



**IGF**

INTERGOVERNMENTAL FORUM  
on Mining, Minerals, Metals and  
Sustainable Development

# ¿En búsqueda de minerales críticos?

Cómo se producen y asocian  
los metales



Secretaría organizada por



Secretaría financiada por

**Canada**



Kingdom of the Netherlands

© 2023 The International Institute for Sustainable Development  
Publicado por el Instituto Internacional para el Desarrollo Sostenible  
Licencia de [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

**El Instituto Internacional para el Desarrollo Sostenible (IISD)** es un centro de investigación independiente que trabaja con el objetivo de impulsar aquellas soluciones que permitan lograr un clima estable, la gestión sostenible de los recursos y economías justas. Nuestro trabajo estimula a que se tomen mejores decisiones y se emprendan acciones significativas para ayudar a que prosperen tanto las personas como el planeta. Arrojam luz sobre lo que se puede alcanzar cuando se unen los Gobiernos, las empresas, las organizaciones sin fines de lucro y las comunidades. El personal del IISD, que está integrado por más de 200 personas, además de más de 150 asociados y asesores, proviene de todas partes del mundo y de varias disciplinas. Contamos con oficinas en Winnipeg, Ginebra, Ottawa y Toronto, por lo que nuestras actividades repercuten en la vida de las poblaciones de casi 100 países.

El IISD es una organización benéfica registrada en Canadá y figura como organización exenta de impuestos bajo el artículo 501(c)(3) del Código del Servicio de Impuestos Internos (IRS) en los Estados Unidos. El IISD recibe su principal apoyo de la provincia de Manitoba y lleva adelante sus proyectos con los fondos provenientes de Gobiernos que se encuentran dentro y fuera de Canadá, los organismos de las Naciones Unidas, las fundaciones, el sector privado y las personas.

**El Foro Intergubernamental sobre Minería, Minerales, Metales y Desarrollo Sostenible (IGF)** presta apoyo a sus 80 países miembro para avanzar hacia sus objetivos de desarrollo sostenible, a través de leyes, políticas y regulaciones efectivas para el sector minero. Ayudamos a los Gobiernos a adoptar acciones para desarrollar prácticas inclusivas y con equidad de género, que optimicen los beneficios financieros, respalden los medios de vida protejan el medioambiente. Nuestro trabajo abarca el ciclo completo de la minería, desde la exploración al cierre, y proyectos de todos los tamaños, desde minería artesanal a operaciones a gran escala. En respuesta a las necesidades de nuestros miembros, brindamos evaluaciones internas en los países, desarrollo de capacidades y asistencia técnica, publicaciones y eventos para promover las mejores prácticas, el aprendizaje entre pares y el relacionamiento con el sector privado y la sociedad civil.

El Instituto Internacional para el Desarrollo Sostenible (IISD) desempeña la función de Secretaría del IGF desde octubre de 2015. El financiamiento central del IGF procede del Gobierno de Canadá y el Gobierno de los Países Bajos.

### **¿En búsqueda de minerales críticos? Cómo se producen y asocian los metales**

Abril 2023

Escrito por Grégoire Bellois e Isabelle Ramdoo

#### **IISD HEAD OFFICE**

111 Lombard Avenue  
Suite 325  
Winnipeg, Manitoba  
Canada R3B 0T4

**IISD.org**  
🐦 @IISD\_news

**IGFMining.org**  
🐦 🌐 📘 📺 @IGFMining



## TABLA DE CONTENIDO

<b>1.0</b>	<b>Uso del metal y desarrollo de las sociedades humanas</b>	<b>1</b>
<b>2.0</b>	<b>¿Cómo se extraen los metales?</b>	<b>3</b>
<b>3.0</b>	<b>Comprender la "complementariedad" de los metales: Una mirada a la rueda de los metales</b>	<b>7</b>
<b>4.0</b>	<b>Riesgos y desafíos asociados con la complementariedad de los metales</b>	<b>10</b>
4.1	Consideraciones económicas	10
4.2	Riesgos ambientales	15
4.3	Desafíos de reciclaje	16
<b>5.0</b>	<b>Cómo entender que la complementariedad puede ayudar a identificar nuevas fuentes de metales</b>	<b>17</b>
5.1	Oportunidades para obtener un mayor valor de la producción de metales	17
5.2	Los vertederos y los depósitos de relave como posibles fuentes de minerales críticos	18
5.3	Oportunidades para alinear la producción minera con la estrategia nacional de desarrollo	20
<b>6.0</b>	<b>Conclusión</b>	<b>21</b>
	<b>Referencias</b>	<b>23</b>



## Prefacio

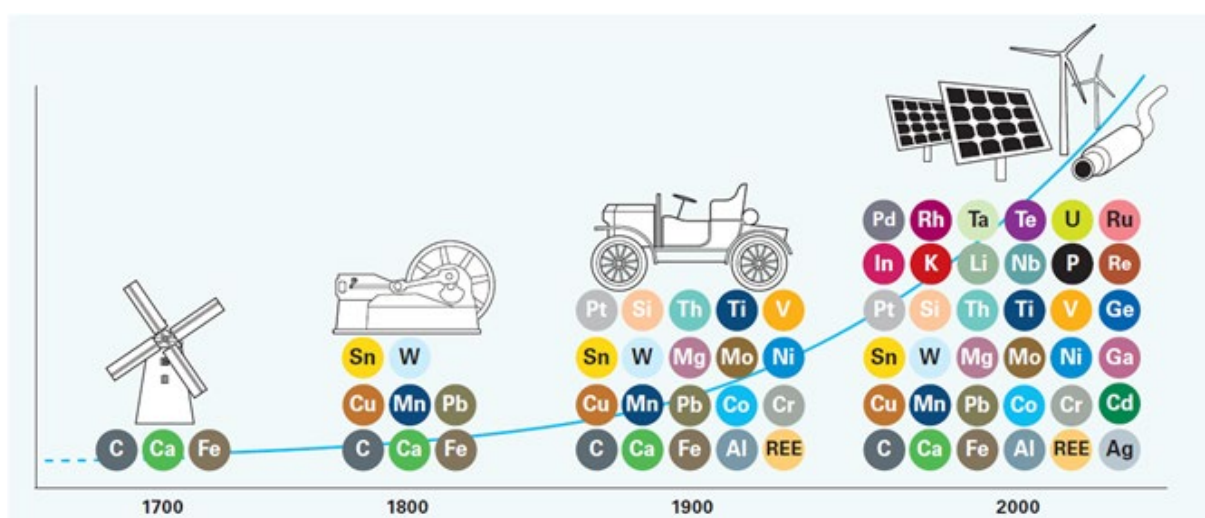
Este documento de trabajo del IGF es un breve documento de debate técnico que pretende explicar cómo se producen y se asocian los metales en los depósitos minerales y las explotaciones mineras. El objetivo es poner de relieve algunos de los desafíos que puedan aparecer en la búsqueda de minerales que son críticos para la transición energética. Forma parte de una serie de productos de conocimiento con los cuales se pretende comprender mejor los desafíos y oportunidades subyacentes relacionados con la creciente demanda de minerales y metales y, como tal, no proporciona ningún conjunto específico de recomendaciones políticas. Estas se desarrollarán una vez que se publique la serie de documentos de trabajo.



# 1.0 Uso del metal y desarrollo de las sociedades humanas

Desde el surgimiento de las sociedades organizadas, los seres humanos se han asociado con las actividades mineras y el consumo de metales. La civilización siempre ha dependido en gran medida de los metales y las aleaciones: desde el uso inicial del cobre, pasando por el estaño (en la Edad de Bronce), el hierro y el plomo (en la Edad de Hierro) en la antigüedad — sin mencionar los metales preciosos, como el oro y la plata—, hasta la amplia gama de metales utilizados en el mundo moderno. Como se ilustra en la figura 1, la intensidad de uso del metal en la producción industrial ha tenido un crecimiento exponencial con el tiempo. A pesar de que nuestras sociedades se han vuelto más sofisticadas y complejas, esperamos que en el futuro se haga un uso aún más intensivo de minerales, lo que causará que la demanda de más y nuevos metales crezca exponencialmente.

**FIGURA 1.** Historia de los principales elementos utilizados en las vías energéticas



*Nota: La posición en el eje de tiempo es solo indicativa.  
Fuente: Zepf et al., 2014.*



Históricamente, los seis metales mencionados en los párrafos anteriores (es decir, cobre, estaño, hierro, plomo, oro y plata) fueron básicamente los únicos utilizados (ASM International, 2011) hasta que se realizaron los grandes avances tecnológicos en el sector metalúrgico en el siglo 19. Las innovaciones durante la revolución industrial dieron lugar a la identificación y la separación de un nuevo conjunto de metales disponibles que se han convertido en elementos esenciales para la producción de maquinaria y bienes de consumo.

### CUADRO 1. ¿SABE CUÁNDO SE DESCUBRIÓ EL ALUMINIO?

La corteza terrestre está compuesta por un 28 % de silicio y un 8 % de aluminio, siendo este último el metal más abundante en la corteza (es 1200 veces más abundante que el cobre)<sup>1</sup> (Desjardins, 2014). Sin embargo, el silicio y el aluminio se descubrieron solo en el siglo 19.

Este descubrimiento relativamente reciente apunta al hecho de que la dificultad para identificar elementos no solo radica en que su presencia es poco común en la corteza terrestre, sino también, y lo que es importante, en que está relacionado con sus propiedades metalúrgicas, incluido el vínculo que tienen con otros elementos naturales que se encuentran en la corteza terrestre.

Hoy en día, conforme el mundo se enfrenta al dilema de apoyar el progreso al mismo tiempo que se adopta un cambio en nuestros modos de consumo con el fin de reducir y mitigar los impactos en el planeta, el papel de los minerales y metales se ha vuelto más prominente. Dos grandes tendencias en particular —la transformación digital y la transición energética— requerirán más metales que nunca en términos de cantidad y diversidad (Agencia Internacional de la Energía [AIE], 2021). La oferta tardará tiempo en ajustarse a la creciente demanda. Algunos minerales y metales son muy vulnerables al déficit de suministro y han sido identificados como "críticos" debido a los riesgos asociados con su disponibilidad y accesibilidad.

1 La concentración promedio de aluminio en la corteza terrestre es del 8,2 %, mientras que la concentración promedio de cobre es del 0,006 %.



## 2.0 ¿Cómo se extraen los metales?

Los metales rara vez se encuentran como elementos puros en la tierra. Más bien, se asocian con otros elementos, como el oxígeno, el azufre o el carbono, para formar minerales.

### CUADRO 2. ALGUNAS DEFINICIONES IMPORTANTES: ¿QUÉ SON LOS ELEMENTOS, LOS METALES Y LOS MINERALES, Y CÓMO SE IDENTIFICAN LOS YACIMIENTOS MINERALES?

#### Elementos

Los **elementos** son átomos que son los componentes básicos del universo. Se caracterizan por un número específico de protones y neutrones en su núcleo y tienen sus propiedades físicas y químicas específicas. El número de protones (también llamado **número atómico**, que, por lo general, se representa mediante la letra "Z") define su posición en la tabla periódica que se muestra en la figura 2: el hidrógeno (Z=1), el carbono (Z=6), el oxígeno (Z=8), el hierro (Z=26), el cobre (Z=29) y el oro (Z=79) son todos elementos.

#### Minerales

Un mineral es un material natural sólido e inorgánico compuesto por uno o más **elementos** químicos que tienen una estructura cristalina interna con un orden específico. Los minerales se clasifican según su forma, estructura cristalina y composición química. Los minerales son los elementos básicos de las rocas. Los minerales comunes incluyen el cuarzo, el feldespato, la mica, el anfíbol, el olivino y la calcita.

#### Rocas

Una roca es un agregado de uno o más **minerales**, homogéneos o no. Se clasifica según su modo de formación (sedimentaria, volcánica o metamórfica), su composición química o mineralógica, o sus propiedades mecánicas. Las rocas comunes comprenden el granito, el basalto, la piedra caliza y la arenisca.



### Metales

Los metales son un conjunto específico de **elementos** (es decir, átomos) con características identificadas y específicas que los diferencian de los elementos no metálicos. Son cristalinos en estado sólido y se encuentran de forma natural en los **minerales**. A menudo son buenos conductores de electricidad y calor. Son brillantes y maleables. Pese a que los metales no son los más abundantes en la Tierra, son los elementos **más representados** en la tabla periódica, con casi 86 metales y 7 metaloides entre los 110 elementos cuyas propiedades han sido estudiadas (figura 2). Los metaloides, o semimetales, que se muestran en verde, tienen propiedades intermedias entre metales y no metales. Los metales abarcan el hierro, el oro, la plata, el aluminio y el cobre.

### Depósito mineral y yacimiento mineral

Un depósito mineral es un agregado de **minerales** en una concentración inusualmente alta. Por cada depósito mineral, hay un conjunto de condiciones, como el nivel de concentración y el tamaño del depósito, que se deben reunir si el depósito se va a explotar de forma rentable. Un depósito mineral lo suficientemente rico para ser explotado con el fin de obtener beneficios económicos se llama un yacimiento, y en un yacimiento, el conjunto de minerales más la ganga<sup>2</sup> se llama "mena". Un **yacimiento mineral** es un término económico, mientras que un **depósito mineral** es un término geológico (Skinner, 2022).

FIGURA 2. Tabla periódica de los elementos

1 H																	2 He																														
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																														
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																														
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																														
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																														
55 Cs	56 Ba	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																														
87 Fr	88 Ra	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og																														
<table border="1"> <tr> <td>57 La</td> <td>58 Ce</td> <td>59 Pr</td> <td>60 Nd</td> <td>61 Pm</td> <td>62 Sm</td> <td>63 Eu</td> <td>64 Gd</td> <td>65 Tb</td> <td>66 Dy</td> <td>67 Ho</td> <td>68 Er</td> <td>69 Tm</td> <td>70 Yb</td> <td>71 Lu</td> </tr> <tr> <td>89 Ac</td> <td>90 Th</td> <td>91 Pa</td> <td>92 U</td> <td>93 Np</td> <td>94 Pu</td> <td>95 Am</td> <td>96 Cm</td> <td>97 Bk</td> <td>98 Cf</td> <td>99 Es</td> <td>100 Fm</td> <td>101 Md</td> <td>102 No</td> <td>103 Lr</td> </tr> </table>																		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																																	
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																																	

Nota: La tabla periódica muestra el número atómico de cada elemento. Los elementos resaltados en azul son metales.

Fuente: Clemson University, Department of Materials Science and Engineering.

2 Los elementos minerales sin valor comercial que rodean o están estrechamente mezclados con el mineral "buscado" en un yacimiento se conocen como "ganga".





Los cuatro principales metales extraídos desde la antigüedad —a saber, el hierro, el cobre, el estaño y el plomo— se producen en cantidades relativamente grandes. Junto con los metales preciosos (es decir, el oro y la plata), siguen conformando la base actual de la demanda industrial.

Con el tiempo, el uso creciente de técnicas de producción modernas y la aplicación generalizada de tecnologías avanzadas han aumentado el uso (y la dependencia) de otros metales y metaloides "menores". Es probable que la demanda de estos metales y metaloides menores se dispare de forma exponencial, debido a que tienen propiedades específicas que los hacen indispensables para el funcionamiento de las tecnologías digitales y para la construcción de soluciones de energía renovable.

En circunstancias generales, las empresas mineras tienden a centrarse en la producción de las materias primas más rentables, y a pasar por alto aquellos que tienen una menor cuota de mercado, un valor más bajo, son más difíciles de extraer o procesar (Mudd *et al.*, 2016), o pueden necesitar inversiones adicionales por razones ambientales.

Los metales "menores" se encuentran generalmente en bajas concentraciones (menos del 0,1 %) (Zepf *et al.*, 2014). En ese sentido, estos metales rara vez constituyen depósitos económicamente viables. En cambio, se producen en intersticios de menas metálicas "principales" con los que comparten propiedades físicas y químicas similares (Nassar *et al.*, 2015). Estos metales menores (también conocidos como "metales complementarios") se extraen principalmente como **coproductos o subproductos** de las principales operaciones mineras que recuperan los metales principales (también llamados "metales hospedantes").

### CUADRO 3. COMPRENDER LA DIFERENCIA ENTRE COPRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS

La producción de coproductos y subproductos puede ayudar a mantener la rentabilidad de una operación minera. La decisión de producir un metal complementario como coproducto o subproducto depende de su concentración en la mena (su grado), su valor y la facilidad de construir una línea de procesamiento adecuada.

Es importante comprender la diferencia entre los coproductos y los subproductos:

Por un lado, el término "coproductos" se refiere a dos o más metales que se producen de forma conjunta y cuyos valores económicos mineros tienen un orden de magnitud similar, basados en una combinación de grado y precio. Cada coproducto influye en las decisiones que se deben tomar en la explotación minera y puede justificar que se lleven a cabo inversiones específicas.

Por otro lado, los "subproductos" tienen un valor que generalmente es demasiado bajo para incidir en las decisiones mineras (como la extensión de la vida útil de la mina, las infraestructuras específicas o la redefinición del yacimiento mineral en sí).



La coproducción y la subproducción presentan sus propios desafíos **técnicos** y **económicos** específicos. Estos desafíos se resumen en las tablas que siguen a continuación.

<p>La <b>coproducción</b> ocurre cuando se necesita una inversión <b>adicional significativa</b> para extraer y procesar el metal complementario (Nieto y Zhang, 2013).</p>	<p>La <b>subproducción</b> se produce cuando se necesita <b>poca o ninguna</b> inversión <b>adicional</b> para extraer y procesar el metal complementario (Nieto y Zhang, 2013).</p>
<p><b>Relación bidireccional</b> entre <b>coproductos</b>: Los cambios en el precio o la demanda de un metal pueden tener efectos significativos en el otro coproducto y viceversa.</p>	<p><b>Relación unidireccional</b> entre metal principal y <b>subproducto</b>: Los cambios en el precio o la demanda del metal principal pueden tener un impacto significativo en el subproducto, pero cualquier cambio en el mercado relacionado con el subproducto no repercute en el metal principal.</p>
<p>Un ejemplo de <b>coproducción</b> es la relación plomo-zinc (Pb-Zn). A menudo, el plomo y el zinc se producen como coproductos, lo que da como resultado que la mayoría de las minas de plomo también sean minas de zinc y viceversa. Si el mercado de uno de estos coproductos se ve muy afectado, por ejemplo, mediante la prohibición del plomo debido a los riesgos asociados con sus características neurotóxicas, las minas de plomo y zinc dejarían de ser rentables. Esto se traduciría en una caída masiva en la producción de zinc y en un aumento en los precios, ya que la demanda de zinc permanecería constante, y la oferta se vería limitada (Frenzel et al., 2017).</p>	<p>Un ejemplo de <b>subproducción</b> es el telurio (Te), que es esencial para la producción de células fotovoltaicas y dispositivos termoeléctricos. Es un subproducto de la extracción y el refinado de cobre. Más precisamente, más del 90 % de la producción de telurio proviene de lodos anódicos producidos por el refinado de cobre, después de que se haya realizado la concentración inicial y la extracción de cobre de la mena (Rietveld et al., 2019). En esta situación, la demanda comercial de telurio no afecta la producción de cobre ni las capacidades de procesamiento, mientras que el mercado del cobre tiene una influencia directa en la cantidad de telurio disponible.</p>

Además, la coproducción y la subproducción tienen implicaciones significativas desde el punto de vista de **la presentación de informes y contabilidad**. En el caso del oro, en 2018, el Consejo Mundial del Oro formuló las siguientes recomendaciones (Consejo Mundial del Oro, 2018):

<p>Los <b>coproductos</b> deberían <b>declararse como ventas</b>, ya que mejoran los ingresos mundiales de la operación. Los costos se atribuyen a la producción de cada metal en relación con su contribución a los ingresos.</p>	<p>Los <b>subproductos</b> deberían considerarse como una <b>reducción del costo de ventas</b>. Esto implica que los ingresos recibidos de sus ventas se <b>deducen</b> de los costos operativos antes de calcular el costo en efectivo del metal primario.</p>
<p>En el caso de las minas de oro, si la producción secundaria representa <b>más del 20 % del valor total de la producción</b>, puede considerarse un <b>coproducto</b> (Fulp, 2015).</p>	<p>Si el <b>valor de producción secundario cae por debajo del 20 %</b>, es solo un <b>subproducto</b> (Fulp, 2015).</p>



### 3.0 Comprender la "complementariedad" de los metales: Una mirada a la rueda de los metales

La "complementariedad" es el grado en que se obtiene un metal, a veces completamente, como coproducto o subproducto de un metal hospedante durante la producción minera (Nassar *et al.*, 2015). Los metales complementarios tienden a estar asociados con elementos hospedantes con los que comparten propiedades físicas y químicas similares.

Muchos elementos menores se producen **solo** como coproductos o subproductos de la explotación minera de uno o dos metales hospedantes específicos. Por ejemplo, el 98 % de la producción actual de cobalto proviene de minas de cobre (60 %) y níquel (38 %) (Cobalt Institute, 2022). El galio proviene exclusivamente de operaciones mineras de aluminio (95 %) y zinc (5 %) (Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 2016).

#### CUADRO 4. ¿CÓMO LEER LA RUEDA DE LOS METALES?

La rueda de los metales fue creada por Nassar *et al.* en 2015. Es una simplificación gráfica de la producción de metales. La intención es ilustrar las relaciones entre los elementos con propiedades similares. Se entiende que los depósitos minerales en todo el mundo presentan un amplio grado de variabilidad en su contenido mineral y asociaciones en función de su tipo y origen.

En el **círculo central**, se ubican los principales elementos hospedantes. Estos son los metales que en su mayoría se extraen y se producen de forma exclusiva. Hay 10 minerales en esta categoría: aluminio, titanio, hierro, níquel, cobre, zinc, plomo, estaño, platino y oro.

Cada **círculo** muestra los elementos asociados estadísticamente con el elemento hospedante en las minas.

El **porcentaje** en el eje representa la proporción promedio del elemento complementario producido como subproducto del elemento hospedante relacionado. Cuanto más oscuro sea el azul, mayor será la proporción de la producción mundial del elemento complementario que proviene de las minas del elemento hospedante.

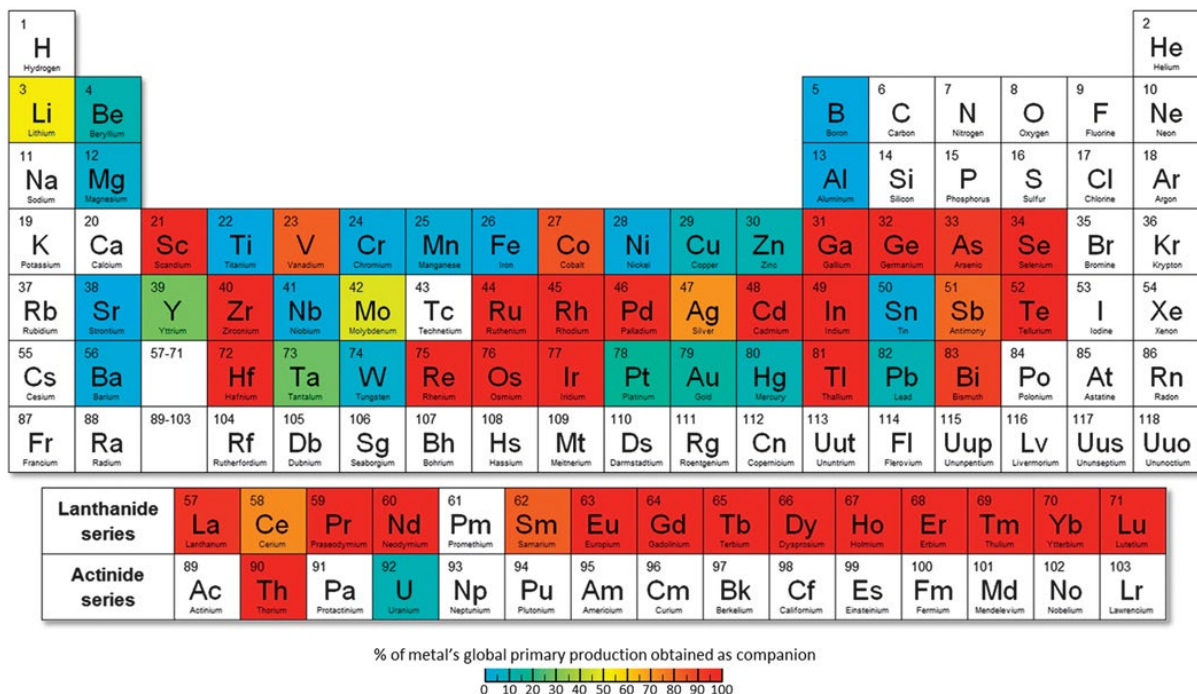




que el aumento de la demanda dé lugar a respuestas problemáticas de la oferta, ya que no pueden extraerse de forma directa y exclusiva.

Como se muestra en la figura 4, el suministro problemático de coproductos y subproductos afecta, en diferentes grados, a un número bastante significativo de metales. Cuanto más azul sea el elemento, más se extrae de forma exclusiva (es decir, es un metal hospedante o principal). El hierro, por ejemplo, se extrae principalmente como un metal principal en todo el mundo. Sin embargo, a medida que avanzamos hacia el color rojo, más se extrae el metal como coproducto o subproducto de un metal principal. Este es el caso del cobalto, por ejemplo, que es en gran medida un coproducto o subproducto de las minas de níquel y cobre. Los elementos en blanco son aquellos para los que no se ha determinado ningún grado de complementariedad.

**FIGURA 4.** La tabla periódica de complementariedad a nivel mundial para 2008.



Fuente: Nassar et al., 2015.

Debido a que los metales complementarios solo se pueden extraer junto con sus metales hospedantes, esto plantea preguntas clave sobre su disponibilidad, su accesibilidad, el flujo de material (es decir, las cadenas logísticas desde la producción de la materia prima hasta el usuario final) y su uso en industrias del sector *downstream*.



## 4.0 Riesgos y desafíos asociados con la complementariedad de los metales

### 4.1 Consideraciones económicas

#### 4.1.1 Riesgos de suministro

Las tendencias en la demanda del mercado de metales producidos de forma conjunta a veces pueden correlacionarse, como es actualmente el caso del cobalto, un coproducto del níquel y el cobre. En ese caso, una mayor producción de los metales hospedantes también impulsará el suministro de metales coproducidos.

Pero este no siempre es el caso. A veces, puede ocurrir una caída en la demanda del metal primario y, al mismo tiempo, un aumento de la demanda del coproducto o subproducto. Este es el caso del plomo y el bismuto (un metal considerado crítico por la UE, los Estados Unidos y el Reino Unido, por ejemplo). El bismuto se utiliza en la industria farmacéutica y como un sustituto ambientalmente más seguro del plomo en las aleaciones utilizadas en álabes de turbina y pantallas de TV y plasma, entre otros usos (Deady *et al.*, 2022).

En cualquier caso, las necesidades futuras, impulsadas por la demanda de infraestructura de energía renovable y las tecnologías digitales, pueden afectar la demanda de metales específicos, como sugieren las previsiones de la AIE. Sin embargo, los mercados, motivados por tecnologías en rápida evolución, a menudo son dinámicos y volátiles, lo que implica que, en el futuro, no hay certeza de que la demanda de metales específicos continúe creciendo al mismo ritmo.

El suministro de metales no debe considerarse de forma aislada. Como se mencionó, la viabilidad económica de las operaciones mineras suele responder a la viabilidad económica de las operaciones mineras "hospedantes". Los metales complementarios no se extraen de forma exclusiva, sino más bien como coproductos o subproductos de los metales hospedantes, y las decisiones sobre si se deben procesar o no a menudo se ven condicionadas por los siguientes factores:

1. El grado de interés de las empresas mineras en producir solo los metales principales (o no).



2. La concentración de los metales menores: Si se considera demasiado baja para lograr una recuperación económica rentable, no se procesarán.
3. Es posible que el proceso metalúrgico o la tecnología para separar tales elementos no se desarrollen lo suficiente para un tipo específico de mineral.
4. Los requisitos de licencias y permisos pueden obstaculizar la producción: Por ejemplo, i) el permiso de explotación minera puede no permitir ninguna otra producción que no sea el metal principal para el que se ha otorgado dicho permiso; ii) la autorización para procesar un metal "nuevo" puede requerir una nueva ronda de negociaciones con el Gobierno o iii) la extensión de una licencia vigente puede concederse con la condición de que las empresas mineras realicen evaluaciones de impacto ambiental nuevas o complementarias, que pueden ser costosas y llevar mucho tiempo.<sup>4</sup>

La producción y, por lo tanto, la disponibilidad de suministro de elementos complementarios, depende por completo de la sostenibilidad económica de los procesos de extracción de metales hospedantes. Como resultado, los elementos complementarios han sido —y siguen siendo— a menudo descartados y eliminados en las rocas estériles y los relaves en cada etapa del proceso de concentración.

Dada la naturaleza del sector minero, el suministro de metales, por lo general, es bastante inelástico a corto plazo, pero tiende a ser más elástico con el tiempo a medida que la producción se pone en marcha. Las peculiaridades de los metales complementarios, sin embargo, tienden a acentuar esta cuestión, ya que su suministro puede no responder necesariamente a la demanda del mercado, incluso en el mediano y largo plazo, sino más bien a las condiciones mencionadas con anterioridad. La producción de coproductos y subproductos es compleja y parece generar un suministro más inelástico porque depende de si el proyecto minero, en un momento determinado, considera que su extracción es viable desde el punto de vista técnico o económico.

Incluso los coproductos que determinan conjuntamente las decisiones de producción con respecto a ciertos metales siguen dependiendo en gran medida del suministro del metal hospedante, cuya demanda a veces sigue su propia dinámica de mercado específica.

En el caso de los subproductos, que a menudo se consideran menos importantes, los precios más altos pueden no ser suficientes para desencadenar la decisión de aumentar la producción del metal. Estos metales tienden a tener un suministro más inelástico.

No tener en cuenta estos riesgos de suministro puede obstaculizar el ritmo de implementación de la transición energética y las tecnologías de transformación digital. Las respuestas lentas sobre el suministro, que aún siguen sin entenderse ni abordarse, tendrán un impacto significativo en el sector downstream de las cadenas de valor mundiales, lo que pondrá en riesgo a sectores industriales enteros, incluidos los trabajadores cuya seguridad laboral puede verse afectada.

---

<sup>4</sup> Aunque muchas jurisdicciones permiten la extensión del permiso de explotación minera a otros productos, requiere una nueva negociación entre la empresa minera y las autoridades. Estas extensiones se conceden generalmente en las mismas condiciones que el permiso inicial, como es el caso en países como Senegal (artículo 25 del Código de Minería [República de Senegal, 2016]) o la República del Congo (artículo 34 del Código de Minería [República del Congo, 2005]). Esto podría representar una carga administrativa y financiera adicional para las empresas si el costo de extraer el subproducto solo está cubierto por los ingresos adicionales esperados.



## 4.1.2 Alta volatilidad de precios

No es raro que los coproductos y subproductos estén sujetos a una mayor volatilidad de precios que los metales hospedantes. De hecho, en los últimos 50 años, los subproductos tuvieron, en promedio, una volatilidad de precios anual un 50 % superior que la de los principales metales (Redlinger y Eggert, 2016).

El rodio, por ejemplo, que es un subproducto del platino y el paladio, se extrae, sobre todo, en Sudáfrica (80 % de la producción mundial en 2018) y Rusia (12 % de la producción mundial en 2018) (Servicio Geológico de Estados Unidos [USGS], 2021). Su aplicación principal es en convertidores catalíticos (85 % de la producción de rodio) (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2021) donde se utiliza para reducir los gases contaminantes nocivos emitidos por los vehículos.

Como se ilustra en la figura 5, el rodio se comercializó a USD 11.000/oz a finales de 2022, un 42 % menos que su precio más alto de USD 19.000/oz en marzo de 2022 y un 60 % menos que su precio más alto de USD 27.000/oz en abril de 2021, pero un 320 % más que el precio de USD 3.500/oz en marzo de 2020.

Otro ejemplo fue cuando hace 15 años la industria del automóvil, el mayor consumidor de rodio, se vio afectada por la crisis de 2008. Los precios del rodio cayeron más de un 90 % en pocos meses, de USD 10.000/oz a menos de USD 1.000/oz.

**FIGURA 5.** Evolución de los precios del rodio en USD/oz de abril de 2005 a enero de 2023



Fuente: Kitco.com, 2023.

Las condiciones inciertas del mercado para algunos metales menores podrían disuadir a las empresas mineras de aventurarse en la producción de metales menores, lo que acentuaría aún más los riesgos de suministro y las fluctuaciones de los precios.

La volatilidad de los precios también es un desafío para los Gobiernos, ya que les impide presupuestar de forma adecuada los ingresos esperados del sector minero y, por ende, se limita su capacidad para realizar una planificación correcta del gasto público.





En última instancia, las altas fluctuaciones en los precios de las materias primas tienen un impacto negativo en la estructura social, y en particular en los trabajadores, que corren el riesgo de ser despedidos durante la parte de la crisis del ciclo de auge y declive. Administrar mejor tales ciclos ayudaría a obtener beneficios tangibles para los trabajadores mineros, sus familias y sus comunidades.

### **4.1.3 Riesgos de perder metales de importancia estratégica (como minerales críticos)**

Teniendo en cuenta la creciente necesidad de una amplia gama de metales, la eliminación de metales en los vertederos y los depósitos de relave sin realizar su debido procesamiento puede representar una pérdida trágica de valor. A medida que crece la brecha de suministro de minerales que se consideran críticos para la transición energética y para las tecnologías digitales, se están llevando a cabo investigaciones para tratar de limitar dicha pérdida y recuperar la mayor cantidad posible de ellos. Esto requeriría emprender un desarrollo metalúrgico necesario que permitiría crear un proceso lo más simple posible que maximice la recuperación de metales complementarios.

No procesar metales menores representa una posible pérdida de valor para las operaciones mineras y los Gobiernos. Para las autoridades fiscales de los Gobiernos de los países anfitriones, en particular, reduce los ingresos que pueden recaudarse y redistribuirse, incluso a las comunidades anfitrionas.

### **4.1.4 Riesgos de reservas y recursos subinformados**

Las estimaciones actuales de las reservas y los recursos de metales son en gran medida imperfectas, en parte, porque no hay una guía ni definiciones universalmente acordadas de productos primarios, coproductos o subproductos en los códigos de declaración de recursos minerales (Mudd *et al.*, 2016). Los países utilizan diferentes métodos y tienen diversas maneras de agregar y divulgar datos, lo que da lugar a la existencia de variaciones en las estimaciones de las reservas y los recursos de metales.

Estas variaciones son aún más notorias con los metales complementarios, que a menudo se considera que tienen menos valor material para su recuperación por parte de las operaciones mineras y, por lo tanto, se siguen ignorando y son menos informados. Incluso cuando se tiene en cuenta la valorización de los metales complementarios en el estudio de factibilidad de un proyecto minero, sus estimaciones de recursos se suelen ocultar y se presentan como un equivalente de metal principal.

Esto da como resultado la falta de datos fiables sobre las estimaciones de recursos y sobre la cantidad y calidad de los minerales disponibles y, por lo tanto, hasta qué punto pueden extraerse y procesarse a escala. La falta de datos suficientes y confiables aumenta la incertidumbre en el mercado de los minerales que son muy solicitados para llevar a cabo la transición energética y la transformación digital. Dificulta aún más la capacidad de anticipar y abordar los riesgos en torno a la seguridad del suministro y de saber dónde y cómo enfocar los esfuerzos y las prioridades para realizar más investigaciones y estudios. Por lo tanto, una presentación de informes más exhaustivos y transparentes puede tener un papel importante en la mitigación de la volatilidad de los precios.



En el caso de los países productores, la incertidumbre en relación con la cantidad y la diversidad de su riqueza de minerales y metales elimina su capacidad para diseñar y liderar adecuadamente una estrategia nacional minera e industrial efectiva.

## CUADRO 5. ¿QUÉ SON LAS RESERVAS Y LOS RECURSOS MINERALES?

Las reservas y los recursos minerales son acumulaciones de una materia prima que se puede extraer para obtener ganancias bajo las condiciones técnicas y económicas actuales. Teniendo en gran parte un componente económico, cualquier fluctuación en el precio de las materias primas incide en la cantidad de recursos y reservas disponibles.

Los términos "recursos" y "reservas", en su uso actual, se emplean para elaborar los informes que son obligatorios para la mayoría de las empresas mineras que cotizan en bolsa. Se definen dentro de los códigos de divulgación estándar, como el Comité Conjunto de Reservas de Mena (JORC)<sup>5</sup> (Australia y Nueva Zelanda), los Códigos Sudafricanos de Informe de Minerales (SAMREC)<sup>6</sup> (Sudáfrica) y el Instrumento Nacional (Ni) 43-101<sup>7</sup> (Canadá), por ejemplo, que han sido desarrollados por las bolsas de valores para ayudar a los inversores a comparar los proyectos de exploración minera y limitar los informes falsos o engañosos. Establecen requisitos mínimos, directrices y recomendaciones para la presentación de informes públicos sobre los activos minerales. También sirven como marco para la clasificación de recursos y reservas basada en el conocimiento geológico, la facilidad de recuperación metalúrgica y la viabilidad económica de las propiedades minerales. Se basan en la noción de "persona competente" (JORC, SAMREC) o "persona calificada" (CIM Ni 43-101), es decir, un experto técnico reconocido por sus pares que está obligado a firmar el informe donde se divulgan los resultados.

**Un recurso mineral** es la parte del depósito mineral sobre el cual se tiene la suficiente confianza técnica en el modelo geológico para esperar una futura explotación minera. Los recursos, por lo general, se pueden dividir en tres categorías diferentes, ordenadas de acuerdo con la creciente confianza geológica:

- recursos inferidos;
- recursos indicados;
- recursos medidos.

**Una reserva mineral** (Ni 43-101, SAMREC) o **una reserva de mena** (JORC) representa la parte económicamente explotable de un recurso mineral medido e indicado. Solo un estudio de pre-factibilidad o factibilidad de un proyecto minero puede proporcionar suficiente información adicional para apoyar la conversión de los recursos a reservas. Las reservas se suelen clasificar en dos categorías ordenadas según la creciente confianza geológica en los recursos minerales:

- Reservas probables: se derivan de recursos indicados y medidos.
- Reservas probadas: solo pueden derivarse de recursos medidos.

5 El Código JORC es el código de Australasia para informar los resultados de exploración, los recursos minerales y las reservas de mena. Es obligatorio para las empresas que cotizan en la bolsa de valores en Australia y Nueva Zelanda.

6 SAMREC, o el código sudafricano para informar los resultados de exploración, los recursos minerales y las reservas minerales, establece requisitos mínimos, recomendaciones y directrices para la divulgación de información mineral.

7 Ni 43-101 es el estándar canadiense de divulgación para proyectos minerales. Es obligatorio para cualquier divulgación de información relacionada con la propiedad minera para las empresas que cotizan en cualquier bolsa de valores de Canadá.



Para las empresas mineras, la falta de datos apropiados es una oportunidad perdida para diversificar su cartera y reconsiderar los metales y minerales que de otro modo se clasifican como activos de baja prioridad o no rentables.

#### 4.1.5 Riesgos de flujos de materiales ilícitos

Durante el proceso de concentración, mediante el cual las materias primas se someten a procesos químicos y físicos para convertirlas en concentrados de mayor grado, muchos metales complementarios permanecen junto a los metales hospedantes, dado que comparten propiedades similares. Los concentrados de los metales hospedantes pueden ser vendidos a fundiciones y refinarias para ser separados y procesados en metales fáciles de vender. Lo que queda, se considera como impurezas sin valor o por las cuales la fundición puede recibir multas.

En muchos países productores, los concentrados que se exportan sin una transformación posterior no son probados sistemáticamente por los Gobiernos para buscar elementos que no sean los principales metales y las principales impurezas reconocidas. De hecho, cuando los metales menores no forman parte de la cartera de las empresas mineras, rara vez se declaran como minerales "extraíbles" y, por lo tanto, no se informan. Si bien existen directrices sólidas (Readhead, 2018) para que los Gobiernos de los países productores evalúen el grado y el volumen del producto exportado, ningún ensayo y protocolo identificaría ningún elemento si los materiales exportados no se someten a pruebas para la detección de elementos específicos.

Este es un desafío importante, ya que los Gobiernos no pueden estimar el volumen y el valor de todos los minerales que se venden o exportan. Los materiales enviados al extranjero sin una declaración ni notificación adecuada representan un alto riesgo de **fuga de material** o incluso **flujos de material ilícito**. Como consecuencia, los Gobiernos no pueden reclamar la parte adecuada de los ingresos.

Dado que se estima que el 60 % de los minerales críticos provienen de metales menores, y dada la demanda exponencial esperada en el futuro, la fuga potencial de materiales o los flujos de materiales ilícitos representan un riesgo financiero significativo y oportunidades de ingresos perdidas para los Gobiernos y las empresas por igual.

## 4.2 Riesgos ambientales

El desecho de metales complementarios de las operaciones mineras o de procesamiento en los vertederos y los depósitos de relave también plantea problemas ambientales subyacentes, ya que algunos de estos elementos son tóxicos (como el plomo o el mercurio, que son altamente neurotóxicos) y han adquirido una mayor movilidad como consecuencia del proceso minero y de extracción.

Los relaves cerrados y abandonados representan una de las fuentes más importantes de contaminación por metales pesados en lugares donde ocurren o han ocurrido actividades mineras. La lixiviación adicional producida por el agua de lluvia puede extenderse aguas abajo y precipitar los metales pesados que permanecen en los depósitos de relave cerrados (Wang *et al.*, 2019). Esto constituye una amenaza significativa para el medio ambiente, para las comunidades locales y para los trabajadores de las minas. En el caso de la industria



minera, esto es especialmente grave, ya que los empleadores tienen el deber de proteger a sus trabajadores y de velar por su salud y seguridad (Organización Internacional del Trabajo, 2003, 2005).

Cualquier divulgación de la cantidad de metales complementarios recuperados ayudaría a mitigar este riesgo importante. El uso de nuevas y mejores técnicas de procesamiento que se alinean con estándares ambientales más estrictos representa una oportunidad para abordar esas consecuencias negativas y problemas ambientales heredados.

Algunos elementos complementarios indeseables pueden incluso evitar la explotación de un determinado depósito. El proyecto de tierras raras Kvanefjeld en Groenlandia, que se estima que contiene más de 1000 millones de toneladas de recursos minerales (Greenland Minerals and Energy, 2015), se encuentra actualmente detenido debido a la subproducción de uranio. Las autoridades rechazaron la licencia de explotación basándose en una nueva ley aprobada en 2021 que prohíbe la exploración y producción de cualquier proyecto minero donde la concentración de uranio supere el umbral de 100 ppm (parte por millón o 0,0001 %) (Jamasmie, 2021).

### **4.3 Desafíos de reciclaje**

En teoría, el metal (al estar formado por átomos) puede ser 100 % reciclado en comparación con compuestos como, por ejemplo, los plásticos, cuyas cadenas moleculares son degradables por el calor, la luz ultravioleta o con el tiempo. En la práctica, sin embargo, la complementariedad de los metales trae desafíos adicionales respecto al reciclaje.

Los metales suelen estar muy diluidos en objetos manufacturados (Verhoef, 2004), y esto es particularmente grave para los metales menores que se utilizan en cantidades muy pequeñas. En ese sentido, el reciclaje en la metalurgia tiene un nivel de complejidad similar al de los procesos metalúrgicos mineros. Sin embargo, a diferencia del procesamiento minero, donde los metales asociados ocurren de forma natural, en los objetos manufacturados, los metales contenidos y asociados a ellos responden a propiedades tecnológicas. Por lo tanto, los metales menores de los objetos manufacturados son más difíciles de reciclar porque sus asociaciones no son naturales. En ese sentido, el conocimiento metalúrgico desarrollado y utilizado para manipular los minerales naturales podría no ser adaptable ni relevante para el procesamiento secundario de "minerales artificiales".



## 5.0 Cómo entender que la complementariedad puede ayudar a identificar nuevas fuentes de metales

Las proyecciones actuales sobre la demanda de metales para el desarrollo de tecnologías energéticas apuntan a una brecha de suministro significativa en la próxima década (AIE, 2021). Si bien los factores que impulsan la demanda son relativamente claros, nos cuesta determinar de dónde vendrán los minerales, a qué ritmo se producirán y cómo se recuperarán algunos metales menores, dado el hecho de que, desde el punto de vista técnico, no pueden extraerse de forma exclusiva. Dicho esto, una comprensión más profunda de cómo se extraen y asocian los metales puede ofrecer una nueva perspectiva para que los responsables de la formulación de políticas adopten los instrumentos normativos y reglamentarios necesarios, inviertan en investigación y desarrollo, proporcionen un apoyo adecuado para nuevas técnicas de procesamiento y faciliten el acceso a nuevas fuentes de metales. También provee una plataforma para dialogar con las empresas mineras y otros actores industriales de las cadenas de suministro para aprovechar las oportunidades que contribuyan a cerrar la brecha de suministro. En esta sección, se extraen algunas de las oportunidades clave que se pueden aprovechar si se comprende de mejor manera la complementariedad de los metales.

### 5.1 Oportunidades para obtener un mayor valor de la producción de metales

La creciente demanda de minerales que son críticos para la transición energética y las tecnologías digitales aporta una nueva perspectiva a la economía de los metales complementarios.

El procesamiento de metales complementarios representa una oportunidad para aumentar la rentabilidad de las operaciones mineras, en particular haciendo un mejor uso del capital invertido y el intenso trabajo ya realizado, desde la exploración hasta la extracción y la conminución.

Esto también es una gran ayuda para los países productores, ya que proporciona nuevas vías para beneficiarse de sus recursos del subsuelo y desarrollar actividades de valor agregado y, por lo tanto, participar en las cadenas de suministro mundiales.



La coproducción y la subproducción también representan una oportunidad para que los países productores revisen su régimen fiscal a fin de introducir más flexibilidad con algunos tipos de minerales. Un ejemplo es la aplicación de tasas de regalías variables, que son más progresivas que las tasas fijas (IGF 2022). Sin embargo, cobrar tasas de regalías variables a los metales hospedantes puede ser difícil porque los costos y los precios suelen aumentar y caer en conjunto. Pero la aplicación de este tipo de regalías variables a metales menores limita cualquier riesgo a la rentabilidad de la operación minera en los casos en que la subproducción por sí sola no tiene suficiente valor para influir en las decisiones de inversión. Como resultado, esto podría proporcionar un flujo de ingresos adicional a los países ricos en recursos sin desalentar la inversión en el sector minero. No obstante, es necesario que exista cierta flexibilidad en la aplicación de tasas variables, en particular en el caso de los metales coproducidos, ya que podrían competir con la producción de metales hospedantes, o incluso superarla.

#### **CUADRO 6. NUEVOS SUBPRODUCTOS DE UNA MINA DE ESTAÑO**

La mina Uis en Namibia es operada por Andrada Mining (anteriormente AfriTin Minerals). Entró en producción en 2019 para producir un concentrado de estaño (Sn). Las pruebas metalúrgicas han tenido éxito en la extracción de litio y tantalio como subproductos. Pronto se iniciará la construcción de una planta piloto para producir hidróxido de litio de grado de batería y un circuito de separación de tantalio para elaborar concentrado de óxido de tantalio (AfriTin Mining Ltd, 2022). Curiosamente, dependiendo de la evolución relativa de los precios del estaño y el litio (y si las concentraciones relativas en el yacimiento mineral lo permiten), el litio podría reemplazar al estaño como el producto principal en esta mina específica.

## **5.2 Los vertederos y los depósitos de relave como posibles fuentes de minerales críticos**

Por las razones mencionadas con anterioridad, la mayoría de los depósitos de relave, en especial los que están cerrados, albergan cantidades significativas de metales complementarios que han sido extraídos pero descartados como parte del proceso de recuperación del elemento hospedante. Incluso si la explotación de tales elementos menores no se evaluó como parte del estudio de factibilidad inicial de proyectos mineros (o se estudió pero no se consideró económicamente factible en el momento del estudio), existe la posibilidad, con la creciente demanda de minerales críticos asociados con los cambios en las condiciones económicas generales y los avances tecnológicos, de explotar esos relaves para recuperar los metales menores.

Esto requeriría realizar nuevas evaluaciones geológicas de los recursos y reservas contenidos en tales relaves y lograr que tales materiales pasen de un estado de desecho a un estado de (nuevos) yacimientos minerales que pueden ser reexplotados.



## CUADRO 7. LA NUEVA ALQUIMIA: TRANSFORMAR LOS DESECHOS EN ORO BLANCO

La mina de boro en California es una mina de boratos de 90 años de antigüedad, operada por Rio Tinto, que ha producido una cantidad significativa de relaves con el tiempo. Para evaluar su posible valor mineral restante, estos relaves fueron sometidos a pruebas para extraer oro y otros subproductos potenciales. De acuerdo con los resultados obtenidos, se halló la presencia de litio en concentraciones que podrían justificar la reutilización. En 2019 se inició con éxito un ensayo a pequeña escala para demostrar la viabilidad técnica del proyecto. Actualmente se está llevando a cabo un estudio de factibilidad para construir una planta de procesamiento con una capacidad inicial de 5000 toneladas por año, suficiente para suministrar litio para 70.000 vehículos eléctricos (Rio Tinto, 2021).

Además, el valor contenido en estos depósitos de relave cerrados que podrían justificar una intervención, aporta una adición importante. Ofrece la oportunidad única de reparar las instalaciones que se están convirtiendo en una amenaza para el medio ambiente y las comunidades debido a diseños, construcciones y normas obsoletas en el contexto del cambio climático. Sin embargo, el reprocesamiento de relaves debe ser controlado y monitoreado de manera muy estricta para evitar fallas desastrosas en las presas de relaves, como el evento ocurrido en septiembre de 2022 en Jagersfontein, Sudáfrica (Eligon, 2022).

El reprocesamiento de relaves proporciona una oportunidad de ingresos significativa para los países anfitriones. También puede crear —y ayudar a desarrollar— un sector completamente nuevo, con nuevas y diferentes oportunidades de empleo asociadas. Estos nuevos empleos pueden requerir nuevas competencias específicas que se alinearán con las mejoras en la base de conocimientos técnicos del país.

Si bien, en principio, el reprocesamiento de relaves es una fuente seductora de minerales críticos, hay varios obstáculos reglamentarios que deben abordarse para presentar el argumento comercial a los inversores. Por ejemplo, la falta de claridad sobre la propiedad de los relaves —especialmente en el caso de minas abandonadas y huérfanas— y, por lo tanto, sobre su seguridad, es un obstáculo claro para cualquier posible inversor. Además, las cuestiones relacionadas con los derechos sobre la tierra, los costos y retrasos de los permisos, la autorización ambiental, el acceso a la tecnología (en particular para las empresas medianas) y la financiación de las operaciones de reprocesamiento de relaves son a menudo cuellos de botella considerables que deben sortearse para atraer a los inversores.

Los Gobiernos podrían liberar el potencial de transformar lo que se considera una responsabilidad ambiental en una oportunidad de recuperación de recursos para minerales críticos. Para lograrlo, será necesario fortalecer el marco regulatorio, proporcionar incentivos y generar una mayor coherencia en los diferentes campos de las políticas públicas para garantizar la sostenibilidad de las prácticas. Además, para presentar el argumento comercial a los inversores (y teniendo en cuenta las externalidades que pueden estar asociadas con las actividades de reprocesamiento), deberán diseñarse y financiarse debidamente esquemas de inversión adecuados y completos, como esquemas dedicados a la valorización de los desechos mineros, teniendo en cuenta su integración en los regímenes de licencias desde el principio.



## 5.3 Oportunidades para alinear la producción minera con la estrategia nacional de desarrollo

La búsqueda de un volumen cada vez mayor y diferentes tipos de minerales y metales para impulsar las tecnologías necesarias para forjar un futuro sostenible, así como estrategias para garantizar la seguridad del suministro, está presionando a un número creciente de países productores de minerales para que aumenten su producción de minerales y celebren acuerdos de suministro a largo plazo.

Estas dinámicas están colocando a los países productores en una posición de fortaleza y, por lo tanto, les dan la oportunidad de reevaluar su posicionamiento estratégico, tanto en términos de estrategias nacionales de desarrollo como con los socios mundiales. Desde una perspectiva de desarrollo nacional, la buena gestión de la matriz de producción minera es fundamental para fomentar el desarrollo industrial y la adición de valor, y estimular las inversiones en sectores económicos que pueden impulsar un futuro climáticamente inteligente. Desde una perspectiva mundial, esto ofrece una ocasión única para que los países productores fortalezcan su posición en las cadenas de suministro mundiales y garanticen acuerdos más justos y equitativos con los inversores.

Para que estas oportunidades se materialicen, será importante revisar los procesos regulatorios para otorgar licencias o permisos cuando existan datos sobre la complementariedad de los metales. Si bien el sistema de permisos no debe impedir que las empresas mineras procesen metales menores cuando este procesamiento sea económicamente factible, los Gobiernos deberían poder reevaluar los términos y condiciones de la licencia o el permiso en caso de que se produzca un "cambio importante".<sup>8</sup> Además, se debe informar a los Gobiernos sobre el nivel de procesamiento de los metales complementarios, incluso si no se procesan, y deben tener requisitos claros de transparencia y presentación de informes, incluso sobre la presentación sistemática de datos geológicos detallados y la clasificación de los metales como subproductos o coproductos. Esto es importante porque algunos metales menores pueden ser recategorizados para cambiar su clasificación de subproductos a coproductos, si el valor de producción se vuelve significativo en un momento dado.

Desde una perspectiva de planificación, entender las asociaciones de los metales naturales y tener una buena base de datos sobre la complementariedad de los metales es esencial para que los países productores identifiquen qué minerales se están extrayendo y cuáles aún no se pueden recuperar, para luego estimular la exploración o promover la recuperación específica de minas o proyectos mineros existentes.

---

<sup>8</sup> El cambio importante se refiere a un cambio sustancial que tiene un efecto significativo en la operación general del negocio.





## 6.0 Conclusión

Desde la exploración hasta la extracción, el procesamiento y el reprocesamiento de relaves, comprender la complementariedad es clave para identificar formas innovadoras de abordar la inminente brecha de suministro de minerales necesarios para la transición energética. En consecuencia, se añade una nueva herramienta a la caja de herramientas del sector minero.

La principal conclusión de la noción de complementariedad de los metales es que la extracción de metales y la viabilidad del suministro no pueden considerarse de forma aislada. Además, la producción de un gran número de metales está interconectada y, por lo tanto, requiere una comprensión integral de cómo funciona la dinámica del mercado para estos metales (de forma individual y conjunta) y cómo podrían afectar la capacidad de la industria minera para suministrar metales que tienen una alta demanda pero no necesariamente una alta oferta.

Para alentar a las empresas mineras a invertir en metales menores que se consideran de menor interés (y, por ende, son tratados como subproductos) pero que son críticos para una amplia gama de aplicaciones industriales, los Gobiernos podrían considerar la posibilidad de proporcionar esquemas de incentivos específicos para apoyar la inversión en la recuperación de metales complementarios junto con los metales hospedantes. A cambio, los Gobiernos podrían ordenar a las empresas de exploración que realicen y divulguen análisis de múltiples elementos de las muestras de suelo para garantizar que se tengan en cuenta todos los elementos o minerales asociados.

Se extrae una cantidad significativa de metales, pero no todos son procesados, por las razones mencionadas en la presente publicación. Esto significa que los relaves y los vertederos, por ejemplo, están llenos de elementos que, en un momento dado, podrían no haberse considerado importantes, pero que pueden llegar a extraerse teniendo en cuenta las limitaciones actuales de suministro. Para mitigar los riesgos y aprovechar las oportunidades, se debe fomentar la investigación fundamental sobre la metalogenia, así como la investigación aplicada sobre los procesos metalúrgicos.

Desde el punto de vista de las políticas, existen importantes riesgos económicos y ambientales que deben abordarse para que el reprocesamiento de relaves sea ambientalmente seguro. Sin embargo, y lo que es más importante, esto también ofrece grandes oportunidades, ya que el desarrollo tecnológico y los planes para avanzar hacia un



futuro más verde brindan un mayor enfoque en los metales menores con una importancia significativa para las necesidades industriales. También es una oportunidad para que las empresas mineras mejoren el valor de sus operaciones y optimicen el suministro de minerales críticos.

Para facilitar la exploración y las inversiones, deben promoverse y desarrollarse sinergias y asociaciones entre los organismos públicos de investigación y las empresas mineras, incluso a nivel regional. Esto ayudaría a identificar formas innovadoras de procesar metales menores y valorizar minerales y metales que son (o han sido) extraídos pero que son considerados como desechos por las operaciones mineras.

La estabilidad en el mercado de los metales —en particular la alta volatilidad de los precios, las estrategias mundiales para asegurar el acceso a minerales críticos y la proliferación de contratos de suministro entre los actores de la cadena de suministro y las empresas mineras— está íntimamente ligada a la dificultad y lentitud de la respuesta de la oferta productiva a las demandas. Entender la complementariedad de los metales puede ayudar a cerrar la brecha de conocimiento sobre lo factible que es extraer algunos de los minerales y en qué tipos de yacimientos minerales hay una mayor posibilidad de encontrarlos. Esto permite, por ende, tomar decisiones fundamentadas al momento de hacer planes sobre el uso de esos metales en aplicaciones industriales.



## Referencias

- AfriTin Mining Ltd. (2022). *Lithium and tantalum product development update*. [https://polaris.brighterir.com/public/andrada\\_mining/news/rns/story/xz0d93r](https://polaris.brighterir.com/public/andrada_mining/news/rns/story/xz0d93r)
- ASM International. (2011). *Metallurgy for the non-metallurgist* (2.º ed.). [https://www.asminternational.org/documents/10192/3212401/05306G\\_Sample\\_BuyNow.pdf/ab60c086-2c71-4de0-91f6-aad1112cf4dc](https://www.asminternational.org/documents/10192/3212401/05306G_Sample_BuyNow.pdf/ab60c086-2c71-4de0-91f6-aad1112cf4dc)
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières. (2016). *Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - Le gallium*. <https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2020-12/fichecriticitegallium-publique160912.pdf>
- Clemson University, Department of Materials Science and Engineering. (2023). *Metals*. <https://www.clemson.edu/cecas/departments/mse/research/areas/metals.html>
- Cobalt Institute. (2022). *Cobalt mining*. <https://www.cobaltinstitute.org/about-cobalt/cobalt-life-cycle/cobalt-mining/>
- Deady, E., Moon, C., Moore, K., Goodenough, K. M., Shail, R. M. y mn. (2022). "Bismuth: Economic geology and value chains". *Ore Geology Reviews*, vol. 143. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104722>
- Desjardins, J. (2014). *The history of metals*. Visual Capitalist. <https://www.visualcapitalist.com/history-of-metals/>
- Eligon, C. G. (2022). "How a South African town became buried in sludge after a diamond mine collapse". *New York Times*.
- Fleming, A., Manley, D. y Lassourd, D. (2022). *Variable royalties: An answer to volatile mineral prices*. Foro Intergubernamental sobre Minería, Minerales, Metales y Desarrollo Sostenible. <https://www.igfmining.org/wp-content/uploads/2022/11/variable-royalties-an-answer-to-volatile-mineral-prices.pdf>
- Frenzel, M., Kullik, J., Reuter, M. A. y Gutzmer, J. (2017). "Raw material 'criticality'—sense or nonsense?". *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 50, núm. 12. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa5b64>
- Fulp, M. (2015). *The real cost of mining gold*. Kitco. <https://www.kitco.com/ind/fulp/2015-02-04-The-Real-Cost-of-Mining-Gold.html>
- Greenland Minerals and Energy. (2015). *Company announcement, Kvanefjeld feasibility study completed*.
- International Energy Agency. (2021). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- Organización Internacional del Trabajo. (2003). *La seguridad y la salud en las industrias de los metales no ferrosos*.
- Organización Internacional del Trabajo. (2005). *Code of practice on safety and health in the iron and steel industry*. [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_protect/---protrav/---safework/documents/normativeinstrument/wcms\\_112443.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---safework/documents/normativeinstrument/wcms_112443.pdf)
- Jamasmie, C. (2021). "Greenland bans uranium mining, blocking vast rare earths project". Mining.com. <https://www.mining.com/greenland-bans-uranium-mining-blocking-vast-rare-earths-project/>



- Kitco.com. (2023). *Rhodium In US dollar per ounce - (RHODIUM)*. [https://www.kitco.com/charts/interactive-charts/?Symbol=RHODIUM&Currency=USD&multiCurrency=true&langId=EN&period=2329200000&utm\\_content=20110407\\_iCharts\\_30day\\_rhodium\\_link&utm\\_campaign=iCharts](https://www.kitco.com/charts/interactive-charts/?Symbol=RHODIUM&Currency=USD&multiCurrency=true&langId=EN&period=2329200000&utm_content=20110407_iCharts_30day_rhodium_link&utm_campaign=iCharts)
- Manley, D., Heller, P. R. P. y Davis, W. (2022). *No time to waste: Governing cobalt amid the energy transition*. Natural Resource Governance Group. [https://resourcegovernance.org/sites/default/files/documents/no\\_time\\_to\\_waste\\_governing\\_cobalt\\_amid\\_the\\_energy\\_transition.pdf](https://resourcegovernance.org/sites/default/files/documents/no_time_to_waste_governing_cobalt_amid_the_energy_transition.pdf)
- Mudd, S., Jowitt, S. M. y Werner, T. T. (2016). "The world's by-product and critical metal resources part I: Uncertainties, current reporting practices, implications and grounds for optimism". *Ore Geology Reviews*, vol. 86, págs. 924-938.
- Nassar, N. T. Graedel, T. E. y Harper, E. M. (2015). "By-product metals are technologically essential but have problematic supply". *Science Advances*, vol. 1, núm. 3. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400180>
- Nieto, A. y Zhang, K. Y. (2013). "Cutoff grade economic strategy for byproduct mineral". *Mining Technology*, vol. 122, núm. 3.
- Readhead, A. (2018). *Monitoring the value of mineral exports: Policy options for governments*. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico y Foro Intergubernamental sobre Minería, Minerales, Metales y Desarrollo Sostenible. <https://www.oecd.org/tax/beps/monitoring-the-value-of-mineral-exports-oecd-igf.pdf>
- Redlinger, M. y Eggert, R. (2016). "Volatility of by-product metal and mineral prices". *Resources Policy*, vol. 46, págs. 69-77. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.12.002>
- República del Congo. (2005). *Code minier, Loi n°4-2005 du 11 avril 2005*.
- República de Senegal. (2016). *Code minier*.
- Rietveld, E., Boonman, H., van Harmelen, T., Hauck, M. y Bastein, T. (2019). *Global energy transition and metal demand*. TNO. [https://www.researchgate.net/publication/330468693\\_GLOBAL\\_ENERGY\\_TRANSITION\\_AND\\_METAL\\_DEMAND](https://www.researchgate.net/publication/330468693_GLOBAL_ENERGY_TRANSITION_AND_METAL_DEMAND)
- Rio Tinto. (2021). "Rio Tinto achieves battery grade lithium production at Boron plant". <https://www.businesswire.com/news/home/20210407005321/en/>
- República de Senegal. (2016). Mining code.
- Skinner, B. J. (2022). *Mineral deposit*. Encyclopedia Britannica. Fecha de acceso: 2022. <https://www.britannica.com/science/mineral-deposit>
- United States Geological Survey. (s. f.). *What is the difference between a rock and a mineral?* <https://www.usgs.gov/faqs/what-difference-between-rock-and-mineral>
- United States Geological Survey. (2021). "Platinum-Group Metals", *2018 Minerals Yearbook*. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2018-plati.pdf>
- Verhoef, E. V., Gerard, P. J., Dijkema y Reuter, M. A. (2004). "Process knowledge, system dynamics, and metal ecology". *Journal of Industrial Ecology*, vol. 8, núm. 1-2, págs. 23-43.
- Wang, P., Sun, Z., Hu, Y. y Cheng, H. (2019). "Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact". *Science of The Total Environment*, vol. 695. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133893>



World Gold Council. (2018). *Guidance note on non-GAAP metrics: All-in sustaining costs and all-in costs*. <https://www.gold.org/about-gold/gold-supply/responsible-gold/all-in-costs>

Zepf, V., Reller, A., Rennie, C., Ashfield, M. y Simmons, J. (2014). *Materials critical to the energy industry. An introduction* (2.º ed.). BP Plc.



**IGF**

INTERGOVERNMENTAL FORUM  
on Mining, Minerals, Metals and  
Sustainable Development