

Manejo de los desechos peligrosos provenientes de la minería para mitigar el impacto ambiental adverso en la Región La Libertad

Management of hazardous waste from mining to mitigate adverse environmental impact in the La Libertad Region

Jorge Enrique Medina Rodríguez * 

Programa de Doctorado en Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n- Ciudad Universitaria, Trujillo Perú.

*Autor correspondiente: jorge_medina_r@hotmail.com (J. Medina)

DOI: [10.17268/rev.cyt.2025.01.08](https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2025.01.08)

RESUMEN

Este estudio propone un modelo de gestión para reducir el impacto ambiental de los residuos peligrosos generados por la actividad minera en la Región La Libertad, utilizando un enfoque descriptivo y analítico basado en un análisis detallado de la bibliografía, con un inventario de empresas mineras y la caracterización de residuos, desde estériles hasta industriales, evaluando los impactos mediante una matriz de causa y efecto que derivó en un Plan de Gestión de Residuos Peligrosos con estrategias para la minimización, tratamiento y disposición final de los desechos, validado por expertos; aunque las empresas operan formalmente, persiste el desafío del manejo inadecuado de residuos, por lo que se concluye que implementar alternativas de minimización desde el origen es crucial para proteger el entorno natural y las comunidades vecinas, mientras que la aplicación efectiva del modelo contribuirá a evaluar residuos peligrosos, promover la responsabilidad ambiental en el sector minero y garantizar la preservación de los ecosistemas y la salud de las comunidades.

Palabras clave: Residuos peligrosos; impacto ambiental; valoración.

ABSTRACT

This study proposes a management model aimed at reducing the environmental impact caused by hazardous waste generated by mining activities in the La Libertad region. The approach used is both descriptive and analytical, based on a detailed analysis of the available literature. An inventory of mining companies was compiled, and the types of waste generated were characterized, ranging from sterile to industrial waste. Using a cause-and-effect matrix, environmental impacts were assessed, resulting in a Hazardous Waste Management Plan that includes strategies for waste minimization, treatment, and final disposal, validated by experts. Although companies operate within a formal framework, improper waste management remains a challenge. It is concluded that it is crucial to implement minimization alternatives from the source of waste generation to protect the natural environment and nearby communities. The effective implementation of the proposed management model will contribute to the evaluation of hazardous waste and foster greater environmental responsibility in the mining sector, ensuring the preservation of ecosystems and safeguarding the health of surrounding communities.

Keywords: Hazardous waste; environmental impact; assessment.

1. INTRODUCCIÓN.

La gestión de los desechos peligrosos generados por la actividad minera constituye un desafío crucial que impacta negativamente en el entorno natural y en las personas. Las actividades mineras producen desechos que contienen metales pesados, los cuales, si no se gestionan correctamente, tienen el potencial de contaminar tanto el suelo como los recursos hídricos. Este problema se ve exacerbado en diversas áreas donde la falta de regulaciones adecuadas y prácticas eficientes provoca una acumulación desmedida de residuos, contribuyendo al deterioro de los ecosistemas locales (May et al., 2019). A pesar de los esfuerzos por establecer lineamientos para una gestión racional de estos residuos, como los propuestos en diversas iniciativas regulatorias, la implementación efectiva sigue siendo un desafío. Es esencial que las empresas mineras adopten buenas



prácticas y tecnologías adecuadas para minimizar el impacto ambiental negativo, garantizando así un desarrollo sostenible en el sector (Patra & Dash, 2024).

La Unión Europea genera millones de toneladas de residuos peligrosos anualmente, representando el 3,8% del total de desechos en la región. De estos, casi la mitad se gestiona mediante vertederos, y solo el 13,9% se incinera o se valoriza energéticamente, lo que evidencia una fuerte dependencia de métodos con un alto impacto ambiental (Woźniak & Pactwa, 2018). Las políticas de gestión varían entre los Estados miembros: Alemania y Bélgica sobresalen en reciclaje, mientras que Bulgaria y Rumanía dependen mayormente del vertido. La gestión de residuos peligrosos mineros, que aporta millones de toneladas cada año, es especialmente crítica. En Hungría, varios sitios mineros de alto riesgo están cerca de cuerpos de agua, aumentando los riesgos ambientales (Manhart et al., 2019). Los lixiviados tóxicos de los vertederos contaminan suelos y aguas subterráneas, afectando la salud pública. Para mitigar estos efectos, la UE considera el uso de minas abandonadas y la encapsulación en cemento para convertir residuos peligrosos en materiales seguros. Además, la adopción de tecnologías limpias y diseños eficientes ayuda a reducir el impacto ambiental negativo, impulsando la economía circular y promoviendo prácticas más sostenibles (Konieczna et al., 2023).

América Latina y el Caribe (ALC) generan aproximadamente 145,000 toneladas de residuos diarios, con una parte significativa proveniente de la minería. Las tasas de reciclaje y recuperación son alarmantemente bajas, alrededor del 10% (Aguilar et al., 2021). En Chile, se generan aproximadamente 60 millones de toneladas de residuos mineros anuales. En Argentina, la cuantificación de residuos peligrosos es incompleta, aunque se están estableciendo directrices para su gestión. En Bolivia, la minería informal ha dejado más de 200 sitios contaminados (Schwarz & Omran, 2019). La gestión de residuos peligrosos mineros es crucial para reducir el impacto ambiental negativo, ya que la contaminación por metales pesados afecta la calidad del agua y los suelos agrícolas. Además, la infraestructura para el tratamiento de estos residuos es insuficiente, generando conflictos entre comunidades y empresas. Para mitigar estos problemas, es fundamental adoptar tecnologías de cero residuos y prácticas de minería sostenible, como la biominería y la fitorremediación, así como invertir en tecnologías limpias y promover la educación ambiental en las comunidades (Das et al., 2024).

Cada año, Perú genera cerca de 1,5 millones de toneladas de desechos peligrosos provenientes de actividades mineras, lo que ha llevado a la existencia de más de 1,000 sitios contaminados, de los cuales solo un 10% ha recibido tratamiento (Altamirano et al., 2020). Además, se ha encontrado que el 60% de las cuencas hídricas en zonas mineras tiene concentraciones elevadas de metales pesados. Con proyecciones que indican que en las próximas dos décadas el país generará más de 10 mil millones de toneladas de residuos mineros, queda claro que es esencial mejorar las políticas de gestión ambiental para mitigar el impacto negativo en el entorno. Para enfrentar estos retos, es fundamental implementar un enfoque de "cero residuos", utilizar tecnologías de relleno hidráulico y promover la reutilización de relaves en proyectos de construcción.

Cada año, la minería en la región de La Libertad genera aproximadamente 1,5 millones de toneladas de desechos peligrosos, lo que ha llevado a la existencia de más de 1,000 sitios contaminados. Un análisis revela que el 60% de las cuencas hídricas en estas regiones muestra concentraciones elevadas de metales pesados, lo que constituye un grave riesgo para la salud de las comunidades locales (Cacciuttolo & Marinovic, 2023). La insuficiencia de infraestructura adecuada para el manejo de estos residuos resulta en prácticas inapropiadas, como el vertido indiscriminado a cielo abierto. Para solucionar estos desafíos y mitigar el impacto ambiental adverso, es fundamental mejorar las normativas existentes y asignar recursos a la rehabilitación de las zonas impactadas. Algunas de las estrategias propuestas incluyen el tratamiento de aguas ácidas mediante el uso de roca caliza triturada, que ha logrado reducir el arsénico en un 93,48%, así como la disposición subterránea de relaves, que contribuye a resguardar las aguas subterráneas y superficiales (Castro et al., 2024).

Frente a este contexto, se plantea la siguiente cuestión de investigación: ¿De qué manera se puede minimizar el impacto ambiental adverso que generan los residuos peligrosos derivados de la minería en la Región La Libertad? Para lograrlo, se plantean los siguientes objetivos específicos: establecer procedimientos claros para el almacenamiento, transporte y disposición final de los residuos; analizar las actividades generadoras de residuos y su impacto ambiental, con el fin de implementar estrategias que reduzcan su cantidad y peligrosidad; y desarrollar un Plan de Contingencia con protocolos específicos para manejar emergencias relacionadas con residuos peligrosos, minimizando los riesgos para los empleados y la comunidad.

2. METODOLOGÍA.

La presente investigación se llevó a cabo con un enfoque descriptivo-analítico, utilizando diversas herramientas y técnicas para recopilar datos sobre la gestión de residuos peligrosos generados por la minería en la Región

La Libertad. Para abordar este tema, se empleó el método deductivo, partiendo del análisis de principios generales sobre el manejo de desechos peligrosos y su impacto ambiental, para luego aplicarlos al contexto específico de la Región La Libertad.

Se realizó un análisis exhaustivo de las fuentes disponibles, que incluyó artículos científicos, informes técnicos y normativas vigentes, lo cual permitió establecer un marco teórico sólido para guiar el desarrollo del estudio. Esta revisión bibliográfica fue complementada con un trabajo de campo que consistió en la identificación de las operaciones mineras presentes en la región y la caracterización de los residuos generados. Dichos residuos fueron clasificados según su tipo, cantidad y nivel de peligrosidad, proporcionando información clave para el análisis de su impacto ambiental.

Además, se evaluaron los efectos de estos residuos sobre recursos naturales como el agua, el suelo y el aire, así como en las comunidades cercanas a las zonas de influencia. Este análisis se realizó mediante el uso de herramientas específicas como matrices de impacto ambiental, que permitieron organizar y valorar de manera estructurada los efectos identificados.

Con base en los datos obtenidos, se diseñó un modelo de gestión orientado a mitigar el impacto ambiental de los residuos peligrosos mineros. Para asegurar la precisión y calidad del trabajo, se utilizaron herramientas como programas de gestión de referencias para organizar las fuentes bibliográficas, cuestionarios estructurados, protocolos estandarizados para la toma de muestras ambientales y software estadístico para el procesamiento de los datos recolectados.

La metodología desarrollada busca no solo proponer un modelo de gestión adaptado a las condiciones locales de la Región La Libertad, sino también contribuir con una base científica sólida que sirva de referencia para futuras investigaciones y el desarrollo de políticas públicas orientadas a la sostenibilidad ambiental.

Se elaboró un inventario de seis empresas mineras que operan en La Libertad: Barrick Misquichilca, Compañía Minera Poderosa, Compañía Minera Horizonte, Minera Aurífera Retamas, Compañía Minera Santa Rosa y Compañía Minera La Arena. La información recopilada, detallada en la Figura 1, identifica a los actores clave en la gestión de residuos del sector. Los datos, obtenidos de fuentes como la Sociedad Nacional de Minería y reportes empresariales, se organizaron en tablas y gráficos para su análisis. La Figura 2, por ejemplo, resume las exportaciones mineras entre 2023 y 2024, destacando la magnitud de la actividad en la región y su relación con la generación de residuos peligrosos.

Se identificaron y caracterizaron los tipos de residuos peligrosos generados en las actividades mineras, elaborando una lista detallada con la cantidad de cada uno. La Figura 3 ilustra los residuos de extracción y su proceso de generación, destacando la variedad de desechos asociados a la minería, desde estériles o lastre hasta residuos de flotación y lixiviación. Se utilizó una valoración de los impactos ambientales en la Región La Libertad, representada en la Figura 4 y la Figura 5, para evaluar los efectos de las actividades mineras. Esta evaluación fue fundamental para desarrollar el Plan de Gestión de Residuos Peligrosos, que detalla los impactos ambientales en las distintas fases de la actividad minera, desde la construcción hasta el cierre de las operaciones.

Finalmente, se elaboró un plan de gestión de residuos peligrosos que incluye estrategias para su minimización, tratamiento y disposición final, con el objetivo de mitigar el impacto ambiental. Este plan se formuló con los datos recopilados en fases previas y se validó con especialistas, asegurando la viabilidad y efectividad de las soluciones propuestas en el contexto regional.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio, centrado en la Región La Libertad, analiza las principales empresas mineras locales y su producción anual. Barrick Misquichilca lidera con 300,000 toneladas de oro, seguida por Compañía Minera Poderosa y Compañía Minera La Arena, ambas con 200,000 toneladas (zinc y oro, respectivamente). Minera Aurífera Retamas y Compañía Minera Santa Rosa aportan 120,000 y 100,000 toneladas de oro, mientras que Compañía Minera Horizonte produce 150,000 toneladas de zinc. Este panorama refleja una intensa actividad minera en la región, con énfasis en la extracción de oro, destacando la necesidad de diseñar modelos de gestión ambiental que consideren las dinámicas locales y las tendencias nacionales.

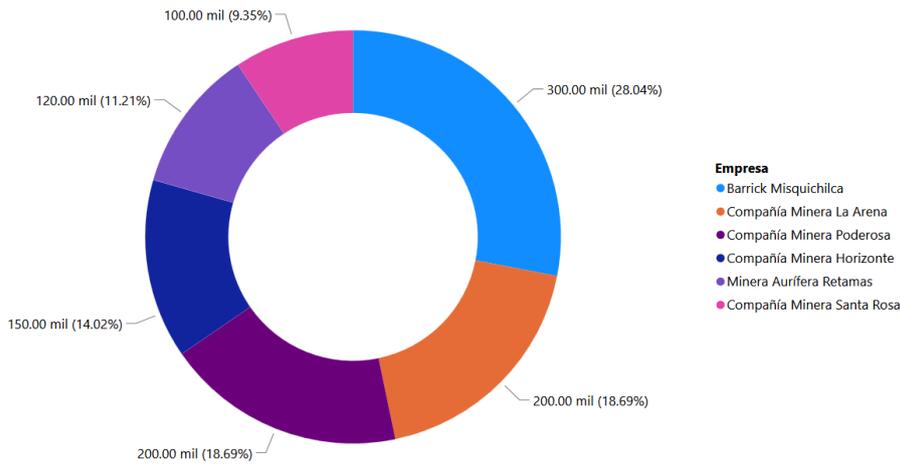


Figura 1. Principales empresas mineras productoras en La Libertad, Perú.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2024)

En julio de 2024, la producción minera presentó un comportamiento mixto: aumentos en estaño (53%) y molibdeno (29%), y caídas en cobre (2%) y zinc (11%), resultando en un crecimiento moderado del PBI del sector minero del 1%. Este crecimiento no es homogéneo, ya que factores como los precios internacionales y la eficiencia operativa afectan los resultados, lo que resalta la necesidad de modelos de gestión adaptativos. Humphreys (2019) sostiene que la volatilidad de los precios internacionales de los productos básicos impacta la producción minera, ya que las fluctuaciones en la demanda y los precios pueden conducir a la desindustrialización económica y afectar la redistribución de las regalías de los recursos naturales.

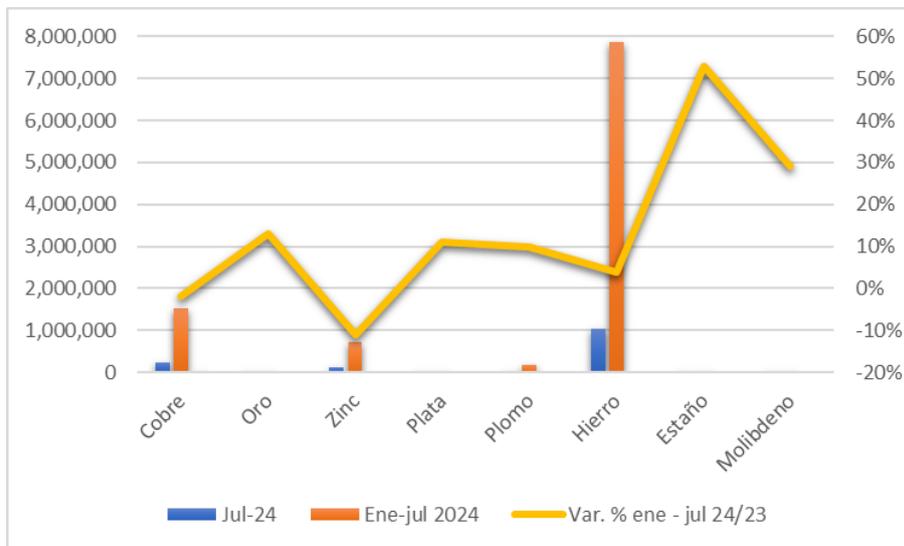


Figura 2. Variación de la Producción de Minerales en Perú – Julio 2024.

Fuente: Sociedad Nacional de Minería (2024).

Caracterización de los residuos peligrosos mineros

Tabla 1. Clasificación de Residuos Mineros según su Origen y características.

| Tipo Residuo | Descripción |
|---------------------------------|--|
| Residuos de flotación (relaves) | Desechos formados por partículas finas tras la extracción del mineral valioso. |

| Tipo Residuo | Descripción |
|---|--|
| Residuos de extracción: Estéril o Lastre | Material sin valor económico extraído del yacimiento. |
| Residuos de extracción: Desmontes de minas subterráneas | Materiales estériles generados durante la construcción de túneles y rampas. |
| Residuos de extracción: Minerales de baja ley | Minerales cuyo contenido metálico es bajo y no es rentable procesarlos en el momento. |
| Residuos de fundición (escoria) | Subproducto generado durante la fundición de concentrados de cobre. |
| Residuos de lixiviación (ripios) | Residuos tras la lixiviación de mineral triturado tratado con ácido sulfúrico o cianuro. |

La caracterización de los residuos mineros que se presenta en la Tabla 1, muestra una disminución proyectada para 2025 en categorías como estéril o lastre, desmontes y minerales de baja ley, sin embargo, los residuos de flotación (relaves) y rípios aumentarán un 6,7 % y 20 %, respectivamente, según la Figura 3. Este incremento resalta la necesidad de una gestión adecuada, ya que su mal manejo puede liberar metales tóxicos, generando contaminación del agua, suelo y pérdida de biodiversidad. Implementar estrategias de cero desechos, como reciclaje y reutilización, es esencial para mitigar estos impactos (Patra & Dash, 2024).

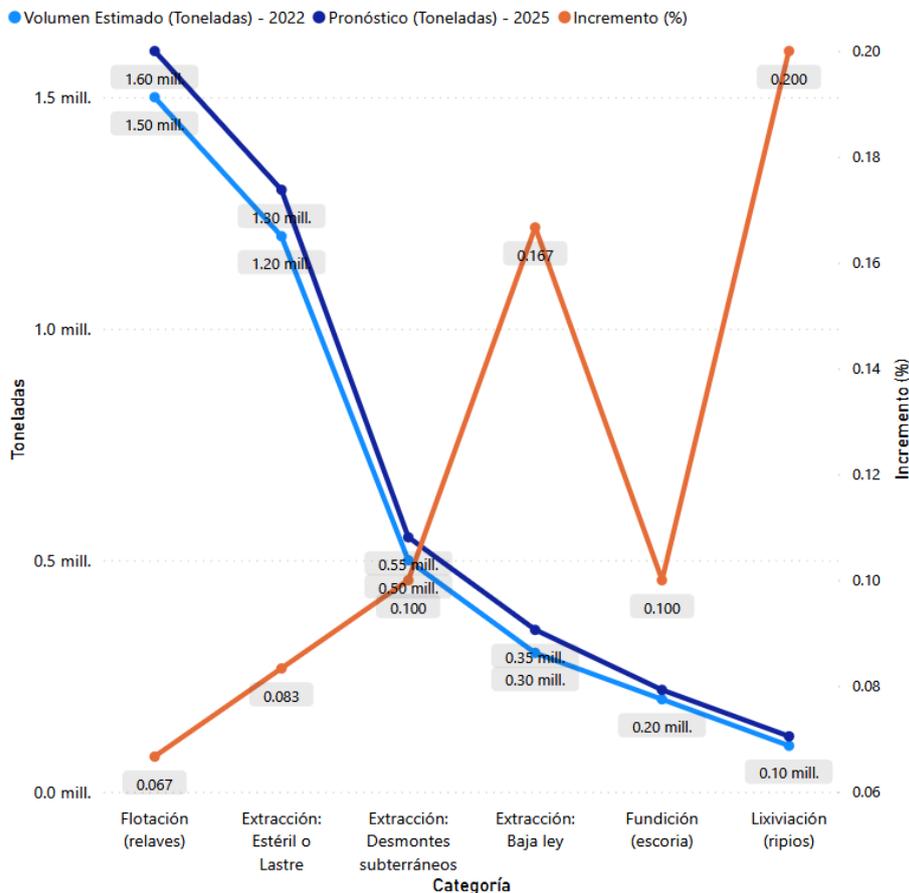


Figura 3. Comparación del Volumen Estimado y Pronóstico con Incremento Porcentual por Categoría (2022-2025).

Fuente: Sociedad Nacional de Minería (2024).

Identificar los impactos negativos sobre el ambiente proveniente de los residuos peligrosos mineros

La Tabla 2 destaca las actividades mineras que generan impactos ambientales, como el transporte, la disposición de escombros y los frentes mineros, con un índice de prioridad de 20, afectando principalmente al

aire y suelo. Los impactos más relevantes son la emisión de gases, contaminación y remoción del suelo. Estos resultados se contrastan con la Figura 3, que muestra una disminución en ciertos residuos y un aumento en la categoría de lixiviación (F), lo que subraya la necesidad de ajustar la gestión de residuos y mitigar los impactos ambientales, especialmente en actividades que afectan el aire y el suelo.

Tabla 2. Clasificación de Residuos Mineros por Actividad, Impacto Ambiental y Prioridad de Mitigación.

| Actividad Principal | Impacto Ambiental | Componente Ambiental | Índice de Prioridad | Porcentaje relativo |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Transporte interno | Emisión de gases | Aire | 20 | 13% |
| Disposición de escombros | Contaminación del suelo | Suelo | 20 | 13% |
| Frentes mineros | Remoción del macizo rocoso | Suelo | 20 | 13% |
| Construcción de edificaciones | Pérdida de suelo | Suelo | 12 | 8% |
| Perforación y voladura | Emisión de material particulado | Aire | 12 | 8% |
| Generación de empleo | Generación de expectativas | Social | 12 | 8% |
| Perforación y voladura | Generación de ruidos | Aire | 9 | 6% |
| Perforación y voladura | Erosión | Suelo | 9 | 6% |
| Transporte interno | Generación de ruidos | Aire | 9 | 6% |
| Disposición de escombros | Sedimentación | Agua | 9 | 6% |
| Frentes mineros | Afectación de comunidades faunísticas | Biota | 9 | 6% |
| Modificación del paisaje | Cambios en el uso del suelo | Suelo | 9 | 6% |

La Figura 4 muestra que la perforación y voladura ocupan el 20% de las actividades mineras, seguidas de la disposición de escombros y los frentes mineros, con un 19,3% cada una. Aunque la construcción de edificaciones y la generación de empleo tienen un impacto ambiental menor, el transporte interno (8%) y la modificación del paisaje (6%) generan emisiones, deforestación y pérdida de hábitats. Las actividades mineras en general tienen impactos ambientales variados, siendo la eliminación de residuos y los frentes mineros los que causan mayor contaminación en suelo y agua. Los mayores efectos provienen del transporte y los frentes mineros, por lo que es esencial adoptar prácticas sostenibles, como la recuperación de tierras, la restauración de ecosistemas y el uso de micorrizas y compost, como sugieren Akhmadiyev y Ekzaryan (2020).

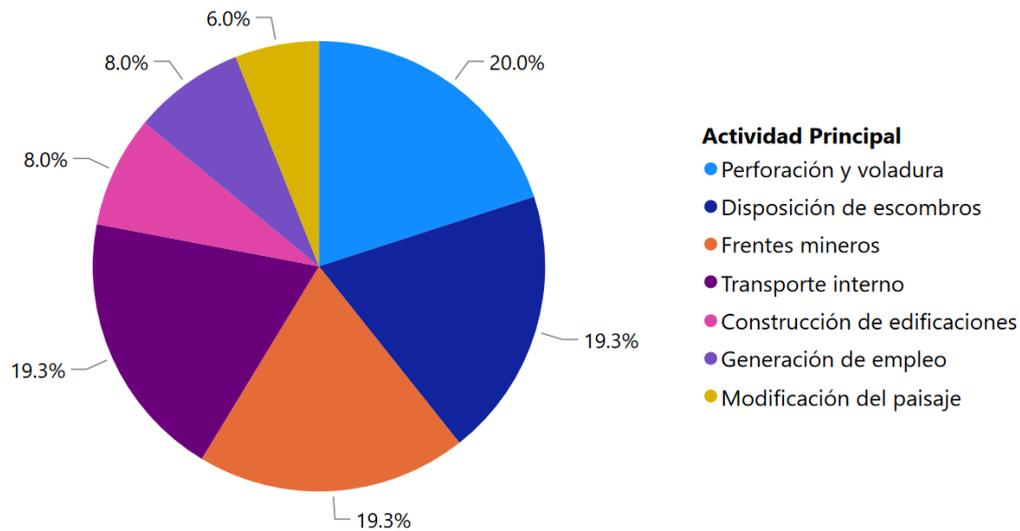


Figura 4. Distribución Relativa de Impactos Ambientales Generados por Residuos Mineros según Actividades.

Evaluación e identificación de impactos

El análisis de los impactos ambientales en La Libertad, según la Figura 5 y el estudio de Castro et al. (2024), muestra coincidencias y diferencias. Ambos destacan la alta intensidad de la contaminación del agua (25%) y la contaminación del suelo (37,5%) con efectos duraderos. Sin embargo, el estudio de Castro et al. (2024), especifica contaminantes como metales pesados, arsénico y plomo, mientras que la Figura 5 no los menciona. La contaminación del aire presenta una intensidad y extensión medias (20%) en ambos, pero la Figura 5 agrega detalles sobre la capacidad de recuperación y duración temporal, que no se mencionan en el estudio de Castro et al. En lo social, ambos reconocen el empleo como un impacto positivo pero temporal, con el estudio de Castro et al. señalando su limitada duración en las comunidades locales.

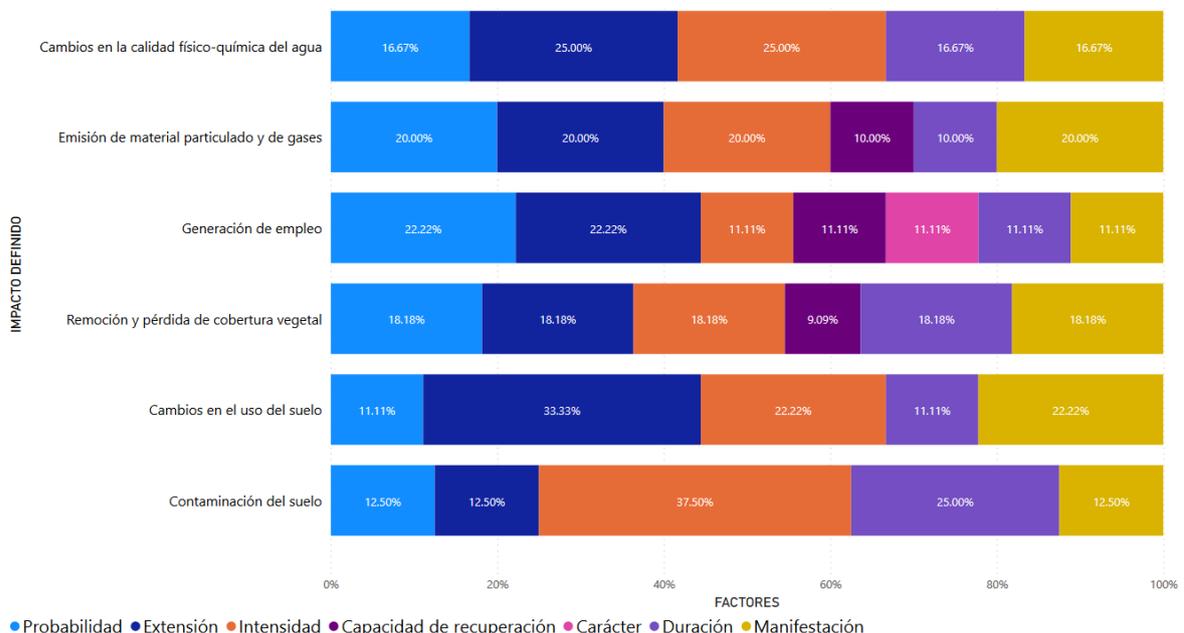


Figura 5. Valoración de impactos ambientales Región La Libertad.

Modelo de gestión desarrollando el Plan de manejo de los residuos peligrosos

Para garantizar un entorno saludable y armonioso con la naturaleza, es clave gestionar eficazmente la producción, almacenamiento, tratamiento y recuperación de residuos, especialmente los peligrosos. La meta es

minimizar la generación de residuos perjudiciales para el medio ambiente. Alawa et al. (2023) destaca la importancia de gestionar los residuos peligrosos a lo largo de su ciclo de vida, reduciendo su impacto mediante economía circular, tratamientos físicos, químicos y biológicos, y utilizando métodos de eliminación segura como la incineración controlada. El reciclaje y la reutilización ayudan a reducir su volumen y la necesidad de eliminación.

La minimización de los residuos peligrosos

El Plan de Manejo de Residuos Peligrosos exige a las empresas mineras de la Región La Libertad realizar un análisis de opciones para minimizar residuos, promoviendo la prevención y reducción de la cantidad y peligrosidad de los mismos. Entre las estrategias recomendadas están la disminución en la generación de residuos y la promoción del reciclaje. En línea con esta estrategia, Cacciuttolo y Marinovic (2023) apoyan el uso de tecnologías avanzadas como el relleno hidráulico y cementado, que ayudan a reducir el volumen de relaves mineros, facilitando su eliminación subterránea y contribuyendo a una gestión más eficiente y menos impactante del medio ambiente.

Procedimientos en el manejo por parte de las empresas

Los procedimientos buscan establecer un método para gestionar los residuos peligrosos de las empresas mineras. Esto implica su almacenamiento temporal en bodegas designadas y su posterior traslado a un sitio autorizado para disposición final, garantizando el cumplimiento de las leyes y regulaciones, lo que resguarda tanto la salud de los trabajadores como la protección del entorno natural. Castrejón et al. (2021) sostienen que, para lograr esto, es fundamental seguir un proceso estructurado de identificación, clasificación y manejo adecuado de los desechos peligrosos, minimizando los riesgos tanto para los trabajadores como para el medio ambiente. La gestión de residuos peligrosos incluye:

1. Recolección de los residuos en contenedores apropiados en el sitio de generación, los cuales estarán claramente etiquetados. Estos contenedores serán transportables, en forma de tambor, y tendrán un tamaño adecuado y compatible con el tipo de residuo que se almacenará, además de estar correctamente señalizados según sus características de peligrosidad.
2. A continuación, los residuos serán transportados y almacenados de manera temporal en una de las instalaciones habilitadas para la guarda de desechos peligrosos, según el lugar donde se generaron. Estas bodegas estarán específicamente diseñadas para contener contenedores transportables.
3. Luego, serán transportados a una instalación autorizada donde se llevará a cabo su tratamiento de manera segura y controlada.

El proceso destinado a garantizar el funcionamiento seguro de la Bodega de Almacenamiento de Residuos Peligrosos incluye las siguientes acciones:

1. Acceso, Mantenimiento y Control: La entrada se encuentra despejada en todo momento para facilitar el ingreso de vehículos de transporte. El acceso al área será restringido, permitiendo solo la entrada a personal autorizado, sujeto a vigilancia y control.
2. Capacitación, Equipos de Protección y Señalización: Todo el personal de la bodega debe estar capacitado en la gestión segura de residuos y en procedimientos ante derrames, incendios o fugas. La información sobre riesgos estará en las Hojas de Seguridad (HDS) y cada sección estará señalizada con el usuario y tipo de residuo.
3. Identificación, Registro y Gestión de Almacenamiento: Los residuos peligrosos deben identificarse claramente, indicando sus riesgos y clasificados por incompatibilidad. Es esencial mantener actualizadas las Hojas de Seguridad (HDS). Se debe llevar un registro de peligrosidad, cantidad, peso, volumen, propiedades físico-químicas, ubicación, fecha de recepción y procedencia. Los residuos deben retirarse antes de que la bodega alcance el 70% de su capacidad o si llevan más de seis meses almacenados.

Programas de capacitación

La formación en gestión de residuos peligrosos se enfocará en todos los empleados de las empresas mineras, con énfasis en el profesional encargado y el personal operativo, quienes recibirán capacitación cada dos años.

Las empresas contratistas también implementarán programas de formación sobre manejo de residuos, legislación nacional, el Plan de Manejo de Residuos Peligrosos, procedimientos internos y medidas de emergencia.

Plan de contingencia

El propósito del Plan de Contingencia es definir las directrices esenciales para garantizar una gestión segura de los residuos peligrosos en situaciones de emergencia. Su finalidad es controlar y reducir al mínimo los incidentes que puedan surgir de posibles incendios o derrames de residuos peligrosos, los cuales podrían amenazar la salud tanto de los empleados como de la comunidad. Este plan de acción se organiza de la siguiente manera:

1. Inicio de la Emergencia: Este enfoque se centra en objetivos clave: salvaguardar la seguridad de los trabajadores, reconocer residuos peligrosos y establecer un sistema de comunicación interna para garantizar una respuesta eficiente ante emergencias.
2. Durante la Fase de Control: El objetivo es prevenir la difusión de incidentes y reducir la posibilidad de que se repitan, mediante la definición de condiciones precisas para suspender las operaciones, además de asegurar la correcta provisión de equipos de emergencia y elementos de protección personal.
3. Después de la Emergencia: Es fundamental definir un protocolo para gestionar los residuos relacionados con la emergencia, así como los que se produzcan durante su control, y asegurar que no haya otros desechos o sustancias incompatibles en la zona afectada.

Las empresas mineras en la región, que se centran principalmente en la extracción de oro, operan bajo un marco formal que les permite realizar contratos y colaborar con terceros. Esto coincide con lo que menciona la literatura sobre la estructura operativa del sector minero en Perú, donde la formalización se asocia con un mayor cumplimiento de normativas ambientales (Martinez et al., 2021). No obstante, la gestión ineficaz de los residuos generados durante las actividades mineras sigue siendo un desafío importante, ya que estos residuos no solo provienen de la extracción de minerales, sino también de procesos industriales asociados, como la flotación y fundición (Qi & Benson, 2023).

La clasificación de los residuos peligrosos, que abarca estériles, minerales de baja ley, escorias y residuos industriales, evidencia la complejidad del problema. Este hallazgo respalda las afirmaciones de (Coayla et al., 2024), quienes destacan que la gestión ineficaz de los diversos tipos de residuos puede resultar en contaminación del suelo y del agua, lo que afecta no solo a los ecosistemas locales, sino también a las comunidades cercanas. Además, la inclusión de residuos por tipo de material, como envases y lubricantes, subraya la necesidad de abordar el ciclo completo de vida de estos materiales en la gestión de residuos.

El uso de la matriz causa-efecto para identificar los impactos ambientales demuestra la interrelación entre el manejo de residuos y la salud ambiental de la región. Según Sarupria et al. (2019), la implementación de herramientas de evaluación como esta es crucial para establecer un diagnóstico claro sobre los efectos negativos de las actividades mineras. Esto también permite diseñar un modelo de gestión efectivo que no solo minimice los residuos, sino que también considere la reducción de la peligrosidad desde su origen. Las alternativas de minimización propuestas en tu estudio, basadas en prácticas exitosas de otras empresas del sector, son un paso en la dirección correcta para reducir el impacto ambiental (Bond & Morrison, 2018).

4. CONCLUSIONES

En este estudio se concluye que es de mucha relevancia la propuesta del modelo de gestión para el manejo de residuos peligrosos en la minería, con el fin de reducir el impacto ambiental y garantizando un entorno saludable. A través de la propuesta del Plan de Manejo de Residuos Peligrosos, se minimiza la generación de residuos desde su origen y promueve el reciclaje, contribuyendo a la reducción de la contaminación. Los procedimientos establecidos para el almacenamiento, transporte y disposición final de los residuos aseguraron el cumplimiento de las normativas y la protección del medio ambiente y la salud de los trabajadores.

Asimismo, se concluye que el análisis de las actividades generadoras de residuos y su impacto ambiental se evidenció la necesidad de aplicar estrategias que reduzcan tanto la cantidad como la peligrosidad de los residuos. Los programas de capacitación periódicos fueron clave para asegurar que el personal manejara los residuos de forma segura y efectiva, manteniendo altos estándares en las prácticas laborales.

En el Plan de Contingencia se subrayó la importancia de contar con protocolos claros para manejar emergencias relacionadas con residuos peligrosos, reduciendo los riesgos para empleados y la comunidad. Los hallazgos también coincidieron con la literatura, que señala la gestión ineficaz de los residuos como un desafío persistente en la minería, especialmente en procesos industriales como flotación y fundición.

En conclusión, se desarrolló un modelo de gestión adaptado a la minería en la Región La Libertad, centrado en la minimización y control de residuos, esencial para mitigar impactos ambientales y fomentar un manejo responsable, alineado con las mejores prácticas internacionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, A., Peña, E., Vitvar, T., Koepke, R., & Menéndez, J. M. (2021). A Comparative Study of Mining Control in Latin America. *Mining*, 1(1), 6–18. <https://doi.org/10.3390/mining1010002>
- Akhmadiyev, A. K., & Ekzaryan, V. N. (2020). Rehabilitation of the natural environment as the structural element of ecological security. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2020(2), 112–120. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-2-0-112-120>
- Altamirano, P., Supa, J., Pehovaz, H., Raymundo, C., Mamani, N., & Dominguez, F. (2020). Filling Method Implementing Hydraulic Lime for Reusing Mine Tailings and Improve Sustainability in Conventional Peruvian Underground Mines. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1209 AISC. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50791-6_41
- Bond, A., & Morrison, A. (2018). Environmental impact assessment and the quest for sustainable mining. In *Mining and Sustainable Development: Current Issues*. <https://doi.org/10.4324/9781315121390>
- Cacciuttolo, C., & 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 (Switzerland)*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/su151712912>
- Castrejón, M. L., Díaz, A., Rodríguez, A. J., Mussali, P., & Tovar, E. (2021). Mining waste management alternatives, biological monitoring and bioremediation strategies. In *Environmental Management: Ecosystems, Competitiveness and Waste Management*.
- Castro, E., Cristobal, A., Lopez, G., Tantavilca, N., & Espinoza, P. (2024). In situ removal of arsenic from the mine drainage of the la Calzada mine environmental liability by neutralization with limestone. *AIP Conference Proceedings*, 3203(1). <https://doi.org/10.1063/5.0222662>
- Coayla, E., Romero Carrion, V. L., & Bedón Soria, Y. T. (2024). Economic regulation and environmental impact of large copper mining in the development of Peru. *Economía, Sociedad y Territorio*, 24(74). <https://doi.org/10.22136/est20242032>
- Das, S., Sahu, H., & Mishra, S. (2024). Green Technologies for Mining Waste Management. In *Sustainable Management of Mining Waste and Tailings: a Circular Economy Approach*. <https://doi.org/10.1201/9781003442455-3>
- Humphreys, D. (2019). The mining industry after the boom. *Mineral Economics*, 32(2), 145–151. <https://doi.org/10.1007/s13563-018-0155-x>
- Konieczna, M., Szumny, M., Fuławka, K., Jaśkiewicz, I., Pactwa, K., Kozłowska, A., Joutsenvaara, J., & Aro, P. (2023). Challenges Related to the Transformation of Post-Mining Underground Workings into Underground Laboratories. *Sustainability (Switzerland)*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/su151310274>
- Manhart, A., Vogt, R., Priester, M., Dehoust, G., Auberger, A., Blepp, M., Dolega, P., Kämper, C., Giegrich, J., Schmidt, G., Schmidt, G., & Kosmol, J. (2019). The environmental criticality of primary raw materials – A new methodology to assess global environmental hazard potentials of minerals and metals from mining. *Mineral Economics*, 32(1), 91–107. <https://doi.org/10.1007/s13563-018-0160-0>
- Martinez, G., Smith, N. M., & Malone, A. (2021). Formalization is just the beginning: Analyzing post-formalization successes and challenges in Peru's small-scale gold mining sector. *Resources Policy*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102390>
- May, I. V., Kleyn, S. V., & Vekovshinina, S. A. (2019). Assessment of impact of accumulated environmental damage to the quality of soil, surface and groundwater, agricultural products resulted from the mining enterprise. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 315(6). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/6/062024>

- Ministerio de Energía y Minas. (2024). Mapa de Principales Unidades Mineras en Producción 2024. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/5724261-mapa-de-principales-unidades-mineras-en-produccion-2024>
- Patra, H. S., & Dash, A. K. (2024). Management and Recycling of Mining Wastes with Zero Waste Adaptation Technology as a Tool for Sustainable Environmental Management. In Sustainable Management of Mining Waste and Tailings: a Circular Economy Approach. <https://doi.org/10.1201/9781003442455-12>
- Qi, C., & Benson, C. H. (2023). Managing Mining and Minerals Processing Wastes: Concepts, Design, and Applications. In Managing Mining and Minerals Processing Wastes: Concepts, Design, and Applications. <https://doi.org/10.1016/C2021-0-00553-8>
- Sarupria, M., Manjare, S. D., & Girap, M. (2019). Environmental impact assessment studies for mining area in Goa, India, using the new approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7135-z>
- Schwarz, O., & Omran, A. (2019). Mining Environmental Disasters in North and South America: The Current Practices and the Way Forward. In *Sustaining our Environment for Better Future: Challenges and Opportunities*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7158-5_2
- Sociedad Nacional de Minería, P. y E. (2024). Boletín Estadístico Mensual Minero / Julio 2024 - SNMPE. <https://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones/boletin-estadistico-mensual/mineria/8793-boletin-estadistico-mensual-minero-julio-2024.html>
- Woźniak, J., & Pactwa, K. (2018). Overview of polish mining wastes with circular economy model and its comparison with other wastes. *Sustainability (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/su10113994>