

ARTÍCULOS

Escasez de recursos minerales: consecuencias en la explotación, la sostenibilidad y el desarrollo tecnológico

Scarcity of mineral resources: consequences for exploitation, sustainability and technological development



Castillo-Pérez, María José; Huerta-Velásquez, Catherine; Rivas-Lorca, Fernanda; Rojas-Uzcátegui, Eduardo; Lescot-Soto, Alexander; Argandoña-Reyes, Claudio; Araya-Carvajal, Katherine

María José Castillo-Pérez



maria.castillo@iacc.cl

Instituto Profesional IACC. Providencia, Región Metropolitana, Chile.

Catherine Huerta-Velásquez



catherine.huerta@iacc.cl

Instituto Profesional IACC. Providencia, Región Metropolitana, Chile.

Fernanda Rivas-Lorca



fernanda.rivas@iacc.cl

Instituto Profesional IACC. Providencia, Región Metropolitana, Chile.

Eduardo Rojas-Uzcátegui



eduardo.rojas.uz@gmail.com

Instituto Profesional IACC. Providencia, Región Metropolitana, Chile.

Alexander Lescot-Soto



alexander.lescot@iacc.cl

Instituto Profesional IACC. Providencia, Región Metropolitana, Chile.

Claudio Argandoña-Reyes



claudio.argandona@iacc.cl

Instituto Profesional IACC. Providencia, Región Metropolitana, Chile.

Katherine Araya-Carvajal



katherine.araya@iacc.cl

Instituto Profesional IACC. Providencia, Región Metropolitana, Chile.

RESUMEN

El incremento de la población mundial y la demanda de tecnologías han aumentado de manera exponencial el consumo de recursos minerales, poniendo en riesgo su disponibilidad para las generaciones futuras. El presente estudio tiene como objetivo conocer el estado de la producción académica sobre la escasez de recursos y evaluar sus consecuencias en la explotación, la sostenibilidad y el desarrollo tecnológico. Se llevó a cabo una revisión bibliográfica sistematizada usando las bases de datos Scopus, WoS y SciELO. Se analizaron 57 documentos que abordan temáticas como el impacto ambiental de la extracción, estrategias de reutilización, evaluaciones de criticidad y políticas de regulación de la actividad minera. Se concluye que los principales factores de la escasez de recursos están relacionados con la falta de normativa, la creciente demanda de nuevas tecnologías y discrepancia en los métodos de estimación de criticidad. Se advierte la necesidad de buscar alternativas de extracción y fomentar estrategias de recuperación de materiales.

Palabras claves: Escasez; recursos minerales; explotación minera; sostenibilidad; desarrollo tecnológico.

ABSTRACT

The increase in world population and the demand for technologies have exponentially increased the consumption of mineral resources, putting their availability for future generations at risk. The objective of this study is to know the state of academic production on resource scarcity and evaluate its consequences on exploitation, sustainability and technological development. A systematized bibliographic review was developed using the Scopus, WoS and SciELO databases. 57 documents were analyzed that cover topics such as the environmental impact of extraction, reuse strategies, criticality evaluations and regulatory policies for mining activity. It is concluded that the main factors of resource scarcity are related to the lack of regulations, the growing demand for new technologies and discrepancy in criticality estimation methods. There is a need to look for extraction alternatives and promote material recovery strategies.

Keywords: Scarcity; mineral resources; mining exploitation; sustainability; technological development.

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

vol. 17, núm. 1, 2024

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 07 noviembre 2023

Aprobación: 31 enero 2024

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v17i1.5811>

Autor de correspondencia:

katherine.araya@iacc.cl



Esta obra está bajo una Licencia
Creative Commons Atribución
4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Cómo citar: Castillo-Pérez, M. J., Huerta-Velásquez, C., Rivas-Lorca, F., Rojas-Uzcátegui, E., Lescot-Soto, A., Argandoña-Reyes, C., & Araya-Carvajal, K. (2024). Escasez de recursos minerales: consecuencias en la explotación, la sostenibilidad y el desarrollo tecnológico. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 17(1), 112-123. <https://doi.org/10.29166/revfig.v17i1.5811>

INTRODUCCIÓN

A nivel global nos encontramos frente al problema de que la oferta de minerales disminuirá considerablemente para los siguientes años debido al agotamiento de los recursos y la reducción de las leyes del mineral (Henckens *et al.*, 2016). El agotamiento de los recursos naturales no renovables (principalmente recursos minerales y energéticos) y su valoración, es un problema que actualmente se analiza a partir del concepto de desarrollo sostenible (Ponomarenko *et al.*, 2021). Seguir extrayendo minerales para satisfacer la demanda actual no solo agota las reservas existentes, sino también, incrementa sus consecuencias. Por ejemplo, en Australia y Estados Unidos, las leyes del mineral se han reducido y los costos ambientales y sociales están aumentando al mismo ritmo (Tilton, 2003; Prior *et al.*, 2012). Muchas minas en antiguas regiones industriales de Estados Unidos y Europa se han cerrado debido a las bajas leyes del mineral (Henckens, 2021b). Es relevante mencionar que hay rutas para extraer cobre y níquel de leyes tan bajas que sólo alcanzan el 0,1%. Sobre esto, Schodde (2018), indica que dentro de los próximos 26 años se debe minar más cobre que en toda la historia de la humanidad.

La criticidad en la escasez de mineral es otro punto de interés en la extracción minera. Según Can Sener *et al.* (2021), la importancia económica y el riesgo de suministro son dos de los factores más importantes para evaluar esta criticidad. El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2018) considera una lista de 35 minerales críticos basados en los criterios de suministro, demanda y producción. Según esta agencia, el riesgo más alto de fallo en el suministro se presenta para elementos usados en la electrónica emergente.

Por otra parte, junto a la escasez, se analizan los problemas asociados al impacto de la actividad minera, por ejemplo, es el caso de la extracción de tierras raras, cuyos principales impactos se asocian a la emisión de gases residuales que contienen ácido fluorhídrico, dióxido de azufre y ácido sulfúrico, además de generar aguas residuales ácidas y residuos radiactivos (Tunsu *et al.*, 2019). Así, la explotación de los recursos minerales desde una perspectiva ambiental se ha vuelto un tema de interés mundial debido a los efectos e impactos significativos que puede ocasionar sobre los entornos naturales, lo que ha llevado a los gobiernos a tomar medidas para evitar consecuencias dramáticas en el entorno (Gomes-Correia *et al.*, 2016).

En vista de aquello, el presente estudio busca conocer el estado de los estudios académicos sobre la escasez de recursos minerales a nivel global dada la explotación minera en la actualidad y sus consecuencias en la sostenibilidad y el desarrollo tecnológico futuro, lo que permite evaluar y proyectar medidas de mitigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica sistematizada, metodología que permite recopilar, seleccionar y analizar artículos científicos de forma rigurosa y sistemática (Codina, 2018), para explorar el estado de la producción académica sobre la escasez de recursos y generar un conocimiento actualizado acerca de sus consecuencias. Para su realización, se han seguido las cuatro fases señaladas por Grant y Booth (2009), correspondientes a: búsqueda, evaluación, análisis y síntesis.

En la fase de búsqueda se identificaron las principales palabras claves asociadas al objeto de investigación, intercaladas con buscadores booleanos, definiendo la siguiente estrategia de búsqueda: ("mineral resource" or "minerals" or "mining") AND ("scarce mineral" or "critical material") AND ("sustainable extraction" or "sustainable development"). Esta fórmula fue ingresada en tres bases de datos multidisciplinarias: WoS, Scopus y SciELO, limitando los resultados a publicaciones desde 2017 en adelante. Así, se encontró un total de 589 documentos.

Los artículos fueron evaluados considerando los siguientes criterios de inclusión: (1) Artículos sobre las consecuencias de la explotación minera y la escasez de recursos, (2) artículos sobre mecanismos de evaluación de criticidad y (3) artículos sobre sostenibilidad e impacto en el desarrollo tecnológico de la actividad minera. Aplicando estos criterios y excluyendo todos aquellos trabajos que abordaran temáticas diferentes dentro de la explotación de minerales, se seleccionó un total de 57 artículos.

Finalmente, se realizó una matriz con información relevante sobre los estudios (título, autor/es, año, etc.), además de los hallazgos encontrados en cada uno de ellos que fueran de utilidad para los objetivos de la investigación y se examinaron los artículos mediante un análisis temático del contenido con el fin de clasificarlos en subtemas, facilitando la síntesis y agrupación de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción general

Como se puede observar en la Tabla 1, la mayor cantidad de artículos se encontró en Scopus, que alcanza un 74 %. En segundo lugar, se encuentra WoS, que proporcionando un 17 %. Finalmente, en SciELO se encontró un 9 % del total del corpus analizado.

TABLA 1
Artículos seleccionados en cada base de datos

Base de datos	Cantidad de artículos seleccionados
Scopus	42
WoS	10
SciELO	5
Total	57

Cabe recordar que la búsqueda incluyó publicaciones del 2017 en adelante. Observando la figura 1, vemos que no existe una determinada tendencia en la cantidad de publicaciones a lo largo de los años. La mayor cantidad de artículos se registra en el año 2021 (28%), seguido del 2022 (21%), el 2020 (18%), el 2018 (12%), el 2017 (10%) y, finalmente, el 2019 (9%). Un artículo corresponde al año 2023 (2%) dada la edición de la revista, sin embargo, fue encontrado durante la fase de búsqueda desarrollada en el año 2022.

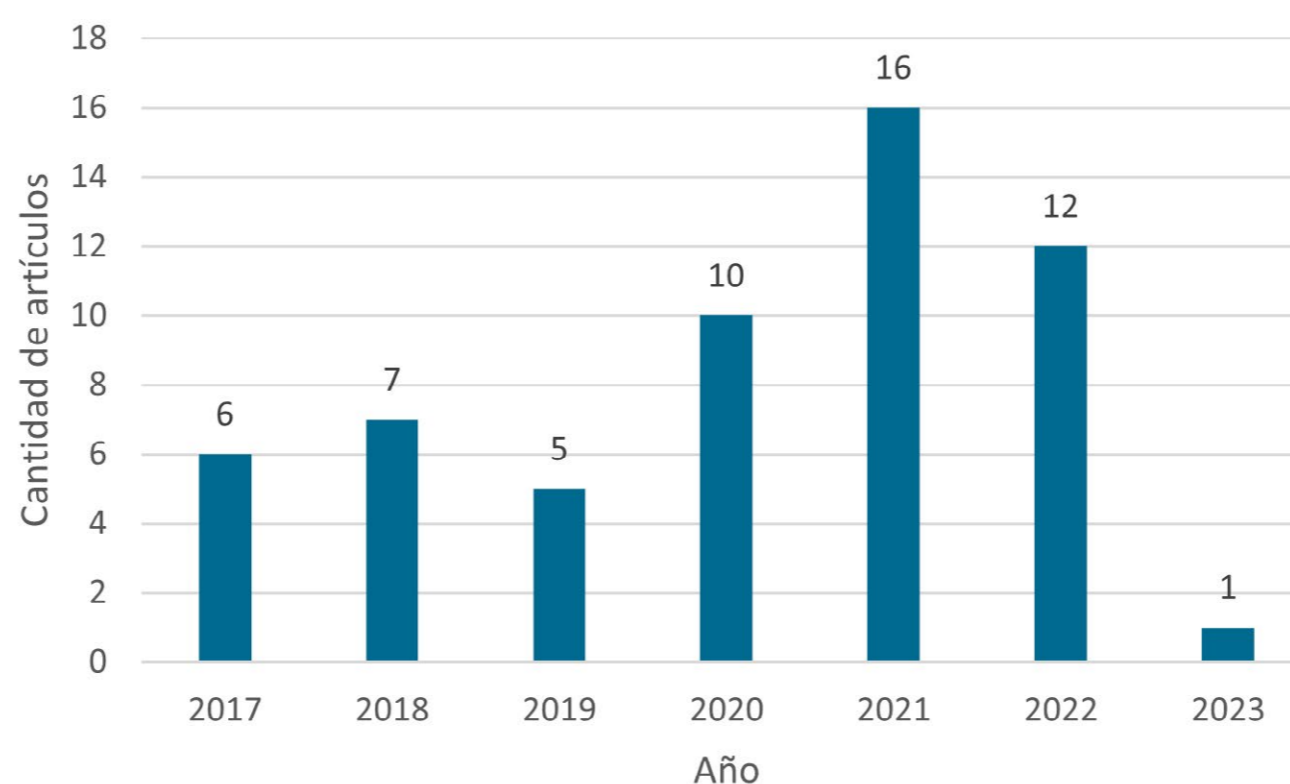


FIGURA 1
Artículos seleccionados por año de publicación

Con relación a la metodología de los estudios analizados, predomina la de tipo cuantitativo, con un 46%, incluyendo: métodos geoestadísticos, análisis estadístico de datos, estimación de flujos y modelos matemáticos. Le sigue la metodología cualitativa (28%), que incluye principalmente el análisis documental. Finalmente, un grupo de artículos utiliza como metodología la revisión de literatura (26%), ver figura 2.

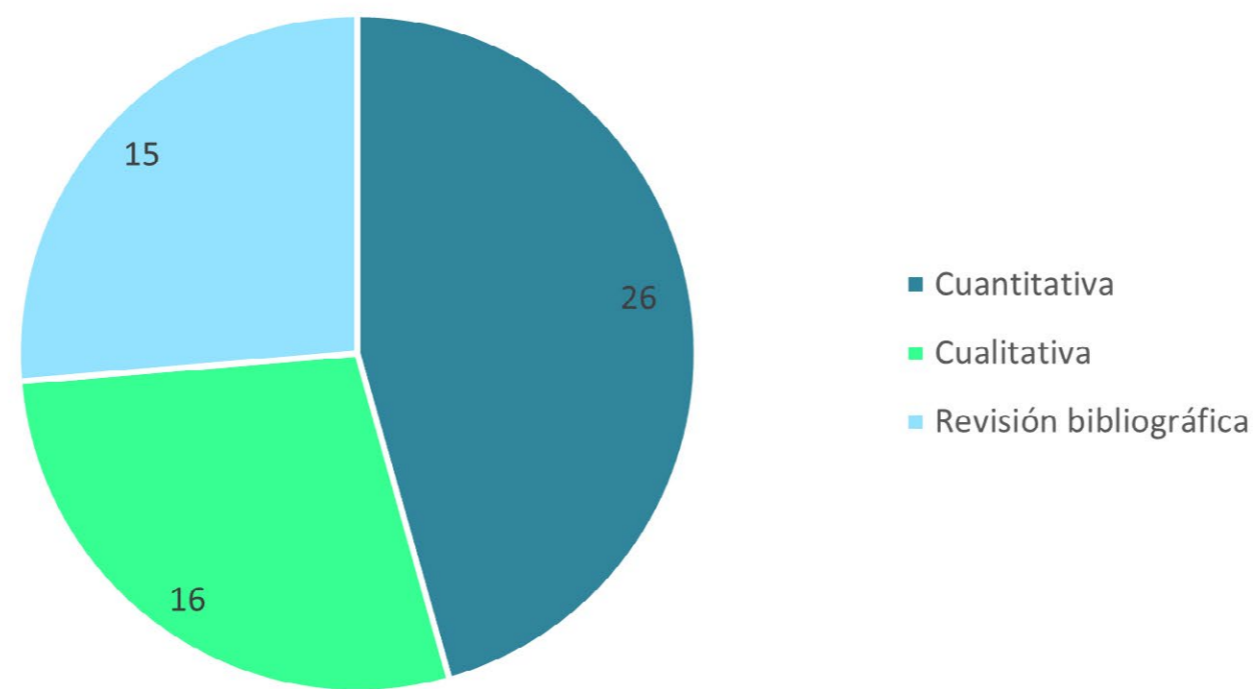


FIGURA 2
Distribución de artículos de acuerdo con la metodología de investigación

Los artículos, además, provienen de diferentes ubicaciones geográficas, señalando un interés mundial por el tema. La mayor producción de literatura se encuentra en Estados Unidos (7) y China (6). A nivel de continentes, la mayoría fueron desarrollados en Europa (49%), seguido por América (23%), Asia (19%), Oceanía (5%) y, finalmente, África (4%). La figura 3 muestra el detalle de la distribución de artículos por cada país.

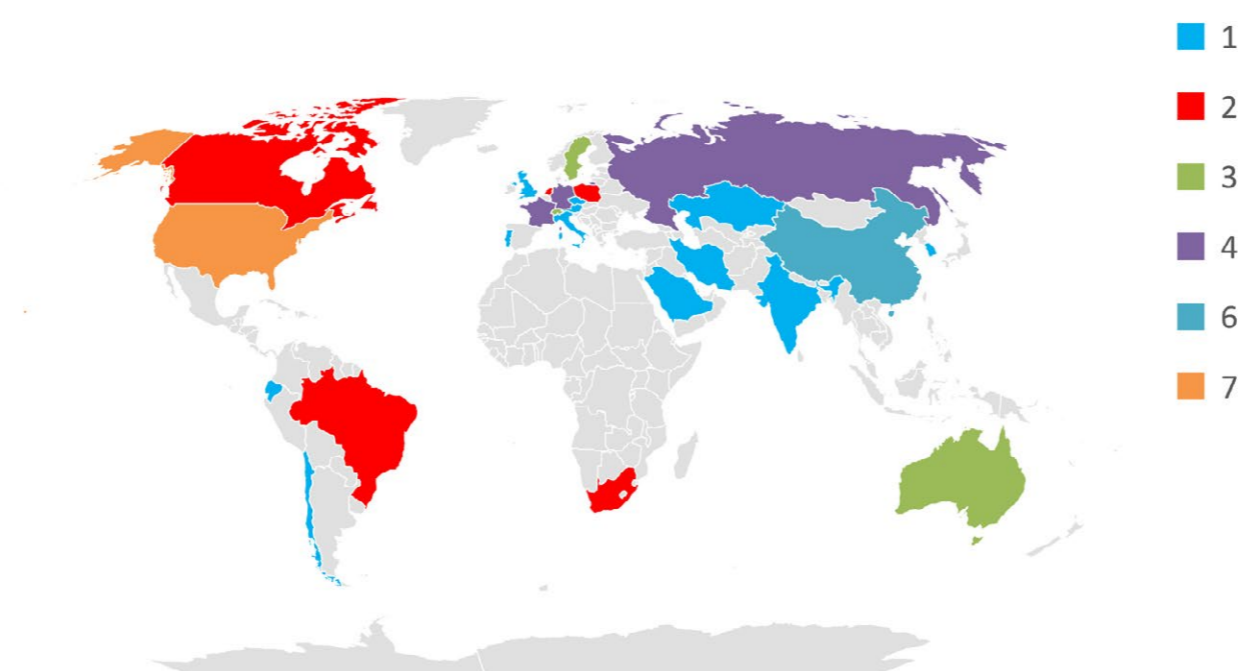


FIGURA 3
Distribución de artículos según ubicación geográfica

Análisis temático

Consecuencias de la explotación

El crecimiento demográfico y el de los procesos de extracción han ocasionado un aumento en la generación de residuos industriales y de desechos mineros masivos, provocando un impacto sobre el medio ambiente. Los efectos más significativos se ocasionan sobre el suelo, que al ser destinado al almacenamiento de residuos industriales ve alteradas sus funciones y rendimiento, y sobre el agua, debido a la contaminación por infiltración de residuos hacia las aguas subterráneas (Rybak *et al.*, 2021; Cisternas *et al.*, 2022). Como indicamos, para el caso de las tierras raras, se ha observado que su extracción genera inconvenientes sobre los ecosistemas debido a las grandes cantidades de gases residuales compuesto de material particulado concentrado, ácido fluorhídrico, dióxido de azufre, aguas residuales ácidas y residuos radiactivos (Tunsu *et al.*, 2019). Los impactos ambientales también incluyen la emisión de gases de efecto invernadero, ecotoxicidad e impactos en la toxicidad humana, atribuidos a metales comunes como el hierro, acero, aluminio y cobre, que representan más del 95% de la extracción mundial (Lee *et al.*, 2020). Además, Lapcik *et al.* (2018), señalan que las consecuencias dependen directamente del tipo de explotación, dando como ejemplo el caso de cielo abierto, cuya desventaja es que afecta en mayores extensiones y genera un alto grado

de transformación del territorio minado. La extracción también produce impactos sociales (Mudd *et al.*, 2018), que muchas veces no son abordados, ocasionando la oposición de las comunidades a la actividad minera en el mundo y un cuestionamiento de su contribución socioeconómica (Nickless y Yakovleva, 2022; Khubana *et al.*, 2022).

Por último, Brewer *et al.* (2022) destacan que existe un aumento en la investigación dedicada a mitigar los riesgos de suministro y los peligros ambientales de los procesos de extracción de minerales, particularmente en la Unión Europea, EE. UU. y Japón, esbozando estrategias como: el diseño de técnicas para la recuperación de materias primas críticas, el desarrollo de métodos para reciclar materiales críticos de productos de desecho o el reemplazo de estos por unos funcionalmente similares. En la misma línea, se propone el concepto de circularidad antropogénica, que refiere al reciclaje de metales que ya han sido extraídos de minerales provenientes del subsuelo y se encuentran en uso o en stock en la antropósfera (Zeng, 2023).

Impacto en la sostenibilidad

La definición de minerales críticos o materias primas críticas (CRM) varía de un país a otro según la necesidad de un elemento en particular durante un período de tiempo determinado, junto con otros criterios como las implicaciones ambientales, la importancia para la economía y el riesgo de suministro (Li *et al.*, 2022). Los recursos minerales clave para el desarrollo de la sociedad son tan escasos geológicamente que su disponibilidad para las generaciones futuras puede ser sustancialmente menor, adquiriendo relevancia la concepción de desarrollo sostenible, que refiere a satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las de las generaciones futuras (Sauer y Seuring, 2017). Además, puede existir una discrepancia entre los intereses de las generaciones actuales y futuras en relación con el acceso a los recursos minerales geológicamente escasos (Henckens, 2021a; 2021b). Autores como Weiser *et al.* (2020) y Babbitt *et al.* (2021) señalan que, si la innovación tecnológica continúa, puede que no se sostenga debido a la cantidad cada vez menor de recursos naturales accesibles. Estos autores lo ejemplifican con productos electrónicos de consumo que utilizan más de 60 elementos minerales, de los cuales, más de la mitad se encuentran en la lista de materiales críticos para Estados Unidos y la Unión Europea¹ (Ver tabla 2). Aunado a esto, Nassani *et al.* (2021), dejan en evidencia que la velocidad a la que se agotan los depósitos se ha acelerado con el inicio de la era industrial y que, en la actualidad, existe una gran demanda de materias primas específicas, en particular metales especiales para aplicaciones sostenibles y alta tecnología.

A la luz de todas estas evidencias, es necesario mejorar la eficiencia y el rendimiento en las cadenas de producción y reciclaje para reducir el consumo neto per cápita y conservar los recursos a medida que aumenta la población mundial. Wellmer (2022) menciona que, en cuanto al reciclaje de minerales, la tasa de recolección se aleja del 100 %, pues algunos metales se utilizan en forma muy dispersa, lo que hace que la recuperación y el reciclaje sean poco prácticos. Estas pérdidas de metal en los procesos de reciclado dependen de su naturaleza, lo que explica que algunos metales sean más críticos que otros y que su sustitución en el mercado en un futuro sea más complicada (Charpentier Poncelet *et al.*, 2022). Como opciones al reciclaje, Botelho Junior *et al.* (2021), proponen la "minería urbana", que refiere a un conjunto de procesos y actividades relacionados con la producción de materias primas secundarias a partir de los desechos sólidos urbanos. Por su parte, Gaustad *et al.* (2018) identifican como estrategia para reducir el riesgo de suministro de materiales críticos la diversificación de proveedores, buscando fuentes alternativas de materiales críticos. En ello también, se enmarca el trabajo de Can Sener *et al.* (2021), quienes analizan la obtención de metales críticos desde fuentes acuosas, buscando aprovechar este origen alternativo de materiales, en lugar de depender exclusivamente de la minería de extracción de medios sólidos.

Por otro lado, la criticidad de los materiales se encuentra estrechamente ligada a su cuantificación (Reis *et al.*, 2021; André y Ljunggren, 2021). Al respecto, existe una crítica transversal sobre los métodos que se utilizan actualmente para esta cuantificación, señalando, por ejemplo, errores en la obtención de los valores extremos de leyes minerales (Dutaut y Marcotte, 2021); una incertidumbre en las estimaciones frente a la presencia de factores técnicos y humanos (Sebutsoe y Musingwini, 2017) y la falta de consideración del dinamismo de las características sociales, técnicas y económicas, incluyendo parámetros cambiantes de oferta y demanda (Ioannidou *et al.*, 2019). Incluso, West (2020) señala que las estimaciones de los recursos globales extraíbles (EGR) de metales realizadas con las metodologías actuales son tan inciertas que generalmente las hacen inadecuadas para guiar la política con respecto al agotamiento de los recursos. No obstante, su evaluación es particularmente importante para las economías basadas en los recursos (Ponomarenko *et al.*, 2021), por lo que existe un consenso en que se deben mejorar y optimizar los métodos de estimación (Hosseini *et al.*, 2017; Orynassar y Madani, 2021; Pietrzak y Palcerzak, 2021), así como mejorar los objetivos y alcances de los estudios y seleccionar los indicadores adecuados para proporcionarles mayor calidad y utilidad (Schrijvers *et al.*, 2020).

¹ Con la finalidad de sintetizar información respecto a los minerales críticos considerados en distintas zonas del mundo, se elaboró la tabla 2 de minerales críticos de acuerdo con lo establecido por EE. UU., la U.E. y Australia.

TABLA 2
Materiales críticos

Mineral	Estados Unidos	Unión Europea	Australia
Aluminio	X	X	
Antimonio	X	X	X
Arsénico	X		
Berilio	X	X	
Bismuto	X	X	
Boro		X	
Cesio	X		
Circonio	X		
Cobalto	X	X	X
Cromo (Cr)	X		
Estroncio	X	X	
Fósforo		X	
Galio	X	X	X
Germanio	X	X	X
Hafnio	X	X	
Helio	X		
Litio	X	X	X
Magnesio	X	X	
Manganeso	X		
Niobio	X	X	X
Potasio	X		
Renio	X		X
Silicio		X	
Tantalio	X	X	
Telurio	X		
Titanio	X	X	
Uranio	X		
Vanadio	X	X	
Iridio	X	X	X
Osmio	X	X	X
Paladio	X	X	X
Platino	X	X	X
Rodio	X	X	X
Rutenio	X	X	X
Cerio	X	X	X
Disprocio	X	X	X
Erbio	X	X	X
Europio	X	X	X
Gadolinio	X	X	X
Holmio	X	X	X
Iterbio	X	X	X
Lantano	X	X	X
Lutecio	X	X	X
Neodimio	X	X	X
Praseodimio	X	X	X
Samarario	X	X	X
Terbio	X	X	X
Tulio	X	X	X

Fuente: Sarker et al. (2022); Babbitt et al. (2021)

Legislación y normativa

Los impactos ambientales derivados de la explotación y las múltiples consecuencias de la escasez de recursos se han visto favorecidas por la carencia de políticas públicas que aborden la actividad minera durante todas sus etapas. En el ámbito de la sostenibilidad, Hariyani y Mishra (2022) proponen una estrategia que contribuye a la recuperación y eliminación segura de productos, procesos y residuos de la cadena de suministro, así como la adopción de un sistema de fabricación de respuesta rápida sostenible. Por su parte, Bach *et al.* (2017) proponen el método SCARCE, una evaluación integral del uso de los recursos a nivel de país en el contexto del desarrollo sostenible que contempla la vulnerabilidad, disponibilidad, criticidad, e impactos ambientales y sociales. También, se ha indicado el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) como clave para el desarrollo de la industria de minerales críticos en la justicia procesal, pues el aumento de los requisitos reduce el perfil de riesgo de los proyectos para todas las partes interesadas (Heffron, 2020). El problema es que estas medidas no se han implementado en muchos de los países proveedores, pues se observa una desconexión entre las políticas del sector minero y el deseo de lograr un desarrollo sostenible en estos países ricos en recursos minerales (Moomen *et al.*, 2019). Además, algunos de los países con altas concentraciones de recursos suelen tener bajo alcance de gobernanza e inestabilidad política (Schellens y Gisladottir, 2018). No obstante, hay ejemplos como Rusia, que firmó un acuerdo de cooperación cuyo objetivo es favorecer la creación de un entorno económico y legal que permita tanto, aumentar su competitividad, como desarrollar la esfera social y el principio de conformidad con la naturaleza (Zhernov *et al.*, 2020). De igual forma, el desarrollo verde ha alcanzado consenso global (Wang *et al.*, 2021), por lo que muchos países han tomado medidas para lograr un crecimiento de mayor calidad, más eficiente, más justo y sostenible, lo cual es esencial para el éxito de programas sustentables locales (Geipel, 2017).

Efectos en el desarrollo tecnológico

Debido al crecimiento de la población y del producto interno bruto per cápita, existe mayor demanda de tecnología y, consecuentemente, un mayor uso de metales (Henckens, 2021a). Esto también se vio potenciado por la pandemia, donde los dispositivos electrónicos adquirieron relevancia y se incrementó notablemente su consumo (Zanoletti *et al.*, 2021), lo que es preocupante considerando la criticidad de ciertos elementos. Por ejemplo, el galio, un mineral que se utiliza para la electrónica de consumo y aplicaciones contemporáneas de energía renovable, vive una situación de incertidumbre que está aumentando debido a la escasez de reservas (Eheliyagoda *et al.*, 2019). Lo mismo ocurre con las tierras raras, cuya demanda sufrirá un continuo incremento debido al aumento de la fabricación de tecnologías emergentes más ecológicas (Nam *et al.*, 2017; Zou *et al.*, 2022); con el níquel en China, cuyas reservas son limitadas y se espera que la demanda supere la producción nacional en el futuro (Zeng *et al.*, 2018) y con el cobre, elemento fundamental en la transición energética (Seck *et al.*, 2020). Por esta razón, Christmann y Lefebvre (2022) mencionan que es necesaria la creación de políticas que regulen la disponibilidad y precio de los minerales y metales, pues estas ventas desde el 2013 no compensan de manera justa la pérdida de riqueza mineral (Palacios *et al.*, 2018) y el sistema económico puede colapsar si el aumento exponencial del consumo no se equilibra con la disponibilidad de recursos (Mateus y Martins, 2019).

Karali y Shah (2022) analizan los desafíos y las posibles soluciones para reforzar el suministro de materias primas críticas (CRM) para tecnologías bajas en carbono a través de estrategias de economía circular, lo que podría satisfacer una parte significativa de esta demanda para 2050 y contribuir al desarrollo tecnológico. Otros estudios mencionan que el progreso tecnológico y la calidad de vida dependen del acceso a las materias primas, vinculadas a tecnologías limpias (Lewicka *et al.*, 2021; Castillo y Eggert, 2020; Hofmann *et al.*, 2018). Por ello, se deben desarrollar métodos sostenibles y eficientes para la extracción y utilización de los recursos minerales, incorporando la investigación para diversificar conocimientos respecto a materiales y tecnologías alternativas que puedan reemplazar minerales escasos (Theler *et al.*, 2020) además de innovar en estrategias de recuperación (Sarker *et al.*, 2022). Finalmente, se propone aspirar a una sinergia entre el ciclo natural y los procesos industriales, buscando un equilibrio al integrar procesos tecnológicos en el ciclo natural de la biósfera (Trubetskoi *et al.*, 2020).

Efectos en el desarrollo tecnológico

La escasez de recursos minerales se ha convertido en un problema creciente en el mundo actual, y sus principales factores están estrechamente ligados al aumento en la demanda de materiales y la falta de políticas efectivas que regulen la extracción minera e incentiven la reutilización de recursos (Moomen *et al.*, 2019; Nassani *et al.*, 2021). A medida que la tecnología avanza e integra procesos más limpios, aumenta la necesidad de algunos recursos cuya explotación se realiza frecuentemente sin una supervisión que garantice su sostenibilidad, ni se haga cargo de la degradación ambiental. La cuantificación de la criticidad de estos materiales es un punto clave para la estimación a futuro y la instalación de procesos sostenibles.

Los estudios analizados indican que es urgente cambiar la forma en que hacemos uso de los recursos minerales para minimizar los impactos negativos, mantener su disponibilidad y avanzar hacia un desarrollo más sostenible. Autores como Gaustad et al. (2018), Botelho Junior et al. (2021), Brewer et al. (2022) Karali y Shah (2022), han planteado la necesidad de impulsar la investigación y el desarrollo de alternativas a estos materiales, así como fomentar métodos de recuperación para reducir la presión sobre los recursos minerales críticos. Se abre una línea de investigación sobre la extracción de minerales en ambientes acuosos y poco accesibles como alternativa a la extracción sólida, el desarrollo de técnicas eficientes de reciclaje y reutilización de metales, así como el perfeccionamiento de los métodos de cuantificación y evaluación de criticidad de recursos.

REFERENCIAS

- André, H. & Ljunggren, M. (2021) Towards comprehensive assessment of mineral resource availability? Complementary roles of life cycle, life cycle sustainability and criticality assessments. *Resources, Conservation and Recycling*, 167. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105396.
- Babbitt, C.W., Althaf, S., Cruz Rios, F., Bilec, M.M. & Graedel, T.E. (2021) The role of design in circular economy solutions for critical materials. *One Earth*, 4 (3), pp. 353–362. doi: 10.1016/J.ONEEAR.2021.02.014.
- Bach, V., Finogenova, N., Berger, M., Winter, L. & Finkbeiner, M. (2017) Enhancing the assessment of critical resource use at the country level with the SCARCE method – Case study of Germany. *Resources Policy*, 53, pp. 283–299. doi: 10.1016/j.resourpol.2017.07.003.
- Botelho Junior, A.B., Stopic, S., Friedrich, B., Tenório, J.A.S. & Espinosa, D.C.R. (2021) Cobalt Recovery from Li-Ion Battery Recycling: A Critical Review. *Metals*, 11 (12), p. 1999. doi: 10.3390/met11121999.
- Brewer, A., Florek, J. & Kleitz, F. (2022) A perspective on developing solid-phase extraction technologies for industrial-scale critical materials recovery. *Green Chemistry*, 24 (7), pp. 2752–2765. doi: 10.1039/D2GC00347C.
- Can Sener, S.E., Thomas, V.M., Hogan, D.E., Maier, R.M., Carbajales-Dale, M., Barton, M.D., Karanfil, T., Crittenden, J.C. & Amy, G.L. (2021) Recovery of Critical Metals from Aqueous Sources. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9 (35), pp. 11616–11634. doi: 10.1021/acssuschemeng.1c03005.
- Castillo, E. & Eggert, R. (2020) Reconciling Diverging Views on Mineral Depletion: A Modified Cumulative Availability Curve Applied to Copper Resources. *Resources, Conservation and Recycling*, 161. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104896.
- Charpentier Poncelet, A., Helbig, C., Loubet, P., Beylot, A., Muller, S., Villeneuve, J., Laratte, B., Thorenz, A., Tuma, A. & Sonnemann, G. (2022) Losses and lifetimes of metals in the economy. *Nature Sustainability*, 5 (8), pp. 717–726. doi: 10.1038/s41893-022-00895-8.
- Christmann, P. & Lefebvre, G. (2022) Trends in global mineral and metal criticality: the need for technological foresight. *Mineral Economics*, 35 (3–4), pp. 641–652. doi: 10.1007/s13563-022-00323-5.
- Cisternas, L.A., Ordóñez, J.I., Jeldres, R.I. & Serna-Guerrero, R. (2022) Toward the Implementation of Circular Economy Strategies: An Overview of the Current Situation in Mineral Processing. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43 (6), pp. 775–797. doi: 10.1080/08827508.2021.1946690.
- Codina, L. (2018) Revisiones bibliográficas sistematizadas: Procedimientos generales y Framework para Ciencias Humanas y Sociales. *Departamento de Comunicación. Universitat Pompeu Fabra*.
- Dutaut, R.V. & Marcotte, D. (2021) A new grade-capping approach based on coarse duplicate data correlation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121 (5), pp. 193–200. doi: 10.17159/2411-9717/1379/2021.
- Eheliyagoda, D., Zeng, X., Wang, Z., Albalghiti, E. & Li, J. (2019) Forecasting the temporal stock generation and recycling potential of metals towards a sustainable future: The case of gallium in China. *Science of The Total Environment*, 689, pp. 332–340. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.413.
- Gaustad, G., Krystofik, M., Bustamante, M. & Badami, K. (2018) Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, pp. 24–33. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.08.002.

- Geipel, J. (2017) Local procurement in mining: A central component of tackling the resource curse. *The Extractive Industries and Society*, 4 (3), pp. 434–438. doi: 10.1016/j.exis.2017.07.001.
- Gomes Correia, A., Winter, M.G. & Puppala, A.J. (2016) A review of sustainable approaches in transport infrastructure geotechnics. *Transportation Geotechnics*, 7, pp. 21–28. doi: 10.1016/j.trgeo.2016.03.003.
- Grant, M.J. & Booth, A. (2009) A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26 (2), pp. 91–108. doi: 10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x.
- Hariyani, D. & Mishra, S. (2022) Drivers for the adoption of integrated sustainable green lean six sigma agile manufacturing system (ISGLSAMS) and research directions. *Cleaner Engineering and Technology*, 7. doi: 10.1016/j.clet.2022.100449.
- Heffron, R.J. (2020) The role of justice in developing critical minerals. *The Extractive Industries and Society*, 7 (3), pp. 855–863. doi: 10.1016/J.EXIS.2020.06.018.
- Henckens, M.L.C.M., van Ierland, E.C., Driessen, P.P.J. & Worrell, E. (2016) Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations. *Resources Policy*, 49, pp. 102–111. doi: 10.1016/j.resourpol.2016.04.012.
- Henckens, T. (2021a) Governance of the World's Mineral Resources. *Elsevier*. doi: 10.1016/C2020-0-01047-9.
- Henckens, T. (2021b) Scarce mineral resources: Extraction, consumption and limits of sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, 169. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105511.
- Hofmann, M., Hofmann, H., Hagelüken, C. & Hool, A. (2018) Critical raw materials: A perspective from the materials science community. *Sustainable Materials and Technologies*, 17. doi: 10.1016/j.susmat.2018.e00074.
- Hosseini, S.A., Asghari, O. & Emery, X. (2017) Direct block-support simulation of grades in multi-element deposits: application to recoverable mineral resource estimation at Sungun porphyry copper-molybdenum deposit. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117 (6), pp. 577–585. doi: 10.17159/2411-9717/2017/v117n6a8.
- Ioannidou, D., Heeren, N., Sonnemann, G. & Habert, G. (2019) The future in and of criticality assessments. *Journal of Industrial Ecology*, 23 (4), pp. 751–766. doi: 10.1111/jiec.12834.
- Karali, N. & Shah, N. (2022) Bolstering supplies of critical raw materials for low-carbon technologies through circular economy strategies. *Energy Research & Social Science*, 88. doi: 10.1016/j.erss.2022.102534.
- Khubana, T., Rootman, C. & Smith, E.E. (2022) Antecedents of Shared Value: Perceptions within the South African mining industry. *Journal of Contemporary Management*, 19 (1), pp. 132–167. doi: 10.35683/jcm21041.141.
- Lapcik, V., Kohut, O., Novak, P. & Kalocajova, A. (2018) Environmental Impacts Of Mining Of Mineral Resources. *Inzynieria Mineralna-Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, (2), pp. 253–263.
- Lee, J., Bazilian, M., Sovacool, B. & Greene, S. (2020) Responsible or reckless? A critical review of the environmental and climate assessments of mineral supply chains. *Environmental Research Letters*, 15 (10). doi: 10.1088/1748-9326/ab9f8c.
- Lewicka, E., Guzik, K. & Galos, K. (2021) On the Possibilities of Critical Raw Materials Production from the EU's Primary Sources. *Resources*, 10 (5), p. 50. doi: 10.3390/resources10050050.
- Li, Y., Zhong, Q., Wang, Y., Jetashree, Wang, H., Li, H. & Liang, S. (2022) Scarcity-weighted metal extraction enabled by primary suppliers through global supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133435. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133435.
- Mateus, A. & Martins, L. (2019) Challenges and opportunities for a successful mining industry in the future. *Boletín Geológico y Minero*, 130 (1), pp. 99–121. doi: 10.21701/bolgeomin.130.1.007.
- Moomen, A.W., Jensen, D., Lacroix, P. & Bertolotto, M. (2019) Assessing the policy adoption and impact of geoinformation for enhancing sustainable mining in Africa. *Journal of Cleaner Production*, 241. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118361.

- Mudd, G.M., Jowitt, S.M. & Werner, T.T. (2018) Global platinum group element resources, reserves and mining – A critical assessment. *Science of The Total Environment*, 622–623, pp. 614–625. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.350.
- Nam, S.Y., Thriveni, T. & Whan, A.J. (2017) Climate change mitigation and sustainability: Global trend of critical rare earth elements recovery from waste sources. In: *14th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology*, EARTH2017. 26 September, Sapporo, The Mining and Material Processing Institute of Japan.
- Nassani, A.A., Aldakhil, A.M. & Zaman, K. (2021) Ecological footprints jeopardy for mineral resource extraction: Efficient use of energy, financial development and insurance services to conserve natural resources. *Resources Policy*, 74, 102271. doi: 10.1016/J.RESOURPOL.2021.102271.
- Nickless, E. & Yakovleva, N. (2022) Resourcing Future Generations Requires a New Approach to Material Stewardship. *Resources*, 11 (8), p. 78. doi: 10.3390/resources11080078.
- Orynbassar, D. & Madani, N. (2021) Mineral resource modelling using an unequal sampling pattern: An improved practice based on factorization techniques. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121 (8), pp. 1–11. doi: 10.17159/2411-9717/1332/2021.
- Palacios, J.L., Calvo, G., Valero, A. & Valero, A. (2018) The cost of mineral depletion in Latin America: An exergoecology view. *Resources Policy*, 59, pp. 117–124. doi: 10.1016/j.resourpol.2018.06.007.
- Pietrzak, M.B. & Balcerzak, A.P. (2021) Selection of the set of areal units for economic regional research on the land use: a proposal for Aggregation Problem solution. *Acta Montanistica Slovaca*, 26 (2), pp. 222–234. doi: 10.46544/AMS.v26i2.04.
- Ponomarenko, T., Nevskaya, M. & Jonek-Kowalska, I. (2021) Mineral Resource Depletion Assessment: Alternatives, Problems, Results. *Sustainability*, 13 (2), p. 862. doi: 10.3390/su13020862.
- Prior, T., Giurco, D., Mudd, G., Mason, L. & Behrisch, J. (2012) Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. *Global Environmental Change*, 22 (3), pp. 577–587. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.08.009.
- Reis, C., Arroyo, C., Curi, A. & Zangrandi, M. (2021) Impact of bulk density estimation in mine planning. *Mining Technology*, 130 (1), pp. 60–65. doi: 10.1080/25726668.2021.1876481.
- Rybak, J., Gorbatyuk, S.M., Bujanovna-Syuryun, K.Ch., Khairutdinov, A.M., Tyulyaeva, Yu.S. & Makarov, P.S. (2021) Utilization of Mineral Waste: A Method for Expanding the Mineral Resource Base of a Mining and Smelting Company. *Metallurgist*, 64 (9–10), pp. 851–861. doi: 10.1007/s11015-021-01065-5.
- Sarker, S.K., Haque, N., Bhuiyan, M., Bruckard, W. & Pramanik, B.K. (2022) Recovery of strategically important critical minerals from mine tailings. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10 (3). doi: 10.1016/j.jece.2022.107622.
- Sauer, P.C. & Seuring, S. (2017) Sustainable supply chain management for minerals. *Journal of Cleaner Production*, 151, pp. 235–249. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.049.
- Schellens, M.K. & Gisladdottir, J. (2018) Critical Natural Resources: Challenging the Current Discourse and Proposal for a Holistic Definition. *Resources*, 7 (4), p. 79. doi: 10.3390/resources7040079.
- Schodde, R. (2018) Where, what, when and who? Highlighting key global exploration opportunities, trends and a perspective on the cycle of mineral exploration. In: *International Mining and Resources (IMARC) Conference*. October 2018 Melbourne, Victoria. p.
- Schrijvers, D., Hool, A., Blengini, G.A., Chen, W.-Q., Dewulf, J., et al. (2020) A review of methods and data to determine raw material criticality. *Resources, Conservation and Recycling*, 155. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104617.
- Sebutsoe, T.C. & Musingwini, C. (2017) Characterizing a mining production system for decision-making purposes in a platinum mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117 (2), pp. 199–206. doi: 10.17159/2411-9717/2017/v117n2a11.

- Seck, G.S., Hache, E., Bonnet, C., Simoën, M. & Carcanague, S. (2020) Copper at the crossroads: Assessment of the interactions between low-carbon energy transition and supply limitations. *Resources, Conservation and Recycling*, 163, 105072. doi: 10.1016/J.RESCONREC.2020.105072.
- Servicio Geológico de Estados Unidos (2018) *Final List of Critical Minerals 2018*. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2018-05-18/pdf/2018-10667.pdf>
- Theler, B., Kauwe, S.K. & Sparks, T.D. (2020) Materials Abundance, Price, and Availability Data from the Years 1998 to 2015. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 9 (1), pp. 144–150. doi: 10.1007/s40192-020-00173-5.
- Tilton, J.E. (2003) Assessing the Threat of Mineral Depletion. *Minerals & Energy - Raw Materials Report*, 18 (1), pp. 33–42. doi: 10.1080/14041040310008383.
- Trubetskoi, K.N., Zakharov, V.N. & Galchenko, Yu.P. (2020) Naturelike and Convergent Technologies for Developing Lithosphere Mineral Resources. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 90 (3), pp. 332–337. doi: 10.1134/S1019331620030065.
- Tunsu, C., Menard, Y., Eriksen, D.O., Ekberg, C. & Petranikova, M. (2019) Recovery of critical materials from mine tailings: A comparative study of the solvent extraction of rare earths using acidic, solvating and mixed extractant systems. *Journal of Cleaner Production*, 218, pp. 425–437. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.312.
- Wang, Y., Chen, H., Long, R., Liu, B., Jiang, S., Yang, X. & Yang, M. (2021) Evaluating green development level of mineral resource-listed companies: Based on a “dark green” assessment framework. *Resources Policy*, 71. doi: 10.1016/j.resourpol.2021.102012.
- Weiser, A., Bickel, M.W., Kümmerer, K. & Lang, D.J. (2020) Towards a more sustainable metal use – Lessons learned from national strategy documents. *Resources Policy*, 68, 101770. doi: 10.1016/j.resourpol.2020.101770.
- Wellmer, F.W. (2022) What we have learned from the past and how we should look forward. *Mineral Economics*, 35 (3–4), pp. 765–795. doi: 10.1007/s13563-021-00296-x.
- West, J. (2020) Extractable global resources and the future availability of metal stocks: “Known Unknowns” for the foreseeable future. *Resources Policy*, 65. doi: 10.1016/j.resourpol.2019.101574.
- Zanoletti, A., Cornelio, A. & Bontempi, E. (2021) A post-pandemic sustainable scenario: What actions can be pursued to increase the raw materials availability? *Environmental Research*, 202. doi: 10.1016/j.envres.2021.111681.
- Zeng, X. (2023) Win-Win: Anthropogenic circularity for metal criticality and carbon neutrality. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 17 (2). doi: 10.1007/s11783-023-1623-2.
- Zeng, X., Xu, M. & Li, J. (2018) Examining the sustainability of China's nickel supply: 1950–2050. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, pp. 188–193. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.08.011.
- Zhernov, E., Nekhoda, E. & Petrova, M. (2020) Economic Transformation Impact on the Modernization of a Mineral Resource Industry Cluster. In: S. Vöth, M. Cehlár, J. Janocko, M. Straka, D. Nuray, D. Szurgacz, M. Petrova, Y. Tan, & A. Abay (eds.). *Vth International Innovative Mining Symposium*. 18 June 2020 E3S Web Conf. p. doi: 10.1051/e3sconf/202017404003.
- Zou, B., Poncin, S. & Bertinelli, L. (2022) The U.S.-China Supply Competition for Rare Earth Elements: a Dynamic Game View. *Environmental Modeling & Assessment*, 27 (5), pp. 883–900. doi: 10.1007/s10666-022-09819-4.