



Boletín de **VIGILANCIA TECNOLÓGICA**



INDUSTRIA MINERA



CRÉDITOS

Editado por:

© Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Concytec)
Av. del Aire 485, San Borja - Lima - Perú
Teléfono: (51-1) 399-0030
www.concytec.gob.pe

Edición Digital

2025

Presidente del Concytec:

Sixto Enrique Sánchez Calderón

Equipo responsable del estudio:

Directora de Investigación y Estudios (DIE) - Concytec
Agnes Franco Temple
Analista DIE
Julia Isabel Cárdenas Velásquez



ÍNDICE

Presentación.....	5
El sector minero en el mundo.....	6
El sector minero en el Perú	7
1. Artículos científicos	8
1.1. Producción científica a nivel global.....	10
1.1.1. Red de coocurrencia	11
1.1.2. Nube de palabras	14
1.1.3. Países líderes	14
1.1.4. Artículos científicos	16
1.2. Producción científica a nivel de Perú.....	35
1.2.1. Red de coocurrencia	35
1.2.2. Nube de palabras	37
1.2.3. Artículos científicos	37
2. Patentes	42
2.1. Tabla de agrupación de patentes	45
2.2. Descripción de patentes	46
3. Proyectos.....	55
Conclusiones	61
Bibliografía.....	63
Glosario.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Participación minera en el PBI, 2010-2020.....	7
Figura 2. Nube de palabras.....	9
Figura 3. Red de coocurrencia de términos de los artículos de Scopus	12
Figura 4. Nube de palabras	14
Figura 5. Países líderes de investigación y producción de documentos.....	15
Figura 6. Capas autoorganizadas de nanotubos de TiO ₂ como fotocatalizadores de alta eficacia.....	19
Figura 7. Contribuciones energéticas en varios ecosistemas de aguas profundas.....	21
Figura 8. Explotación de recursos minerales en aguas profundas	23
Figura 9. Resumen del estudio del sitio.....	25
Figura 10. Estructura del modelo de suministro de carbón	26
Figura 11. Diseño de la estructura del módulo.....	28
Figura 12. Localización de los pozos N° 3 y N° 4 en la mina	29
Figura 13. Zona de drenaje de las minas de carbón de la India (Assam) (sin escala)	31
Figura 14. Revoluciones industriales	33
Figura 15. Acciones priorizadas en la jerarquía de mitigación	34



Figura 16. Red de coocurrencia de términos en la producción científica relacionados a Perú	36
Figura 17. Nube de palabras 40 elementos de VOSviewer	37
Figura 18. Disposición de relleno de pasta cementada en una mina subterránea en Perú	39
Figura 19. Micrografías por microscopía óptica	40
Figura 20. Factores de la demanda	41
Figura 21. Keywords de búsqueda de patentes en Lens	43
Figura 22. Documentos de patentes por jurisdicción	44
Figura 23. Flujograma de un sistema sustentable	47
Figura 24. Casco vista frontal	48
Figura 25. Dispositivo para desalinizar el agua	49
Figura 26. Sistema informático para monitorear y/o dirigir operaciones de las máquinas	51
Figura 27. Diagrama esquemático de pozos de entrenamiento y pozos objetivo.....	52
Figura 28. Vista esquemática de una mina a cielo abierto.....	54
Figura 29. Tecnología de exploración innovadora.....	57
Figura 30. Visión 3D y rayos X para una minería sostenible.....	58
Figura 31. Transformación verde y digital de la minería	59
Figura 32. Figura conceptual de Goldeneye.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Construcción de palabras claves	10
Tabla 2. Agrupación de artículos científicos.....	16
Tabla 3. Agrupación de artículos científicos relacionados al Perú.....	38
Tabla 4. Agrupación de patentes	454



PRESENTACIÓN

La minería constituye uno de los sectores estratégicos más importantes para la economía peruana, no solo por su notable contribución al Producto Bruto Interno, sino también por su capacidad para dinamizar otras actividades productivas. En este contexto, la ciencia, tecnología e innovación se presentan como elementos claves para abordar los desafíos estructurales del sector y fortalecer la competitividad.

El Boletín de Vigilancia Tecnológica ha sido diseñado como una herramienta práctica para brindar información sobre artículos científicos, patentes y proyectos de investigación relacionados a la minería. En ese sentido, busca acercar el conocimiento a los actores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SINACTI) que abarca las entidades de la Administración Pública, empresas y academia.

En el presente boletín se explorarán los principales avances tecnológicos y las oportunidades de mejora en los procesos extractivos, la gestión ambiental, la automatización, la seguridad y el uso eficiente de los recursos, con la finalidad de coadyuvar a una gestión más eficiente y sostenible en este rubro.



El sector minero en el mundo

A nivel global, World Economic Forum (WEF, 2024) sostiene que el sector minero ha sido fundamental en el progreso humano a lo largo de la historia en industrias clave impulsando así el desarrollo tecnológico y económico. Además, el crecimiento demográfico y la creciente necesidad de minerales y metales, impulsada por tecnologías como los vehículos eléctricos, han elevado la demanda de estos recursos.

Según el Banco Mundial (2013) argumenta que, muchos países señalan que la minería es reconocida como un impulsor fundamental del crecimiento económico. Hay evidencia que aquellos países que implementan regulaciones mineras modernas y crean un entorno favorable pueden atraer inversiones del sector privado en exploración y operaciones mineras, lo que contribuye a un aumento de los ingresos fiscales, las exportaciones, las oportunidades laborales y el desarrollo de infraestructuras, especialmente en áreas rurales, así como en la transferencia de tecnología.

Sin embargo, la extracción de recursos minerales conlleva riesgos de daños ambientales significativos. Por lo tanto, es crucial que los gobiernos consideren cuidadosamente los aspectos sociales y ambientales, comprometiéndose con la buena gobernanza y la transparencia. Los países, las comunidades locales y las empresas enfrentan desafíos complejos al buscar un equilibrio entre las oportunidades económicas y los riesgos ambientales, así como sociales relacionados con la explotación de los recursos minerales.



El sector minero en el Perú

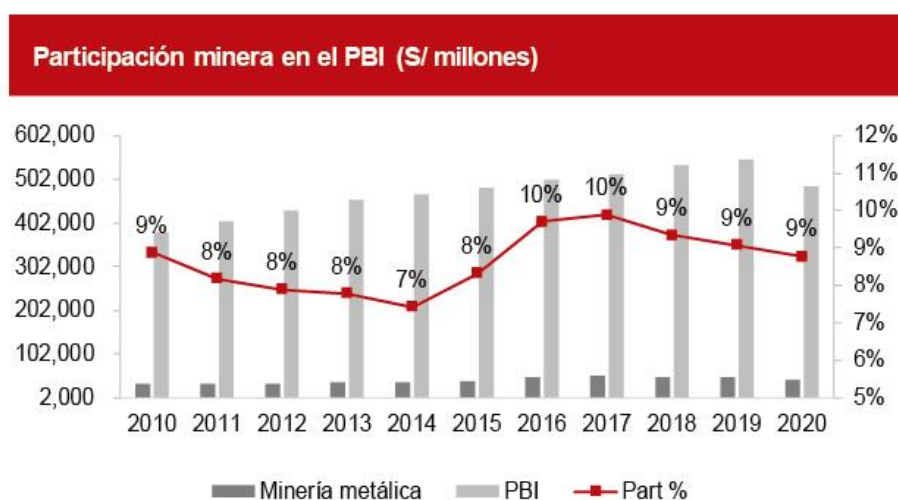
En Perú, Comex Perú (2021) indica que, durante la última década, la minería ha desempeñado un papel crucial en el desarrollo económico de nuestro país. Más allá de la generación de empleo y la atracción de inversiones, este sector ha fortalecido nuestros lazos comerciales a nivel internacional y ha contribuido significativamente a través de impuestos, canon y regalías, los cuales han sido redistribuidos para beneficio de diversas regiones del país.

Asimismo, menciona que según datos del Banco Central de Reserva del Perú (BCRP), en el año 2020, el Producto Bruto Interno (PBI) del sector minero alcanzó los S/ 42,663 millones, representando una disminución del 13.8% en comparación con el año anterior. A pesar de este descenso, la minería contribuyó con el 9% del PBI total, como se puede apreciar en la figura 1.

7

Figura 1

Participación minera en el PBI, 2010-2020



Fuente: BCRP. Elaboración: ComexPerú.

Nota. El gráfico representa el Producto Bruto Interno (PBI), de la participación minera en millones de soles. Tomado de ComexPerú, 2025. (<https://www.comexperu.org.pe/>)



1. Artículos científicos

A partir de esos datos, se realizó un procedimiento mediante la herramienta Orange, cuya representación se muestra en la figura 2, la cual coadyuvó a identificar las palabras claves más representativas relacionadas con el tema, sirviendo como base para construir la ecuación de búsqueda.

[illegible]

Nota. Imagen que muestra la frecuencia del uso de palabras clave en los artículos de Scopus período 2003-2024, aplicando la herramienta Orange. Adaptado de University of Ljubljana - *Orange Data Mining*, 2025, (<https://orangedatamining.com/>).



1.1. Producción científica a nivel global

El objetivo de la búsqueda es reportar los avances científicos y tecnológicos en el desarrollo de la industria minería de manera sostenible. Asimismo, información relacionada a energía limpia que cuide el medio ambiente, lo cual puede visualizarse en la tabla 1, con sus traducciones al inglés y sus sinónimos correspondientes:

Tabla 1

Construcción de palabras claves

<i>Término en español</i>	<i>Término en inglés</i>	<i>Sinónimo</i>
<i>Minería</i>	<i>Mining</i>	<i>Mine</i>
<i>Industria</i>	<i>Industry</i>	<i>Production</i>
<i>Sostenible</i>	<i>Sustainable</i>	<i>Sustainable</i>
<i>Energía limpia</i>	<i>Clean energy</i>	<i>Green energy</i>
<i>Medio ambiente</i>	<i>Environmental</i>	<i>Ecosystem</i>

Esto contribuye a aclarar y especificar términos claves que delimitan el enfoque hacia la intersección entre minería, tecnología e innovación sostenible. Finalmente, la ecuación examinada es la siguiente: ***“(mining AND industry) AND (tech* OR innovation) AND (sustainable OR environment OR “clean energy”)***”. Esto consiste en la unión de las palabras clave mediante operadores booleanos. La palabra “Tech” tiene el atributo especial de asterisco (*) para buscar la raíz de la palabra clave.



1.1.1. Red de coocurrencia

La red de coocurrencia elaborada en VOSviewer mediante el análisis de 140 ítems de 1206 artículos de acceso abierto de la fuente *Scopus* comprendidos entre los años 2003 y 2024, según la figura 3. Este proceso condujo a la formación de 4 clústeres temáticos y para dar una visión detallada de estos clústeres, mencionamos elementos importantes de cada uno.

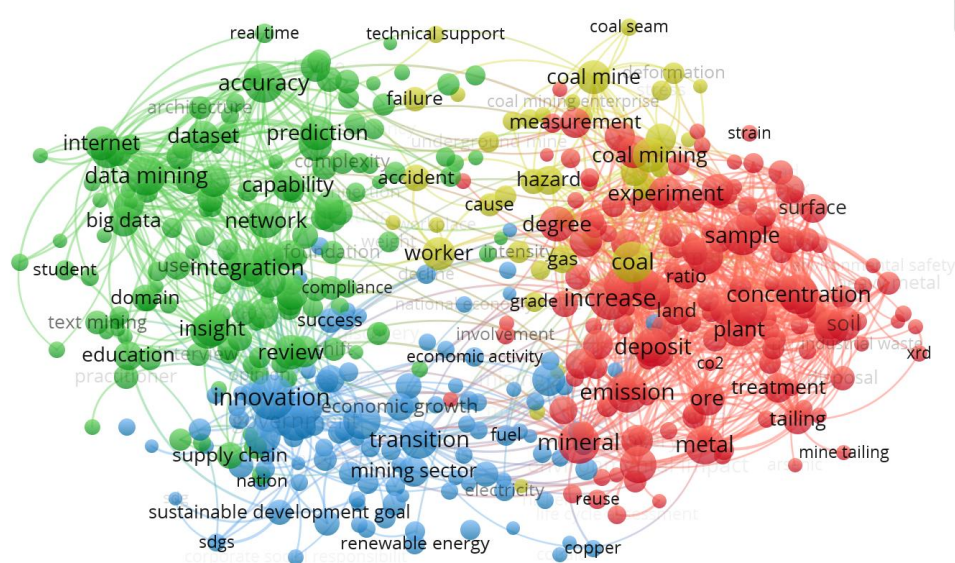
El primer clúster identificado por el color rojo, agrupa investigaciones centradas en la contaminación del aire, del suelo y del agua: así como la exposición a metales pesados y residuos industriales. Asimismo, conceptos como pollution, groundwater, mining waste y human health revelan el interés por mitigar los efectos negativos de las actividades mineras a través de soluciones como la remediación, el reciclaje y la recuperación de materiales. Este grupo de estudios también destaca la importancia de la caracterización química, el análisis de ciclo de vida, el uso eficiente de recursos naturales y la implementación de tecnologías para el tratamiento de residuos y la restauración de ecosistemas.

El segundo clúster de color verde, gira en torno al uso de herramientas como inteligencia artificial, minería de datos, IoT, blockchain y Machine Learning. Asimismo, temas como digital transformation, data mining, automation y technological advancement destacan el rol de la automatización y la conectividad para mejorar la toma de decisiones, la eficiencia operativa y la seguridad en los procesos. Esta agrupación también resalta la integración de tecnologías en contextos como la educación, la salud, la gestión pública y la industria manufacturera, con una fuerte vinculación a la cuarta revolución industrial.

El tercer clúster de color azul, reúne términos relacionados con el cambio climático, las energías renovables, la economía circular y la responsabilidad social empresarial. Asimismo, conceptos como climate change, circular economy, sustainable mining y governance reflejan un giro hacia prácticas más responsables, así como políticas públicas, iniciativas corporativas y tendencias internacionales, así como la participación de comunidades locales en la toma de decisiones sobre los recursos naturales.

El cuarto clúster de color amarillo, está enfocado en la industria del carbón, especialmente en los riesgos asociados al trabajo subterráneo, las emisiones de gases como el metano, los accidentes laborales y los daños ecológicos. Asimismo, palabras como coal mining, accident, methane, occupational health y risk assessment subrayan la necesidad de fortalecer las medidas de prevención, seguridad y salud ocupacional, así como de desarrollar tecnologías que minimicen los efectos negativos de esta industria sobre el entorno y los trabajadores.

Figura 3
Red de coocurrencia de términos de los artículos de Scopus



Nota. Elaboración propia con herramienta VOSviewer, 2025, (<https://www.vosviewer.com/>).



En la presente red de coocurrencia puede observarse una variedad de clústeres que abordan distintos aspectos de la industria minera y sus interacciones con la tecnología, la sostenibilidad y la gestión ambiental. Esto refleja la amplitud de temas de relevancia en la investigación, desde la mitigación de riesgos ambientales, manejo sostenible de los recursos y aplicación de tecnologías emergentes en el procesamiento de minerales hasta la transición hacia prácticas responsables de economía circular. Por ello, la identificación de los clústeres proporciona una visión estructurada y focalizada sobre áreas claves de investigación en minería, destacando su impacto en la salud pública, sostenibilidad industrial y el desarrollo económico, al tiempo que se promueven prácticas responsables y adaptaciones tecnológicas para enfrentar los desafíos contemporáneos.

1.1.2. Nube de palabras

Los cinco temas relevantes de la nube de palabras, según la figura 4, son los siguientes: minería, agua, industria, ambiente y energía.

Figura 4
Nube de palabras



Nota. Elaboración propia, imagen que muestra la frecuencia del uso de palabras clave en los artículos de Scopus período 2003-2024, aplicando la herramienta Orange. Adaptado de University of Ljubljana - Orange Data Mining, 2025, (<https://orangedatamining.com/>).

1.1.3. Países líderes

En el ámbito de la investigación y producción de artículos de acceso libre, según *Scopus*, y puede apreciarse en la figura 5, China se destaca como líder con 276 documentos. Respecto al documento más citado de acceso libre en China, está relacionado con la gestión de la contaminación acuática, éste cuenta con 199 citaciones. En segundo lugar, se encuentra Rusia con 148 documentos, y su documento más citado de acceso libre, está relacionado con aumento de producción de metano a partir de colectores de carbón y gas no convencionales,

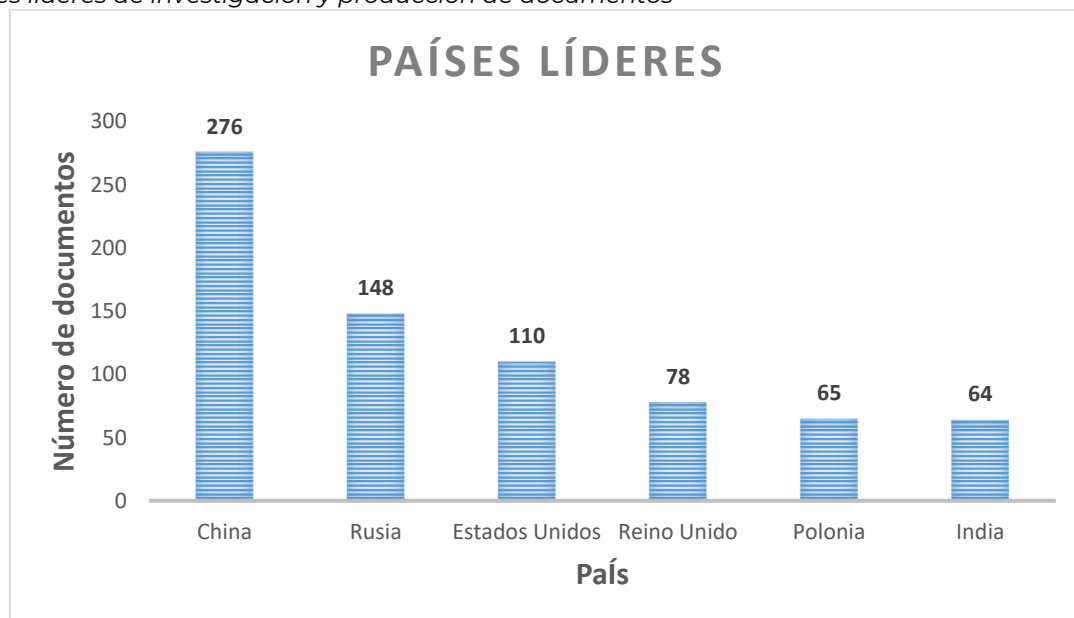


tiene 71 citaciones. Por su parte, Estados Unidos ocupa el tercer lugar con 110 documentos; su documento más citado de acceso libre, enfocado en la minería en aguas profundas, cuenta con 645 citaciones.

En cuarto lugar, está Reino Unido que cuenta con 78 documentos, y entre sus documentos más citados de acceso libre, está relacionado con la conservación y gestión sostenible, tiene 669 citaciones. A continuación, Polonia, tiene 65 documentos y su documento más citado de acceso libre está relacionado con la gestión ambiental, acumulando 70 citaciones. Finalmente, India presenta 64 documentos, con su documento más citado de acceso libre, relacionado con la caracterización nanomineralógica del carbón, teniendo 95 citaciones.

Figura 5

Países líderes de investigación y producción de documentos



Nota. Elaboración propia con información obtenida de Scopus, 2025, (<https://www.scopus.com>).



1.1.4. Artículos científicos

En esta sección se encuentran los artículos científicos que destacaron con mayor número de citas del año 2003 al 2024 y son de libre acceso, entre otros, los cuales pueden visualizarse en la tabla 2 como también el objetivo de cada uno de ellos, estos objetivos detallan los enfoques específicos de cada artículo científico y proporcionan una visión clara de los temas de investigación abordados por cada uno, agrupándolos en las etapas de la industria minera, “exploración”, “explotación”, “procesamiento” y “cierre”.

Tabla 2

Agrupación de artículos científicos

Agrupación	Artículo científico	Objetivo
Exploración	Desafíos y oportunidades para gestionar la contaminación acuática por mercurio en paisajes alterados.	Sintetizar la comprensión científica de cómo el ciclo de Hg en el entorno acuático se ve influenciado por perturbaciones del paisaje a escala local.
	Profundo, diverso y definitivamente diferente: Atributos únicos del ecosistema más grande del mundo.	El objetivo es analizar las características únicas, biodiversidad, patrones biogeográficos y amenazas del océano profundo, destacando la necesidad de estrategias sostenibles para su conservación y gestión
	El hombre y el último gran desierto: el impacto humano en las profundidades marinas.	Analizar los efectos de la actividad humana en los ecosistemas de las profundidades marinas, con énfasis en la exploración y extracción de recursos
Explotación	Evaluación y predicción de vibraciones inducidas por explosiones en una mina a cielo abierto utilizando redes neuronales artificiales: un estudio de caso en Vietnam.	Desarrollar y evaluar modelos de redes neuronales artificiales para predecir con precisión la vibración del terreno inducida por explosiones en minas a cielo abierto, con el fin de minimizar sus impactos negativos en el medio ambiente y la población circundante.



Agrupación	Artículo científico	Objetivo
	El futuro del suministro de carbón en China basado en el desarrollo de energía no fósil y estrategias de precios del carbono.	Optimizar el sistema de suministro de carbón en China hasta 2050 mediante un modelo multirregional que evalúe el impacto del desarrollo de tecnologías limpias, combustibles no fósiles y precios del carbono en la regulación del suministro y la reducción de emisiones de GEI.
	Novedoso sistema de seguimiento y localización de mineros de carbón en tiempo real basado en redes de sensores autoorganizadas.	Proponer un sistema prototipo para la localización y seguimiento de mineros de carbón en tiempo real basado en redes de sensores autoorganizadas.
	Justificación de los parámetros de perforación de pozos de drenaje socavados para aumentar la producción de metano a partir de colectores de carbón y gas no convencionales.	Optimizar los parámetros de perforación para mejorar la producción de metano en colectores de carbón y gas no convencionales. .
Procesamiento y Cierre	Evaluación ambiental y caracterización nano-mineralógica del carbón, el material estéril y los sedimentos de drenajes ácidos de la minería del carbón en India.	Evaluar los impactos ambientales de la minería de carbón con alto contenido de azufre en el noreste de India mediante análisis químicos y nano-minerales, con el propósito de proponer tecnologías de gestión ambiental para restaurar las áreas afectadas.
	Innovación en la industria minera: tendencias tecnológicas y un estudio de caso de los desafíos de la innovación disruptiva.	Analizar la importancia de la innovación para la industria minera y describir los mecanismos mediante los cuales se lleva a cabo.
	Un marco procedimental para la gestión ambiental robusta de proyectos de minería en aguas profundas utilizando un modelo conceptual.	Analizar la importancia de la innovación para la industria minera y describir los mecanismos mediante los cuales se lleva a cabo.

Nota. Adaptado de la información obtenida de Scopus, 2025, (<https://www.scopus.com>).



A continuación, son presentados los nueve (09) artículos de la tabla 2:

a. Desafíos y oportunidades en la gestión de la contaminación acuática por mercurio en paisajes alterados

En este trabajo, Hsu-Kim et al. (2018) mencionan que, analizan como las perturbaciones naturales y antropogénicas pueden afectar el ciclo del mercurio (Hg) en el medio ambiente, destacando la preocupante movilización del Hg y la formación monometilmercurio (MeHg), una sustancia tóxica y bioacumulativa que afecta a la vida silvestre y a los humanos. Asimismo, abordan alteraciones del paisaje a escala local, como las cargas de las cuencas hidrográficas, la deforestación, la creación de embalses y humedales, la agricultura, la urbanización, la minería y la contaminación industrial.

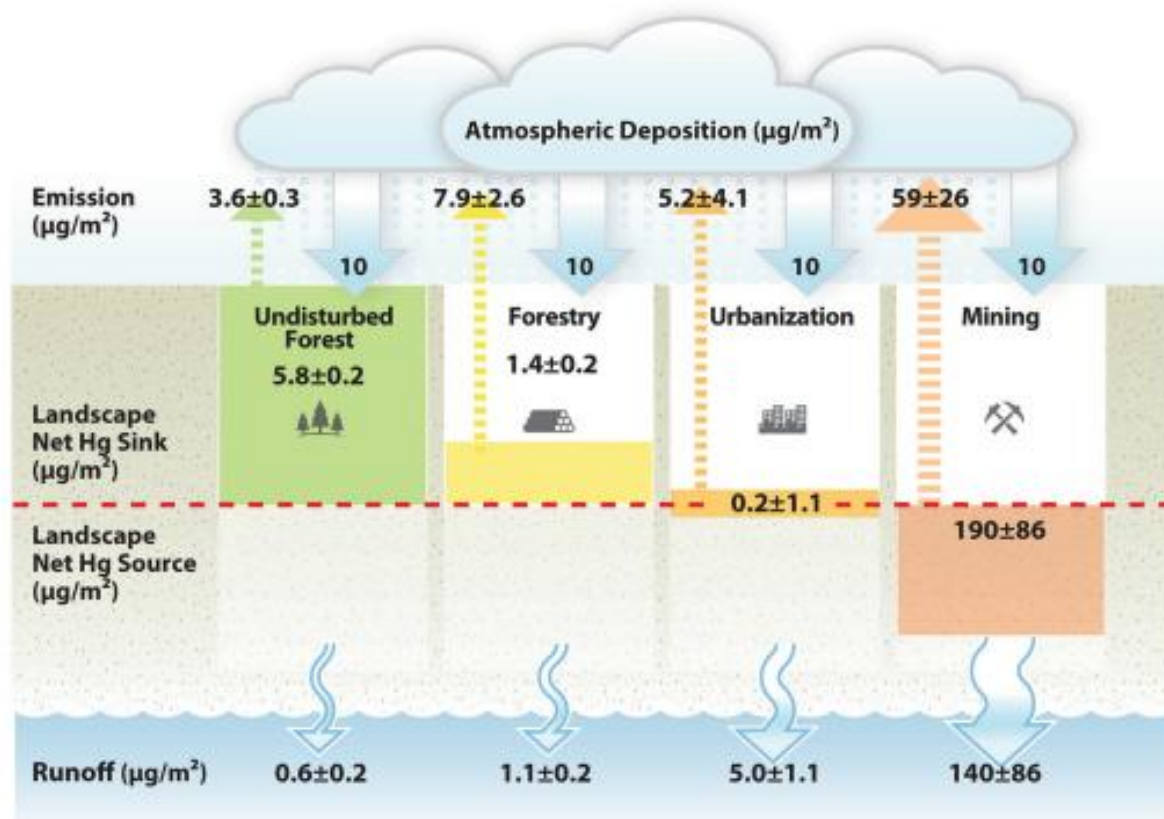
18

Además, mencionan que el mercurio depositado en superficies urbanas impermeables se libera de nuevo al aire o se mueve a través de la escorrentía, debido a la exposición a la luz solar, según la figura 6. Por otra parte, exploran métodos de gestión para reducir los niveles de MeHg, incluyendo políticas que protejan ecosistemas vulnerables y tecnologías in situ menos invasivas y más rentables. La minería artesanal de oro contemporánea continúa teniendo importantes impactos bien documentados respecto al Hg, pero se enfrenta a desafíos sociales y políticos en la implementación de políticas para reducir su uso. Finalmente, el estudio resalta la necesidad de más investigación sobre los riesgos del Hg y la implementación de estrategias de manejo adecuadas para mitigar sus efectos.



Figura 6

Capas autoorganizadas de nanotubos de TiO_2 como fotocatalizadores de alta eficacia



Nota. La influencia de diferentes perturbaciones del paisaje en la acumulación de Hg dentro de las cuencas y las exportaciones de Hg a través de la escorrentía y la emisión. Las cargas medias ($\pm$ SE) de acumulación y exportación se obtuvieron a partir de estudios de campo de cuencas forestales inalteradas, boscosas, urbanizadas y afectadas por minas, y se han escalado en relación con una deposición atmosférica constante ($10 \mu\text{g}/\text{m}^2$). Los cálculos y referencias utilizados para crear esta figura están disponibles en el material suplementario. Tomado de “Challenges and opportunities for managing aquatic mercury pollution in altered landscapes.” (p.7) por Hsu-Kim, H. et. al., 2018, Ambio, (<https://doi.org/10.1007/s13280-017-1006-7>).

b. Profundo, diverso y definitivamente diferente: atributos únicos del mayor ecosistema del mundo

En el presente artículo, Ramírez-Llodra et al. (2010), señalan que, las profundidades marinas son el mayor bioma de la Tierra y presentan características únicas que lo distinguen de otros ecosistemas. Los respiraderos hidrotermales, por ejemplo, son ecosistemas donde los microorganismos utilizan sustancias químicas reducidas en lugar de energía solar para generar materia orgánica.



Sin embargo, estos ecosistemas dependen del oxígeno producido durante la fotosíntesis en las capas superficiales del agua, según la figura 7. Además, los autores abordan los patrones y procesos geológicos, biológicos, de biodiversidad y biogeográficos presentes en estos hábitats.

También, analizan las amenazas actuales que enfrentan debido a las actividades humanas. A lo largo de los años, hay avances tecnológicos y descubrimientos importantes en la investigación de los fondos marinos, cambiando nuestra comprensión de la vida en el planeta. Sin embargo, todavía hay mucho que se desconoce sobre estas profundidades y los índices de descubrimiento de hábitats y especies siguen siendo altos.

Desde 1840, hay 28 nuevos hábitats descubiertos, varían con diferentes especies dominantes y patrones de diversidad a diferentes profundidades y latitudes. pero la mayoría de ellos aún no ha sido muestreada e investigada adecuadamente. Esto demuestra el requerimiento de continuar explorando y estudiando hábitats únicos. La mayoría de los ecosistemas de aguas profundas son heterótrofos y dependen del flujo de materia orgánica del océano superficial. Las comunidades de aguas profundas presentan atributos abióticos únicos y están adaptadas a la baja disponibilidad de alimento.

Las comunidades bentónicas de aguas profundas muestran una relación unimodal entre diversidad y profundidad, y la diversidad puede disminuir hacia los polos. El conocimiento sobre la biodiversidad y biogeografía de las aguas profundas es limitado, pero es esencial para una gestión y conservación adecuadas debido a los impactos antropogénicos, como la minería y la pesca. Para concluir indican que, se requiere una



En este contexto, los nódulos de manganeso se encuentran en muchas zonas del fondo marino abisal, particularmente bajo regiones de productividad primaria de baja a moderada según figura 8A, mientras que los depósitos de metales de sulfuros polimetálicos han despertado gran interés debido a su alta concentración de metales valiosos, según la figura 8B.

Sin embargo, la eliminación de residuos, la acidificación de los océanos y el cambio climático amenazan estos hábitats, por lo cual plantean nuevos desafíos y efectos globales. Existe un desafío para que las comunidades científicas, la industria y las organizaciones internacionales trabajen juntas para gestionar con éxito la explotación y la conservación de este ecosistema.

Este documento proporciona opiniones de expertos y un análisis realizado por expertos científicos en un taller del Censo de la Vida Marina revela que, en las últimas décadas, las actividades antropogénicas han sido desarrolladas desde la eliminación hacia la explotación en las profundidades marinas.

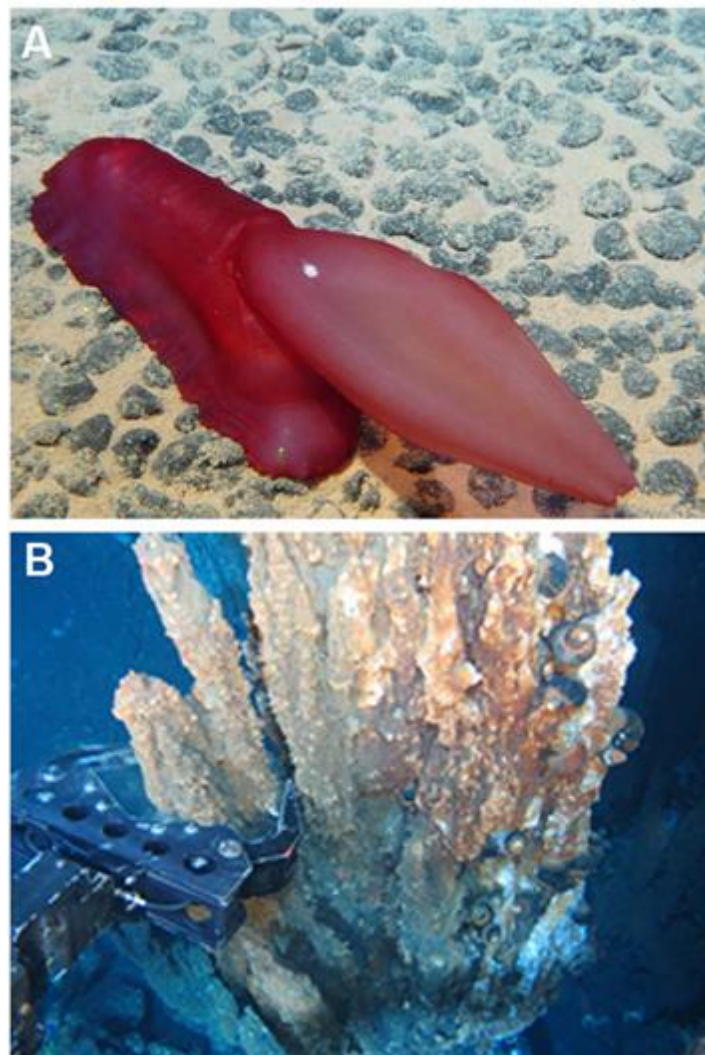
Los impactos pasados se relacionan con la eliminación de residuos, mientras que en la actualidad la explotación de recursos es la principal amenaza. Para el futuro, se predice que los aumentos del CO₂ atmosférico y los efectos del cambio climático serán los factores más perjudiciales para los hábitats y la fauna marina. Identificaron ecosistemas de aguas profundas que corren un mayor riesgo de atravesar impactos humanos en un próximo futuro, como comunidades bentónicas, corales de agua frías y montes submarinos.



Además, discuten las sinergias entre las diferentes presiones antropogénicas, señalando que la mayoría están relacionados con el aumento de CO₂ atmosférico y el cambio climático. También, identifican los ecosistemas de aguas profundas que corren un mayor riesgo de sufrir impactos humanos en el futuro cercano. Finalmente, concluyen con una breve discusión sobre la protección y gestión de estos ecosistemas.

Figura 8

Explotación de recursos minerales en aguas profundas.



Nota. Explotación de recursos minerales en aguas profundas: A. el holoturiano *Psychropotes semperiana* sobre nódulos de manganeso en la llanura abisal de Kaplan en el Océano Pacífico (Fotografía cortesía de IfremerNautilus/Nodinaut, 2004); B. muestreo de una chimenea de ventilación frente a Papúa Nueva Guinea durante la evaluación ambiental realizada por Nautilus Minerals antes de la explotación de sulfuros masivos (Fotografía cortesía de Nautilus Minerals). Tomado de "Man and the Last Great Wilderness: Human Impact on the Deep Sea" (p.11) por Ramírez-Llodra, E. et. al., 2011, Anthropogenic Impact on the Deep Sea, (<http://doi.org/10.1371/journal.pone.0022588>)



d. Evaluación y predicción de vibraciones inducidas por explosiones en una mina a cielo abierto utilizando redes neuronales artificiales: un estudio de caso en Vietnam

En el presente artículo, Nguyen et al. (2018) indican que, la voladura es una técnica comúnmente utilizada en las minas a cielo abierto para romper la roca, es un método eficaz y económico, pero sus efectos secundarios como la vibración del suelo (PPV, por sus siglas en inglés), la sobrepresión del aire, la dispersión del polvo y las sustancias tóxicas son dañinos para las personas y el medio ambiente.

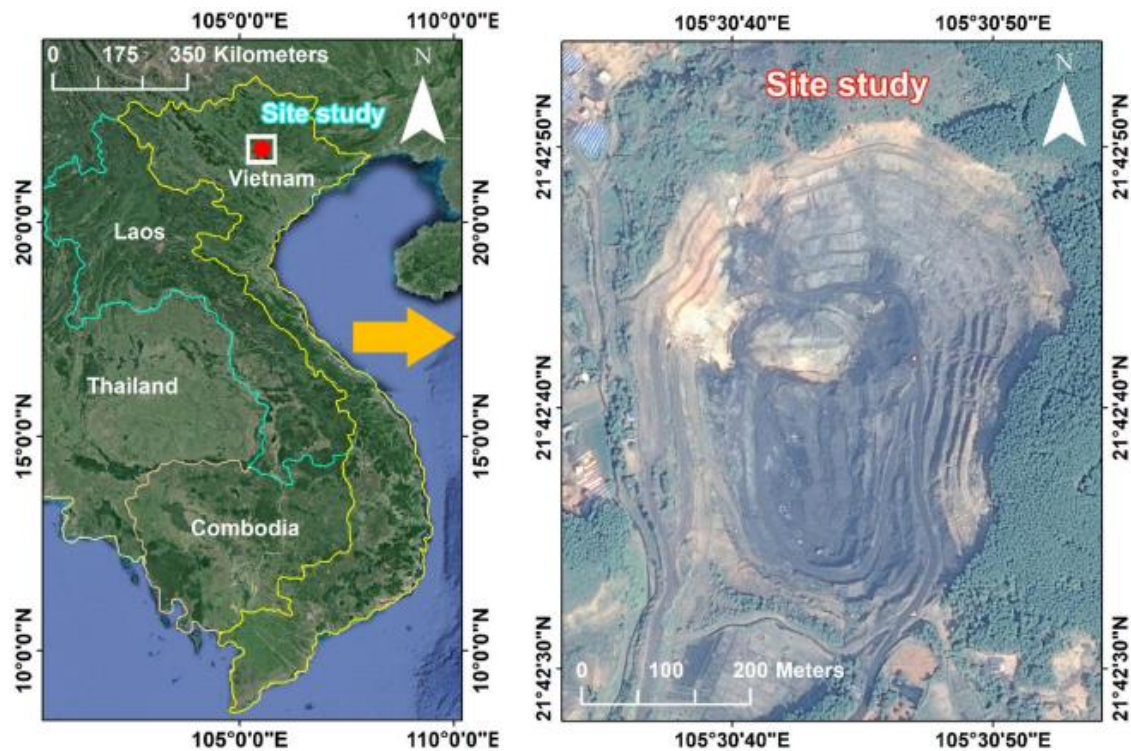
En este estudio, aplicaron modelos de redes neuronales artificiales (ARN, por sus siglas en inglés) para predecir las vibraciones del suelo causadas por las explosiones en una mina de carbón en Vietnam, según la figura 9, utilizando 68 datos de explosión para desarrollar los modelos de redes neuronales y se dividió el conjunto de datos en 80% para el entrenamiento y 20% para las pruebas. Asimismo, evaluaron el rendimiento de los modelos utilizando el error cuadrático medio y el coeficiente de determinación.

Finalmente, este estudio propone un enfoque novedoso para predecir los efectos de la voladura en el medio ambiente circundante y tiene como objetivo minimizar los impactos negativos de las operaciones de voladora en minas de cielo abierto.



Figura 9

Resumen del estudio del sitio



Nota. Esta investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo de Red Neuronal Artificial (ANN, por sus siglas en inglés) para predecir el PPV producido por voladura en una mina de carbón a cielo abierto de Vietnam. Tomado de “Evaluating and predicting blast-induced ground vibration in open-cast mine using ANN: a case study in Vietnam” (p.2) por Nguyen, H.. et. al., 2018, Discover Applied Sciences, (<https://doi.org/10.1007/s42452-018-0136-2>)

e. El futuro del suministro de carbón en China basado en el desarrollo de energía no fósil y estrategias de precios del carbono

En este artículo, Jie, Xu y Guo (2021) mencionan que, para lograr un desarrollo de bajas emisiones de carbono en China, es necesario producir y consumir carbón de forma limpia y eficiente. En ese sentido, presentan un modelo multirregional de suministro de carbón en China hasta 2050, el modelo tiene en cuenta la disparidad regional, la clasificación del carbón y el desarrollo de tecnologías limpias, la estructura del modelo se muestra en la figura 10.

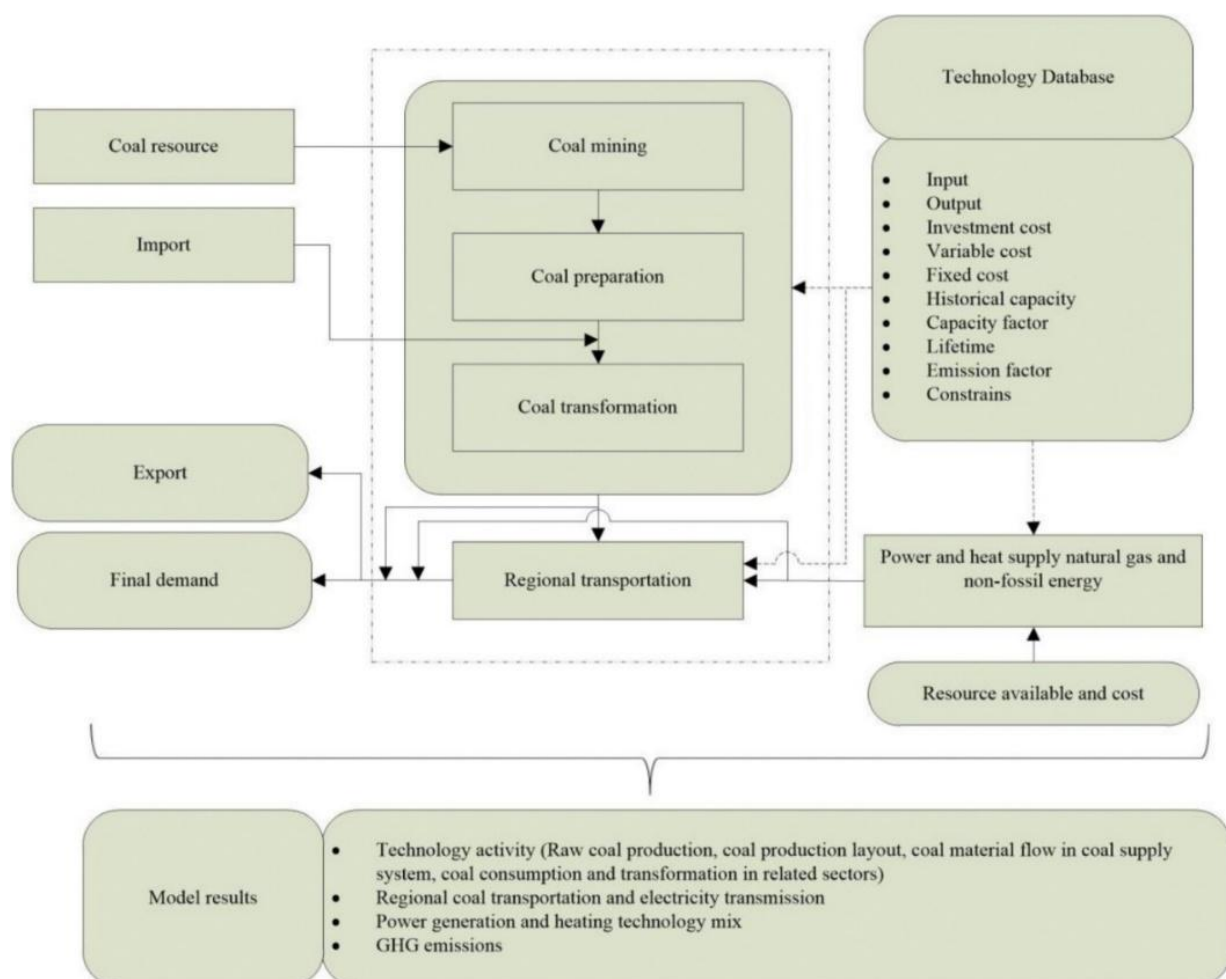


Los resultados muestran que la producción nacional de carbón alcanzará su punto máximo en 2030 en el escenario actual, pero en los escenarios de energías no fósiles y precio del carbono, ya ha alcanzado su máximo.

Además, observaron una disminución en el consumo final de carbón, mientras que aumenta su transformación en líquidos y productos químicos. Tanto el desarrollo de energías no fósiles y las estrategias de precios del carbono favorecen la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

Figura 10

Estructura del modelo de suministro de carbón



Nota. Los diferentes tipos de recursos de carbón en cada región son la base del modelo. El flujo de carbón es la parte principal de este modelo, que se caracteriza por tecnologías detalladas. Tomado de "The future of coal supply in China based on non-fossil energy development and carbon price strategies" (p.4) por Jie, D. et. al., 2021, Energy, (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119644>)



f. Novedoso sistema de seguimiento y localización de mineros de carbón en tiempo real basado en redes de sensores autoorganizadas

En el estudio realizado por Wang, Huang y Yang (2010) los autores proponen un sistema de localización y seguimiento en tiempo real en las minas de carbón. Este estudio propone un sistema de localización y seguimiento basado en una red de sensores autoorganizados, que consiste en plataformas de hardware y software, el hardware incluye dispositivos de localización con Certificado de Aprobación de Seguridad para productos mineros, mientras que el software se basa en una arquitectura de cinco (05) capas de aplicación: módulo de muestreo de datos, módulo de agrupación de mensajes, módulo de actualización de estado, módulo de localización y módulo de almacenamiento de datos, como se muestra en la figura 11.

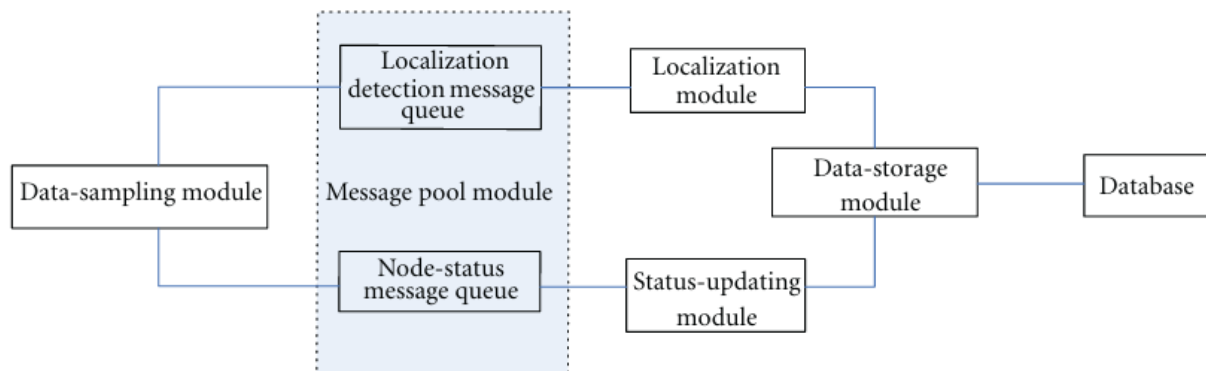
27

El sistema incluye tres tecnologías importantes para localizaciones clave: un algoritmo de localización subterránea que utiliza un indicador de la intensidad de la señal (RSSI, por sus siglas en inglés) para reducir la interferencia ambiental, un mecanismo de localización tolerante a fallos para mejorar la estabilidad del RSSI y un algoritmo basado en la localización Monte Carlo (MCL, por sus siglas en inglés) para adaptarse a la estructura de los túneles y realizaron una evaluación experimental. Finalmente, los resultados mostraron que el sistema es más preciso y adaptable que los algoritmos de localización tradicionales, indicando que este sistema podría ser clave para mejorar la seguridad en las minas de carbón.



Figura 11

Diseño de la estructura del módulo



Nota. Hay cinco módulos en esta capa: módulo de muestreo de datos, módulo de agrupación de mensajes, módulo de actualización de estado, módulo de localización y módulo de almacenamiento de datos. Tomado de “A novel real-time coal miner localization and tracking system based on self-organized sensor networks” (p.4) por Wang, Y. et al., 2010, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, (<https://doi.org/10.1155/2010/142092>)

g. Justificación de los parámetros de perforación de pozos de drenaje socavados para aumentar la producción de metano a partir de colectores de carbón y gas no convencionales

28

En esta investigación, Malozyomov et al. (2023) indican que, la descarbonización de la industria minera es clave para lograr el desarrollo sostenible. No obstante, el deterioro de las condiciones en las minas de carbón dificulta el aprovechamiento de gas metano. Este estudio propuso mejorar las recomendaciones para la perforación de pozos de drenaje socavados, con el objetivo de aumentar la producción de metano.

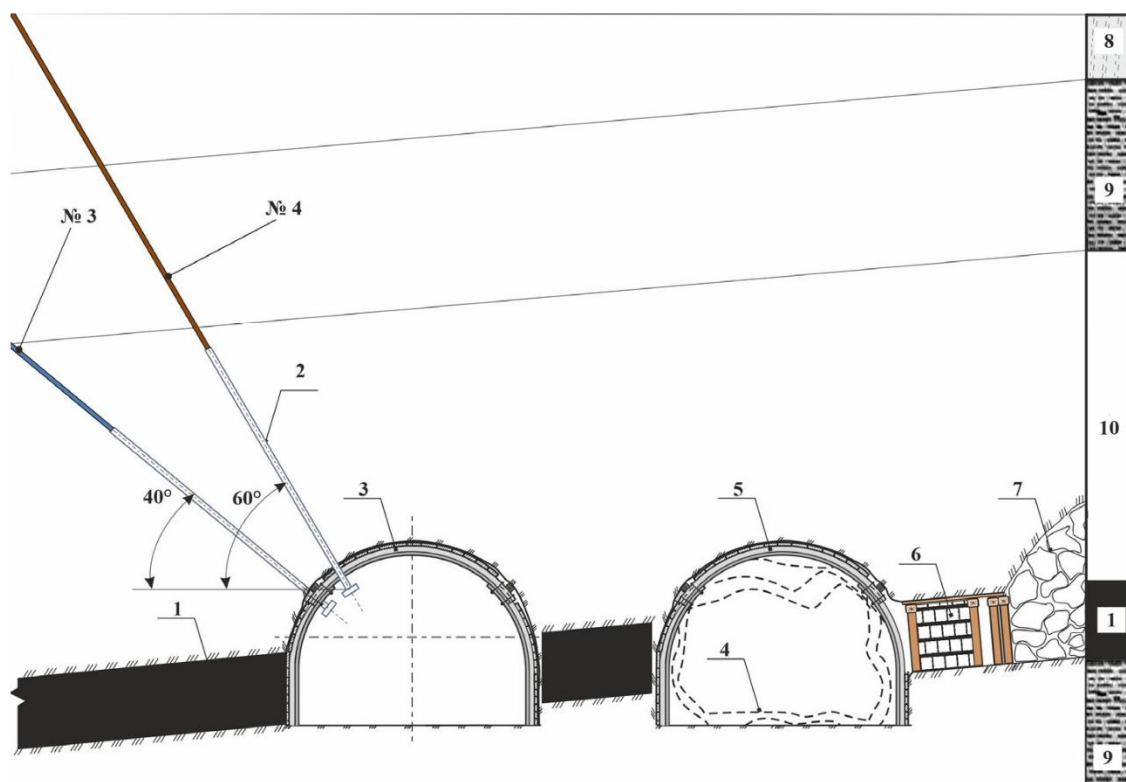
Los autores proponen utilizar los patrones de estabilidad natural de las perforaciones utilizando métodos de suavizado de datos experimentales y técnicas de interpolación para analizar el efecto del ángulo de inclinación en la dinámica de emisión de metano en depósitos tecnogénicos, según la figura 12.



Finalmente, encontraron que aumentar el ángulo de inclinación tiene un impacto significativo en la productividad del metano. Como resultado, recomendaron el reemplazo de pozos con un ángulo de subida menor para aumentar la productividad del metano.

Figura 12

Localización de los pozos N° 3 y N° 4 en la mina



Nota. 1- veta de carbón; 2- encofrado del pozo; 3- calzada de aire 18° tajo largo oriental; 4- deformaciones de la calzada; 5- calzada de acarreo 17° tajo largo oriental; 6- revestimiento; 7- goaf; 8- arenisca; 9- aleurolita; 10- arcillolita. En el espacio minado, como estructura protectora de los pozos de deriva y de desgasificación, se construyó un bifastón de 2 m de ancho. Además, a lo largo del eje de la excavación se colocaron hogueras de madera hechas con estacas de 1,5 m de largo, y la distancia entre las hogueras de 6 m. Tomado de "Substantiation of Drilling Parameters for Undermined Drainage Boreholes for Increasing Methane Production from Unconventional Coal-Gas Collectors." (p.4) por Malozyomov, B. et. al., 2023, Geoscience Frontiers, (<https://doi.org/10.3390/en16114276>).



h. Evaluación ambiental y caracterización nanomineralógica del carbón, la capa superficial y los sedimentos del drenaje ácido de la minería de carbón de la India

En el presente artículo, Dutta et al. (2017) indican que, la minería del carbón con alto contenido en azufre en la cuenca carbonífera del noroeste de India tiene un impacto significativo en el medio ambiente. Hallaron que el carbón tiene un alto contenido de materia volátil, y las muestras de agua presentaron altos niveles de conductividad eléctrica y sólidos disueltos.

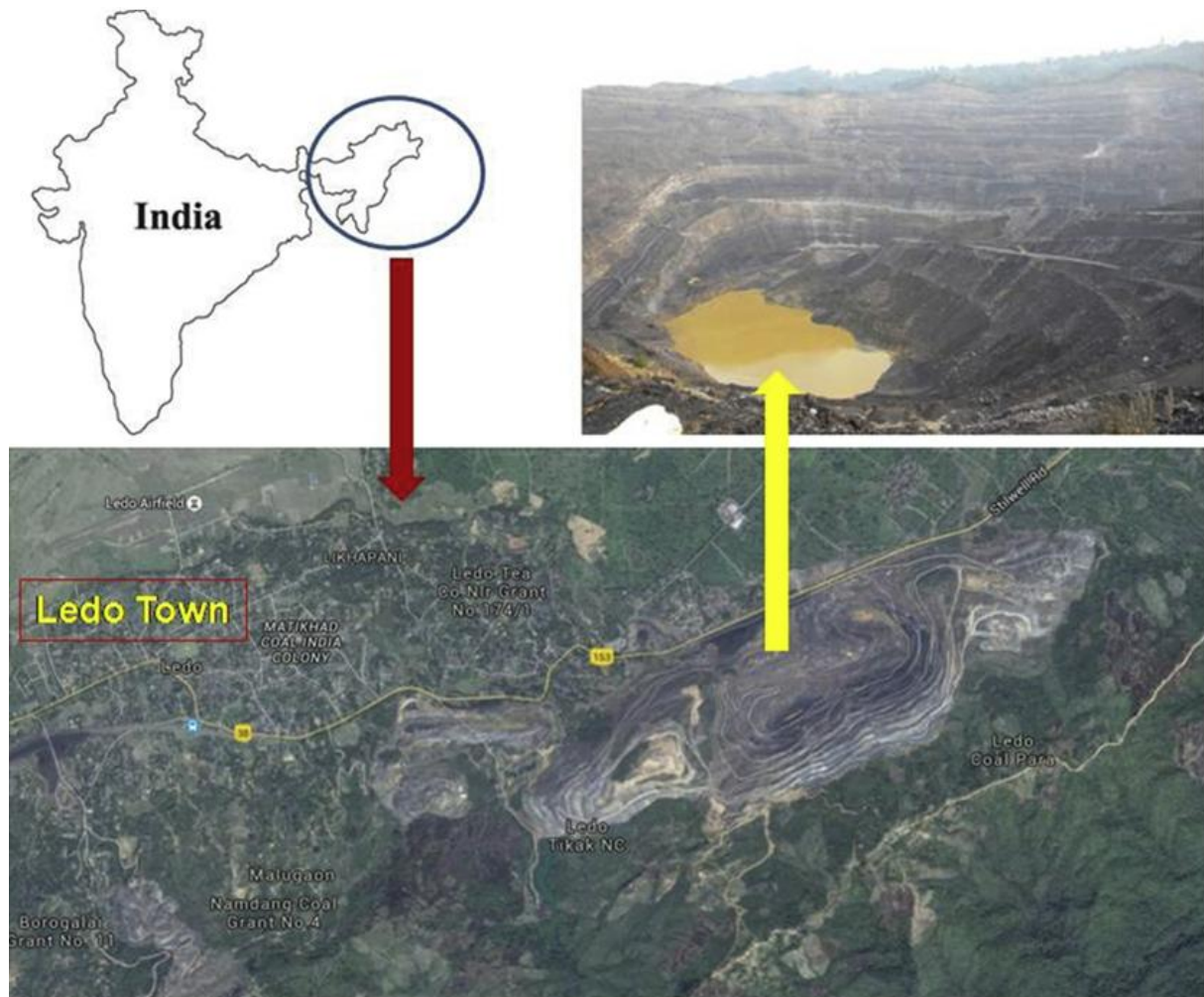
Por otra parte, encontraron que el agua de la mina Ledo, donde se ha adoptado recientemente actividad minera a cielo abierto según la figura 13, tiene el pH más bajo, mientras que en las muestras de la mina Tirap presentan la conductividad eléctrica más alta. El análisis mineral de la sobrecarga de la mina de carbón reveló la presencia de pirita y marcasita, lo cual se confirmó mediante análisis espectrales.

Además, la presencia de minerales como el cuarzo y hematita se observó en los carbones mediante análisis de difracción de rayos X. Encontraron altos niveles de Mg^{2+} y Br^- en el agua de la mina Tirap. Finalmente, estos datos demuestran la capacidad de los minerales y las ultra/nano partículas presentes para controlar la movilidad de elementos peligrosos, lo que sugiere su posible uso en la gestión medioambiental, incluyendo la restauración de zonas mineras en la India.



Figura 13

Zona de drenaje de las minas de carbón de la India (Assam) (sin escala).



Nota. Ledo es la mina más activa donde se ha adoptado recientemente una actividad minera a cielo abierto y en la figura indican las zonas de interés. Tomado de “Environmental assessment and nano-mineralogical characterization of coal, overburden and sediment from Indian coal mining acid drainage.” (p.3) por Dutta, M. et al., 2017, Geoscience Frontiers, (<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.11.014>).



i. Innovación en la industria minera: tendencias tecnológicas y un estudio de caso de los desafíos de la innovación disruptiva

En el estudio realizado por Sánchez y Hartlieb (2020) los autores mencionan que, la innovación es esencial en el sector minero como medio para optimizar la eficiencia de sus operaciones, disminuir gastos, así como para atender las crecientes inquietudes sociales y ambientales planteadas por comunidades y autoridades.

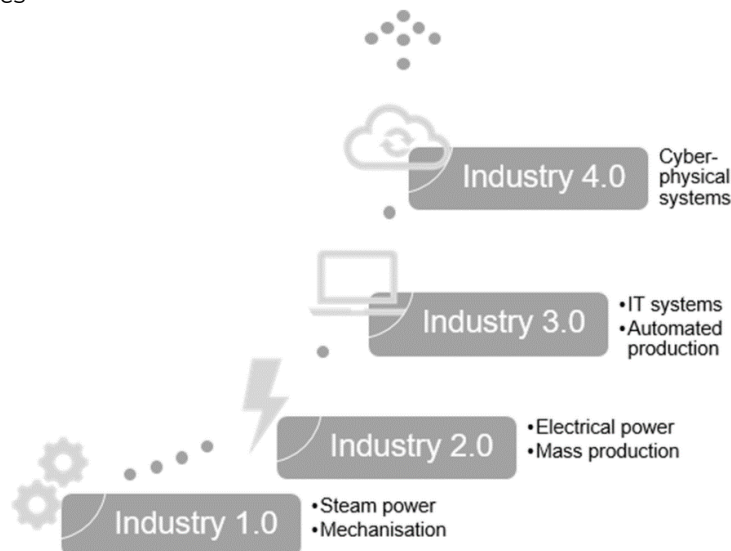
A lo largo de la historia, han sucedido diferentes cambios en los paradigmas productivos, promovidos por la llegada y la aplicación de nuevas tecnologías. Como ilustra la figura 14, el mundo ha pasado por tres cambios de paradigma, más conocidos como revoluciones industriales. Por consiguiente, la evolución tecnológica ha sido igualmente fundamental para facilitar la explotación de nuevos yacimientos en contextos más desafiantes: menor concentración de minerales, climas extremos, depósitos más profundos, formaciones rocosas más resistentes y situaciones de alta tensión.

Este documento analiza la importancia de la innovación en la industria minera, los mecanismos involucrados y las tendencias actuales en la industria minera. Además, evalúa el proceso de transformación digital que está viviendo la industria, junto a otras tendencias importantes que probablemente influirán en la minería del futuro. Finalmente, presenta un caso que ilustra las implicaciones técnicas y económicas del desarrollo de un proyecto de innovación disruptiva. En resumen, la innovación es esencial para la industria minera, impulsando su evolución y contribuyendo su sostenibilidad.



Figura 14

Revoluciones industriales



Nota. El mundo ha asistido a tres cambios de paradigma, más conocidos como revoluciones industriales. Tomado de “Innovation in the mining Industry: technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation.” (p.6) por Sánchez, F. & Hartlieb, P., 2020, Mining, Metallurgy & Exploration, (<https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1>).

j. Marco procedimental para la gestión ambiental robusta de proyectos de minería en aguas profundas utilizando un modelo conceptual

33

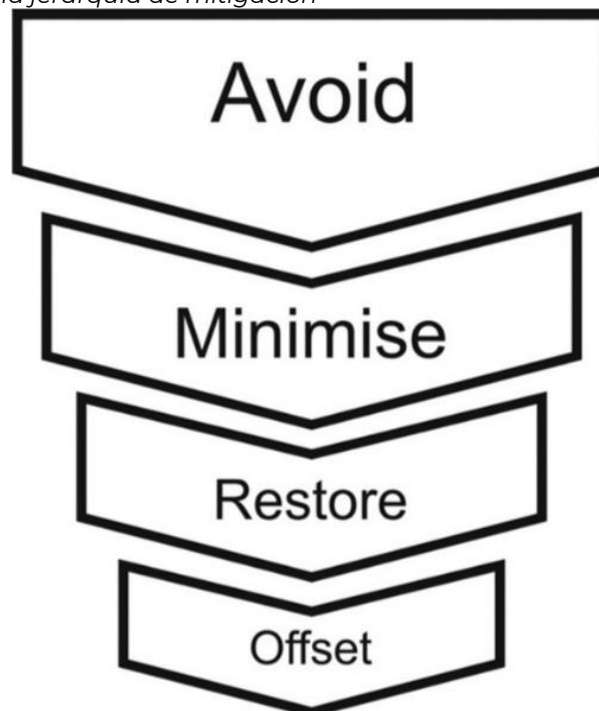
En el presente artículo, Durden et al. (2017) indican que, la gestión medioambiental en proyectos de minería en aguas profundas debe ser integral y desarrollarse en simultáneo con las operaciones mineras. Para esto, proponen un marco de gestión ambiental que facilita la recolección de datos ambientales y la toma de decisiones a lo largo de las diferentes fases del proyecto. Por consiguiente, las oportunidades de mitigación es importante que sean identificadas durante la fase de planificación y aplicadas a lo largo de todo el proyecto mediante una gestión adaptativa. Para ello, existe una jerarquía de mitigación como puede apreciarse en la figura 15, la cual apoya el enfoque de precaución, visualizando cómo pueden aplicarse las medidas en función de su importancia relativa.



Asimismo, se enfocan en la recopilación, síntesis de información y su uso en la toma de decisiones, y utiliza un modelo conceptual como un repositorio para organizar la información específica del proyecto. Por otra parte, realizaron énfasis en la aplicación del principio de precaución y en la revisión de las medidas de gestión adaptativa para mejorar la gestión ambiental a medida que la cantidad y calidad de los datos crecen y las tecnologías son optimizadas. Finalmente, este marco garantiza la equidad y coherencia en la aplicación de normas medioambientales, beneficiando tanto al regulador como a los contratistas y financiadores al reducir la incertidumbre en el proceso.

Figura 15

Acciones priorizadas en la jerarquía de mitigación



Nota. Una jerarquía de medidas de mitigación respalda el enfoque precautorio, visualizando cómo se pueden implementar las medidas en términos de su importancia relativa. Tomado de “A procedural framework for robust environmental management of deep-sea mining projects using a conceptual model.” (p.3) por Durden, J. et al., 2017, Marine Policy, (<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.07.002>).



1.2. Producción científica a nivel de Perú

La ecuación que vamos a analizar “(mining AND industry) AND (tech* OR innovation) AND (sustainable OR environment OR "clean energy")” implica la combinación de palabras clave mediante conectores booleanos, y está enfocada en la búsqueda de la palabra "Tech" con el carácter especial de asterisco (*) para buscar la raíz de la palabra clave y, además, tiene como filtro de Country a "PERU". Fueron 15 documentos de la fuente Scopus comprendidos entre los años 2003 y 2024.

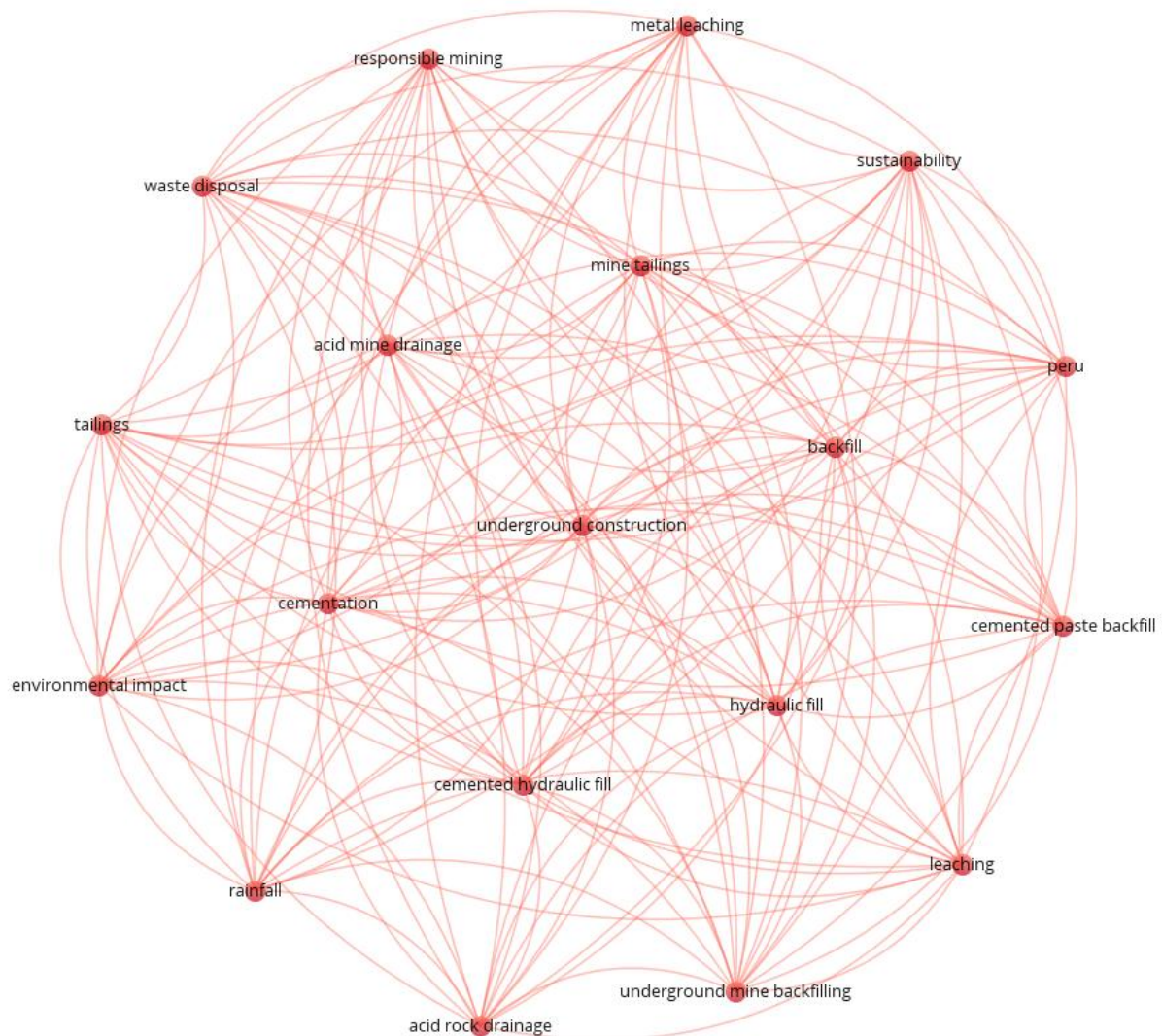
1.2.1. Red de coocurrencia

La red de coocurrencia elaborada en *VOSviewer* mediante el análisis de 19 ítems, de 3 artículos de acceso abierto de la fuente *Scopus* relacionados a la industria minera y comprendidos entre los años 2003 y 2024. Este proceso condujo a la formación de 1 clúster temático, según la figura 16. Para dar una visión detallada de este clúster, enumeramos elementos importantes como el manejo de residuos mineros, impacto ambiental y sostenibilidad. La atención está centrada en la gestión de los relaves mineros, especialmente en las técnicas de disposición subterránea y en la minería responsable con énfasis en la sostenibilidad y la reducción de impactos socioambientales.



Figura 16

Red de coocurrencia de términos en la producción científica relacionados a Perú



Nota. Elaborado con VOSviewer, 2025, (<https://www.vosviewer.com/>).

1.2.2. Nube de palabras

Los cuatro temas relevantes de la nube de palabras son los siguientes: minería, ambiente, innovación y extracción, según la figura 17.

Figura 17

Nube de palabras 40 elementos de VOSviewer



Nota. Imagen que muestra la frecuencia del uso de palabras clave en los artículos de *Scopus* relacionados a Perú período 2003-2024, aplicando la herramienta Orange. Adaptado de University of Ljubljana - Orange Data Mining, 2025, (<https://orangedatamining.com/>).

1.2.3. Artículos científicos

En esta sección están los artículos científicos de acceso libre que destacaron con el mayor número de citas, artículos que han sido elaborados como mínimo por una persona que representa a una universidad peruana. Asimismo, en la tabla 3 pueden visualizarse artículos que abordan desde la fabricación de compuestos geopoliméricos con residuos mineros y de construcción, hasta la innovación ecológica en industrias de recursos naturales en la minería peruana.



Tabla 3

Agrupación de artículos científicos relacionados al Perú

Agrupación	Artículo científico	Objetivo
Materia prima y procesamiento inicial	Fabricación y evaluación del comportamiento mecánico de compuestos geopoliméricos a partir de residuos de la industria minera y de la construcción	Proponer el uso de la tecnología geopolimérica para aprovechar los residuos mineros y de demolición en la fabricación de concreto geopolimérico.
Producción y diseño	Experiencias de relleno de minas subterráneas utilizando relaves mineros desarrollados en la región andina de Perú: Una solución minera ecológica para reducir el impacto socioambiental	Presentar y analizar las condiciones específicas, ventajas, desventajas y lecciones aprendidas de la disposición de relaves mineros en minas subterráneas en Perú.
Comercialización	Innovación ecológica en las industrias de recursos naturales: El caso de los proveedores locales en la industria minera peruana	Analizar los factores que determinan el desarrollo e integración de innovaciones verdes en la cadena de valor de la minería peruana.

Nota. La tabla incluye una selección de estudios científicos relevantes realizados incluyendo investigadores de universidades peruanas, destacando avances en tecnologías de tratamiento de efluentes textiles y evaluación de dispositivos para fibras animales. Información obtenida a partir de Scopus, 2025, (<https://www.scopus.com>).

A continuación, son presentados tres (03) artículos de la tabla 3:

38

a. Experiencias de relleno de minas subterráneas utilizando relaves mineros desarrolladas en la región andina del Perú: una solución minera verde para reducir los impactos socioambientales

La presente investigación realizada por Cacciuttolo. y Marinovic (2023) analiza la gestión de conflictos socioambientales en Perú, destacando que la minería ha adoptado la disposición de relaves en minas subterráneas como alternativa a la disposición superficial convencional. Este enfoque busca construir relaciones de confianza con las comunidades y reducir los impactos negativos del medio ambiente.

Asimismo, mencionaron técnicas como el relleno hidráulico, el relleno hidráulico cementado, entre otros. Estas técnicas permiten limitar la generación de drenaje ácido de roca y la lixiviación de metales, mitigando la contaminación de las aguas



superficiales y subterráneas. Además, la disposición de relaves en minas subterráneas reduce la huella de afectación en el territorio y evita la emisión de partículas en el ambiente. En ese sentido, el relleno de pasta cementada en minas subterráneas aumenta la estabilidad local, la seguridad y la eficacia de las operaciones mineras, evitando desprendimientos y reduciendo el impacto en la superficie, según la figura 18. En conclusión, esta estrategia es una solución minera más sostenible y amigable con el medio ambiente.

Figura 18

Disposición de relleno de pasta cementada en una mina subterránea en Perú



Nota. Muestra el relleno de un hueco con pasta cementada en una mina subterránea de Perú. Tomado de “Experiences of Underground Mine Backfilling Using Mine Tailings Developed in the Andean Region of Peru: A Green Mining Solution to Reduce Socio-Environmental Impacts.” (p. 14). por Cacciuttolo, C. & Marinovic, A., 2023, Sustainability, (<https://doi.org/10.3390/su151712912>)

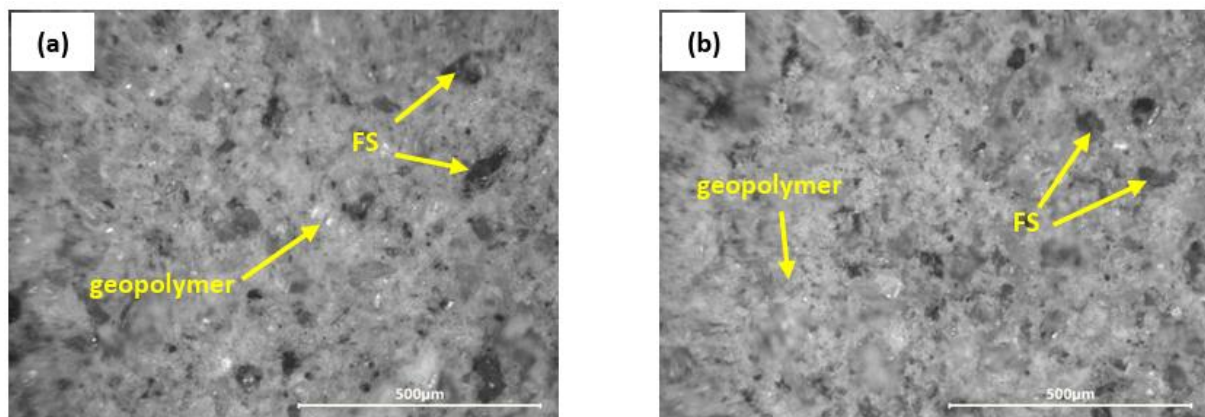


b. Fabricación y evaluación del comportamiento mecánico de compuestos geopoliméricos a partir de residuos de la industria minera y de la construcción

Según la presente investigación realizado por Huamán-Mamani, Mayta-Ponce y Rodríguez-Guillén (2021) destaca los geopolímeros como materiales innovadores debido a sus resistencia mecánica, estabilidad química y resistencia al fuego, así como a su versatilidad en diversas aplicaciones. Asimismo, la densidad promedio de los cementos geopoliméricos fue de $1,8 \text{ g/cm}^3$ y la morfología consistió en una fase continua de geopolímero con partículas de arena fina dispersas, según la figura 19.

En Perú, dos de las industrias más importantes, como minería y construcción, generan una gran cantidad de residuos que causan daños al medio ambiente y actualmente no hay ningún uso alternativo. La investigación en parte propone utilizar la tecnología de geopolímeros para aprovechar los residuos de minería. Finalmente, este enfoque ayudaría a mitigar el impacto ambiental de estas industrias y aprovechar los recursos de manera más sostenible.

Figura 19
Micrografías por microscopía óptica



Nota. Micrografías por microscopía óptica de (a) MIW(30), (b) MIW(70). Tomado de "Fabrication and Evaluation of the Mechanical Behavior of Geopolymer Compounds Using Waste from the Mining"



and Construction Industry” (p. 3) por Huamán-Mamani et al., 2021, Materials Science and Engineering, (<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1054/1/012002>).

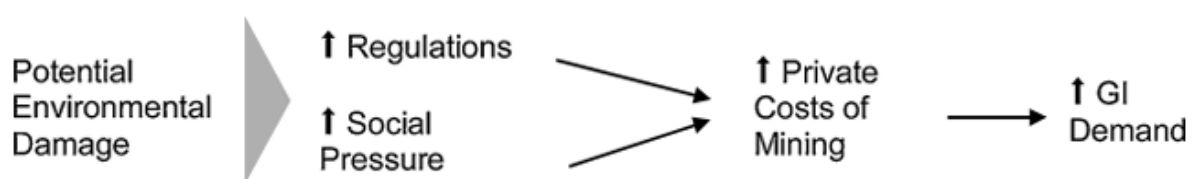
c. Innovación ecológica en las industrias de recursos naturales: El caso de los proveedores locales en la industria minera peruana

Según el estudio realizado por Aron y Molina (2020) analizan como la creciente preocupación por el cambio climático está impulsando el aumento de los costes privados de las empresas mineras, debido a una normativa más estricta y a una mayor presión social, lo que representa un mecanismo a través del cual puede aumentar la demanda de innovación ecológica (GI, por sus siglas en inglés), según la figura 20. Destaca el éxito de algunas empresas locales en Perú que han integrado innovaciones ecológicas en la cadena de valor minera, impulsadas factores internos como un capital humano altamente especializado y un esfuerzo tecnológico.

41

Además, existen factores externos que promueven la innovación en los proveedores locales, como la estructura del mercado, las cadenas de valor, los vínculos con las partes interesadas del sector minero, los centros de investigación y el acceso a financiamiento externo proporcionado por el gobierno. Sin embargo, aún existen limitaciones.

Figura 20
Factores de la demanda



Nota. Factores de la demanda. Tomado de “Green innovation in natural resource industries: The case of local suppliers in the Peruvian mining industry” (p. 3) por Aron, A. y Molina, O., 2020, The Extractive Industries and Society, (<https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.09.002>).



2. Patentes





La ecuación examinada “(mining AND industry) AND (tech* OR innovation) AND (sustainable OR environment OR “clean energy”)” consiste en la unión de las palabras clave mediante conectores booleanos. La palabra “Tech” tiene el carácter especial de asterisco (*) para buscar la raíz de la palabra clave.

Existen 83,118 documentos en Lens en el rango de fechas desde 2003 a 2024, con los cuales se obtuvo el mapa de la figura 21 que resume las principales palabras recuperadas a partir de la consulta ingresada.

Figura 21

Keywords de búsqueda de patentes en Lens



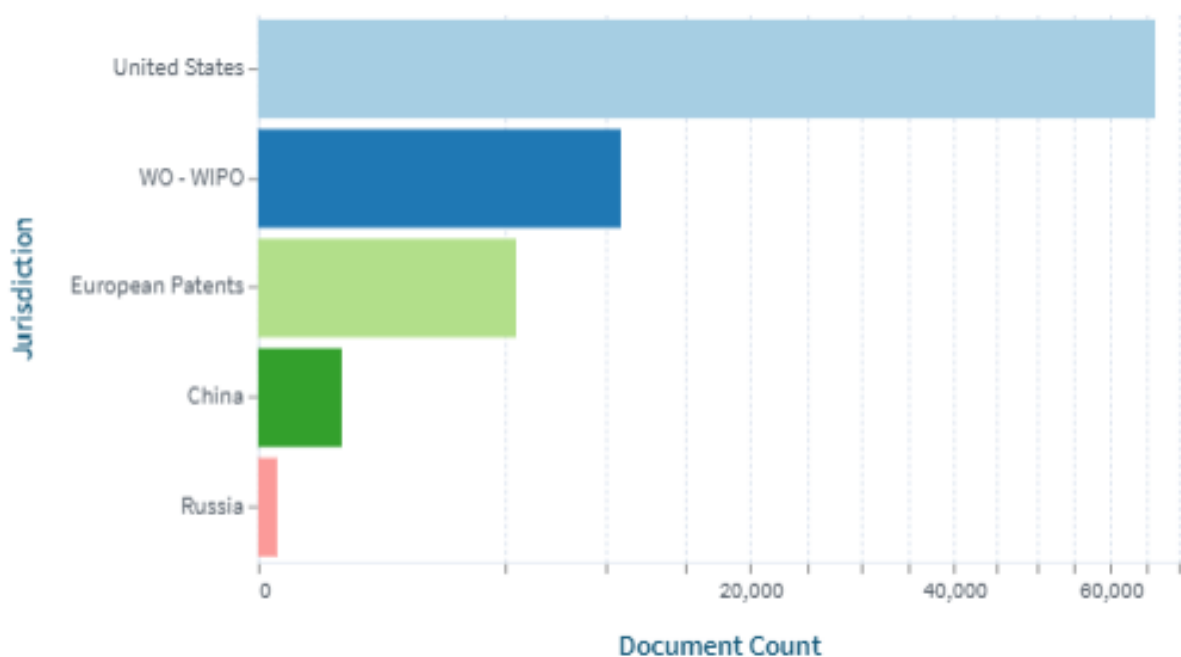
Nota. Imagen que muestra la frecuencia del uso de palabras clave en los artículos de Lens período 2003-2024, aplicando la herramienta Orange. Adaptado de University of Ljubljana - *Orange Data Mining*, 2025, (<https://orangedatamining.com/>).



Asimismo, según la clasificación de Lens, las principales jurisdicciones son las siguientes: en primer lugar, Estados Unidos, que lidera con la mayor cantidad de documentos de patentes. En segundo lugar, está la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WIPO, por sus siglas en inglés). Le siguen, en tercer lugar, las patentes europeas. En cuarto lugar, está China y, por último, en quinto lugar, Rusia, tal como se muestra en la figura 22 a continuación.

Figura 22

Documentos de patentes por jurisdicción





2.1. Tabla de agrupación de patentes

A partir del mapa generado en Intelligo, fueron filtrados los documentos relevantes de patentes que contaban con más de 100 palabras en su resumen.

Tabla 4

Agrupación de patentes

Grupo	Clasificación IPC	Descripción
B03C	B03C 3/00	Separación de partículas dispersas de gases o vapores, por ejemplo aire, mediante efecto electrostático
	B03C 1/005	• Pretratamiento especialmente adaptado para la separación magnética
E21F	E21F 15/04	• Esteras de estiba, red de alambra de cabra; tabiques divisorios
A41D	A41D 13/11	• Máscaras faciales protectoras, por ejemplo, para uso quirúrgico o en atmósferas viciadas (máscaras para los ojos A61F 9/04)
	A42B 3/28	• Disposiciones de ventilación (A42B 3/24 tiene prioridad)
C02F	C02F 1/28	• Por sorción (utilizando intercambio iónico C02F 1/42; composiciones absorbentes B01J)
	C02F 1/36	• Vibraciones ultrasónicas
C22B	C22B 3/08	• Ácido sulfúrico
	C22B 3/22	• Por procesos físicos, por ejemplo, por filtración, por medios magnéticos (C22B 3/26 tiene prioridad)
	C25C 1/10	• De cromo o manganeso

Nota. Clasificación de varios grupos y subgrupos de tecnologías. Adaptado de la información obtenida del sistema de Clasificación Internacional de Patentes (CIP), 2025, (<https://ipcpub.wipo.int>).

A continuación, fueron consideradas seis (06) patentes, tres (03) de ellas fueron seleccionadas de la tabla 4 que cuentan con su documento original en inglés o portugués. Asimismo, se seleccionaron (03) patentes de Patentinspiration, filtradas por documentos relevantes que mostrarán solo una patente por familia, cuentan con imágenes, cuyos títulos o resúmenes no estuvieron vacíos, con el rango de fecha desde 2003 al 2024.



2.2. Descripción de patentes

a. Sistema sustentable de procesamiento de relaves finos de minería, minerales de baja dureza y residuos industriales, electrónicos y de construcción, y productos obtenidos de ellos

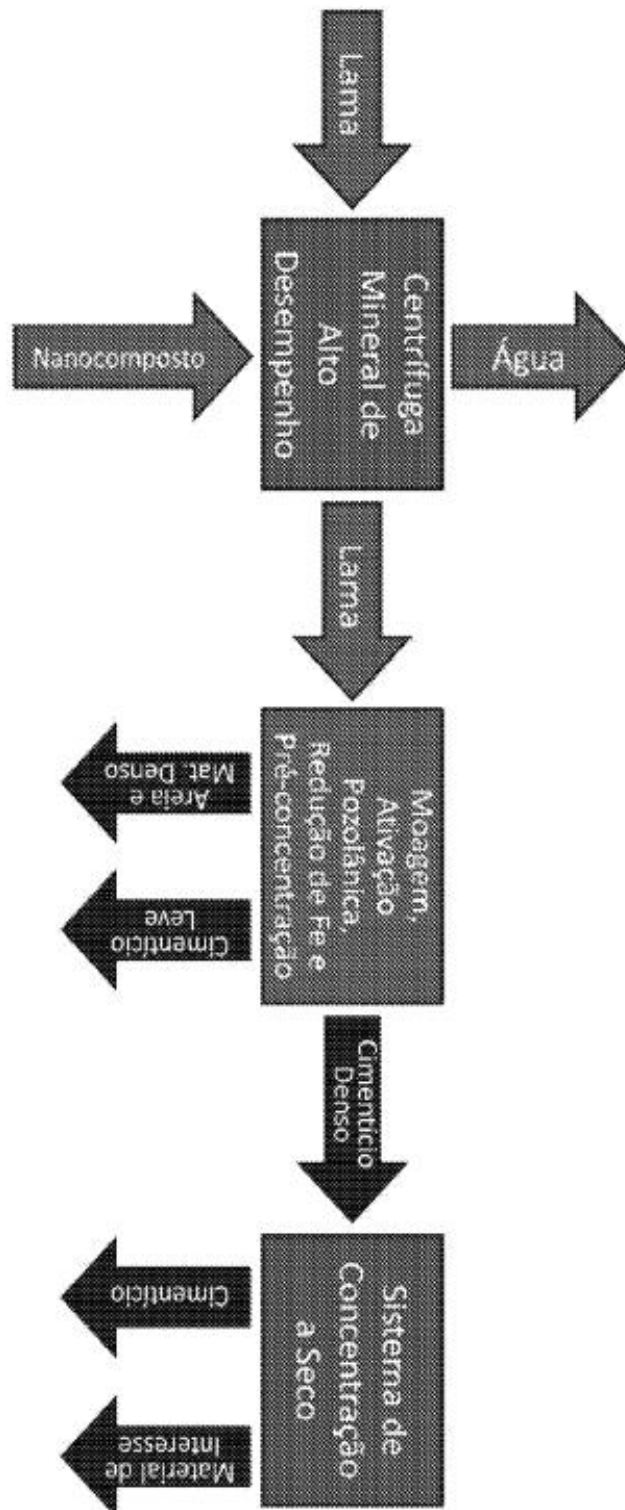
Según la presente invención realizada por Orlandi (2021) consta de un sistema sostenible para el tratamiento de relaves finos de minería, minerales de baja dureza y residuos industriales, electrónicos y de construcción, así como los productos derivados de estos, según la figura 23. El propósito es recuperar materiales, principalmente metálicos, y aprovechar el resto de residuos para generar insumos útiles, como cemento, arena seca y materiales puzolánicos.

El diseño innovador incluye tecnologías relacionadas con molinos de alta eficiencia que utilizan circulación de gases calientes, capaces de alcanzar temperaturas de hasta 750°C, y sistemas de preconcentración. Como resultado, esta tecnología mejora la recuperación de metales y favorece la activación puzolánica del material residual, lo cual depende de la naturaleza del material y la temperatura. Finalmente, los parámetros del proceso son ajustados según los requisitos del proceso y la aplicación de los productos.



Figura 23

Flujograma de un sistema sustentable



Nota. Sistema sostenible de tratamiento de residuos mineros finos, minerales de baja dureza y residuos industriales, electrónicos y de la construcción en sus fases de entrada y salida de productos. Tomado de WO2021113941A1 (A1) – “sustainable system for processing fine tailings from mining, low-hardness minerals and industrial, electronic and construction waste, and products obtained therefrom” (p. 21) por Orlandi, A., 2021, Espacenet Patent Search, (<https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DWO2021113941A1>).



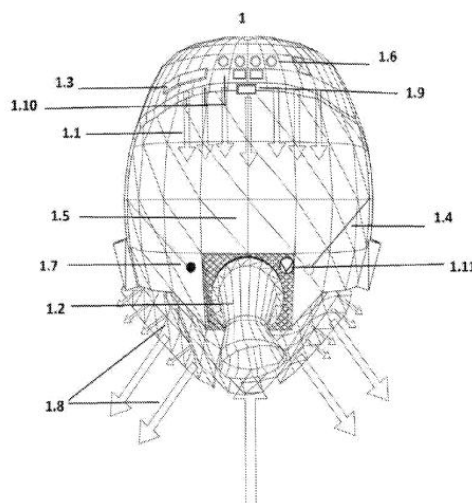
b. Sistema de casco blanco para protección contra enfermedades, comodidad y salud

La presente invención según lo realizado por Fevzi, O. (2022) se utiliza en diversos sectores, como la minería, centros comerciales, entre otros. También es aplicado en vehículos de transporte público y en lugares cerrados donde desee proteger a las personas del aire contaminado y los alérgenos. Además, está relacionado con medicamentos terapéuticos y extractos de hierbas en el sistema de collarín para el tratamiento de enfermedades y/o la prevención de las mismas.

El sistema de casco blanco y collarín, según la figura 24, está diseñado para acelerar la absorción de medicamentos en la sangre y mejorar la oxigenación al expandir los bronquios. Asimismo, para hidratar la piel, regenerar las células y proteger contra el calor. Por último, han desarrollado un sistema para transferir la información del paciente al personal sanitario a través de audio y video, permitiendo recomendar métodos de tratamiento adecuados.

48

Figura 24
Casco vista frontal



Nota. Sistema de casco blanco, objeto de la invención, vista frontal del caso blanco con ventilador estéril completo. Tomado de WO2022093161 (A2) - *White helmet system for protection from diseases, comfort and health purpose* por Fevzi, O., 2022, Espacenet Patent Search, (<https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pr%3DWO2022093161A2>)



c. Método y dispositivo para la desalinización de agua de mar

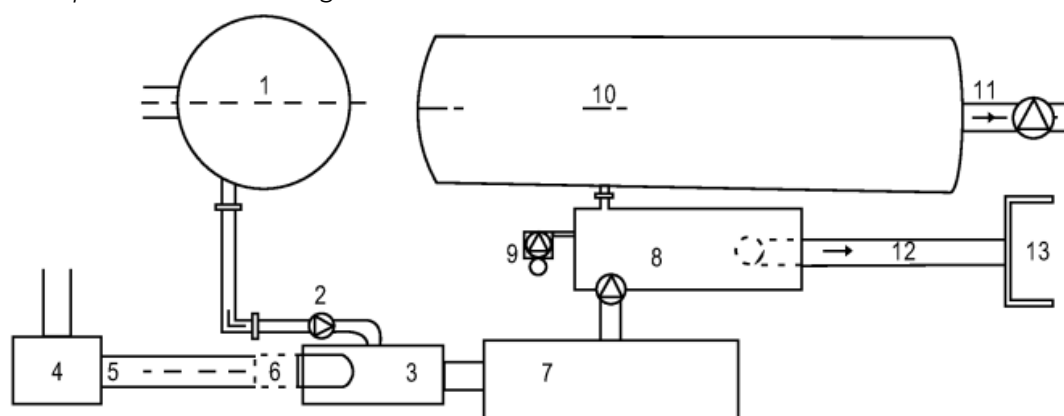
En la presente invención Langenecker y Zeilinger (2012) describen un método y un dispositivo para modificar el agua de mar o similares, según la figura 25, haciéndolas aptas para el riego, uso industrial o tratamiento en una planta de purificación de agua potable. Además, se busca extraer sustancias deseadas, como el boro, y eliminar residuos de procesos mineros, reduciendo los contaminantes ambientales, como los hidrocarburos y sustancias radiactivas.

Para lograr esto, utilizan la exposición a macrosonidos de alta intensidad, es decir, radiación de energía mecánica a frecuencias sónicas. Este tratamiento mejora la separación de la sal y otros materiales del agua, y activa la adsorción de estos materiales en sustancias sorbefacientes suministradas al proceso. La separación de los materiales adsorbidos se realiza mediante métodos comunes como la sedimentación, decantación, filtración o separación electrostática.

49

Figura 25

Dispositivo para desalinizar el agua



Nota. Diagrama de bloques que ilustra un dispositivo y un sistema para la desalinización de agua de mar. Tomado de WO2012021122 (A1) – *Method and apparatus for desalination of seawaters*, por Langenecker, B. & Zeilinger, C., 2012, Espacenet Patent Search, (<https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=prn%3DWO2012021122A1>).



d. Detección de secuencias prohibidas de procesamiento de materiales en una trituradora mediante análisis predictivo

La presente invención por Brockhurst, Banham, Harpour y Wesley (2023) consta de un método que implica recibir datos telemétricos en tiempo real, prediciendo secuencias de llegada y procesamiento, y emite comandos para ordenar, reasignar o retener camiones, por ejemplo, puede transportar materiales desde una ubicación de origen hasta una ubicación de destino.

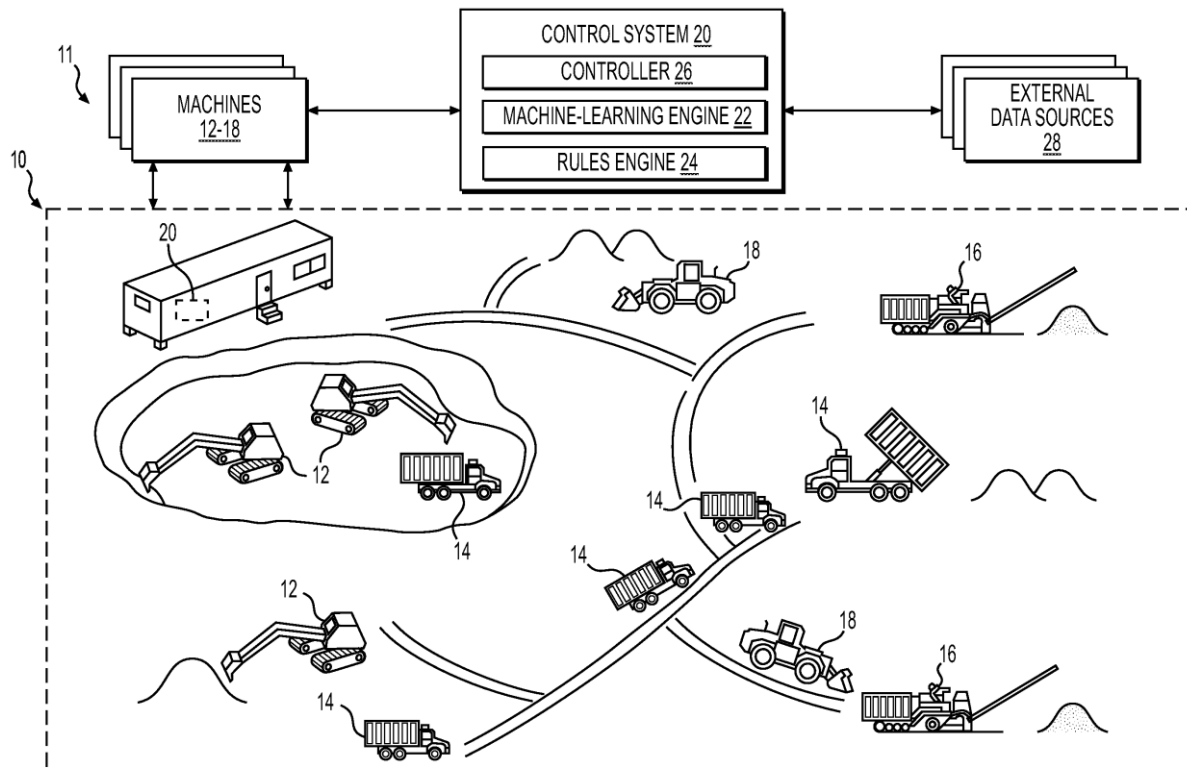
Las máquinas mostradas en la figura 26 son ilustrativas, y en el entorno físico pueden estar presentes diversos tipos de máquinas, como máquinas de movimiento de tierras (por ejemplo, cargadoras de ruedas, camiones volquete, retroexcavadoras, bulldozers o manipuladoras de materiales), camiones cisterna para transportar agua o combustible, vehículos de carretera, máquinas de trabajo (por ejemplo, pavimentadoras o compactadoras), y/o similares.

La patente resuelve el problema de la falta de coordinación en el acarreo y descarga de materiales en minería, que implica colas excesivas, tiempos muertos, uso ineficiente de equipos y riesgo de procesar materiales en ordenes inadecuadas. Finalmente, aporta una solución de optimización y control dinámico de la operación minera.



Figura 26

Sistema informático para monitorear y/o dirigir operaciones de las máquinas



Nota. Esquema ilustrativo de un entorno típico que incorpora tanto elementos físicos como máquinas, junto con un sistema informático asociado para monitorear y/o dirigir las operaciones de las máquinas. Tomado de “Avoiding prohibited sequences of materials processing at a crusher using predictive analytics” por Brockhurst, R., Banham, M., Harpourt, J., y Wesley, C., 2023, WIPO Organización Mundial de la Propiedad Intelectual.

https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US411170119&_cid=P20-LVL8XN-35206-1

e. Gestión de pozos de entrenamiento para pozos objetivo en Machine Learning

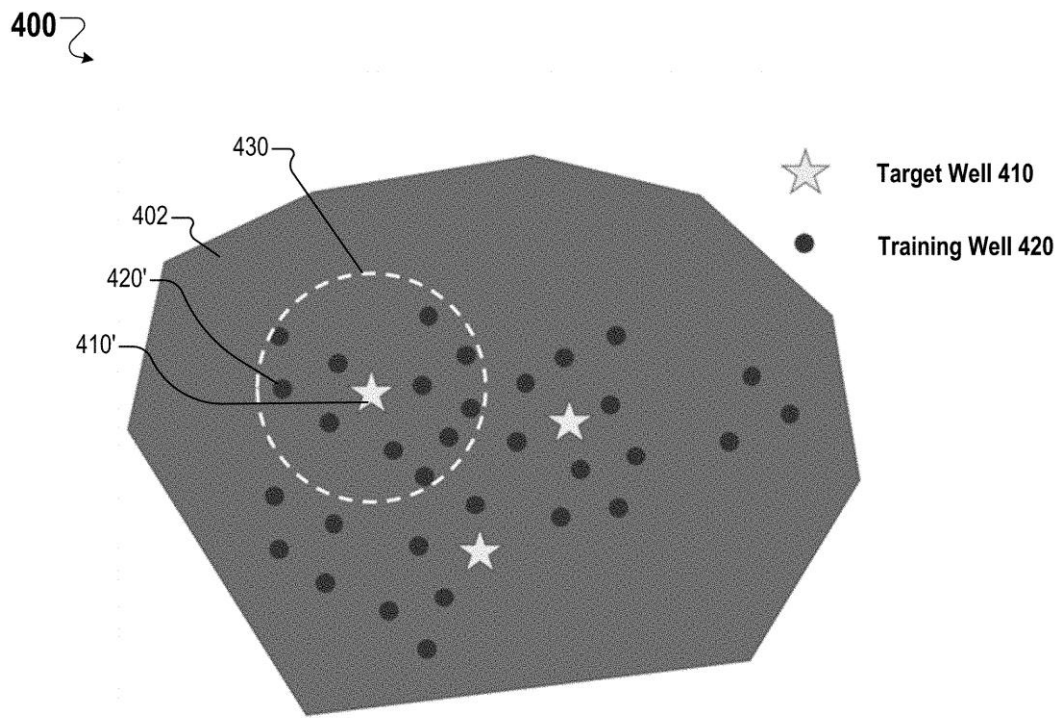
Respecto a la invención realizada por Xu, Lin, Fu, Li y Alzayer (2023) mencionan que, en la industria del petróleo, gas y minería, los pozos son cruciales tanto para la exploración como para la producción. Los registros son realizados al fondo de los pozos a través de una combinación de sensores físicos para obtener datos que miden diversas propiedades de la roca y el fluido, como irradiación, densidad, propiedades eléctricas y acústicas.



Estos registros son utilizados para estimar propiedades del yacimiento como porosidad, saturación de fluido y permeabilidad, esenciales para el modelado, la estimación y el pronóstico de producción. La representación de manera esquemática, según la figura 27, muestra la elección de los pozos de entrenamiento y los pozos objetivo, tomando en cuenta su proximidad de ubicación en un campo. El Machine Learning ofrece una alternativa para estimar estas propiedades utilizando múltiples registros de pozo, pero para optimizar el conjunto de datos de entrenamiento y lograr una alta precisión de predicción en los pozos o áreas específicas sigue siendo un desafío sin un enfoque sistemático y cuantitativo establecido.

Figura 27

Diagrama esquemático de pozos de entrenamiento y pozos objetivo



Nota. Diagrama esquemático que ilustra la selección de pozos de entrenamiento para pozos objetivo basada en la proximidad de ubicación en un campo. Tomado de "Managing training wells for target wells in Machine Learning" por Xu, C. et al., 2023, WIPO Organización Mundial de la Propiedad Intelectual.

https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US399578559&_cid=P20-LVLCK8-14234-1



f. Transporte de un material extraído

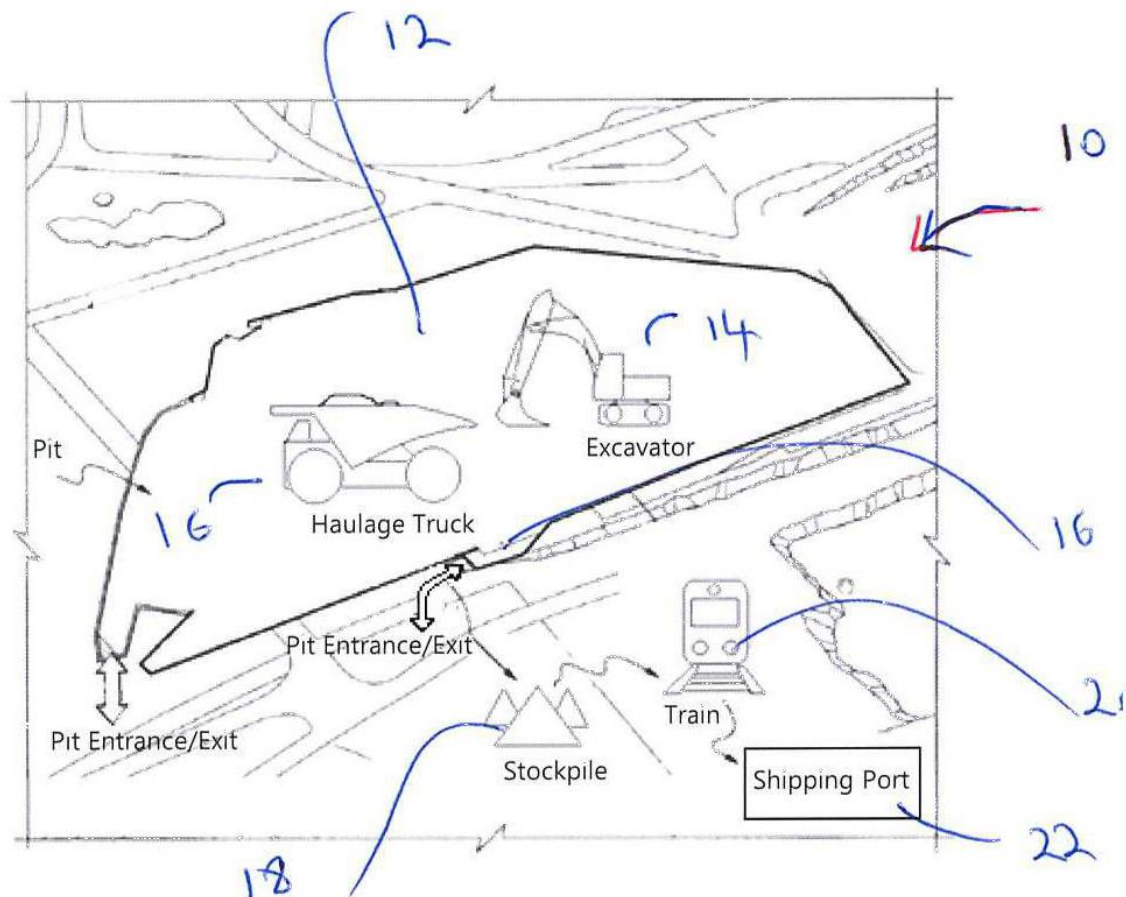
Según la invención de Oppolzer (2021) indica que la innovación aborda el transporte de material extraído y procesado tanto dentro como fuera de una mina, ya sea si es una mina a cielo abierto o subterránea. La representación esquemática de una mina a cielo abierto estándar y su proceso de extracción, se encuentra ubicada en la figura 28. En esta mina, un pozo se adentra debajo del nivel del suelo. Dentro de este pozo, palas cargadoras o excavadoras (u otro equipo de movimiento de tierras adecuado) excavan el material que se ha desprendido en el pozo tras ser volado desde los bancos (no representados) y lo cargan en las bandejas de camiones de transporte convencionales.

Estos camiones llevan el material desde el pozo hasta la superficie. Los camiones transportan el material extraído a lo largo de caminos específicos hasta un punto de salida en la superficie. Asimismo, suelen tener bandejas basculantes traseras y son vehículos de gran tamaño capaces de transportar grandes cantidades de material. Además, hacen referencia a un recipiente diseñado para recibir y transportar dicho material minero. También incluye una unidad móvil configurada para transportar estos contenedores dentro o fuera de la mina. Finalmente, la invención también contempla una mina que cuenta con una "pila de almacenamiento" para material minado, así como una instalación de almacenamiento para contenedores de material procesado proveniente de la misma.



Figura 28

Vista esquemática de una mina a cielo abierto



Nota. Vista esquemática de una mina a cielo abierto típica. Adaptado de "Transporting a mined material" por Oppolzer, F., 2021, WIPO Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=AU342868969&_cid=P20-LVLFCU-74328-1



3. Proyectos



Este capítulo presenta una selección de proyectos destacados que están modelando el sector minero, alineados con las tendencias actuales, la palabra de búsqueda fue minería. Los proyectos son iniciativas, financiadas por programas, organismos o empresas privadas reconocidas, que demuestran como la tecnología está redefiniendo las operaciones mineras, obtenidos del Servicio de Información sobre Investigación y Desarrollo Comunitario (CORDIS, 2024) que es el portal oficial de la Comisión Europea para difundir proyectos financiados por los programas de investigación e innovación de la Unión Europea, como Horizon 2020 y Horizon Europe.

Los proyectos aquí descritos han sido impulsados por consorcios multidisciplinarios, financiados por programas europeos o respaldados por reconocidas entidades privadas. Todos comparten un objetivo común como el de transformar las operaciones mineras tradicionales mediante la integración de tecnologías avanzadas, tales como inteligencia artificial, análisis de datos geoespaciales, sistemas autónomos, sensores de última generación y plataformas digitales interconectadas. Estas iniciativas no solo están optimizando procesos técnicos y reduciendo impactos ambientales, sino que también están sentando las bases para una minería más segura, eficiente y socialmente aceptada.

Mediante esta revisión, se evidencia como la tecnología está redefiniendo el futuro del sector minero, contribuyendo a una transición hacia modelos productivos más sostenibles.



a. Exploración minera segura y socialmente aceptada

El proyecto NEXT está basado en desarrollar nuevas tecnologías de exploración minera que sean más eficientes y con menor impacto ambiental. Entre las innovaciones, incluyen métodos geofísicos avanzados basados en drones equipados con múltiples sensores para la modelización geológica y estudios de exploración geoquímica. Su impacto es optimizar la exploración de minerales, reduciendo costos y minimizando el impacto ambiental, al mismo tiempo que mejora la precisión en la identificación de yacimientos minerales. La fecha de inicio del proyecto fue el 01 de mayo de 2018 y la fecha de fin fue el 30 de septiembre de 2021.

Figura 29

Tecnología de exploración innovadora



Nota. Exploración minera eficiente con impacto ambiental reducido. © Markku Pirttijärvi, Radai Oy. Tomado de "Efficient mineral exploration with reduced environmental impact" por CORDIS 2022. (<https://cordis.europa.eu/article/id/436267-efficient-mineral-exploration-with-reduced-environmental-impact>)



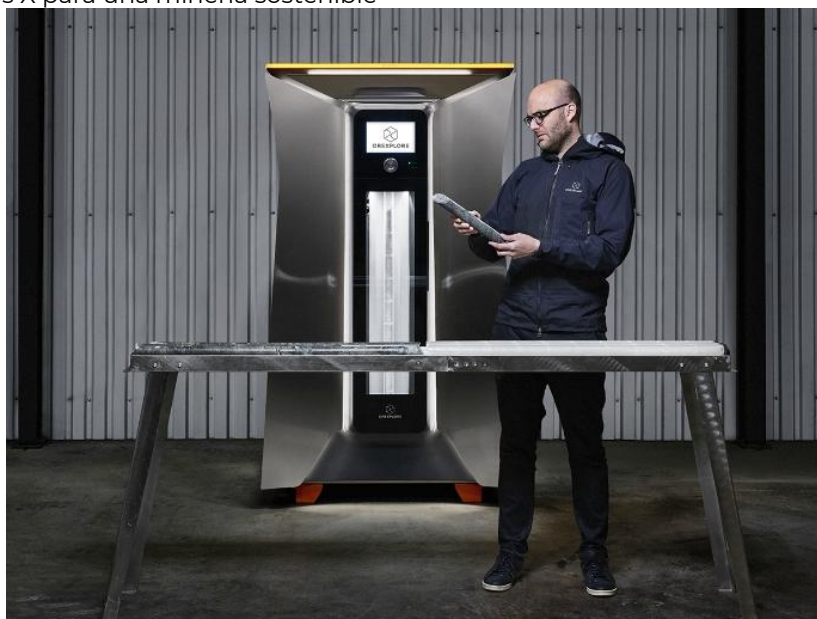
b. Análisis de minerales por rayos X en tiempo real para una minería eficiente y sostenible

La Unión Europea busca reducir su dependencia de materias primas importadas mediante mejores métodos de exploración y extracción sostenible. El proyecto X-MINE propuso demostrar tecnologías avanzadas como fluorescencia de rayos X (XRF), transmisión de rayos X (XRT) y visión 3D. Asimismo, su equipo ha desarrollado el X-Analyser y el X-AnalySorter, demostradas en minas europeas. Estas innovaciones permiten explotar depósitos complejos de forma eficiente y respetuosa con el medio ambiente. Su impacto abarca la mejora de la localización de minerales reduciendo el uso de energía, costos de transporte y emisiones de CO₂. La fecha de inicio del proyecto fue el 01 de junio de 2017 y la fecha de fin fue el 31 de agosto de 2021.

58

Figura 30

Visión 3D y rayos X para una minería sostenible



Nota. Consorcio europeo multidisciplinar cuenta con tecnologías avanzadas de rayos X y 3D para ayudar a la industria europea a acceder mejor a los recursos minerales europeos y reducir su dependencia de las importaciones. ©X-MINE. Tomado de "Real-Time Mineral X-Ray Analysis for Efficient and Sustainable Mining" por CORDIS 2020. (<https://cordis.europa.eu/article/id/422172-3d-and-x-ray-vision-for-sustainable-mining/>)



c. Pilotos de próxima generación neutro en carbono para sistemas de minería inteligente

El proyecto NEXGEN-SIMS busca impulsar la sostenibilidad de la industria minera mediante tecnologías digitales y el Internet de las cosas industrial. A través de proyectos pilotos, pretende demostrar su viabilidad, reducir riesgos de inversión y fomentar la modernización con tecnologías neutras en carbono. Esto aumentará la productividad y asegurará el acceso a nuevos recursos. La fecha de inicio del proyecto fue el 01 de mayo de 2021 y la fecha de fin fue el 30 de abril de 2024.

Figura 31
Transformación verde y digital de la minería



Nota. La minería europea está al borde de un salto evolutivo con vehículos completamente autónomos alimentados por baterías en un entorno minero interconectado 5G. ©Proyecto NEXGEN-SIMS. Tomado de "Next generation carbon neutral pilots for smart intelligent mining systems" por CORDIS 2023. (<https://cordis.europa.eu/article/id/446847-the-green-and-digital-transformation-of-mining>)

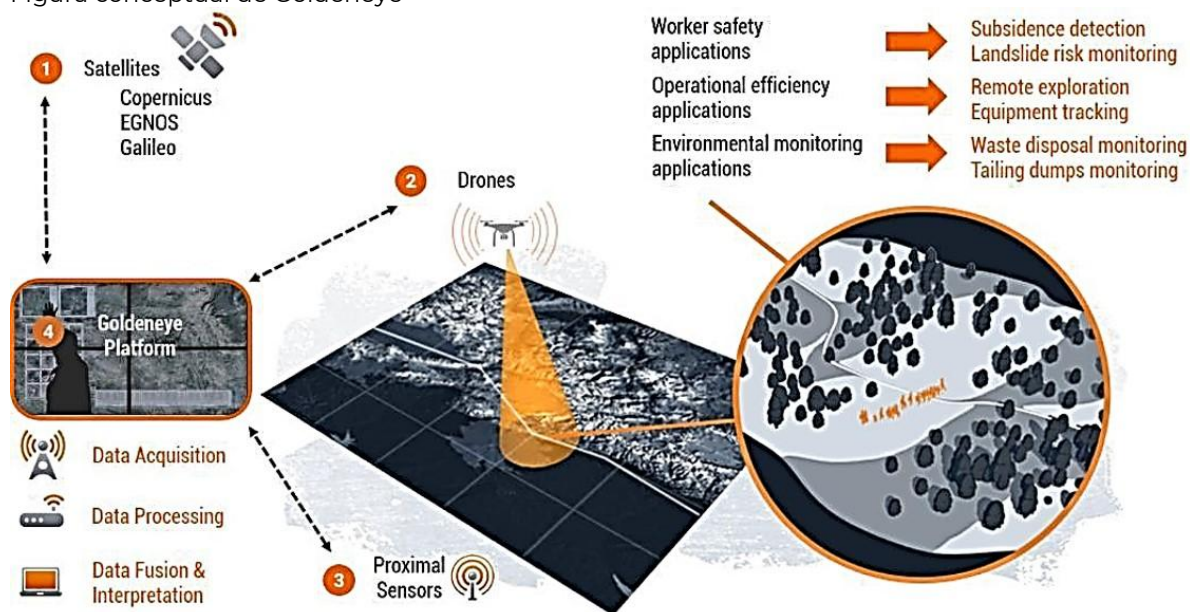


d. Plataforma de adquisición y procesamiento de datos de observación de la Tierra y GNSS terrestre para operaciones mineras seguras, sostenibles y rentables

Según CORDIS (2024) este proyecto fusiona datos satelitales, sensores IoT y herramientas de análisis avanzado para monitorear y gestionar operaciones mineras en tiempo real, aumentando la seguridad y eficiencia al proporcionar información precisa para la toma de decisiones. La fecha de inicio del proyecto fue el 01 de mayo de 2020 y la fecha de fin fue el 31 de octubre de 2023.

Figura 32

Figura conceptual de Goldeneye



Nota. La principal innovación del proyecto reside en la plataforma Goldeyene, de fácil uso, que permite la adquisición de datos de diversas fuentes (drones, sensores proximales y satélites), el procesamiento de datos basado en IA y la interoperabilidad con diferentes plataformas asociadas. Tomado de "Earth observation and Earth GNSS data acquisition and processing platform for safe, sustainable and cost-efficient mining operations" por CORDIS, 2024, (<https://cordis.europa.eu/project/id/869398/reporting>)



Conclusiones

- La investigación en el sector minero se está orientado hacia la adopción de tecnologías limpias y sostenibles, lo que evidencia un interés significativo en prácticas que minimicen el impacto ambiental y promuevan la eficiencia de recursos.
- Los artículos científicos en el plano internacional apuntan a reducir el impacto ambiental y aprovechar las nuevas tecnologías. Por ejemplo, Hsu-Kim et al. (2018) estudian sobre la contaminación acuática por mercurio. Por su parte, Nguyen et al. (2018) utilizan redes neuronales artificiales para predecir vibraciones en minas a cielo abierto, con el fin de evitar daños al medio ambiente y a las comunidades cercanas. A ello se suma la investigación de Durden et al. (2017) que diseñan un marco de gestión ambiental para la minería en aguas profundas.
- A nivel nacional, la investigación de Cacciuttolo y Marinovic (2023) documentan cómo el relleno de minas subterráneas con relaves mitiga la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Huamán-Mamani et al. (2021) desarrollan la fabricación de geopolímeros a partir de residuos mineros y de construcción transformando desechos en materiales útiles y sostenibles. Aron y Molina (2020) destacan el éxito de algunas empresas locales de la minería peruana han integrado innovaciones ecológicas en sus procesos. Muchos de los artículos científicos mencionados se centran en temas de sostenibilidad, manejo de residuos y la gestión del impacto ambiental de las actividades mineras, indicando que existe una tendencia creciente hacia prácticas más responsables y ambientalmente amigables.



- Las patentes identificadas reflejan cómo la innovación tecnológica se convierte en un motor para la sostenibilidad. A nivel internacional, Orlandi (2021) propone un sistema sostenible para procesar relaves y residuos industriales, dando paso a la economía circular. Langenecker y Zeilenger (2012) diseñan un método de desalinización de agua de mar, que responde al desafío global de la escasez hídrica, mientras que Brockhurst et al. (2023) desarrollan un sistema de control inteligente, a través de datos telemétricos para el monitoreo de máquinas.
- Los proyectos financiados por los programas de investigación e innovación de la Unión Europea evidencian cómo la minería avanza hacia modelos que protegen el medio ambiente y que son digitales. El proyecto NEXT (2018-2021) utilizó drones y sensores para la exploración con menos impacto ambiental; X-MINE (2017-2021) aplicó rayos X y visión 3D para una localización de minerales más eficiente; NEXGEN-SIMS (2021-2024) promueve una minería neutra en carbono, con vehículos completamente autónomos en un entorno minero interconectado 5G; y Goldeneye (2020-2023) combinando la adquisición de datos a través de drones, sensores de Internet de las Cosas y satélites, el procesamiento de datos basado en inteligencia artificial para monitorear operaciones en tiempo real.
- El boletín de vigilancia tecnológica ha presentado información sobre artículos científicos, patentes y proyectos relacionados al presente sector. No obstante, en caso de que ciertos temas no hayan sido abordados en este informe, se recomienda que los investigadores interesados profundicen en dichas áreas, a fin de complementar la información y contribuir al fortalecimiento del conocimiento.



Bibliografía

- Aron, A. y Molina, O. (2020). Green innovation in natural resource industries: The case of local suppliers in the Peruvian mining industry. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.09.002>.
- Banco Mundial. (2013). Minería: Resultados del sector. World Bank; Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/results/2013/04/14/mining-results-profile>
- Brockhurst, R., Banham, M., Harpour, J., y Wesley, C. (2023). Avoiding prohibited sequences of materials processing at a crusher using predictive analytics. WIPO Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US411170119&_cid=P20-LVL8XN-35206-1
- Cacciuttolo, C., y Marinovic, A. (2023). Experiences of underground mine backfilling using mine tailings developed in the Andean region of Peru: A green mining solution to reduce Socio-environmental impacts. Sustainability, 15(17), 12912. <https://doi.org/10.3390/su151712912>
- CORDIS (2024). Earth observation and Earth GNSS data acquisition and processing platform for safe, sustainable and cost-efficient mining operations. <https://cordis.europa.eu/project/id/869398/reporting>
- ComexPerú. (2021). Un país minero con inversión minera estancada, ¿Qué nos espera? ComexPerú. <https://www.comexperu.org.pe/articulo/un-pais-minero-con-inversion-minera-estancada-que-nos-espera>



- Durden, J., Murphy, K., Jaeckel, A., Van Dover, C., Christiansen, S., Gjerde, K.,... Jones, D. (2017). A procedural framework for robust environmental management of deep-sea mining projects using a conceptual model. Marine Policy, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.07.002>.
- Dutta, M., Saikia, J., Taffarel, S., Waanders, F., de Medeiros, D., Cutruneo, C.,... Saikia, B. (2017). Environmental assessment and nano-mineralogical characterization of coal, overburden and sediment from Indian coal mining acid drainage. Geoscience Frontiers, <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.11.014>.
- Fevzi, O. (2022). White helmet system for protection from diseases, comfort and health purpose. Espacenet Patent Search. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DWO2022093161A2>
- Hsu-Kim, H., Eckley, C., Achá, D., Feng, X., Gilmour, C., Jonsson, S y Mitchell, C. (2018). Challenges and opportunities for managing aquatic mercury pollution in altered landscapes. Ambio, 47(2), 141-169. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-1006-7>
- Huamán-Mamani, F. A., Mayta-Ponce, D. L., y Rodríguez-Guillén, G. P. (2021). Fabrication and evaluation of the mechanical behavior of geopolymer compounds using waste from the mining and construction industry. IOP conference series. Materials science and engineering, 1054(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1054/1/012002>
- Jie, D., Xu, X. y Guo, F. (2021). The future of coal supply in China based on non-fossil energy development and carbon price strategies. Energy (Oxford, England), 220(119644), 119644. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119644>



- Langenecker, B. y Zeilinger, C. (2012). Method and apparatus for desalination of seawaters. Espacenet Patent Search. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DWO2012021122A1>
- Malozyomov, B., Ivanovich, V., Brigida, V., Kukartsev, V., Tynchenko, Y., Boyko, A. y Tynchenko, S. (2023). Substantiation of drilling parameters for undermined drainage boreholes for increasing methane production from unconventional coal-gas collectors. *Energies*, 16(11), 4276. <https://doi.org/10.3390/en16114276>
- Nguyen, H., Bui, X., Tran, Q., Le, T., Do, N. y Hoa, L. (2018). Evaluating and predicting blast-induced ground vibration in open-cast mine using ANN: a case study in Vietnam. *SN Applied Sciences*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0136-2>
- Oppolzer, F. (2021). Transporting a mined material. WIPO Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=AU342868969&_cid=P20-LVLFCU-74328-1
- Orlandi, A. (2021). Sustainable system for processing fine tailings from mining, low-hardness minerals and industrial, electronic and construction waste, and products obtained therefrom. Espacenet Patent Search. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DWO2021113941A1>
- Ramirez-Llodra, E., Brandt, A., Danovaro, R., De Mol, B., Escobar, E., German, C.,...Vecchione, M. (2010). Deep, diverse and definitely different: unique attributes of the world's largest ecosystem. European Geosciences Union. <https://doi.org/10.5194/bg-7-2851-2010>



- Ramirez-Llodra, E., Tyler, P., Baker, M., Aksel, O., Clark, M., Escobar, E.,...Van Dover, C. (2011). Man and the last great wilderness: human impact on the deep sea. PloS One, 6(8), e22588. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022588>
- Sánchez, F., y Hartlieb, P. (2020). Innovation in the mining industry: Technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation. Mining, Metallurgy & Exploration, 37(5), 1385–1399. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1>
- Scopus (2025). Scopus. <https://www.scopus.com>
- University of Ljubljana (2025). Orange Data Mining. <https://orangedatamining.com/>
- VOSviewer - Visualizing scientific landscapes. (s/f). VOSviewer. Recuperado de <https://www.vosviewer.com/>
- Wang, Y., Huang, L., y Yang, W. (2010). A novel real-time coal miner localization and tracking system based on self-organized sensor networks. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010(1). <https://doi.org/10.1155/2010/142092>
- World Economic Forum. (2024). Estas start-ups disruptivas impulsan la innovación sostenible en la industria minera. World Economic Forum. <https://es.weforum.org/stories/2024/12/estas-start-ups-innovadoras-estan-causando-una-disrupcion-sostenible-en-la-industria-minera/>
- Xu, C., Lin, T., Fu, L., Li, W. y Alzayer, Y. (2023). Managing training wells for target wells in Machine Learning. WIPO Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US399578559&_cid=P20-LVLCK8-14234-1



Glosario

Minería: Conjunto de las minas y explotaciones mineras de una nación o comarca.

Industria: Conjunto de operaciones materiales ejecutadas para la obtención, transformación o transporte de uno o varios productos naturales.

Sostenible: Especialmente en ecología y economía, que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente.

Innovación: Creación o modificación de un producto, y su introducción en un mercado.

Tecnología: Conjunto de teorías y de técnicas que permiten el aprovechamiento práctico del conocimiento científico.

Dron: Aeronave no tripulada

Geoquímica: Estudio de la distribución, proporción y asociación de los elementos químicos de la corteza terrestre.