primas, el desarrollo de sus propios potenciales ha sido objeto de una especial atención y, además, la atención a las condiciones de este desarrollo ha originado una importante variedad de proyectos. Ejemplo de ello es **SUPRIM** (2019), que utiliza como herramienta principal el *Análisis de Ciclo de Vida (LCA)*, modificado a "evaluación del impacto del ciclo de vida" (LCIA), tratando de evaluar los impactos ambientales y el progreso de la producción primaria sostenible. **SUPRIM** podría formar parte de una nueva herramienta de evaluación para complementar las herramientas existentes vinculadas a la minería de conflictos, las emisiones de CO₂, las listas de materias primas críticas, las huellas ambientales del producto y los esquemas de abastecimiento responsable.

También, el *Proyecto EIT Raw-Materials*, **I. Arribas (iTarg3T,**

2019) analiza las condiciones de aparición de los proyectos europeos de sustancias minerales de carácter tecnológico (estaño, wolframio, tántalo y litio) en una completa visión del entorno geológico, económico y ambiental, pronosticando la situación de su suministro propio a corto plazo.

8. Excelencia tecnológica, económica y de sostenibilidad

8.1 Los indicadores de eficacia económica

8.1.1 Recursos no renovables y productividad minera

En la minería y a largo plazo, los impactos del agotamiento de los recursos se han compensado con avances tecnológicos y las mejores prácticas de gestión. Un aumento en el uso de la minería a cielo abierto ha sido un desarrollo clave, junto con un aumento general en la escala y la automatización de los equipos (**Australian Productivity Commission, 2008**).

La minería se diferencia de otros sectores de la economía en que se relaciona con los recursos no renovables y requiere grandes inversiones. Además, éstas pueden llevar un tiempo

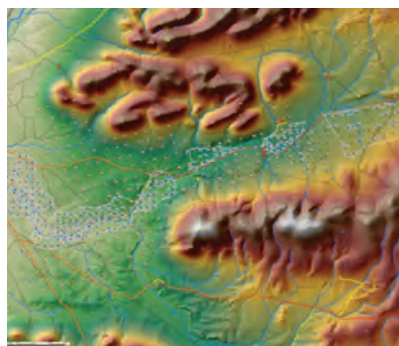


Fig. 5. Investigación mineralométrica en Matamulas (Ciudad Real). Quantum Minería.

considerable para ser realizadas y entrar en funcionamiento. Como resultado, las estimaciones convencionales del crecimiento de la productividad en el sector deben interpretarse con cuidado.

La eficiencia de la producción está determinada por factores tales como la tecnología, la gestión, las habilidades y las prácticas laborales. Sin embargo, la productividad en la minería también refleja la influencia de otro factor, que es el aporte de los recursos naturales. Si bien estos son un insumo importante en la producción minera, los cambios en su calidad, generalmente, no se toman en cuenta en las medidas estándar de la productividad.

A medida que se agotan los depósitos de minerales, por lo general, disminuyen la calidad y accesibilidad de las reservas restantes. Las empresas mineras se centran inicialmente en depósitos de alta calidad y de fácil acceso, ya que producen los mayores rendimientos. A medida que estos depósitos se agotan, los yacimientos restantes pueden ser de menor ley, en lugares más remotos, más profundos, con mayores impurezas, y deben requerir técnicas de extracción más difíciles. Por ello, las inversiones y la mano de obra adicionales por unidad de producción se muestran como una disminución en la productividad.

En consecuencia, la productividad en la minería refleja no solo cambios en la eficiencia de la producción, sino también cambios en la calidad subyacente y la accesibilidad a los recursos naturales. Los cambios en la calidad de estos recursos, generalmente, no se tienen en

cuenta en las estimaciones estándar de la productividad minera. Por lo general, se pasan por alto porque los recursos naturales no son un producto comprado. Es decir, los bienes naturales tienden a tomarse como *datos*, o bien como *variables ambientales*.

8.1.2 Los niveles de productividad

La minería tiene un alto nivel de productividad en comparación con otras industrias (**Australian Productivity Commission, 2008**). La productividad laboral en la minería es alta porque el sector es relativamente intensivo en capital. Al mismo tiempo, la productividad laboral en la minería también es más variable con el tiempo, porque la mano de obra representa una proporción comparativamente pequeña de los gastos totales. Por tanto, incluso cambios relativamente pequeños en la producción o en los gastos laborales de un año a otro pueden dar lugar a cambios comparativamente grandes en el nivel de productividad laboral. El crecimiento a largo plazo de la productividad laboral se debe principalmente a un mayor gasto en capital (más capital disponible por hora de trabajador).

8.1.3 Extracción óptima y agotamiento

Los recursos naturales destinados a la minería traen *rentas de recursos*, es decir, excedentes de ingresos por encima de los costos de producción (lo que permite una tasa de rendimiento *normal* del capital adquirido). Las rentas de los recursos surgen porque los insumos de los recursos naturales no se pagan y aparecen incluso en condiciones competitivas para los explotadores

La minería de un yacimiento genera rentas de recursos en el período de extracción. Pero también existe un costo de oportunidad asociado con la extracción actual: la capacidad de generar una renta futura de recursos al retrasar la extracción. **Hotelling (1931)** muestra que, para un recurso agotable, existe un patrón óptimo de explotación en el tiempo.

Los depósitos de la mejor calidad se explotan primero, a fin de realizar su alta renta, que luego se pueden invertir para generar un flujo de ingresos mayor que la apreciación en el valor del recurso in situ. Los recursos de calidad inferior al límite de explotación se dejan en la tierra, ya que la renta del recurso y el precio implícito del recurso son inicialmente bajos, pero aumentan a un ritmo más rápido que el rendimiento de la inversión alternativa.

8.1.4 La estructura de los costes mineros

La minería es una industria intensiva en capital. Las inversiones de capital representan, aproximadamente, la mitad de los gastos totales de la producción minera. En esta actividad, los costes laborales son una parte relativamente pequeña, aproximadamente el 12 por

ciento, de los costes totales y alrededor del 23 por ciento del valor agregado (**Australian Productivity Commission. 2008**).

La productividad de la mano de obra utilizada en la minera es relativamente alta, no solo porque el sector es relativamente intensivo en el uso de capital físico, sino también porque utiliza el beneficio de un importante insumo adicional que es el capital de recursos naturales (**Australian Productivity Commission, 2008**). Las combinaciones de insumos requeridos para producir una unidad de producto difieren, según la accesibilidad y la calidad de un depósito de recursos.

Los empleados mineros, generalmente, están mejor pagados que otros trabajadores, lo cual es una función de los niveles promedio más altos de habilidades entre los mineros y, por otra parte, de los peligros y las dificultades del trabajo en la mina, incluida la lejanía. Además de sueldos y salarios más altos, las empresas mineras también suelen enfrentarse a otros mayores costes asociados con sus empleados.

8.1.5 Los indicadores de eficacia económica

En un proceso de producción, el coste unitario de producción de

un metal es el índice más general, simple y efectivo del rendimiento de una inversión minera. En un proyecto de este tipo, los informes tradicionales de costes se han centrado tan solo en los costes de extracción y procesamiento, incluyendo los costes laborales, los de energía, elementos consumibles y cargas periódicas. Sin embargo, se ignoraba el mantenimiento de capital, los gastos generales y administrativos y la rehabilitación durante la vida útil de la mina (**Malensek, 2016**).

La necesidad de informes más precisos, a fin de recuperar la confianza de los inversores, en 2012, llevó a las principales empresas mineras de oro a trabajar con el **WGC (World Gold Council)** para desarrollar nuevos estándares. Esto dio como resultado, en 2013, el nuevo marco de los costes “*todo incluido, incluyendo la sostenibilidad de las inversiones*” (AISC) y el AIC “*todo incluido*”, que han sido ampliamente aceptados por la industria. El Capital de Sostenimiento es un capital distinto del Capex inicial. Se trata de un costo variable, es decir, depende de la producción. Este capital surge en períodos ocasionales en lugar de regularmente, o un costo de período fijo que aparece cada varios años (**Malensek, 2016**).

Tabla 4. Apoyo para explicar el contenido de las tablas 6, 7, 12, 13, 14, 15 y 20: Datos básicos y situación de los proyectos

Referencia y año: Se mencionan el nombre oficial de la empresa y el año de la información. Además, el estándar de calidad utilizado (JORC, NI 43, PERC u otro).

Dimensión (t/año): la dimensión está indicada por la capacidad nominal o promedio anual del proyecto, en millones de toneladas ROM / año

Vida: es la vida del proyecto en años, suministrada por la empresa o calculada a partir de los recursos (I + M) y reservas.

Estado de desarrollo: en la tabla se ha considerado la siguiente escala:

- (1) Proyecto en fase de evaluación muy preliminar y no tiene un estándar que lo acredite.
- (2) Proyecto diseñado a partir de recursos aún no totalmente valorados. Puede ser un estudio de alcance.
- (3) Proyecto en fase de evaluación que ya cuenta con un PEA reconocido por un estándar internacional
- (4) Proyecto en fase de construcción o que ya cuenta con informe técnico acreditado y que presenta los últimos problemas de aceptación.
- (5) Proyecto en fase de explotación minera

Tabla 5. Apoyo para explicar el contenido de las tablas 8, 9,10, 11, 16, 17, 18, 19, y 21: actividad económica

Eficiencia económica o “cash cost”: es el coste de producción de una unidad de metal o mineral, considerando las unidades habituales en la sustancia calculada (t metal, mtu, LCE, onz oro).

Cuartil de “cash cost”: el proyecto se posiciona en la curva de “cash cost” global (coste unitario de producción, teniendo en cuenta los costes directos e indirectos) e identifica a qué cuartil pertenece (gráfico que reúne y divide todos los “cash cost” mundiales ordenados en cuatro secciones). Cabe mencionar si es o no AISC.

Excedente económico de su contenido metálico (“Surplus”): es la proporción en % del contenido metálico que se puede valorar en una tonelada ROM después de haber pagado sus gastos de producción. Es decir, el margen operativo bruto, en % de metal, relacionado con la ley promedio del depósito.

Inversión no AISC: es la inversión inicial sin tener en cuenta inversiones de reemplazo (no AISC, costes todo incluido).

Valor de producción: es el valor de la producción anual, bien al precio actual o manteniéndolo cuando está muy cercano en el tiempo.

Intensidad en capital invertido: se refiere al valor de la inversión inicial referida a las unidades metálicas producidas en un año.

Si existe algún índice o indicador de la eficacia de una inversión en un proceso productivo, el más general, sencillo y eficaz es el coste unitario del producto final, el cual se muestra en las tablas siguientes para cada proyecto, suministrado por la empresa propietaria o, en su caso, calculado, habiendo escogido y definido previamente los elementos que ayudan en su cálculo.

8.1.6 Aplicación a los proyectos españoles

En un intento de calificar los proyectos mineros españoles,

se han considerado tan solo los siguientes: los de actividad actual; los paralizados en este año o en el anterior, pero con voluntad deseguir adelante; aquellos que están apunto de ponerse en marcha y aquellos que, estando muy avanzados, cuentan con un *Preliminary Economic Assessment* o un *Technical Report* en un estándar de calidad reconocido.

a) Metales básicos (Cu-Zn-Pb)

- Situación y datos básicos. Ver tablas 6 y 7

- Indicadores económicos (tablas de eficiencia económica). Ver tablas 8, 9, 10 y 11, y figuras 6 y 7.
- Consecuencias de grupo: A partir de las tablas anteriores se constata que:
 - En conjunto, los proyectos analizados (Tablas 8 a 11) presentan unas muy buenas características económicas, contando con las cotizaciones de metales que marcan la tendencia actual y a la que todos los proyectos se acogen. Sin embargo, existen di-

Tabla 6. Situación de los proyectos de cobre españoles

Proyecto	Referencia (año)	Dimensiones (Mt ROM**/año)	Dimensiones unidad prod.	Vida años	Estatus
Aguas Teñidas	Iberian Minerals. Technical Report NI 43-101 (2008) y comunicaciones de MATSA	4 Mt subterránea	60.000 t Cu 110.000 t Zn 34.000 t Pb	Abierto	5
Cobre Las Cruces	First Quantum. NI 43-101 Technical Report (2015) y otras comunicaciones	1,4 Mt cielo abierto	70.000 t Cu	Abierto	5 transfor mándose
Riotinto	Atalaya Mining. NI 43-101 Technical Report(2018) y otras comunicaciones de ATALAYA	10,5 to 15 Mt cielo abierto expansión	45.000 t Cu a 50.000 t cu	Abierto	5
Touro*	Atalaya Mining. Technical Report (2018)	7,0 Mt cielo abierto	30.000 t Cu	13	3-4

(*) en espera; (**) ROM (Run-of-mine)

Tabla 7. Situación de los proyectos de zinc-plomo españoles

Proyecto	Referencia (año)	Dimensiones (Mt ROM**/año)	Dimensiones unidad prod.	Vida años	Estatus
Aznalcollar*	Minera Los Frailes. Presentación. 2020	2,7 Mt/año subterránea	133.280 t Zn eq/año	20	3-4
Toral*	Portex Minerals. NI 43-101 Technical Report. 2018	0,45 Mt/y subterránea	28.760 t Zn eq/año	9	3

(*) en espera; (**) ROM (Run-of-mine)

Tabla 8. Indicadores de coste de producción (“cash cost”) y excedente económico (“surplus”) del cobre

Proyecto	Ley media % Cu eq.	Recuperación metal %	Costes operativos / t ROM***	Costes procesado, % total	Eficiencia económica (\$/lb Cu eq.)	AISC Cash Cost Cuartil	NSR \$/t Cu metal	Surplus % Cu
Aguas Teñidas*	2,6	80,0	48,9 \$	28,7	0,89 \$	1st Q	5.700	47% Cu
Cobre Las Cruces	5,4	92,4	45,2 \$	51,1	0,99 \$	1st Q	5.820	77% Cu
Riotinto	0,5	83,0	12,7 \$	47,4	1,60 \$	2nd Q	5.700	38% Cu
Touro**	0,4	87,0	12,5 \$	45,0	1,73 \$	2nd Q	5.600****	30% Cu

(*) incluyendo a Magdalena y Sotiel; (**) en espera; (***) ROM (Run-of-mine); (****) considerado

Tabla 9. Indicador que relaciona las inversiones con el valor de la producción de cobre anual

Proyecto	Intensidad de la inversión (mill. \$)	Inversión en la planta (mill. \$)	Valor de la producción anual (mill. \$)	Indicador: valor de la producción anual / Inv. total
Aguas Teñidas	1.132	489,0	474,0	0,42
Cobre Las Cruces	1.018	-	410,4	0,40
Riotinto	473	200,0	404,6	0,85
Touro*	259	80,6	190,0	0,73

(*) en espera; (**) objetivo

Tabla 10. Indicadores de coste de producción (“cash cost”) y excedente económico (“surplus”) del zinc-plomo

Proyecto	Ley media % Cu eq.	Recuperación metal %	Costes operativos / t ROM***	Costes procesado, % total	Eficiencia económica (\$/lb Cu eq.)	AISC Cash Cost Cuartil	NSR \$/t Cu metal	Surplus % Cu
Los Frailes*	6,5	88	-	-	-	-	-	-
Toral*	8,3	77	65,0	40,1	0,42\$	2nd Q	2.120	40 % Zn

(*) incluyendo a Magdalena y Sotiel; (**) en espera; (***) ROM (Run-of-mine); (****) considerado

ferencias apreciables que, en primer lugar, se relacionan con la gran variedad de características geoquímicas, mineralógicas, texturales y geométricas de los yacimientos que, en casi su totalidad, se integran en la provincia metalogénica de la IPB.

- En una visión general, el proyecto de **Atalaya Mining** destaca por sus bajos costes operativos totales respecto al cobre contenido en sus minerales, y ello ocurre debido a sus muy escasos costes de extracción minera (gran volumen de movimiento mineral, bajo ratio de desmonte), acercándose a los característicos de un pórfido cuprífero clásico. El resto de proyectos de la FPI se mantiene en valores muy semejantes (minería subterránea, complejidad y coste del sistema metalúrgico de **CLC**).
- Se destaca también la buena posición de los costes de producción de la unidad de cobre metal en relación con otros proyectos mundiales, con nada menos que dos proyectos (**Aguas Teñidas** y **CLC**) en el primer cuartil de sus *cash-cost*.

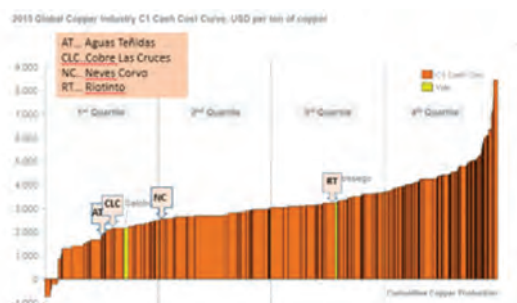


Fig. 6. Cash cost de los proyectos de cobre. La base está tomada de la compañía Vale. 2017.

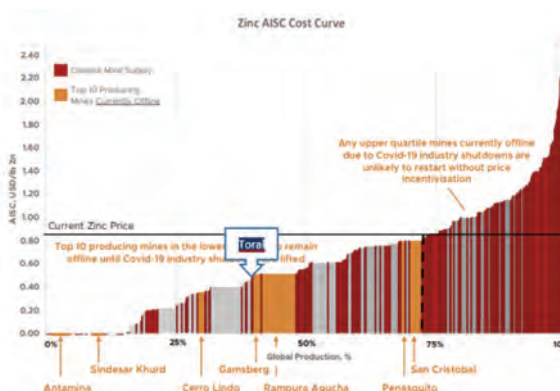


Fig. 7. Posición del Proyecto de Toral en la curva “cash cost” de los proyectos mundiales de zinc. Base tomada de S&P April 2020.

Tabla 11. Indicador que relaciona las inversiones con el valor de la producción de cobre anual

Proyecto	Intensidad de la inversión (mill. \$)	Inversiones en la planta (mill. \$)	Valor de la producción anual (mill. \$)	Indicador: valor de la producción anual / Inv. total
Los Frailes*	350	-	360,3	1,03
Toral*	110	33	63,9	0,58

(*) en espera

- En cuanto a la magnitud de las inversiones, resulta muy comprensible que la adecuación de proyectos antiguos a las posibilidades actuales se beneficien de los gastos infraestructurales pasados (**Atalaya**), mientras que **Cobre Las Cruces** y **Aguas Teñidas** se han analizado en su dimensión temporalmente íntegra.
- b) Grupo Sn-W-Ta-Li (metales tecnológicos)
 - Situación y datos básicos. Ver tablas 12, 13, 14 y 15.
 - Indicadores económicos (tablas de eficiencia económica). Ver tablas 16, 17, 18 y 19, y figuras 8, 9 y 10.
 - Consecuencias de grupo:
- Estaño
 - 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 pro-

Tabla 12. Situación de los proyectos de estaño españoles

Proyecto	Referencia (año)	Dimensiones (Mt ROM**/año)	Dimensiones unidad prod.	Vida años	Estatus
Oropesa*	Minas de Estaño de España. 2018. and EUROTIN 2011. NI 43	0,5 - 1,0 Mt/año cielo abierto	2.000t - 4.000t Sn/año	9	4
Santa María*	Eurotin 2011. Presentación	-	-	-	2

(*) en espera; (**) ROM (Run-of-mine)

Tabla 13. Situación de los proyectos de wolframio españoles

Proyecto	Referencia (año)	Dimensiones (Mt ROM**/año)	Dimensiones mtu4*/año	Vida años	Estatus
La Parrilla	W Resources. 2017. Final Investment Decision Report	2,0-3,4 Mt/año cielo abierto	178 a 264 kmtu/año	9	5
San Finx	Valoriza. 2018. Página web	0,07Mt/año subterránea	78 kmtu / año eq.	¿?	5**
Los Santos	Almonty Resources. 2017. Annual Report	0,45 Mt/año cielo abierto y subterránea	80 kmtu/año	3	5**
Barrueco	Ormonde. 2018. Presentación	1,1 Mt/año cielo abierto	227 kmtu/año	9	4-5
Vaitrexal*	ALMONTY R. 2014. Technical. R. NI 43 101	0,5 Mt/año cielo abierto	100 kmtu/año	13	3

(*) en espera (**) paralizado (***) ROM (Run-of-mine) (4*) 1 mtu=10 kg WO₃

Tabla 14. Situación de los proyectos de tántalo españoles

Proyecto	Referencia (año)	Dimensiones (Mt ROM**/año)	Dimensiones unidad prod.	Vida años	Estatus
Penouta	Penouta Project: Strategic Mining. 2016	3 Mt/año cielo abierto	231 t Ta ₂ O ₅ /año 1.400 t Sn/año	21	5
Alberta II*	Solid Resources. NI 43. 2014. Alberta 1	-	-	-	2

(*) en espera; (**) ROM (Run-of-mine)

Tabla 15. Situación de los proyectos de litio españoles

Proyecto	Referencia (año)	Dimensiones (Mt ROM**/año)	Dimensiones unidad prod.	Vida años	Estatus
Valdeflórez*	Infinity Lithium. Corporate Presentation	1,25 Mt/año open pit	15.000 t HxLi/año 19.500 t LCE** eq/año	24	3-4
Mina Feli	SAMCA. 2011	0,008 Mt/año underground		-	c
Arteal*	Datos Almagrera SA	2,2 Mm ³ /año mining spring	2.230 t LCE/año	10	2
Las Navas*	Lithium Iberia. Presentación 2020	2,3 Mt/año cieño abierto y subterránea	24.000 t LCE/año	20	2

(*) en espera (**) Lithium Carbonate Equivalent (***) ROM (Run-of-mine)

Tabla 16. Indicadores económicos básicos de los proyectos de estaño españoles

Proyecto	Inversiones iniciales (no AISC en M\$)	Valor de la producción en M\$	"Intensidad del Capital": Inv. \$ / ud. de metal por año	Eficiencia económica en \$ / unidad de metal	Cuartil de la curva AISC Cash Cost
Oropesa*	106,4	46,3 (para 1Mt/año)	43.600 \$/t Sn	11.500\$/t Sn	2° Q

(*) en espera

Tabla 17. Indicadores económicos básicos de los proyectos de wolframio españoles

Proyecto	Inversiones iniciales (no AISC en M\$)	Valor de la producción en M\$	"Intensidad del Capital": Inv. / mtu** año	Eficiencia económica en \$ / mtu**	Cuartil de la curva AISC Cash Cost
La Parrilla	47,5	44,5 a 66,0	266,8\$/mtu 180,0/mtu	94 \$/mtu	1° Cuartil
San Finx	20,0	19,5	256,0/mtu		
Los Santos	Antiguo	20,0	-	160-108/mtu	1° Cuartil
Barrueco	90,4	72,8	347,7/mtu	114 /mtu	1° Cuartil
Vaitrexal*	44,7	25,0	447,0/mtu	109 /mtu	1° Cuartil

(*) en espera (**) 1 mtu = 10kg WO₃

Tabla 18. Indicadores económicos básicos de los proyectos de tántalo españoles

Proyecto	Inversiones iniciales (no AISC en M\$)	Valor de la producción en M \$	"Intensidad del Capital": Inv. / tantalita año	Eficiencia económica en \$/ ud. metal	Cuartil de la curva AISC Cash Cost
Penouta	27,6	57,0	64.037 \$/t tant.	120 \$/kg tantalita eq.	-

Tabla 19. Indicadores económicos básicos de los proyectos de litio españoles

Proyecto	Inversiones iniciales (no AISC en M\$)	Valor de la producción en M\$	"Intensidad del Capital": Inv. \$/t LCE año	Eficiencia económica en \$ / t LCE***	Cuartil de la curva AISC Cash Cost
Valdeflores**	268	150	3.660 \$/t LCE	10.830\$/t LCE	3°Q
Arteal**	46*	26,8*	3.972 \$/t LCE*	20.590\$/t LCE*	3°Q
Las Navas**	280	240	-	11.700\$/t LCE	-

(*) salmueras geotérmicas (**) en espera (***) Lithium Carbonate Equivalent

duce estaño en otros depósitos de wolframio (**La Parrilla y Barruecopardo**).

- Tras un repunte de los precios en 2013, el colapso de los precios del estaño ha in-

hibido 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 ex-

ploración, aunque sea del tipo *brownfield*. 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

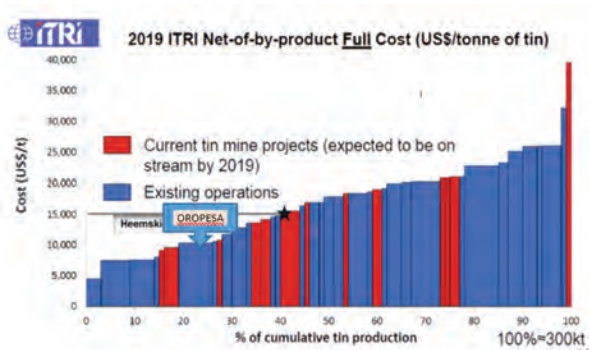


Fig. 8. Posición del Proyecto de Oropesa en la curva “cash cost” de los proyectos mundiales de estaño. Base tomada de ITRI 2020.

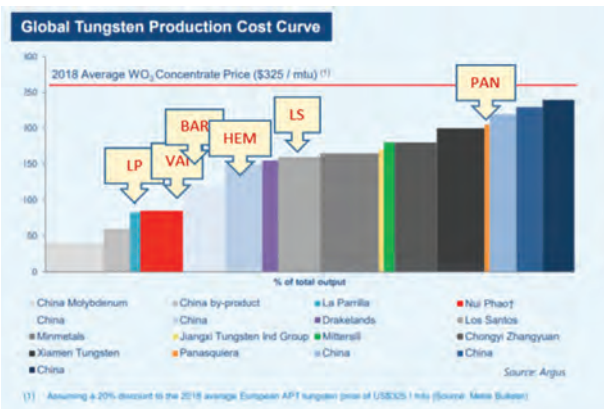


Fig. 9. Situación de los proyectos españoles y europeos de wolframio en la curva de “total cash cost”: La Parrilla: LP, Vaitrexal: VAI, Barruecopardo: BAR, Hemerdon: HEM, Los Santos: LS, Panasqueira: PAN. Modificado de Argus 2018,

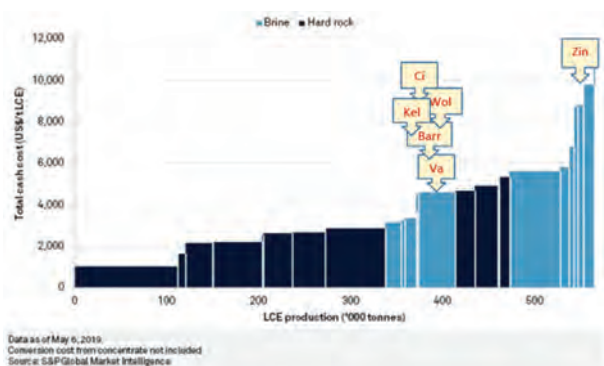


Fig. 10. Situación de los proyectos españoles y europeos de litio en la curva de “total cash cost”: Valdeflórez: Va, Barroso: Bar, Keliiber: Kel, Wolsber: Wol, Zinnwald: Zin. Fuente: S&P Global Market Intelligence (2018)

los 70 del siglo pasado. Desde entonces, solo un corto pico de precio, alrededor de 2014, ha creado la esperanza de un nuevo desarrollo.

- El proyecto de **Oropesa** es un caso muy especial desde el punto de vista del estaño europeo. Este yacimiento no pertenece a la tipología más abundante en Europa, incluida la Península Ibérica. Destaca por leyes relativamente altas, y una parte importante de ella es

susceptible de ser explotada a cielo abierto, sin una excesiva relación de desmonte. El proyecto se encuentra en su fase final de aceptación y su avance. Una vez alcanzado su régimen de diseño, podría suponer el 1,4% de la producción mundial de estaño.

Wolframio

- En los últimos años, con el atractivo de los precios, en España se han desarrollado tres nuevos proyectos de wolframio. Sumando algunos éxitos previsibles en el vecino Portugal, Europa puede incrementar su producción hasta duplicar la actual. Cuando se iniciara la producción nominal de los proyectos, se produciría el 8% del wolframio mundial, correspondiendo a España el 5,5%.
- Los nuevos proyectos tienen en común que, en la mayoría de los casos, son proyectos abandonados después de un corto periodo de explotación. También es común explotar el wolframio en forma de sheelita, que muestra una disposición dispersa, pero masiva, que favorece a la geometría de la minería. Mucho más problemática es la de la wolframita, situada en estructuras de vetas, que no permiten considerar el cuerpo extendido, salvo cuando aparece formando *stockwork*, que contienen la densidad de filones necesaria para conseguir una ley económica.
- 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**.

Tántalo

- La casi única alternativa de producción tántalo europeo se encuentra en el yacimiento de **Penouta**. Sin embargo, este proyecto, ya en marcha, también depende de la recuperación del estaño, que contiene casi el 50% de su valor final. Además, el inicio de su producción se ha realizado aprovechando los residuos mineros del anterior propietario. Es decir, todavía está lejos de su capacidad máxima. El proyecto **Penouta**, alcanzado su capacidad nominal, debería producir 230 toneladas de tantálita al año, lo que supondría, más del 10% de la producción mundial.
- También hay que considerar el yacimiento de pegmatitas con tántalo, estaño y litio de **Al-**

berta II en Presqueiras, Pontevedra. Si se explotase a una tasa de 0,5 Mt/año, produciría anualmente 35 toneladas de tantalita.

Litio

- Así como las posibilidades de acercarnos a las necesidades metálicas europeas son siempre escasas, en el litio, en el corto plazo, esto parece posible. Existen, en Europa, no menos de seis proyectos en el rango de producción de 15.000 t 25.000 t LCE/año, (LCE carbonato de litio equivalente). En la Península Ibérica, ejemplos de ello son el proyecto **Valdeflórez** y **Las Navas**, en España, y el proyecto **Barroso**, en Portugal.
- Estos proyectos se refieren a mineralizaciones de roca dura, y tanto sus leyes como sus circunstancias geológicas se parecen a muchos de los proyectos en producción del mundo. Además, muchos de ellos han sido respaldados financieramente por inversores con el deseo de una rápida puesta en marcha.
- Los costes operativos totales, o *costes de eficacia económica*, son una medida espléndida de la calidad de los depósitos o de la habilidad y el conocimiento de la ingeniería empleada. La posición de los proyectos de litio en las curvas que recogen los datos globales siempre se sitúan en el tercer o cuarto cuartil de los costes mundiales. Sin embargo, estas curvas también incluyen los bajísimos costes de los depósitos de salmuera y, además, también están pre-

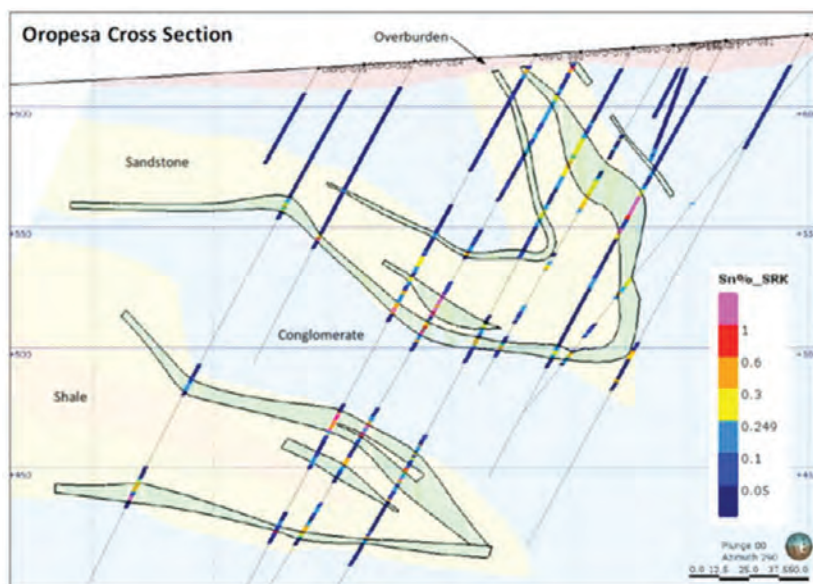


Fig. 11. Perfil representativo del yacimiento de casiterita de Oropesa. Elementos 2020.

- sentes los gigantescos proyectos australianos.
- El valor de la inversión sobre el índice de producción es muy significativo. En todos los proyectos, este indicador es muy bajo, entre 1,4 y 2,1. Es decir, muy lejos de las pautas de no superar el valor de tres, que correspondería a un proyecto bien desarrollado (**Naranjo, R. y Botín, J. A., 2012**). Esto significa que las necesidades de capital inicial son muy pequeñas para los minerales de litio en forma de roca dura o, más probablemente, el precio de los productos de litio es actualmente elevado.
- En el aspecto de las incertidumbres, los proyectos tienen una fuerte respuesta en su aceptación social y, en concreto, en **Valdeflórez** han sido las propias Administraciones las que han actuado más negativamente.
- Indicadores económicos: ver Tabla 21 y Figura 12.
- Solo hay un proyecto en producción, **Orovalle**, en el norte de España, aunque también hay varios otros en estudio o en fase de exploración. Su producción, inferior a 100.000 onz Au/año, es moderada, al igual que ocurre con el resto de proyectos en preparación. Los altos precios del metal amarillo, sin duda, favorecerán su puesta en marcha o la reactivación de los que están invernando.
- Los costes AISC del proyecto en marcha, como los que aguardan, están bien posicionados (1º-2º cuartil) en las curvas mundiales de costes unitarios de producción (\$/onza de oro producido). En todos los casos, la intensidad de inversión es similar o incluso moderada, a la global (Figura 12).

c) Metales preciosos (Au-Ag)

- Situación y datos básicos: ver Tabla 20.

8.2 Indicadores de excelencia tecnológica

8.2.1 Introducción

La eficiencia de los recursos, en términos de eficacia del

Tabla 20. Situación de los proyectos de oro-plata españoles

Proyecto	Referencia (año)	Dimensiones (Mt ROM*/año)	Dimensiones unidad prod. / año	Vida años	Estatus
Orovalle	Orovalle. Orvana Corp. 2016	3 Mt/y open pit	64.000 onz.Au 200.000 onz. Ag 3.000 t Cu	6	5
Salave**	Black Dragon Gold. PEA 2019.	0,65 Mt/y underground	79.200 onz.Au	14	3-4
Corcoesto**	Edgewater Exploration Ltd. PEA. 2011	1,8 Mt/y open pit	106.000 onz.Au	10	3

(*) ROM (Run-of-mine); (**) en espera

Tabla 21. Indicadores económicos básicos de los proyectos de oro-plata españoles

Proyecto	Inversiones iniciales (no AISC en M\$)	Valor de la producción en M\$	"Intensidad del Capital": Inv. \$/onz Au año	Eficiencia económica en \$ / onz Au)	Cuartil de la curva AISC Cash Cost
Orovalle	181	127	2.380\$/onz Au eq.	940 \$/onz Au eq.	2° Q
Salave*	158	150	1.975\$/onz Au .	730 \$/onz Au	1° Q
Corcoesto*	171	138	1.613 \$/onz Au	730 \$/onz Au	1° Q

(*) en espera

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 gran tiempo que consume en desarrollar los proyectos y, especialmente, a los períodos de recuperación asociados con sus inversiones principales. Por esta razón, la industria necesita que las nuevas tecnologías reciban soporte durante el tiempo suficiente para garantizar un retorno de la inversión.

Desde el punto de vista tecnológico, el sector minero siempre ha optado por desarrollos e innovaciones lineales, además de un aumento y evolución constante, pero, actualmente, esto ya no es suficiente. Resulta complicado imaginarse una compañía (da igual el tipo) que en el futuro pueda sobrevivir sin implementar mejoras tecnológicas en su cadena de valor, optimizando sus operaciones, diseñando y desarrollando un proceso productivo capaz de adaptarse a la volati-

lidad de los mercados y otras circunstancias. El uso y adopción de las nuevas tecnologías disruptivas son el camino a seguir. Dichas tecnologías, en lugar de seguir una tendencia lineal, se comportan de forma exponencial. Es decir, inicialmente apenas se aprecia su contribución, pero, posteriormente, aceleran los resultados obteniendo la clave que permiten crecer y desarrollarse de forma exponencial. Este esquema tiene que ser visto como una cuestión de supervivencia, no ser observado únicamente bajo el paraguas de la mejora competitiva.

8.2.2 En el mundo de la información

Actualmente, la creación de valor no depende exclusivamente de las tecnologías físicas, sobre todo si se desea mejorar la planificación y/o las previsiones, tanto a largo como a corto plazo. Para ello, en la industria minera, es necesario adoptar tecnologías de la información lo suficientemente maduras y transversales como para ser im-

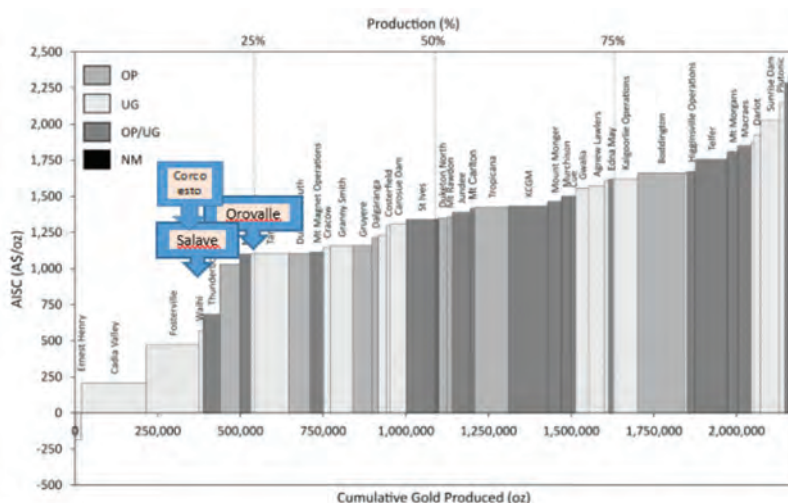


Fig. 12. Situación de los proyectos españoles de oro-plata en la curva de "total cost".

plementadas. Como resultado, se obtendrán los avances más radicales desde el punto de vista del rendimiento de la operación minera (modelos predictivos, uso del *Machine Learning* para la optimización de los recursos, gemelo digital para el diseño e implementación de experimentos y otros más).

Se recomienda que las organizaciones consideren la implementación de estas tecnologías mediante la definición y el uso de un mapa tecnológico integral. Este será el aglutinador de toda la información de la cadena de valor, junto con las particularidades propias del proyecto. Explorar las posibles sinergias que se producen dentro del proceso minero provoca que las mejoras puedan superar con creces los beneficios individuales generados por aplicar una sola tecnología de forma aislada.

La implementación de avances tecnológicos en los proyectos mineros se enfrenta a los siguientes retos:

- Falta de conectividad, debido a la extensión de las explotaciones y su situación, normalmente, en áreas remotas. Ello provoca que cuenten con conexiones inestables o con un mal ancho de banda. Esto implica el desarrollo de nuevas redes de comunicación (ej: sixfog, LoRaWAN) y acercar físicamente la infraestructura (capacidad de cálculo y el almacenamiento de datos) a la explotación (ej: *edge computing* y otros).
- Falta de adopción por parte de los usuarios de los últimos avances tecnológicos. Ello conlleva realizar un esfuerzo en el desarrollo de las

aplicaciones, especialmente para facilitar y favorecer su uso. Por ejemplo, mediante la simplificación o la integración entre ellas, a fin de incrementar el valor percibido por el usuario.

- Para obtener resultados o cumplir objetivos. Usualmente, es necesario esperar un largo plazo. Esto se debe a la necesidad de inversiones considerables, a la necesidad de perfiles tecnológicos muy específicos y a la compleja puesta en marcha. Además, los acercamientos, tales como el desarrollo y la utilización de modelos predictivos, la mejora de la cultura del dato en la organización (uso de *Data Lakes*, tecnologías *Big Data*, *GIS* y otras) o bien, el uso de metodologías ágiles que permitan predecir y simular escenarios futuros.
- Un ambiente de trabajo hostil. Las condiciones de trabajo cambiantes y muy exigentes provocan dificultades

en la instalación y mantenimiento de los sensores. El desarrollo de sensores remotos (ej: captura de imágenes mediante cámara) o la utilización de mediciones indirectas pueden ayudar a solventar este problema.

- Dificultad y altos costes para obtener los datos (información). Resulta esencial la integración de diversos modelos *IIOT (Industrial internet of Things)* y el desarrollo de *data pipelines* y *data feeds* para facilitar la comunicación entre todos los sistemas implicados en la operación minera. Además, se debe mantener la información actualizada y reducir los costes de su obtención.

8.2.3 Medición de los indicadores de eficiencia tecnológica

Los indicadores de eficiencia tecnológica descritos por **Jacobs et al. (2017)** tienen en cuenta tanto las tecnologías físicas como las digitales, mi-



Fig. 13. Representación visual del ciclo minero (Jacobs, 2016).

Tabla 22. Indicadores utilizados en las tablas de Excelencia Tecnológica

Gestión de los recursos minerales: como el conjunto de depósitos económicos en sus principales proyectos, Cobre Las Cruces (First Quantum) y otros. Otra opción ha sido la incorporación de proyectos externos: Aguas Teñidas (Mubadala-Trafigura) y Riotinto (Atalaya Mining) .
Producción: Implica el desarrollo de plantas de procesamiento más versátiles, modelos de optimización de costos y otros. Por ejemplo, la expansión del Proyecto de Atalaya Mining a 15 millones de toneladas.
Productividad y eficiencia de los activos: Por ejemplo, la analítica avanzada puede determinar la mezcla óptima de materiales y programar la producción para optimizar el rendimiento de la mina/planta. La implementación de la gestión de la flota y la solución del control de la mina en el caso de Aguas Teñidas .
Rentabilidad y control de costes: Por ejemplo, la automatización, la modelización predictiva y el relleno en pasta en el proyecto de Aguas Teñidas y la construcción de una planta solar en Riotinto .
Cadena de suministro: Por ejemplo, Blockchain , seguridad cibernética e impresión en 3D.
Factores socioeconómicos: Por ejemplo, gobierno corporativo, trabajo, comunidades y responsabilidad social corporativa. Un caso básico sería considerar la información independiente sobre la innovación en la web del proyecto.
Salud, medio ambiente, seguridad y legalidad: Por ejemplo, evaluación del impacto ambiental, gestión de las emisiones de carbono, plan de gestión ambiental, plan de post-cierre y rehabilitación. Un ejemplo es la optimización de la gestión del agua de Cobre Las Cruces .

diendo la capacidad de: 1) aumentar la producción como medida de la eficiencia; 2) aumentar la productividad como medida de la eficiencia; 3) aumentar la eficiencia como medida distinta de la productividad; 4) mejorar la seguridad y reducir el riesgo de error humano (**Jacobs y Webber-Youngman, 2017**).

La Figura 13 ilustra cómo las siete etapas representan un ciclo genérico de un proyecto minero. Se trata de representar de la forma más general posible (para tener un punto común en la valoración tecnológica de los diversos proyectos en España) un proyecto mi-

nero. Ello provoca que no pueda ser adecuado para la evaluación o estudio de un proyecto en específico.

Con el objeto de evaluar las innovaciones tecnológicas de los proyectos mineros españoles, se valoraron y analizaron siete etapas (Tabla 22) del proceso minero (**Jacobs, 2017**).

Actualmente, es común que las empresas hagan públicas sus innovaciones tecnológicas, con el fin de poder involucrar a otros miembros. Así se consigue mejorar sustancialmente la implementación y el alcance de las mismas (por ejemplo, las tecnologías de código

abierto, **Sung-Min y Mardovona, 2019**).

Para realizar esta evaluación mediante el uso de una escala numérica, en números enteros del 1 (mínimo) al 5 (máximo), solo se han tenido en cuenta las fuentes primarias (principalmente, el sitio web del proyecto).

8.2.4 Aplicación de indicadores de eficiencia tecnológica a los proyectos españoles

a) Metales básicos (Cu-Zn-Pb): Ver tablas 23 y 24.

b) Metales tecnológicos (Sn-W-Ta-Li): Ver tablas 25, 26, 27 y 28.

Tabla 23. Indicadores tecnológicos en proyectos españoles de cobre

Proyecto	Gestión de los recursos minerales (GRM)	Producción (P)	Productividad y eficiencia de los activos (P&EA)	Rentabilidad y control de costes (RCC)	Cadena de suministro (CS)	Factores socioeconómicos (FSE)	Salud, medio ambiente, seguridad y legalidad (SMS&L)
Aguas Teñidas	3,5	-	3,5	3	-	1	2,5
Cobre Las Cruces	4	-	3	-	-	1	2,6
Riotinto	3	3	3	3	-	1,4	2

Tabla 24. Indicadores tecnológicos en proyectos de plomo-zinc

Proyecto	GRM	P	P&EA	RCC	CS	FSE	SMS&L
Aznalcóllar*	-	-	-	3	-	1.5	2.5

(*) en espera

Tabla 25. Indicadores tecnológicos en proyectos de estaño

Proyecto	GRM	P	P&EA	RCC	CS	FSE	SMS&L
Oropesa*	-	-	-	-	-	2	-

(*) en espera

Tabla 26. Indicadores tecnológicos en proyectos de wolframio

Proyecto	GRM	P	P&EA	RCC	CS	FSE	SMS&L
La Parrilla	4	-	-	-	-	1	-
San Finx		-	-	-	-	1	3
Los Santos	2	3	-	-	-	1	-
Barrueco	-	-	-	-	-	1	-

Tabla 27. Indicadores tecnológicos en proyectos de tántalo

Proyecto	GRM	P	P&EA	RCC	CS	FSE	SMS&L
Penouta	1	-	1,7	-	-	1	-

Tabla 28. Indicadores tecnológicos en proyectos de litio

Proyecto	GRM	P	P&EA	RCC	CS	FSE	SMS&L
Valdefiérrez*	-	-	-	-	-	1	3

(*) en espera

c) Metales preciosos (Au-Ag):
Ver Tabla 29.

- Consecuencias

En los proyectos mineros españoles, los casos más admirables corresponden a los proyectos de cobre y, especialmente, en el apartado de Gestión de Recursos Minerales (mayores de 3, ver Tabla 23). Los buenos resultados de estos cinco proyectos se deben a una buena política de gestión de los recursos minerales. Por eso, casi constituyen una señal de identidad del perfil empresarial en el IPB (Cinturón Pirítico Ibérico). Esto no sólo afecta a los proyectos actuales en producción, sino que los indicios de los proyectos de zinc-cobre pendientes de **Los Frailes-Aznalcollar** (véase Tabla 24) también parecen poseer ese espíritu.

En los demás proyectos (Tablas 25-29), es decir, los que no están en el IPB, su tamaño (y casi siempre su complejidad) es notablemente

menor. Por ello, apenas destaca la prevista sustitución del proyecto de **Los Santos** (wolframio) por el proyecto **Vaitrexal**, con el probable traslado de la planta de procesamiento, ya que, al final, no se ha realizado la sustitución de sus escasos recursos explotables a cielo abierto por otros subterráneos.

8.3 Indicadores de sostenibilidad y economía circular

8.3.1 Conceptos de sostenibilidad

Dentro de los sectores industriales, el minero es un mundo aparte. Esta actividad se diferencia notablemente del resto de las actividades industriales no solo por explotar en concesión administrativa, estar ubicada geográficamente en el recurso y atender a una legislación copiosa y compleja, sino también por los largos períodos de maduración de los proyectos, el volumen importante de inversiones y la volatilidad de los precios (**Carasco J.**, 2012). Este aspecto se

ve reflejado, más aún si cabe, al hablar de sostenibilidad y economía circular.

Si existían ciertas dudas sobre la aplicación de la sostenibilidad en la minería, la aparición del concepto desarrollo sostenible fue eliminando esas incógnitas. Se ha demostrado, en las últimas décadas, que la necesidad de materias primas por parte de la humanidad se ve en estos días acompañada por la observación en el tratamiento de la naturaleza y el entorno social. Uno sólo debe fijarse cómo las últimas políticas de materias primas de la UE, Iniciativa de Materias Primas (EU, 2008), incorporan el carácter de justo y sostenible en el suministro de materias primas en los mercados globales, al suministro sostenible de materias primas desde dentro de la UE, a la eficiencia de los recursos, y al suministro de materias primas secundarias a través del reciclaje.

Hoy, la atracción de los inversores por un proyecto minero, una vez aceptado el potencial geológico y económico básico, debe



necesariamente completarse con un análisis de sostenibilidad. Este análisis debería tener en cuenta no sólo el aspecto ambiental clave durante la operación y restauración minera, sino también el ámbito social en las relaciones con la comunidad y los aspectos regulatorios y no regulatorios. Además, se debe observar una perspectiva económica general, donde se verifique la posición competitiva en cuanto a costos operativos.

Desde que **Kesler (2015)**, en los años ochenta, escribiera de la sostenibilidad que es punta de lanza en la industria minera, hasta hoy, el uso del término en sectores tan inicialmente distantes como el mundo financiero ha ido ampliándose, no contemplándose la presentación de resultados en una compañía, sin ir acompañados de información no financiera *ad hoc*.

Una visión amplia de la sostenibilidad en las explotaciones mineras abarca una amplia gama de parámetros que se refieren a sus dimensiones social, ambiental y económica. Dejando de lado la dimensión social, los siguientes aspectos podrían ser candidatos en la configuración de los indicadores de sostenibilidad de un depósito mineral y de su propia operación: eficiencia económica y tecnológica de la operación, intensidad de capital, costos de tratamiento, *cut-off* seleccionado y recuperación metalúrgica. El movimiento de material y la relación de desmonte se suponen am-

bientales, pero también resultan económicos, debido a su influencia en los costos operativos. Un aspecto más intrínseco del mineral, como la ley promedio y los subproductos que lo acompañan, suele venir determinado por el tipo de yacimiento; por ejemplo, la explotación de un pórfido que requiere grandes movimientos de tierra para obtener una baja ley mineral, no es tan sostenible para la extracción de mineral del cobre como son un *skarn*, un VMS o un IGCC (**De la Torre y Espí, 2019**).

Muchas de estas características marcarán su posición competitiva, que será clave para la sostenibilidad económica de la explotación.

Entre la amplia variedad de indicadores ambientales, se han seleccionado para las operaciones mineras aquellos con base en la simplicidad y eficiencia (**Moreno y Espí, 2007**). Además, en esta selección se ha considerado que la información disponible, en este caso, es muy escasa. Por eso, muchas veces ha sido necesario recurrir a cálculos indirectos, o suministrar la información con datos obtenidos de circunstancias similares. Todos ellos pertenecen a la categoría *Presión*, según el Modelo DPSIR: Impulso F-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (**Jesinghaus, 2002**).

Los indicadores recopilan habitualmente indicaciones de todo un conjunto superando la com-

plejidad del sistema. Las medidas simples pueden indicar cambios o tendencias en estructuras ambientales complicadas. Cuando esto ocurre, una buena actuación sería tratar de comprender completamente estas tendencias y sus implicaciones. (**I. Arribas, GRUPO iTarg3T, 2019**).

Incluso cuando, en los últimos años, se han realizado diferentes acercamientos para tratar de valorar la sostenibilidad minera con enfoque en la dimensión ambiental (ver **Navarro y Dinis da Gama 2006, Dialga, 2018, De la Torre, 2011**), una puntuación sostenible más holística resultaría una solución más completa, pero una tema complejo. En este sentido, entre las principales agencias de calificación de ESG (*Environment, Social and Governance*) se encuentra una gran divergencia (promedio de correlación 54%), con diferencias en alcance, medición y ponderaciones de categorías (**F. Berg, 2019**).

8.3.2 Aplicación de los indicadores de sostenibilidad a los proyectos españoles

Tablas de sostenibilidad (ver Tabla 30).

a) Metales básicos (Cu-Zn-Pb). Ver tablas 31 y 32.

- Consecuencias de grupo
- Habitualmente, en minería, el flujo de masa es un pará-

Tabla 29. Indicadores tecnológicos en proyectos de oro - plata

Proyecto	GRM	P	P&EA	RCC	CS	FSE	SMS&L
Orovalle	3	-	-	-	-	1	2,7
Corcoesto*	-	-	-	-	-	1	-

(*) en espera

Tabla 30. Indicadores en las tablas de sostenibilidad

<ul style="list-style-type: none"> Huella de carbono: se calculan las emisiones producidas por el uso de la electricidad y el consumo de combustible (Alcances 1 y 2). Los resultados son divididos por la producción de metal unitaria. Un litro de gasoil consumido emite 2,69 kg de CO₂ (IPCC, 2006). Un kWh de energía eléctrica consumida emite 0,27 kg de CO₂ (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018)
<ul style="list-style-type: none"> Huella del agua: se determina el consumo unitario de agua referido a la producción de metal unitario. Se refiere al agua empleada y no reciclada. Las estimaciones se llevan a cabo con una humedad por residuo del 30%.
<ul style="list-style-type: none"> Consumo de energía eléctrica: expresado en kWh, se calcula por unidad de producción.
<ul style="list-style-type: none"> Producción de residuo: residuo sólido en toneladas referido a la producción de metal unitario. Los residuos de la planta de tratamiento son considerados, así como el residuo del cielo abierto o la minería subterránea.

metro de considerable importancia en el análisis sostenible. El indicador de producción de residuos está claramente influido por el ratio de desmonte. Sin embargo, la repercusión de la ley es mayor que aquel del ratio de desmonte cuando calculamos la relación estéril/mineral (ver Tabla 34).

- La minería subterránea siempre trabaja con menores ratios de desmonte y mayores leyes, dado que las riquezas minerales superficiales disminuyen acusadamente con el tiempo. Ese es uno de los motivos por los que, compa-

rativamente, la minería subterránea supone una mejora en la sostenibilidad, asumiendo así un esfuerzo medioambiental (ver Tablas 34-35). Nota: la intensidad en las emisiones de GEI y de consumo energético aumentan al disminuir la ley mineral, alcanzando el punto de inflexión 0,5% por debajo del cual la intensidad en ambos aumenta acusadamente.

- Las mayores emisiones calculadas en el proyecto de **Touro** provienen del elevado ratio de desmonte, ya que el consumo de gasoil es bastante superior que en otros yacimientos con mejor ratio.

b) Elementos tecnológicos (Sn-W-Ta-Li). Ver tablas 33, 34, 35 y 36.

- Consecuencias de grupo
 - **Oropesa** (Tabla 33) es el único proyecto español en condiciones para su puesta en marcha inmediata. Sin embargo, desde el punto de vista de la sostenibilidad, su elevado ratio de desmonte supone un incremento en el indicador de flujo de masa, moderado por su apreciable ley en estaño.
 - En los proyectos de wolframio (Tabla 34), desde el punto de vista de la sosteni-

Tabla 31. Proyectos de cobre. Indicadores de sostenibilidad

Proyecto **	Huella de carbono (kg CO ₂ / kg Cu)	Huella del agua (l H ₂ O / kg Cu)	Consumo eléctrico (kWh / lb Cu)	Producción de residuos (residuo / lb Cu)	Esfuerzo ambiental sostenible	Licencia social
Aguas Teñidas	-	14,8 l / kg Cu	-	0,06 t residuo / lb Cu	Subterránea	Alta
Cobre Las Cruces	2,1 kg CO ₂ / kg Cu	6,1 l / kg Cu	1,7 kWh / lb Cu	0,08 t residuo / lb Cu	Cielo abierto	Aceptable
Riotinto	5,2 kg CO ₂ / kg Cu	111,5 l / kg Cu	1,4 kWh / lb Cu	0,41 t residuo / lb Cu	Cielo abierto	Aceptable
Touro*	7,2 kg CO ₂ / kg Cu	75,5 l / kg Cu	3,2 kWh / lb Cu	0,39 t residuo / lb Cu	Cielo abierto	Primer rechazo

(*) en espera; (**) datos calculados

Tabla 32. Proyectos de zinc. Indicadores de sostenibilidad

Proyecto **	Huella de carbono (kg CO ₂ / kg Zn)	Huella del agua (l H ₂ O / kg Zn)	Consumo eléctrico (kWh / kg Zn)	Producción de residuos (residuo / lb Zn)	Esfuerzo ambiental sostenible	Licencia social
Los Frailes*	-	4,7 l/kg Zn	-	0,02 t/kg Zn	Subterránea	Aceptable
Toral*	-	4,7 l/kg Zn	-	0,02 t/kg Zn	Subterránea	-

(*) en espera

Tabla 33. Proyectos de estaño. Indicadores de sostenibilidad

Proyecto	Huella de carbono (t CO ₂ / t Sn)	Huella del agua (m ³ / t Sn)	Consumo de energía eléctrica (kWh/ t Sn)	Producción de residuos (residuo / t Sn)	Esfuerzo ambiental sostenible	Licencia social
Oropesa*	6,28 t CO ₂ / t Sn	Circuito cerrado	6,9 kWh /t Sn	786,5 t residuo / t Sn	Cielo abierto / subterránea 74% recuperación	Aceptable

(*) en espera

Tabla 34. Proyectos de wolframio. Indicadores de sostenibilidad

Proyecto	Huella de carbono (t CO ₂ / mtu*)	Huella del agua (m ³ / mtu)	Consumo de energía eléctrica (kWh/ mtu)	Producción de residuos (t estéril/ mtu)	Esfuerzo ambiental sostenible	Licencia social
La Parrilla	0,108 t CO ₂ / mtu	Circuito cerrado	33,7 kWh / mtu	26,4 t residuo / mtu	Cielo abierto 72% W recuperación	Alto
Los Santos	0,301 t CO ₂ / mtu	1,68 m ³ / mtu	298 kWh / mtu	22,4 t residuo / mtu	Cielo abierto/ subterránea 60% W recuperación	Alto
Barrueco	0,137 t CO ₂ / mtu	Circuito cerrado	254 kWh / mtu	30,9 t residuo / mtu	Cielo abierto 78% W recuperación	Alto
Vaitrexal**	0,258 t CO ₂ / mtu	1,50 m ³ / mtu	300 kWh / mtu	25,0 t residuo / mtu	Cielo abierto 55% W recuperación	Debatible

(*) 1 mtu=10 kg WO₃; (**) en espera

Tabla 35. Proyectos de tántalo. Indicadores de sostenibilidad

Proyecto	Huella de carbono (t CO ₂ / lb Ta ₂ O ₅)	Huella del agua (m ³ / lb Ta ₂ O ₅)	Consumo de energía eléctrica (kWh/ lb Ta ₂ O ₅)	Producción de residuos (residuo / lb Ta ₂ O ₅)	Esfuerzo ambiental sostenible	Licencia social
Penouta	170	1.136	79	3	Cielo abierto 40%-90%**	Alto

(*) en espera; (*) dependiendo de la innovación en la aplicación metalúrgica (o no)

Tabla 36. Proyectos de litio. Indicadores de sostenibilidad

Proyecto	Huella de carbono (t CO ₂ / t LCE*)	Huella del agua (m ³ / t LCE)	Consumo de energía eléctrica (kWh / t LCE*)	Producción de residuos (residuo/ t LCE*)	Esfuerzo ambiental sostenible	Licencia social
Valdeflórez**	2,20 t CO ₂ / t LCE	24,7 m ³ / t LCE	3.795 kWh / t LCE	118 t residuo / t LCE	Cielo abierto	En conflicto

(*) t LCE = tonelada de carbonato de litio equivalente; (**) en espera

bilidad, existe un gran parecido entre ellos. Esto es porque acaban de comenzar o lo harán pronto. Casi todos lo harán a cielo abierto, con bajas leyes de WO₃. **La Parrilla** destaca por su teórico bajo consumo eléctrico y por su extraordinariamente baja razón de desmonte.

- En cuanto a la producción de tántalo, el único proyecto

en Europa, **Penouta** (Tabla 35) sobresale por su esfuerzo en sostenibilidad, al comenzar su actividad recuperando mineral de antiguos residuos.

- Los proyectos de litio (Tabla 36) están todavía en fases muy iniciales de desarrollo, por lo que no publican datos suficientemente exactos para el cálculo de los indica-

dores sostenibles. Sin embargo, la ley y la recuperación metalúrgica son factores fundamentales en la producción del residuo, en el consumo eléctrico y en la huella de carbono. Además, el ratio de desmonte es decisivo en el movimiento másico. Todos los indicadores sostenibles de los proyectos son similares. El proyecto de **Valdeflórez** ocupa una posi-

Tabla 37. Proyectos de oro. Indicadores de sostenibilidad

Proyecto	Huella de carbono (t CO ₂ / onz Au)	Huella del agua (m ³ / onz Au)	Consumo de energía eléctrica (kWh/ onz Au)	Producción de residuos (t onz Au)	Esfuerzo ambiental sostenible	Licencia social
Orovalle	-	3,13 m ³ /g Au	-	26 t/onz Au	Subterránea	Aceptable
Salave*	-	-	-	-	Subterránea	Debatible
Corcoesto*	1,67 t CO ₂ /onz Au	6,14 m ³ /g Au	0,37 kWh/onz Au	205 t/onz Au	Cielo abierto	En conflicto

(*) en espera

ción privilegiada en casi todos los factores, además de presentar un elevado nivel de elaboración.

c) Metales preciosos (Au-Ag)

- Consecuencias de grupo

- El movimiento másico, indicador clave para la sostenibilidad ambiental, se ve multiplicado ante la presencia de un ratio de desmonte elevado (**Corcoesto** 9:1 vs. **Orovalle** 1:5) y reforzado por las leyes más bajas (**Corcoesto** 1,7gAu/t vs. **Orovalle** 3,3 gAu/t) (Tabla 37).

- Se observa cómo la ley del oro define el movimiento másico, el consumo de agua y electricidad. La minería de yacimientos de baja ley entorpece la sostenibilidad ambiental en minería, la cual, habitualmente, se beneficia de los mejores datos medioambientales de la minería subterránea con mayor ley mineral, menores ratios de desmonte y mayor tecnología.

8.3.3 El concepto de economía circular

Conscientes de vivir en un planeta finito y sabedores de la existencia de límites en los recursos que permiten la sociedad que conocemos (*Limits to Growth*), la Comisión Europea, dentro de su agenda para el crecimiento sostenible, el Pacto Verde Europeo, ha adoptado un

nuevo Plan de Acción para la Economía Circular. Esta acción impulsa los modelos de EC, donde el valor de los recursos es mantenido en la economía de la UE durante el mayor tiempo posible, con una generación de residuos minimizada.

Por definición, una de las maneras más directas de encontrar la circularidad en minería supondría revisar la gestión del residuo minero, con el objetivo general del reciclaje de todos los residuos o, al menos, la consideración de un ratio de reciclaje. La generación global estimada de residuos sólidos en producción de minerales y metales supera los 100.000 millones de toneladas al año. Esto puede suponer, desde varias veces la masa del elemento buscado, este es el caso de los minerales de hierro y aluminio, hasta un millón de veces en el caso de algunos metales preciosos como el oro (**Tayebi-Khorami**, 2019). Esta es la razón para incluir un parámetro de circularidad relacionado, a fin de revelar de esta manera la oportunidad de que estos residuos tengan una segunda vida como materias primas secundarias. Ello, obviamente, se realizará con menor ley mineral, pero con la posibilidad de tratarse de nuevo económicamente o emplearse para *back filling*.

Probablemente, el indicador más importante para la economía circular consiste en la pro-

porción en la que el material reciclado reemplaza la extracción de recursos naturales, y la proporción en la cual el residuo es reincorporado en la economía. Por tanto, resulta igualmente crítico considerar la proporción de producción nominal en la que el residuo previo contribuye. La UE también incluye entre sus indicadores otros aspectos relacionados con la sostenibilidad y la calidad y de esta manera la circularidad puede ser completada con conceptos de la sostenibilidad social y ambiental (EC, 2018).

Así pues, bajo estas circunstancias, el consumo de energía y materiales debe ser vigilado durante la operación de obtención del metal final, dado que un abuso en el consumo de cualquiera de ellos significaría el empeoramiento de su condición de circularidad. Se debe añadir que la minería de los metales *subproducto*, de alguna manera, es una contribución a la economía circular; así pues, cuando estos existen y son claramente beneficiosos, deberán tener un indicador propio en las tablas de economía circular, expresándose en tanto por ciento de la producción de la primera sustancia.

Ser sostenible, cuando nos referimos a materias primas, también implica su disponibilidad en el mercado, lo que significa que no exista interrupción posible en la cadena de suministro. Así pues, otro parámetro que



Tabla 38. Indicadores empleados en las tablas de Economía Circular

<ul style="list-style-type: none"> Contribución al consumo europeo: representa el porcentaje de la producción del metal en el total del consumo europeo. En el caso de los metales básicos, es más representativo expresar el dato sobre la producción europea.
<ul style="list-style-type: none"> Contribución previa de residuos: Es la cantidad de residuo evitado debido al reprocesado de antiguos residuos mineros, expresado en t/año.
<ul style="list-style-type: none"> Presencia de subproducto: es la obtención de metal subproducto referido al metal principal, en tanto por ciento.
<ul style="list-style-type: none"> Uso intensivo de energía y materiales. Expresa situaciones de consumos elevados de energía y material. El contenido metal es un indicador muy significativo, dado que el contenido metal en el mineral ROM está directamente relacionado con el consumo energético para liberarlo y con la cantidad de desperdicio que lo acompaña. La ley media se emplea en sus unidades habituales para clasificarlos. Se utiliza la ley media en las unidades más comunes para cada metal.

ha de ser considerado en el conjunto de la economía circular es la contribución de la producción de cada una de las minas señaladas al consumo total de ese mineral para el conjunto de la UE.

8.3.4 Aplicación de indicadores de economía circular en los proyectos ibéricos

Tablas de Economía Circular (ver Tabla 38).

a) Los metales básicos (Cu-Zn-Pb) (tablas 39, 40 y 41).

- Consecuencias de grupo
 - Los proyectos de cobre y zinc mostrados en las tablas 39 y 41 tienen o tendrán (más del 20% en el caso del cobre, y más del 10% en el zinc) una significativa contribución en el consumo europeo que les convierte en adecuados para la idea circular. La razón es que, ambientalmente, la proximidad al mercado mejora la circularidad, ya que el transporte de minerales a granel resulta intensivo en energía. Además, también económica

y geopolíticamente, puesto que el cobre se convertirá en un metal crucial en el mundo que llega de las *nuevas energías*, aun cuando el cobre, actualmente, no suponga ningún problema.

- Cobre Las Cruces** extrae un inusual mineral de alta ley, por lo que cada operación minera se ve compensada por ello en terminos de sostenibilidad y circularidad. Algo similar ocurre con la minería subterránea, si se compara con la minería a cielo abierto.

Tabla 39. Proyectos de cobre. Indicadores de circularidad

Proyecto	Contribución a la producción europea**	Contribución del residuo	Presencia del metal subproducto	Uso intensivo de energía y materiales***
Aguas Teñidas	4,8%	Backfill	Zn+ Pb 240% / Cu	20,2 kg Cu /t ROM
Cobre Las Cruces	5,6%	Reprocesado y capacidad extra****	-	49,2 kg Cu /t ROM
Riotinto	3,6%	-	-	3,9 kg Cu /t ROM
Touro*	2,4%	-	-	4,0 kg Cu /t ROM

(*) en espera; (**) año 2017 o 2018; (***) atención, aquellos proyectos con mayor contenido unitario en metal serán más circulares

Tabla 40. Ejemplo de Economía Circular

- Período transitorio: Una vez que las reservas del actual yacimiento ya se han agotado, se reacondicionará la planta (MTD) para volver a reprocesar el mineral extraído durante los primeros años de vida de la mina (tailings 1% Cu del ajuste de la planta hidrometalúrgica, almacenados de manera separada), extendiendo durante dos años más la actividad productiva (empleos/beneficio social), esperando producir 33.000 toneladas de cátodos de cobre de la máxima calidad, frente a las 72.000 toneladas anuales de los últimos diez años de producción.
- Proyecto PMR: La compañía explotará durante 15 años un nuevo yacimiento sulfuros polimetálicos ubicado bajo el depósito actual, mediante mina subterránea y una nueva planta industrial, única en el mundo (MTD), en la que se producirán cobre, zinc, plomo y plata. Resultará menos económico que en sus primeros años de vida, pero prolongan la vida de la mina (buena gobernanza), ofrecen la capacidad sobrante al sector (economía circular), contribuye al desarrollo estratégico de la zona (sostenibilidad social) y diversificará la cartera de productos.

Tabla 41. Proyectos de zinc. Indicadores de circularidad

Proyecto	Contribución al consumo europeo	Contribución del residuo	Presencia del metal subproducto	Uso intensivo de energía y materiales***
Los Frailes*	17,2%	-	Cu+Pb 59%/Zn	80,0 kg Zn/t ROM**
Toral*	3,2%	-	Pb+Ag 80%/Zn	35,1 kg Zn/t ROM

(*) en espera; (**) ROM (Run-of-mine); (***) atención, aquellos proyectos con mayor contenido unitario en metal serán más circulares

Tabla 42. Proyectos de estaño. Indicadores de circularidad

Proyecto	Contribución al consumo europeo	Contribución del residuo	Presencia del metal subproducto	Uso intensivo de energía y materiales**
Oropesa*	3,9%	-	-	5,5 kg Sn / t

(*) en espera; (**) atención, aquellos proyectos con mayor contenido unitario en metal serán más circulares

Tabla 43. Proyectos de wolframio. Indicadores de circularidad

Proyecto	Contribución al consumo europeo	Contribución del residuo	Presencia del metal subproducto	Uso intensivo de energía y materiales**
La Parrilla	22,0%	No contabilizado	12% Sn / W	1,0 kg WO ₃ / t
San Finx	7,3%	No contabilizado	60% Sn / W	14,9 kg WO ₃ / t
Los Santos	8,0%	-	-	2,7 kg WO ₃ / t
Barrueco	11,5%	-	52% Sn / W	1,1 kg WO ₃ / t
Vaitrexal*	26,0 %	No contabilizado	-	2,6 kg WO ₃ / t

(*) en espera; (**) atención, aquellos proyectos con mayor contenido unitario en metal serán más circulares

Tabla 44. Proyectos de tántalo. Indicadores de circularidad

Proyecto	Contribución al consumo europeo	Contribución del residuo	Presencia del metal subproducto	Uso intensivo de energía y materiales**
Penouta	35,6 % de producción nominal	85% del total del mineral extraído*	16,5% Sn/ Ta	77 g Ta / t 121 g Ta eq. / t

(*) de cada tonelada ROM procesada, Penouta recuperará el 85% en forma de mica, arenas de cuarzo y caolín; (**) atención, aquellos proyectos con mayor contenido unitario en metal serán más circulares

Tabla 45. Proyectos de litio. Indicadores de circularidad

Proyecto	Contribución al consumo europeo	Contribución del residuo	Presencia del metal subproducto	Uso intensivo de energía y materiales**
Valdeflópez*	13%	-	3% Sn / Li ₂ O	0,92% Li ₂ O
Mina Feli	-	-	-	0,5% Li ₂ O
El Arteal*	-	-	K, H ₂ O	100-400 g Li/m ³

(*) en espera; (**) atención, aquellos proyectos con mayor contenido unitario en metal serán más circulares

- Incluso cuando resulta habitual que la minería subterránea emplee un porcentaje de su residuo para *backfilling*, esto tiene que ser señalado positivamente, al pertenecer al concepto de economía circular. Sin embargo, los esfuerzos realizados por **Cobre Las Cruces** han sido mencionados aparte, al ser un magnífico ejemplo de circularidad en minería (Tabla 41).

b) Elementos tecnológicos (grupo Sn-W-Ta-Li). Ver tablas 42, 43, 44 y 45.

- Consecuencias de grupo
- La incorporación de nuevos proyectos en los cuatro metales considerados (tablas 42, 43, 44 y 45) mejorarán signi-

ficativamente la participación de producción propia en el consumo total europeo. Existen nuevos depósitos de interés para Europa, como **Oropesa** en el estaño, **La Parrilla** en wolframio, **Penouta** en tántalo y **Valdeflópez** en litio.

- El estaño es un subproducto bastante apreciado en la minería de los otros tres metales. Resulta muy importante en la economía circular la ayuda que presta a la sostenibilidad de la producción del metal principal.
- En metales como el estaño, wolframio y litio, se da una semejanza en las leyes de su minería. Es más, esta similitud también se produce nivel mundial, lo que asegura

una continuidad en los proyectos.

c) Metales preciosos (Au-Ag). Ver Tabla 46.

- Consecuencias de grupo
- Desde la perspectiva estricta de la sostenibilidad o la economía circular, la limitada cantidad de metal oro extraído por tonelada (Tabla 46) es un asunto complejo. A pesar del elevado valor en mercado de estos metales, que hace económicamente positiva una explotación intensiva en energía por el grado de molienda empleado y el movimiento de material, su verdadero valor, en caso de incluirse las externalidades, resultaría aún más elevado.



Tabla 46. Proyectos de oro y plata. Indicadores de circularidad

Proyecto	Contribución al consumo europeo***	Contribución del residuo	Presencia del metal subproducto	Uso intensivo de energía y materiales***
Orovalle	5,0%	CAF*	Ag 364% / Au 3.000 t Cu / año	3,0 g Au / t ROM
Salave**	6,2%	-	Ag	4,1 g Au / t ROM
Corcoesto**	8,3%	-	Ag	1,5 g Au / t ROM

(*) Los residuos de planta no son normalmente permitidos como "backfill" en las operaciones de Boinás/El Valle, debido a los niveles de arsénico presentes. Así pues, un sistema de relleno cementado (CAF) ha sido diseñado por Kinbauri España junto con el soporte técnico de Golder Associates y la Universidad Politécnica de Madrid; (**) en espera; (***) atención, aquellos proyectos con mayor contenido unitario en metal serán más circulares

- La problemática medioambiental que acompaña al oro en sus procesos puede dificultar el empleo de parte de los residuos, empeorando su capacidad circular.
- Muchas veces, el empleo de la economía circular depende de contar en la compañía con una visión a nivel gestión superior al promedio actual, que exige esfuerzos en las etapas donde o bien se agota el mineral, o bien su riqueza disminuye hasta niveles que no resultan económicamente viables. La economía circular debe implementarse desde el diseño de la operación, con un estudio geológico apropiado que permita adelantarse con un almacenaje diferenciado de los residuos, que facilitará su posterior empleo.

9. Conclusiones y lecciones obtenidas

En general, calificar la excelencia de un proyecto minero es bastante complicado. Más aún cuando se trata de establecer calificaciones generales. La metodología utilizada aquí, mediante indicadores económicos, nivel tecnológico y circularidad de sostenibilidad, ha arrojado resultados consistentes. Como resultado, se propone reelaborar, perfeccionar y aplicar esta metodología como herramienta de análisis para un sector minero específico.

En la actualidad, en España, existen dos espacios para proyectos mineros y muy pocos casos intermedios:

- La minería de metales básicos (Cu, Zn, Pb), polarizada en pocos proyectos dentro de la provincia metalogenética transnacional IPB (Faja Pirítica Ibérica). Esta minería, al amparo de condiciones más que satisfactorias en los mercados internacionales, es un éxito basado en tres condiciones:
 - La eficiencia económica se muestra en los indicadores de los capítulos 8.1, 8.2 y 8.3, con márgenes operativos muy cómodos e inversiones muy adecuadas, ubicándose muy bien en el resumen de los *cash-cost* internacionales.
 - A pesar de la variedad de situaciones de calidad geológica de los depósitos del IPB, los indicadores de excelencia tecnológica, especialmente el MRM (*Mineral Resource Management*), indican una buena visión empresarial. Además, presentan una adecuada gestión de los recursos disponibles y crean *cluster*, incluso incorporando proyectos transnacionales.
 - La parte empresarial ha realizado un esfuerzo sincero en la gestión ambiental sobre el aprovechamiento de minerales con gran abundancia de metales pesados. Además,

existe una aceptación social en un entorno con una necesidad sustancial de desarrollo.

- La minería de metales tecnológicos y estratégicos. En los dos países ibéricos, las condiciones geológicas y características mineras presentan una variación mayor que la provincia metalogenética IPB. De manera general, este tipo de minería se caracteriza por:
 - Una menor eficiencia económica, motivada por el escaso tamaño de sus depósitos minerales. Es conveniente ver la variedad más amplia de situaciones del mercado y su propia volatilidad. Sin embargo, apuntan a nuevos depósitos, con características económicas muy interesantes a nivel mundial.
 - Una situación de menor excelencia tecnológica si los comparamos con los proyectos IPB, derivados de sus propias dimensiones.
 - Una gran variedad de situaciones en el aspecto de la sostenibilidad y circularidad en la explotación de sus yacimientos, con tendencia a una mejor gestión ambiental y aún no clara aceptación social.
 - La crisis provocada por la extensión de la Covid-19 ha coincidido con la reciente apertura y reemplazamiento de sus yacimientos agota-

dos. En esta situación tan problemática, el arranque de los nuevos proyectos ha sido enormemente problemático, demostrando la sensibilidad de los proyectos a las condiciones de contorno adversas (dificultades mecánicas, problemas con el conocimiento de los depósitos, situación en los ciclos de precios de los mercados, la pandemia declarada y la aceptación social en algunos casos).

A modo de resumen, para Europa, la aportación de los metales producidos en la Península Ibérica es una pieza indispensable en la política de asegurar el suministro de materias primas. Esto se refiere tanto a proyectos de calidad del IPB como a metales de carácter estratégico en provincias metalogénicas compartidas.

La UE (2020) ha abordado de forma clara y enérgica el problema del suministro seguro de materias primas no renovables. Su esfuerzo se dirige hacia los temas que pasarán a formar parte de las soluciones a los nuevos retos tecnológicos. Esto es especialmente cierto en lo que respecta a las energías limpias y la industria compatible, al menos con el mantenimiento de las condiciones naturales heredadas del pasado cercano.

En este sentido, la contribución de la minería española al llamado sector de los metales críticos puede ser próximamente significativa. Por lo tanto, además de las fuerzas de desarrollo derivadas de los mercados, los incentivos propuestos para aplicar parecen totalmente consistentes.

En España, como parece derivarse de este trabajo, los verdaderos impulsores de una minería sana y atrevida se ubican en los metales más básicos (Cu, Zn, Pb). Se trata de empresas (ahora multinacionales) que, mediante una adecuada gestión de sus recursos, agregan valor en tecnología, control ambiental y espíritu emprendedor. Esto lleva a crear verdaderos *clusters* internos e incluso internacionales. Simplificando, los proyectos de FPI producen facturaciones que se acercan a los 500 millones de dólares anuales en inversiones y, en sus distintas fases, casi alcanzan los 1.000 millones de dólares anuales y generan abundantes empleos. Además, pueden generar encadenamientos industriales y tecnológicos que puedan asegurar la sostenibilidad económica de las regiones donde se desarrollan.

Bibliografía

- **Adamas Intelligence** (2020): *REE Market to be "Massively" Undersupplied by 2030*. Priscila Barrera. August, 2020. <https://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/rare-earth-investing/adamas-ree-market-massively-undersupplied-2030/>
- **Arribas, I** (2019) **iTarg3T Group** (2019): *EIT Raw Materials*. https://www.itarg3t.eu/Networks_and_project/networks_and_project.html 2019
- **Australian Productivity Commission** (2008): *Productivity in the Mining Industry: Measurement and Interpretation*. Staff Working Paper. December 2008
- **Barrera P.** Investing News (2020): *Open Mineral: Zinc Bottom Likely Past, but Prices to Stay Volatile*. June 29th, 2020
- **Berg F., Koelbel J.F., Rigobon, R.** (2019): *Aggregate Confusion: The Divergence of ESG Ratings*. MIT Sloan School Working Paper 5822-19, August 15, 2019
- **Carrasco, J.** (2012): *Instituto de Estudios Económicos (2012)*. La Industria Minera Sostenible I, N°2/2012
- **CRU Group** (2020): <https://www.crugroup.com/analysis/tin/>
- **Comisión Europea** (2020): *Resiliencia de las materias primas fundamentales: trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad*
- **De la Torre, L., Espí, J.A., Romero, P.** (2020): *Economic, technological and sustainable qualification with reference to Europe: Iberia's new metal mining projects*. Mineral Economics. SPRINGER. En revision: Enviado, Octubre 2020.
- **De la Torre, L., Álvarez, E., Espí, J.A.**, (2020): *The Interest of Mineral Raw Materials in the Development of Electric Vehicles. The Role of the Electric Vehicle in the Energy Transition A Multidimensional Approach*. Angel Arcos-Vargas Editor. pp. 133-156. SPRINGER. 2020.
- **De la Torre, L., Álvarez, E., Espí, J.A.**, (2019): *Protagonismo de las materias primas minerales en el desarrollo del vehículo eléctrico*. Economía Industrial. N° 411, 2019.

- **De la Torre, L., Espí. J.A.**, (2019): *Are investments in priority mineral raw materials attractive?* <https://rankia.s3.amazonaws.com/promociones/buscando-valor/Revista-05-Buscando-Valor-Julio-2019.pdf>
- **De la Torre, L., Espí. J.A.**, (2019): *Making sense of the geology in the copper mining economy*. Boletín Geológico y Minero, 130 (1): 133-159
- **De la Torre, L., Espí. J.A.**, (2018): *Predicción del comportamiento en el suministro seguro de los metales de interés energético: la actualidad del litio, cobalto y grafito*. Real Instituto ELCANO. ARI 101-2018
- **De la Torre, L.** (2011): *Natural Resources Sustainability: Iron Ore Mining*. Dyna, vol. 78, núm. 170, diciembre, 2011, pp. 227-234 Universidad Nacional de Colombia
- **Dialga, I.** (2018): *A Sustainability Index of Mining Countries*. Journal of Cleaner Production, Volume 179, 1 April 2018, Pages 278-291
- **Drielsma J., Sochorová, V.** (2019): *Sustainable management of primary raw materials through a better approach in Life Cycle Sustainability Assessment (SUPRIM)* Newsletter. May 2019. http://www.euromines.org/files/suprim-newsletter_210x297mm_e_final_0.pdf
- **European Commission** (2008): *Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy*
- **European Commission** (2008): *Communication From The Commission To The European Parliament And The Council. The raw materials initiative – meeting our critical needs for growth and jobs in Europe*
- **Hotelling, H.** (1931): *The Economics of Exhaustible Resources*. Journal of Political Economy, Vol. 39, No. 2 (Apr., 1931), pp. 137-175
- **Humphreys, D.** (2020): *Mining productivity and the fourth industrial revolution*. Mineral Economics (2020) 33:115-125
- **ILZSG** (2020). *International Lead Zinc Study Group*. <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=ILZSG+%28International+Lead+and+Zinc+Study+Group>
- **Investig News** (2020): *Copper Price Update: Q3 2020 in Review*. Priscila Barrera. October, 2020 <https://investingnews.com/category/daily/resource-investing/base-metals-investing/copper-investing/>
- **Investig News** (2020): *Investing in Lithium After Tesla's Battery Day*. Priscila Barrera. October, 2020
- **Investig News** (2020): *Copper Price Update: Q3 2020 in Review*. Priscila Barrera. October 2020. <https://investingnews.com/daily/resource-investing/base-metals-investing/copper-investing/copper-price-update/>
- **Investig News** (2020): *Melissa Pistilli. Ways to Invest in Tantalum*. September. 2020. <https://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/tantalum-investing/ways-to-invest-in-tantalum/>
- **Investig News** (2020): *Is a Global Rare Earths Shortage Imminent?* Georgia Williams. January 2019
- **ITA** (2020): *The International Tin Association*. <https://www.internationaltin.org/>
- **iTarg3T Group** (2019): *EIT Raw Materials*. 2019 https://www.itarg3t.eu/Networks_and_project/networks_and_project.html
- **IPCC** (2006): *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Prepared by the national Greenhouse Gas Inventories Programme. **Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K.** (eds). Published: IGES, Japan
- **Jacobs, J.** (2017): *A technology map to facilitate the process of mine modernization throughout the mining cycle*, July 2017. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy Volume 117 (NO. 7)
- **Jacobs, J., 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
- **Jesinghaus, J.** (2002): *The Indicators: A European System of Environmental Passive Indices*. European Commission. <http://esl.jrc.it/envind/theory/handb.html>
- **Kesler E., Simon, A.** (2015) *Mineral Resources, Economics and the Environment*. Cambridge University Press, Cambridge. 434 p.
- **Mardonova, M. y Yosoan, Choi** (2018): *Review of Wearable Device Technology and Its Applications to the Mining Industry*. Energies 2018, 11(3), 547. <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/3/547>
- **McLeod, Ch.** (2018): *MSP-REFRAM (Multi-Stakeholder Platform for a Secure Supply of Refractory Metals in Europe)*. Factsheet <http://prometia.eu/m-sp-refram>
- **Malensek, G.A.** (2016): *Reconciling AISC to Mineral Property Valuations*, April 26, 2016. SRK Consulting. www.srkexploration.com

- **Mining Journal** (2019): *Zero hour for lithium in Europe?* <https://www.mining-journal.com/project-finance/news/1367501/zero-hour-for-lithium-in-europe>
- **Ministerio para la Transición Ecológica** (2020): *Estadística Minera de España*. 2018. <https://energia.gob.es/mineria/Estadistica/Paginas/Consulta.aspx>
- **Ministerio para la Transición Ecológica** (2018): *Factores de Emisión. Registro de la huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono*
- **Moreno, S.A., Espí, J.A.** (2007): *Introducción al uso de lasherramientas de gestión ambiental aplicadas a los recursos naturales no renovables*. Red DESIR. UE /Programa Alfa II-0459-FA. Madrid. 240 p
- **Naranjo, R., Botin, J.A.** (2012): *Modelo de Riesgo: Proyectos Mineros*. Editorial Académica Española
- **Navarro, V., Dinis da Gama, C.** (2006): *Quantifying the Environmental Sustainability in Underground Mining* Geotechnical Center of Lisbon, XV International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection (MPES 2006), 20 - 22 September 2006, Torino, Italy
- **Northey, S., Haque, N., Mudd, G.** (2013): *Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining*. Journal of Cleaner Energy, 40, 118 - 128
- **Pistilli, M.** (2019): *INN Investig News. Lithium Hydroxide and Lithium Carbonate Processing Capabilities Key to Higher Margins for Lithium Producers*. 2019. <https://investingnews.com/innsponsored/lithium-hydroxide-and-lithium-carbonate-processing-capabilities-key-to-higher-margins-for-lithium-producers/>
- **Roskill** (2019): *Is tungsten heading for a deficit in 2019?* Roskill Information Services Ltd. 25 de abril de 2019 (GLOBE NEWSWIRE). <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/04/25/1809476/0/en/Roskill-Is-tungsten-heading-for-a-deficit-in-2019.html>
- **Silver Institute** (2020): www.silverinstitute.org
- **SNL-Metals-Mining** (2016): *Metals Mining Report*. <https://go.snl.com/SNL-Metals-Mining-Free-Report-Downloads-1.html>
- **STRADE** (2018): *Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe (STRADE). Supporting the EU Mineral Sector Capitalising on EU strengths through an investment promotion strategy*. **Masuma Farooki, Chris Hinde and Anton Lof**
- **STRADE** (2017): *The Competitiveness of the European Union's Mining Sector*. **Masuma Farooki, Adam Webb and Chris Hinde**. SNL Financial Ltd. London, 2017
- **STRADE** (2016): *The Cost Competitiveness of Mining Operations in the European Union*. **Adam Webb**. SNL Financial Ltd. STRADE No. 08/2016
- **Sung-Min, Kim** (2019): *Review of Internet of Things and Open-source Hardware Technologies Use in the Mining Industry*. October 2019. Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers 56(5):447-456. <http://www.jksmer.or.kr/journal-information/about/>
- **Tayebi-Khorami, M. et al.** (2019): *Re-Thinking Mining Waste through an Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations, Centre for Mined Land Rehabilitation*. Stainable Minerals Institute, The University of Queensland, Australia, 2019
- **Tkaczyk, A.H.** (2018): *J. Phys. D: Appl. Phys.* 51. *Sustainability evaluation of essential critical raw materials: cobalt, niobium, tungsten and rare earth elements*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/aaba99/pdf>
- **UE Passarini, F.** (2018): *Material Flow Analysis of Aluminium, Copper, and Iron in the EU-28*. Passarini, F. Ciacci, L. Nuss, P. Manfredi, S. 2018. JRC Science Hub. <https://ec.europa.eu/jrc>
- **U.S.G.S.** (2019): *Geological Survey. Mineral Commodity Summaries*. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries>
- **Wellmer, F., Becker-Platen, J.** (2002): *Sustainable development and the exploitation of mineral and energy resources: a review*. International Journal of Earth Sciences. v 91, p.723–745(2002)
- **Williams, G.** (2019): *Potential Tungsten Shortage Imminent*. Roskill. May, 6th, 2019. <https://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/tungsten-investing/potential-tungsten-shortage-imminent-roskill/>
- **Williams, G.** (2019): *Investing News. Rare earths*. <https://investingnews.com/author/gwilliams/>
- **World Silver Survey** (2020): *The Silver Institute*. 2020. www.silverinstitute.org