



Facultad de

Ciencias e Ingeniería

Estrategias para el reaprovechamiento de los lodos derivados del tratamiento de drenaje ácido de mina, plantas de Pucará y Azalia, Daniel Alcides Carrión, Pasco

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR(ES)

DANIEL RAUL CHAMORRO GRADOS

LICIE SOLAINCH PAREDES BEDOYA

ASESOR(ES)

BRAM LEO WILLEMS

LIMA - PERÚ

2026

Jurado calificador:

Presidente: M. Sc. Danny Emerson Robles Sanchez

Vocal: D. Sc. Edwin Julio Palomino Cadenas

Secretario: M. Sc. Flor Maria Ortega Blas

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Los egresados:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES
1.	CHAMORRO GRADOS DANIEL RAUL
2.	PAREDES BEDOYA LICIE SOLAINCH

Pertenecientes al programa de la CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL, autores del trabajo titulado: Estrategias para el reaprovechamiento de los lodos derivados del tratamiento de drenaje ácido de mina, plantas de Pucará y Azalia, Daniel Alcides Carrión, Pasco, el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL bajo la modalidad de TESIS.

En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE	FACULTAD	NIVEL DE ASESORÍA
1.	WILLEMS BRAM LEO	FACI	ASESOR

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de 17%, según el reporte emitido por el software Turnitin® (identificador de entrega: 3574381501; fecha de entrega: 19/05/2026).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: Lima, 19 de mayo de 2025



Firma del asesor

Nº DNI: 48373712

ORCID: 0000-0002-0666-4655

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	1
Abstract	2
I. Introducción:	3
1.1 Pasivos Ambientales Mineros	6
1.2 Procesos de tratamientos de remediación	9
1.3 Casos de Estudio relacionados a las plantas de Pucará y Azalia	14
1.4 Estrategias de reaprovechamiento para las plantas de Pucará y Azalia	16
II. Justificación	18
III. Pregunta de Investigación	18
IV. Objetivos	19
4.1 Objetivo general:	19
4.2 Objetivos específicos:	19
V. Metodología	19
5.1 Tipo de estudio	19
5.2 Área de estudio	20
5.3 Actividades	22
5.4 Operacionalización de variables	26
5.5 Análisis de Información	29
VI. Resultados	32
6.1 Identificación y clasificación de estrategias ambientalmente sostenibles	32
6.2 Evaluación de la sostenibilidad ambiental para el caso de AMSAC	36
6.3 Estrategias alternativas y ambientalmente sostenibles para el reaprovechamiento de PAMs y lodos con el caso de AMSAC	37
VII. Discusión	38
7.1 Estrategias ambientalmente sostenibles para el reaprovechamiento de PAMs y lodos	38
7.2 Viabilidad ambiental de la estrategia de producción de AMSAC	40
7.3 Comparación de las mejores estrategias globales y nacionales con el caso de AMSAC	41
VIII. Conclusiones	42
IX. Recomendaciones:	42
X. Bibliografía	43
Anexos	57

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. TIPOS DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS	6
TABLA 2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL TÚNEL DE PUCARÁ Y LA BOCAMINA DE AZALIA	21
TABLA 3. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO 1	23
TABLA 4. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	27
TABLA 5. ESCALA Y PESOS PARA LOS CRITERIOS DE CONTENIDO PORCENTUAL DE SULFUROS Y PORCENTAJE DE LODOS, RELAVES O METALES REAPROVECHARLES Y TIPO DE GRANULOMETRÍA	29
TABLA 6. ESCALA Y RANGO PARA CONTENIDO PORCENTUAL DE SULFUROS	30
TABLA 7. ESCALA Y RANGO PARA TIPOS DE GRANULOMETRÍA	30
TABLA 8. ESCALA Y RANGO PARA CONTENIDO PORCENTUAL DE LODOS, RELAVES O METALES REAPROVECHABLES	30
TABLA 9. MATRIZ MULTICRITERIO PARA LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DE LAS ESTRATEGIAS GLOBALES Y NACIONALES	31
TABLA 10. MATRIZ MULTICRITERIO PARA LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DE LA ESTRATEGIA DEL CASO DE ESTUDIO AMSAC	31
TABLA 11. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE LAS ESTRATEGIAS AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES PARA EL REAPROVECHAMIENTO DE LOS PAMS Y LOS LODOS DERIVADOS DEL TRATAMIENTO ACTIVO DEL DAM ...	33
TABLA 12. ESTRATEGIAS AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES PARA EL REAPROVECHAMIENTO DE LOS PAMS Y LOS LODOS DERIVADOS DEL TRATAMIENTO ACTIVO DEL DAM CON LOS PESOS ASIGNADOS	34
TABLA 13. DATOS DE LA ESTRATEGIA DE PRODUCCIÓN DE LADRILLOS ECOLÓGICOS ELABORADOS POR AMSAC CON LOS PESOS ASIGNADOS	36

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LA IMPORTANCIA DE LA REGIÓN PASCO COMO PRODUCTOR NACIONAL EN EL AÑO 2024.	4
FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN DE LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS (PAMS) EN LA REGIÓN PASCO.	5
FIGURA 3. MECANISMOS DE FORMACIÓN DEL DAM.	9
FIGURA 4. SISTEMA DE TRATAMIENTO ACTIVO PARA DAM.	13
FIGURA 5. TÚNEL PUCARÁ.	20
FIGURA 6. BOCAMINA AZALIA.	21
FIGURA 7. MAPA DE UBICACIÓN DE LAS PLANTAS AZALIA Y PUCARÁ, CON UNA ESCALA DE 1 CM A 20 M.	22
FIGURA 8. ESQUEMA DE LAS ACTIVIDADES DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 1. ...	24
FIGURA 9. ESQUEMA DE LAS ACTIVIDADES DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 2. ...	25
FIGURA 10. ESQUEMA DE LAS ACTIVIDADES DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 3. ..	25
FIGURA 11. SUMATORIA DE LOS PESOS ASIGNADOS PARA CADA ESTRATEGIA GLOBAL Y NACIONAL PARA EL REAPROVECHAMIENTO DE PAMS Y LODOS DERIVADOS DEL TRATAMIENTO ACTIVO DEL DAM.	35
FIGURA 12. SUMATORIA DE LOS PESOS ASIGNADOS DE LA ESTRATEGIA DE PRODUCCIÓN DE LADRILLOS ECOLÓGICOS ELABORADOS POR AMSAC EN LAS PLANTAS DE PUCARÁ Y AZALIA.	37
FIGURA 13. COMPARACIÓN DE PESOS ASIGNADOS PARA CADA UNA DE LAS ESTRATEGIAS AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES PARA EL REAPROVECHAMIENTO DE PAM.	38

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. CARACTERÍSTICAS DE LAS 13 ESTRATEGIAS SELECCIONADAS A NIVEL GLOBAL Y NACIONAL	57
ANEXO B. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD QUÍMICA DE LOS LODOS DE LA ESTRATEGIA AMSAC	61
ANEXO C. PRUEBAS DE MATERIALES DE LA ESTRATEGIA DE AMSAC	62
ANEXO D. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ESTRATEGIA DE AMSAC	63
ANEXO E. MEJORES ESTRATEGIAS AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES A NIVEL GLOBAL Y NACIONAL	64
ANEXO F. ANÁLISIS DE METALES PESADOS EN LODOS DE LAS PLANTAS DE PUCARÁ Y AZALIA DEL AÑO 2021	65

Resumen

La minería es un motor fundamental para la economía peruana, sin embargo; en el desarrollo histórico de esta actividad ha derivado en la generación de Pasivos Ambientales Mineros (PAMs), el cual produce Drenaje Ácido de Mina (DAM) que deteriora los cuerpos de agua, degrada la calidad del suelo y altera la flora, fauna y vida acuática. Para la mitigación del DAM, se utilizan técnicas activas como la neutralización química, el cual genera la acumulación de lodos en las plantas de tratamiento. Entre los que destacan el departamento de Pasco donde se ubican los PAMs del Túnel de Pucará y Bocamina Azalia que generan lodos por la neutralización de sus aguas ácidas. Por esta razón, el presente estudio tiene como propósito determinar las estrategias ambientalmente sostenibles para el reaprovechamiento de los lodos. Para la metodología, previamente se realizó la búsqueda de información de 120 artículos, 13 cumplen con los criterios de inclusión y exclusión para la investigación; posteriormente se realizó un análisis multicriterio para evaluar las características fisicoquímicas (contenido porcentual de sulfuros y relaves, lodos o metales reaprovechados; y tipo de granulometría) de las estrategias a nivel global y nacional. Así mismo, se aplicó el mismo enfoque para examinar la estrategia implementada por AMSAC en las plantas de Pucará y Azalia. Finalmente se comparó con un diagrama de barras las estrategias globales y nacionales ambientalmente sostenibles con el caso de estudio donde se observó que las alternativas sobresalientes fueron “ladrillos ecológicos” y “extracción de metales”. Cabe mencionar que estas estrategias podrían ser implementadas en conjunto para un mejor reaprovechamiento de los lodos.

Palabras Claves: Pasivos Ambientales Mineros (PAM), Drenaje Ácido de Mina (DAM), Reaprovechamiento de lodos, Estrategias sostenibles ambientalmente, Economía circular.

Abstract

Poorly managed mining practices in Peru have led to the creation of Mining Environmental Liabilities (MELs), which generate Acid Mine Drainage (AMD). This AMD contaminates water bodies, degrades soil quality, and disrupts flora, fauna, and aquatic life. To mitigate AMD, active treatment techniques such as chemical neutralization are used, though these generate sludge accumulation in treatment plants. In the department of Pasco, the MELs located at the Pucará Tunnel and the Azalía Adit produce sludge as a result of neutralizing their acidic waters. Therefore, this study aims to identify environmentally sustainable strategies for the reuse of MELs and sludge. Methodologically, an initial review of 120 articles was conducted, of which 17 met the inclusion and exclusion criteria for this research. Subsequently, a multicriteria analysis was carried out to evaluate the physicochemical characteristics—such as sulfide content, reprocessed tailings, sludge or metals, and granulometry—of strategies applied globally and nationally. The same approach was used to analyze the strategy implemented by AMSAC in the case study. Finally, an Excel Bar Chart was used to compare globally and nationally applied sustainable strategies with the case study. The results showed that the most outstanding alternatives were "eco-bricks" and "metal extraction." It is worth noting that these strategies could be implemented together to enhance the reuse of MELs.

Keywords: Mining Environmental Liabilities (MEL), Acid Mine Drainage (AMD), Sludge Reuse, Environmentally Sustainable Strategies, Circular Economy.

I. Introducción:

La minería fue un pilar relevante en el desarrollo de la humanidad y sigue desempeñando un papel crucial en la actualidad. Latinoamérica es, desde hace mucho tiempo, el principal destino para el desarrollo de esta industria. En América Latina, la minería ha impulsado un notable incremento de las exportaciones de metales, favorecido por los altos precios internacionales y el aumento de la inversión extranjera directa en el sector, lo que ha contribuido significativamente al crecimiento económico de la región (Cárdenas & Reina, 2008). La minería representa para el Perú una de las principales actividades de extracción por la gran influencia sobre la economía. Esta situación se debe al extenso potencial mineral que tiene la cadena montañosa de los Andes considerada una fuente primordial de deposición de minerales a nivel global. (Carrascal, 2020; Montano et al., 2022; Loaiza & Arcos, 2024). Perú se posiciona entre los primeros países a nivel global y en América Latina en la generación de oro (Au), plata (Ag), cobre (Cu), zinc (Zn), estaño (Sn), plomo (Pb) y molibdeno (Mo), entre otros (Chappuis, 2019). Esta actividad ha impulsado, en la última década, un promedio de 10% del Producto Bruto Interno (PBI) nacional, ha aportado el 60% de las exportaciones y ha constituido el 23 % de la inversión extranjera (Castillo et al., 2021). La minería en la región Pasco, según el Banco Central de Reserva del Perú (BCRP), es la principal actividad económica con una participación del 53% en el 2020. Así mismo, el Valor Bruto de Producción (VBP) minero de la región sobresalió con la participación de zinc (41%) seguido de cobre (22%) y plata (20%). Por ese motivo, Pasco se destacó como el mayor productor nacional de plomo (78.3 mil toneladas), el segundo en plata (464.8 toneladas), el tercero en zinc (185.4 mil toneladas) con una participación nacional de 32%, 17% y 14%, respectivamente como se visualiza en la **figura 1:** (Loaiza & Arcos, 2024).

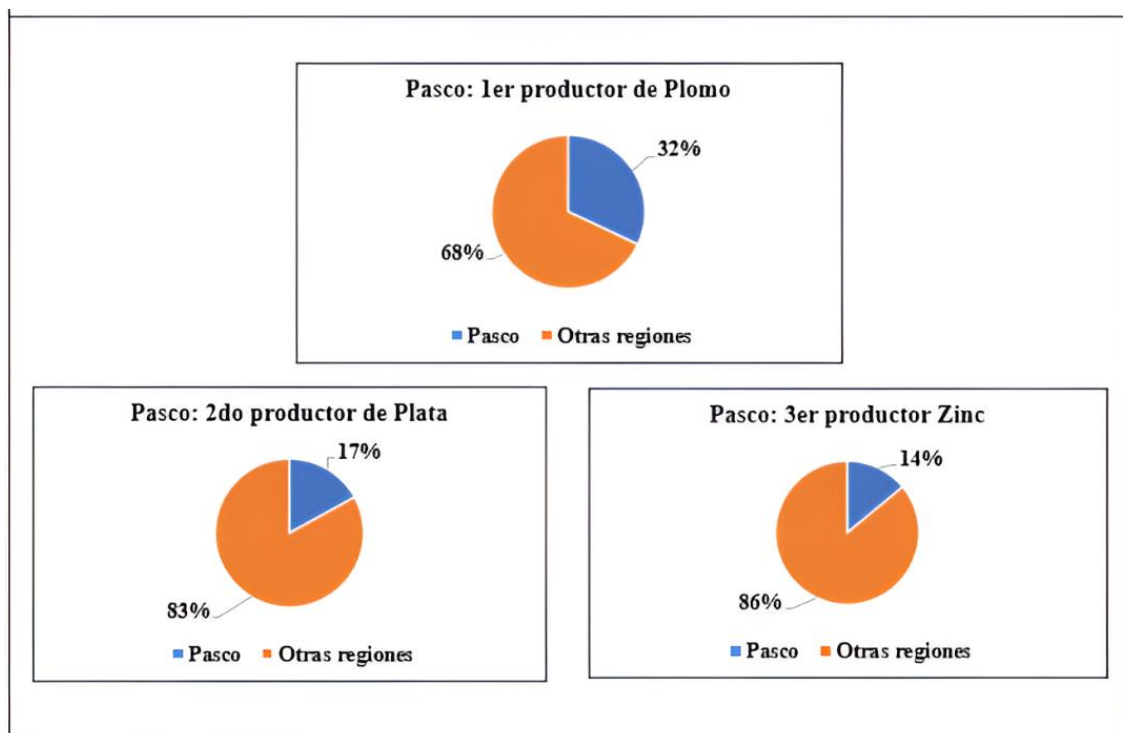


FIGURA 1. LA IMPORTANCIA DE LA REGIÓN PASCO COMO PRODUCTOR NACIONAL EN EL AÑO 2024. FUENTE: ADAPTADO DE LOAIZA & ARCOS, 2024

Sin embargo, la inapropiada gestión de la actividad minera en el Perú ha dado lugar a la generación de Pasivos Ambientales Mineros (PAMs). El Perú cuenta con 6.026 PAMs de los cuales en la región Pasco se estima 380 PAMs (MINEM, 2025) los cuales están distribuidos en sus provincias (**figura 2**). Unos de los casos destacados en la región Pasco son los PAMs el Túnel Pucará y bocamina Azalia que fueron productos de la empresa estatal Centromin Perú. Estos PAMs generan Drenaje Ácido de Mina (DAM) que son tratados por Activos Mineros S.A.C, se desconoce su eficiencia y calidad de vertimiento hacia la quebrada Pucará (Espejo, 2024). Los DAM presentan altas concentraciones de metales pesados que, si no son adecuadamente gestionados, perjudican tanto las aguas superficiales como las subterráneas, alterando la calidad del suelo, afectando la flora y fauna, y la vida acuática lo que constituye un peligro para la salud de las personas (Denegri Muñoz & Iannacane, 2020). Además, la evidente contaminación por estos drenajes ha llevado a las comunidades a oponerse a nuevos proyectos mineros, temiendo que se generen más pasivos ambientales que afectan el lugar, lo que genera numerosos conflictos sociales (Chappuis, 2019). Hasta febrero de 2024, se registraron 206 conflictos

sociales, de los cuales 78 casos están relacionados a la actividad minera, valor que representa el 37.9% del total de conflictos sociales (Defensoría del Pueblo, 2024).

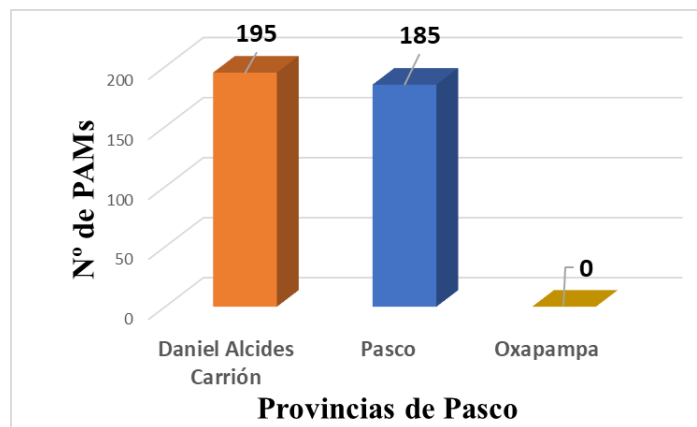



FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN DE LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS (PAMS) EN LA REGIÓN PASCO. FUENTE: ADAPTADO DEL MINEM, 2025

Para solucionar el problema del DAM hay diversas alternativas, las cuales se pueden clasificar en aquellas que emplean mecanismos químicos o biológicos para el tratamiento de los metales que se encuentran en la solución. Estos sistemas se dividen en activos que necesitan suministros constantes de recursos para mantener el proceso y pasivos que requieren pocos recursos (Jhonson & Hallberg, 2005). En los sistemas de tratamiento mencionados, la acidez y los metales se precipitan en soluciones mediante diversas reacciones bioquímicas, las cuales resultan en la formación de lodos, un residuo sólido con elevadas concentraciones de metales. (Jhonson & Hallberg, 2005). Por ejemplo, en un estudio exhaustivo sobre la generación de desechos derivados de las tecnologías convencionales de tratamiento activo y pasivo en 108 minas operativas en Canadá y otros países. En promedio, cada mina produce alrededor de 9.500 toneladas de lodos secos anualmente, podría ocupar todo el campo de juego del Estadio Nacional de Lima (Instituto Peruano del Deporte, 2023) con un 1 m de altura de lodo seco. Aunque estas cifras no son completas, reflejan la gran cantidad de desechos generados globalmente a partir de la neutralización de lodos desmineralizados (Zinck & Griffith, 2013). Por lo mencionado líneas atrás este estudio busca estrategias para el reaprovechamiento de los lodos generados en los tratamientos de DAM en las plantas de Azalia y Pucará.

1.1 Pasivos Ambientales Mineros

Los pasivos ambientales, se definen como “aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad” (Ley N°28271), existen diversos tipos de pasivos ambientales como se aprecia en la **tabla 1**. La inapropiada administración de la actividad minera en Perú ha llevado a la formación de zonas conocidas como PAMs; estos consisten en materiales estériles, a menudo con sulfuro, que se acumulan y, al combinarse con agua y oxígeno, generan drenajes ácidos provenientes de las minas. Estos drenajes generalmente son distinguidos porque su pH es bajo y con ello conllevan a la presencia de metales pesados disponibles biológicamente y minerales en solución. La inadecuada gestión con respecto a los DAM genera efectos adversos sobre el medio ambiente, incluyendo la polución de aguas superficiales, subterráneas y del suelo (Denegri Muñoz & Iannacone, 2020).

TABLA 1. TIPOS DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS

Pasivo Ambiental Minero	Definición	Figura
Bocaminas	Acceso principal de una mina subterránea, sirviendo como el punto de conexión entre el ambiente exterior y el interior de la mina, permitiendo el ingreso de trabajadores y equipos requeridos.	

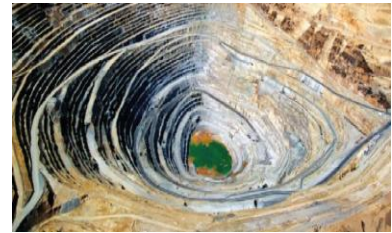
(Silva, 2024)

Chimeneas Perforación vertical o inclinada en la roca que tiene como objetivo conectar distintos niveles o galerías dentro de la mina, sirviendo como sistema de ventilación y para la eliminación de gases y polvo.



(El Comercio, 2024)

Tajo Cavidades creadas por la minería a cielo abierto, que son áreas amplias y despejadas que quedan una vez extraído el mineral. El contorno de estas excavaciones facilita el tránsito de vehículos pesados.



(IIMP, 2024)

Instalaciones Diversas estructuras y espacios fundamentales para el desarrollo de una operación minera, que abarca edificaciones y zonas destinadas a distintos fines.



(IIMP, 2020)

Depósitos de desmonte Espacio destinado al almacenamiento de materiales extraídos durante las actividades mineras que no tienen valor comercial.



(Andina, 2018)

Relaves Residuos generados durante el procesamiento del mineral extraído, compuestos por roca triturada, metales no recuperables ni rentables, productos químicos, materia



(El Comercio, 2024)

orgánica y efluentes derivados del proceso.

Fuente: Adaptado de BHP, 2024.

El DAM constituye el principal desafío de contaminación ambiental que enfrenta la industria minera a nivel global (Sulonen et al., 2021). En los últimos años, el DAM ha provocado efectos bastante negativos en numerosos países alrededor del mundo, como China, Estados Unidos, Canadá, Australia y Sudáfrica (Park et al., 2020). A nivel global, se estima que hay entre 20.000 y 50.000 minas responsables de la generación de DAMs, lo que contamina aproximadamente 19.300 kilómetros cuadrados de agua dulce y afecta a 7,2 millones de kilómetros cuadrados de lagos y embalses (Xu et al., 2020). En el Perú es un problema habitual en los yacimientos polimetálicos, dado que tiene un impacto severo en la vida acuática de los ríos y en el ecosistema de su alrededor (Nina, 2008). Como fue el caso del Proyecto Especial Chavimochic (PECH) que suspendió la captación de agua durante 4 días debido a la contaminación del río Santa de 300 mil m³ de agua contaminada. Este informe se basa en, causada por la presencia de relaves mineros en su afluente, lo que llevó al cierre inmediato de las compuertas en la bocatoma del PECH (Silva, 2024). Otro caso fue el derrame de relave minero en la unidad minera Cobriza – empresa Doe Run Perú, causando la inundación de la central eléctrica con corte de energía eléctrica en la zona, contaminando asimismo con 67 mil m³ de relave al río Mantaro, en Huancavelica, (INDECI, 2019). Una vez que se produce el DAM, contamina cuerpos de agua y suelos adyacentes, volviéndose tóxicos y transmitiendo esa toxicidad a las plantas y animales de la zona. Esto, a su vez, pone en grave riesgo la salud humana debido al fenómeno de biomagnificación en la cadena trófica (Abdullah et al., 2019; MCA., 2014). Según Aduvire (2006), la formación de agua ácida requiere del concurso de cuatro componentes clave: En primer lugar, un mineral sulfuroso, principalmente sulfuro de hierro; en segundo lugar, agua, ya sea en forma líquida o como humedad; en tercer lugar, un aceptor de electrones (oxidante) que puede ser oxígeno del aire; y finalmente, bacterias que actúan como catalizadores (**figura 3**). La adecuada gestión y tratamiento del DAM son esenciales para evitar daños ambientales significativos, dado que la acidez y las concentraciones de contaminantes a menudo superan los límites permitidos para la

descarga de efluentes industriales (Simate & Ndlovu, 2014). En consecuencia, la comunidad científica ha invertido esfuerzos considerables en investigar soluciones de remediación que sean económicamente viables y sostenibles a largo plazo.

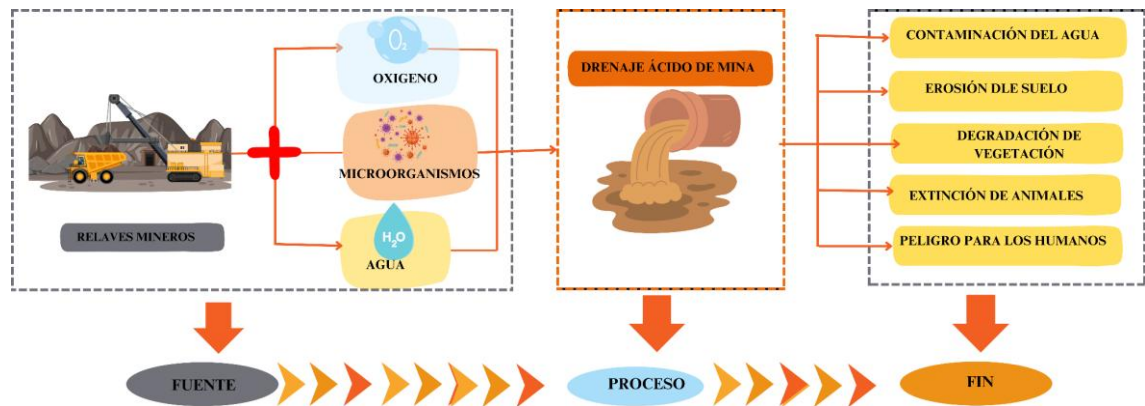


FIGURA 3 . MECANISMOS DE FORMACIÓN DEL DAM. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

1.2 Procesos de tratamientos de remediación

La remediación del DAM puede llevarse a cabo mediante dos enfoques principales: el activo y el pasivo, ambos basados en la combinación de procesos biológicos, físicos y químicos. En ocasiones, estos métodos se combinan para maximizar su efectividad. La selección del método más adecuado depende de diversos factores interrelacionados, como los costos de inversión y operación, las propiedades químicas del DAM (pH y acidez), y la disponibilidad de recursos locales que puedan integrarse en estrategias pasivas. Asimismo, aspectos como el potencial redox (por ejemplo, la presencia de Fe⁺²/Fe⁺³), la composición química del DAM, y la distribución espacial y temporal, incluidas las filtraciones, eventos de lavado, y fluctuaciones de flujo, deben considerarse cuidadosamente. Además, las condiciones climáticas, la topografía del lugar y la planificación para la disposición, reutilización o tratamiento de los lodos generados son aspectos críticos en el diseño del proceso (Pondja et al., 2014; Palma Huilca, 2018). Por una parte, el proceso pasivo se basa en una intervención mínima, con mantenimiento ocasional y costos de construcción bajos; está diseñado para tratar volúmenes menores y ha demostrado ser eficaz en la remediación de aguas ácidas a largo plazo. Por otro lado, el manejo activo, se caracteriza por requerir una operación continua con adición regular

de reactivos químicos, mayor intervención humana, y supervisión constante, lo que implica costos elevados tanto en su implementación como en su mantenimiento. Aunque permite tratar grandes volúmenes de agua y tiene alta eficiencia, genera una cantidad significativa de lodos que requieren almacenamiento y tratamiento adecuado. De este modo, ambos métodos presentan ventajas y limitaciones que deben ser evaluadas según las condiciones específicas del sitio afectado y los recursos disponibles, como se detalla a continuación.

El tratamiento pasivo se desarrolla de manera natural cuando el DAM interactúa con "reactivos" provenientes del entorno, tales como humedales artificiales, barreras reactivas permeables y canales de caliza, que pueden configurarse en diseños abiertos o cerrados (Chaparro Leal, 2015). Específicamente, los canales de caliza resultan efectivos para tratar DAM con bajas concentraciones de hierro y otros metales. Sin embargo, su rendimiento puede verse limitado debido a la precipitación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, que se acumula sobre la caliza y disminuye su capacidad para neutralizar el ácido (Chaparro Leal, 2015). Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en proyectos destinados a la restauración ecológica y en el tratamiento de grandes volúmenes de DAM en sitios como minas abandonadas, demostrando ser una solución sostenible en dichos contextos (Kefeni, Msagati, & Mamba, 2017). Además, se caracteriza por la simplicidad en su operación, su aplicabilidad para bajas concentraciones de metales y caudales de mantenimiento considerablemente bajos, ya que no requiere el uso de productos químicos por ende es de bajo costo de capital. Además, el tratamiento pasivo genera lodos más estables y tiene un bajo impacto ambiental, lo cual lo hace favorable desde una perspectiva ecológica. Sin embargo, este enfoque presenta varias limitaciones. En primer lugar, su eficiencia es baja cuando se enfrenta a volúmenes de caudales elevados o altas concentraciones de metales, lo que reduce su efectividad en escenarios de contaminación más severa. Por otro lado, su rendimiento frente a valores altos de acidez es también limitado. Además, este tratamiento requiere más tiempo para lograr una remediación efectiva, lo cual puede ser un factor crítico en situaciones donde la rapidez sea esencial. Finalmente, aunque es menos costoso y más simple, este tratamiento es generalmente menos efectivo que los métodos activos, lo que puede llevar a la necesidad de complementarlo con otras técnicas para alcanzar resultados óptimos (Kefeni, Msagati, & Mamba, 2017).

El tratamiento activo se enfoca en el uso de reactivos químicos para mitigar los efectos del DAM, neutralizando su acidez y precipitando los metales presentes en el agua contaminada (Choque Gonza, 2020). Este método emplea reactivos alcalinos como la cal (óxido de calcio), cal apagada, carbonato de calcio, hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio, óxido de magnesio e hidróxido de magnesio, los cuales son fundamentales para estabilizar los metales y mejorar la calidad del agua tratada (Palma Huillca, 2018). Además, el proceso puede complementarse con tecnologías avanzadas como la adsorción, el intercambio iónico y las membranas, que optimizan la remoción de contaminantes y amplían la efectividad del tratamiento (Kefeni, Msagati, & Mamba, 2017). Este tratamiento ofrece tanto beneficios como limitaciones que deben evaluarse cuidadosamente antes de su implementación. Por un lado, se destaca por su alta eficacia en la eliminación de concentraciones elevadas de metales en el agua, así como por su capacidad para manejar tanto caudales elevados con alta acidez como flujos más bajos, lo que le otorga una notable versatilidad en diferentes escenarios. Además, es un método relativamente sencillo de replicar y genera lodos con una densidad significativa, lo que en ciertos casos facilita su manejo. Sin embargo, este tipo de procesos enfrenta limitaciones. Entre estas, se encuentra el alto costo asociado a la disponibilidad, el tratamiento que exige una supervisión constante, un suministro continuo de energía eléctrica y una adecuada gestión de los subproductos generados. Un derivado importante es la generación de los lodos, que contienen concentraciones de metales pesados, cuya cantidad considerable puede representar un desafío operativo para la economía (Chaparro Leal, 2015).

El tratamiento activo (**figura 4**) se desarrolla en diversas etapas destinadas a neutralizar la acidez y remover los metales pesados presentes en el efluente. La primera fase es la homogeneización, donde el DAM se mezcla para garantizar que propiedades como el pH y la concentración de metales sean consistentes en todo el volumen de agua, lo que optimiza las etapas posteriores y asegura la efectividad de los reactivos. La siguiente etapa es la oxidación, en la cual el ion ferroso (Fe^{2+}) se transforma en ión férrico (Fe^{3+}) mediante la introducción de oxígeno. Este cambio es fundamental para facilitar la precipitación del hierro en forma de hidróxido de hierro (Chaparro, 2015). Es importante destacar que la oxidación del hierro también facilita la precipitación de otros metales pesados y ofrece varias ventajas clave en el tratamiento del DAM. En primer lugar, facilita la separación

de sólidos y líquidos, lo que mejora la gestión de residuos y contribuye a la claridad del agua tratada. Al mismo tiempo, la oxidación disminuye la concentración de hierro en el efluente, lo cual es fundamental para evitar la contaminación del agua y asegurar el cumplimiento de los estándares ambientales. Finalmente, este proceso proporciona superficies de adsorción que favorecen la captura de otros metales pesados presentes, lo que facilita su precipitación y remoción del agua tratada (Chaparro Leal, 2015; Choque Gonza, 2020). La tercera etapa es la neutralización, en la cual se añade un agente neutralizante (como cal hidratada o carbonato de calcio) al efluente con el fin de ajustar el pH del agua, llevándolo a un nivel seguro para su descarga al ambiente. Además, la neutralización favorece la precipitación de los metales, como el hierro, en forma de hidróxidos. Un ejemplo común de este proceso es el uso de lechada de cal, que no solo neutraliza el pH, sino que también facilita la formación de hidróxido de hierro al reaccionar con el sulfato férrico. Según Pérez, García y López (2024), esta fase presenta una ventaja notable frente a otros métodos, ya que eleva rápidamente la alcalinidad del DAM.

No obstante, uno de sus inconvenientes es que, tras su aplicación, se genera una considerable cantidad de residuos de lodos en la parte de los sedimentadores que resulta difícil de eliminar, lo cual reduce la efectividad del proceso de neutralización química. La cuarta etapa, es la floculación y coagulación, proceso en el cual se añaden sustancias floculantes y coagulantes al agua con el fin de agrupar las partículas microscópicas suspendidas, como los metales precipitados, en partículas más grandes llamadas flóculos. Estos son más fáciles de retirar en la siguiente etapa de sedimentación. A su vez, este proceso genera lodos, los cuales pueden ser recirculados dentro del sistema para mejorar la eficiencia del tratamiento, o bien, se pueden recuperar los metales útiles para ser reutilizados, lo que contribuye a reducir el impacto ambiental del proceso. Por último, en la etapa de sedimentación, se permite que los flóculos, debido a su mayor peso molecular, se depositen en el fondo del tanque de decantación, facilitando así la clarificación del agua. Este proceso es esencial no solo para mejorar la calidad del efluente, sino también para la generación de lodos, los cuales, al contener principalmente hidróxidos y metales precipitados, pueden ser gestionados como un recurso valioso. La separación eficaz de los lodos del agua tratada contribuye a la purificación del efluente, dejando un líquido más claro y apto para su liberación al medio ambiente. Generalmente, este procedimiento

se lleva a cabo en decantadores; sin embargo, para garantizar una mayor calidad del efluente, en algunos casos es necesario implementar una etapa adicional de filtración tras la sedimentación, permitiendo una eliminación más precisa de los contaminantes (Choque, 2020).

Por otro lado, como mencionan Pérez, García y López (2024) en su artículo científico, “la tecnología de recuperación final de los residuos mineros es una forma eficaz de crear valor económico en la etapa final”. La recuperación y manejo de los lodos generados en las etapas de neutralización, floculación y coagulación juega un papel crucial en la optimización del proceso de tratamiento, ya que son ricos en ferrihidrita y metales precipitados, y se puede promover una gestión integral y eficiente, minimizando su impacto ambiental y reaprovechando su potencial como recurso valioso con la extracción de metales como subproductos para su uso en diversas aplicaciones industriales. De esta manera, se podría fomentar un modelo más sostenible y económicamente rentable para las plantas de Pucará y Azalia en la región de Daniel Alcides Carrión, Pasco, donde el reaprovechamiento de los lodos podría convertirse en una herramienta clave para el desarrollo sostenible y de la minería en la zona.

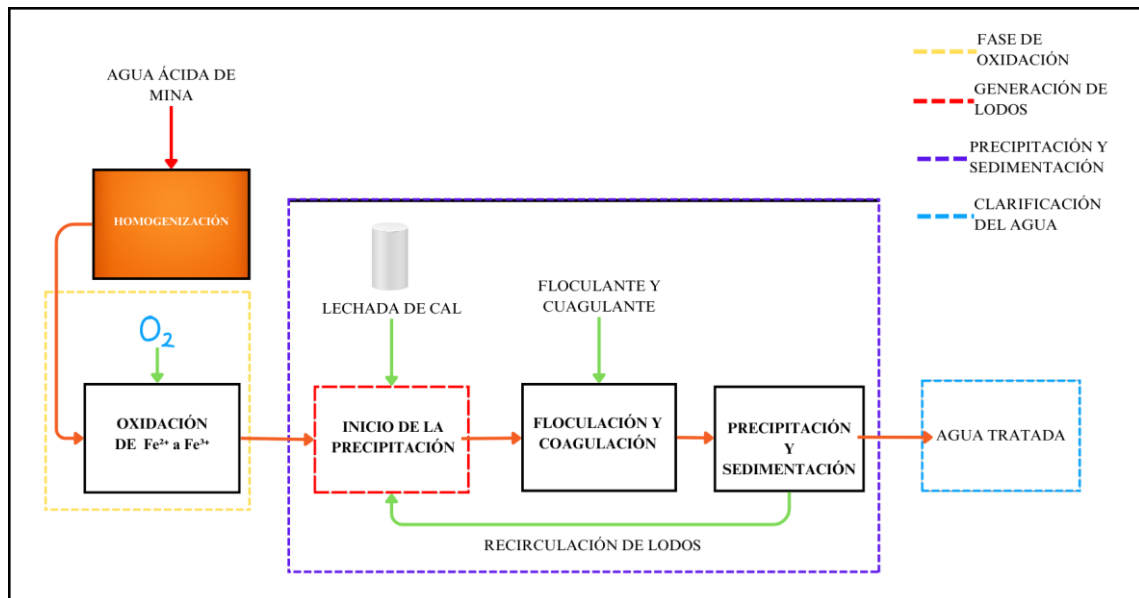


FIGURA 4. SISTEMA DE TRATAMIENTO ACTIVO PARA DAM. FUENTE: FERNÁNDEZ, 2024. MODIFICADO DE LA TESIS: "EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO ACTIVO DE DRENAJE ACIDO DE MINA PROVENIENTES DEL DISTRITO DE YARABAMBA, AREQUIPA" PÁG. 39

De los procesos activos y pasivos ya descritos anteriormente, Yang et al., (2024) menciona, que el DAM es un proceso que se puede entender como una trinidad de etapas interconectadas: "prevención- tratamiento - recuperación final". La "prevención" hace que el "tratamiento" continúe y el "tratamiento" conduce al resultado que es la "recuperación final". Este último es importante ya que permite el reaprovechamiento de los lodos generados durante el proceso de remediación, reduciendo de esta manera el impacto ambiental asociado con su acumulación. Este enfoque contribuye a la restauración de ecosistemas afectados por el DAM, al evitar que los lodos contaminen el suelo y el agua. También, el reaprovechamiento de lodos promueve una gestión sostenible de los residuos, alineándose con los principios de la economía circular.

1.3 Casos de Estudio relacionados a las plantas de Pucará y Azalia

Los PAMs han generado impactos significativos en los ámbitos social, económico y ambiental, destacando la contaminación de cuerpos de agua como uno de los problemas más críticos (Huaccanqui, 2019). Ante la falta de una entidad privada que asuma la responsabilidad de su remediación, el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), junto con Activos Mineros S.A.C., ha intervenido en su manejo. Un caso representativo es la mina de carbón de Goyllarisquizga, ubicada en Pasco, la cual fue explotada de forma subterránea y a cielo abierto durante 64 años y fue la unidad minera más grande de Perú de todos los tiempos, sus inicios en 1907 por la Cerro de Pasco Corporation y en 1979 por CENTROMIN Perú S.A., hasta su cierre definitivo en 1993 debido al agotamiento de las reservas económicas y problemas técnicos (Meneses Rivas, 2022). Tras el cese de operaciones, se implementaron actividades de cierre y tratamiento de aguas ácidas mediante métodos convencionales, como la aplicación de agentes neutralizantes y floculantes para precipitar contaminantes. Sin embargo, estos procedimientos enfrentan importantes desafíos, tales como el alto consumo de productos químicos y la generación de grandes cantidades de residuos secundarios (lodos), cuya gestión requiere infraestructura especializada y una planificación exhaustiva (Espejo & coronel, 2017).

Según Huaccanqui (2019) en su investigación “*Remoción de hierro en las infiltraciones ácidas de las bocaminas de Azalia -Pasco mediante sistemas de producción sucesivas de alcalinidad*” - que aborda la problemática ambiental causada por los pasivos mineros de

la antigua mina de carbón Goyllarisquizga - las infiltraciones ácidas tienen un pH de 2.34 y fluyen hacia el río Ushugoya, afectando aún más el entorno. Para mitigar esto, se usa un tratamiento "activo" con hidróxido de calcio y floculante, que neutraliza el ácido y precipita metales. Sin embargo, este proceso genera grandes volúmenes de lodos (96,000 kg mensuales) que deben ser almacenados, lo cual es costoso y plantea problemas a largo plazo. Estos lodos son difíciles de eliminar y su gestión inadecuada puede causar impactos adicionales, como la filtración de contaminantes. Por ello, se propone una alternativa más sostenible: los Sistemas Sucesivos de Producción Alcalina (SAPS). Estos sistemas pasivos no generan lodos y optimizan la remoción de hierro y la neutralización del pH, utilizando sustratos orgánicos y condiciones controladas. La investigación evalúa variables como el tipo de sustrato y el tiempo de retención para mejorar la eficiencia y reducir costos, ofreciendo una solución más económica y de bajo mantenimiento.

Según Meneses (2020) en su tesis "*Cierre de minas de carbón en el Perú y su influencia en la contaminación ambiental en Goyllarisquizga*", la explotación de la mina de carbón en Goyllarisquizga dejó importantes pasivos ambientales, especialmente en términos de contaminación del agua, aire y suelo. Un aspecto crítico identificado fue la generación de lodos como resultado de las reacciones químicas entre los minerales, el azufre, el agua y el oxígeno. Estos procesos aumentan la acidez del agua, liberando metales pesados como arsénico y plomo, lo que afectó gravemente los cuerpos de agua y la biodiversidad local. En respuesta, se implementaron técnicas de cierre de minas con el objetivo de estabilizar el suelo y el agua; sin embargo, el tratamiento convencional continuó generando grandes volúmenes de lodos, los cuales requieren un manejo adecuado para evitar su dispersión y minimizar riesgos adicionales. A través de un monitoreo continuo de los parámetros de calidad del agua, aire y suelo, se observó una reducción significativa de la contaminación, lo que evidencia que las técnicas de estabilización de suelos y el control de los lodos fueron efectivas. Este análisis destaca, por lo tanto, la necesidad urgente de minimizar la generación de lodos como una estrategia clave en la remediación de los pasivos mineros.

Según Espejo (2024) en su tesis "*Evaluación de la calidad de efluentes mineros del túnel Pucará y bocamina Azalia de propiedad de Activos Mineros en el distrito de Goyllarisquizga - 2021*", este estudio se centró en la evaluación de los efluentes mineros provenientes del túnel Pucará y la bocamina Azalia, ambos de propiedad de Activos Mineros S.A.C. en 2021. Los resultados obtenidos revelaron que las aguas evacuadas de

ambas fuentes exceden los límites máximos permisibles establecidos en varios parámetros, como el pH, el hierro disuelto y el zinc. Aunque el tratamiento activo utilizado en el proceso busca reducir la contaminación, la generación de lodos sigue siendo un problema significativo. Estos lodos, compuestos principalmente por metales pesados y sólidos suspendidos, requieren un manejo adecuado para evitar su dispersión y minimizar los impactos ambientales adicionales.

1.4 Estrategias de reaprovechamiento para las plantas de Pucará y Azalia

Los PAMs de la minería suelen ser acumulaciones de desechos generados por las actividades mineras, los cuales contienen minerales sulfurados como piritita (FeS_2), galena (PbS), arsenopiritita (FeAsS) y calcopiritita (CuFeS_2). Cuando estos residuos entran en contacto con agua y oxígeno, reaccionan y producen drenaje, caracterizados por parámetros alterados, como elevados niveles de acidez, concentraciones altas de sulfatos y metales pesados disueltos (Gamonal Pajares, 2001). Estos metales y metaloides pueden perdurar y acumularse en el medio ambiente, afectando de manera negativa la calidad del agua y los suelos (Shuan, 2023). De acuerdo con Espejo (2014), el túnel de Pucará y la bocamina de Azalia son PAMs ubicados en la región de Pasco y generan DAM que vienen siendo tratados por procesos de activos de remediación; a su vez, Activos Mineros S.A.C. (2023), en el “Informe técnico de la generación de lodos-Plantas Azalia y Pucará”, señala que el volumen de lodos generados aproximadamente son 16.000 sacos al mes lo que equivale anualmente a 3.916,8 m³. Con base en lo expuesto, se propone reducir la cantidad de lodos almacenados en los procesos de remediación activa y promover el desarrollo de la economía mediante la viabilidad de estrategias para el reaprovechamiento de los lodos derivados de los procesos activos de las plantas Azalia y Pucará. Los siguientes casos son algunas de las propuestas reaprovechamiento a nivel global, nacional y regional que existen.

Según Enríquez (2002), en Ecuador se realizó una investigación acerca de la reutilización de relaves mineros provenientes de la concesión Campanillas. Zamora Chichipe, como **agregado de adoquines** (ladrillos de piedra). Este estudio tuvo como objetivo identificar si los relaves pueden ser empleados como sustitutos de un agregado (arena), como parte de la fabricación de adoquines. Los resultados muestran que el relave minero se puede utilizar en la fabricación de ladrillos como un sustituto de unas fracciones de 20%, 30%

y 40%. Por último, el autor recalca que estos ladrillos de piedra se pueden usar especialmente para pisos de uso peatonal o transporte ligero (con una velocidad no mayor a 60 km/h). Por otra parte, Torres (2024) señala un estudio sobre el uso de relaves mineros como **materiales para la construcción**, lo cual se presenta como una alternativa factible para el desarrollo de carreteras, promoviendo la valorización de residuos mineros en la región andina del Perú y apoyando la economía circular. Este estudio, de enfoque práctico, incluyó diversos análisis para evaluar la viabilidad de la propuesta, tomando en cuenta factores como las condiciones climáticas, la precipitación y el pH, además de realizar pruebas granulométricas (CBR) y el ensayo de Marshall. Los resultados mostraron que los relaves cumplen con los estándares nacionales, alcanzando una estabilidad de 877.67 kg y logrando un 25 % de reutilización.

De igual manera, Kümmerer, Dionysiou y Olsson (2016) mencionan que el impacto ambiental y el potencial de valorización de los lodos generados por la neutralización activa de DAM altamente contaminados con metales. En este estudio, se evalúan las estrategias para la **gestión de estos lodos** y su posible **reutilización como una fuente de metales valiosos**, contribuyendo así a la minería sostenible. Se realizaron una serie de pruebas de lixiviación (incluyendo las pruebas de lixiviación estándar y de extracción secuencial BCR) para evaluar la movilidad de los metales en los lodos, como Cd, Zn y Al. Los resultados de estas pruebas mostraron que, cuando los lodos entran en contacto con lluvias o ácidos orgánicos, se liberan concentraciones peligrosas de metales, lo que indica la peligrosidad del residuo para el medio ambiente, especialmente para la vida acuática. El estudio también resalta el potencial de estos lodos como fuente de metales de interés industrial, como los metales básicos, industriales y tecnológicos. Al utilizar ácidos diluidos, es posible extraer estos metales de manera eficiente, lo que convierte a estos lodos en una fuente de recursos valiosos. Por último, Zinck, (2006) presentan varias estrategias para reaprovechamiento los lodos generados en el tratamiento de drenajes ácidos. Uno es la **recuperación de metales**, dado que los lodos contienen metales pesados como Fe, Zn y Cu, se puede utilizar tecnología para extraer estos metales y reincorporarlos al ciclo productivo. De esta manera, no solo se reduce el volumen de residuos, sino que también se maximiza el reaprovechamiento de los recursos presentes en los lodos, contribuyendo a una gestión más eficiente de los desechos. Además, otra

estrategia de reutilización destacada es su **uso en la producción de materiales de construcción.**

II. Justificación

La actividad minera en el Perú ha conllevado hacia la generación de Pasivos Ambientales Mineros (PAM). Entre los casos más representativos se encuentra el túnel de Pucará y la bocamina de Azalia, los cuales generan Drenaje Ácido de Mina (DAM) (Espejo, 2024). Este fenómeno no sólo degrada la calidad del suelo y las fuentes de agua (superficiales y subterráneas), sino que altera la biodiversidad y representa un riesgo significativo para la salud humana (Denegri Muñoz & Iannicane, 2020). A causa de esta problemática se implementó un tratamiento activo para el DAM, si bien mitiga la acidez, este proceso genera un volumen de lodos como subproducto, alcanzando **16,000 sacos mensuales y 4,000 m³ anuales** (AMSAC, 2023). Estos subproductos contienen principalmente carbonatos, hidróxido de hierro, hidróxido férrico y yeso, compuestos que presentan un desafío para su disposición y gestión como recurso. Aunque Activos Mineros S.A.C. ha implementado la fabricación de “ladrillos ecológicos” como valorización (AMSAC, 2016), la presente investigación determinó otras alternativas de estrategias ambientalmente sostenibles para los lodos. Para ello, se analizaron las características fisicoquímicas (tipo de granulometría, porcentaje de sulfuros y reaprovechamiento) de las diversas estrategias nacionales y globales en el reaprovechamiento de PAMs y lodos. También se evaluó la estrategia “ladrillos ecológicos” en función a las características mencionadas. Finalmente se comparó la estrategia actual de AMSAC con las estrategias nacionales y globales.

III. Pregunta de Investigación

¿Cuáles son las estrategias para el **reaprovechamiento** sostenible de lodos derivados del tratamiento de DAM en las plantas de Pucará y Azalia?

IV. Objetivos

4.1 Objetivo general:

Determinar estrategias ambientalmente sostenibles para el **reaprovechamiento** de los lodos generados por el tratamiento de Drenaje Ácido de Mina (DAM) en las plantas de Pucará y Azalia, ubicadas en la provincia de Daniel Alcides Carrión, departamento de Pasco.

4.2 Objetivos específicos:

- **Analizar** estrategias ambientalmente sostenibles para el reaprovechamiento de Pasivos Ambientales Mineros (PAM) y lodos derivados de procesos de tratamiento de DAM, mediante el análisis de experiencias globales y nacionales.
- **Evaluar** la sostenibilidad ambiental de la estrategia de producción de ladrillos ecológicos desarrollados por AMSAC en función al contenido porcentual de sulfuros y relaves, lodos o metales reaprovechados; y tipo de granulometría de los lodos derivado del tratamiento activo del DAM de las plantas de Pucará y Azalia.
- **Contrastar** las mejores estrategias ambientalmente sostenible a nivel global y nacional para el reaprovechamiento de PAMs y lodos generados en tratamiento del DAM con el caso de estudio.

V. Metodología

5.1 Tipo de estudio

Este estudio, de carácter descriptivo y analítico, se basó en una revisión sistemática de información para determinar las estrategias sostenibles para el reaprovechamiento de los lodos derivados en el tratamiento de DAM en las plantas de Pucará y Azalia. A través de un enfoque descriptivo, se identificaron y clasificaron las estrategias de reaprovechamiento aplicables a los lodos y PAMs tanto a nivel global como nacional, lo que permitió analizar las características de dichas estrategias y su relación con la

efectividad ambientalmente sostenible de cada una de ellas. El enfoque analítico, por su parte, proporcionó la relación del caso de estudio con las estrategias previamente identificadas y clasificadas. Esto nos facilitó determinar las opciones más viables para el reaprovechamiento de los lodos generados en las plantas de Pucará y Azalia.

5.2 Área de estudio

Está ubicada en el distrito de Goyllarisquizga, provincia de Daniel Alcides Carrión, en el departamento de Pasco, Perú, específicamente en la antigua mina de carbón Goyllarisquizga, a una distancia de 352 km de Lima y 37 km de Cerro de Pasco, con una altitud de 4200 m.s.n.m. Esta región presenta una notable complejidad geológica, ecológica y ambiental, lo que requiere un análisis detallado para entender sus características y el impacto de actividades como la minería. El Túnel Pucará con una altitud promedio de 4170 m.s.n.m., una longitud aproximada de 2 km y a 200 m bajo el manto de carbón, fue utilizado para la extracción y drenaje del DAM en Goyllarisquizga. Aunque el agua drenada era casi neutra, contenía altas concentraciones de Al, Fe y sólidos suspendidos. Las aguas de las bocaminas Azalia y el túnel desembocan en quebradas que alimentan al río Ushugoya, deteriorando la calidad del agua y su ecosistema. Asimismo, la acumulación de desmonte y residuos de carbón en el área representa un riesgo significativo de contaminación (Lozano, 2019).

Túnel Pucará



Túnel Pucará en interior



FIGURA 5. TÚNEL PUCARÁ. FUENTE: ESPEJO, 2024

La bocamina Azalia, ubicada a aproximadamente 4.8 km al oeste de la localidad de Goyllarisquizga y a 1.9 km al noroeste, pertenece a la antigua mina de carbón de Goyllarisquizga, situada a una altitud de 4,200 m.s.n.m. El clima de la zona es similar al de Cerro de Pasco, con temperaturas que oscilan entre -5 y 20 °C, presentando un marcado gradiente térmico diario. Entre mayo y septiembre, las heladas son frecuentes, mientras que de octubre a abril predominan las lluvias y nevadas, con una precipitación pluvial promedio mensual de 217 mm (Lozano, 2019). Ambos puntos mineros son fundamentales para la actividad extractiva de la región y están localizados a 52 km de la ciudad de Cerro de Pasco (Espejo, 2024).

Afluente



Efluente



FIGURA 6. BOCAMINA AZALIA. FUENTE: ESPEJO, 2024

TABLA 2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL TÚNEL DE PUCARÁ Y LA BOCAMINA DE AZALIA

Lugar	Código	Descripción	Coordenadas UTM WGS84 Zona 18M		
			Este	Norte	Altitud(m.s.n.m.)
Azalia	P1	Bocamina (afluente)	345055	8842035	3936
	P2	Bocamina (efluente)	344758	8841979	3934
Pucará	P3	Pucará	344086	8839764	3636

(afluente)

P4

Pucará
(efluente)

343827

8839847

3639

Nota. Fuente: (Espejo de la CRUZ, 2024) &/ Activos Mineros SAC.

PLANTAS DE PUCARA Y AZALIA

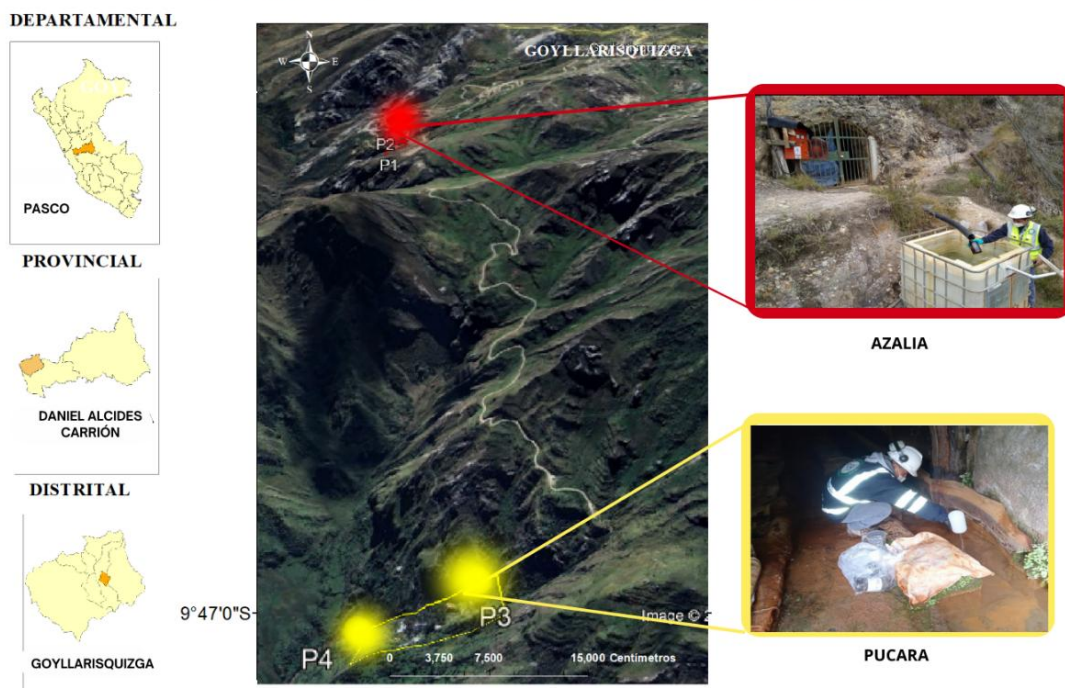


FIGURA 7. MAPA DE UBICACIÓN DE LAS PLANTAS AZALIA Y PUCARÁ, CON UNA ESCALA DE 1 CMA 20 M. LAS IMÁGENES FUERON EXTRAÍDAS DE LA TESIS DE ESPEJO (2024). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.3 Actividades

Para el desarrollo de los objetivos específicos planteados se realizó una serie de actividades las cuales se llevaron a cabo mediante un enfoque **integral de análisis bibliométrico sistemático y comparativo**. Con respecto a las **estrategias sostenibles** desde el punto de vista **ambiental** para el reaprovechamiento de los PAMs y lodos producidos en los procesos de tratamiento de DAM a nivel global y nacional se llevó

a cabo mediante una serie de etapas. La **primera etapa** consistió en la **búsqueda de información** en fuentes como PubMed, Scielo, ScienceDirect y literatura gris mediante términos como “reaprovechamiento de lodos”, “residuos generados en la minería”, “drenaje ácido de minas”, “pasivo ambiental minero”, “economía circular en la minería”, entre otros, y se buscó los títulos, resúmenes y resultados. Una vez identificada la información del total de artículos analizados se desarrolló la **segunda etapa** mediante técnicas para la **selección de información**. Estas se basaron en criterios de inclusión y exclusión como periodo de años, idioma, acceso y tipo de publicación (**tabla 3**). En la **tercera etapa** se abordó la clasificación de la información en términos de estrategias de reaprovechamiento, las tres etapas mencionadas comprenden el **análisis bibliométrico sistemático**. La **cuarta etapa** se basó en el análisis de la información mediante un **Análisis Multicriterio**, el cual se enfocó en una comparación **de las características fisicoquímicas** de las estrategias.

TABLA 3. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN PARA EL OBJETIVO ESPECÍFICO 1

Inclusión	Exclusión
Se consideraron los artículos científicos de los últimos 25 años	Se descartaron todos los artículos científicos que no pertenecen a los últimos 25 años.
Se incluyó textos con referencia al título del trabajo de revisión	Se excluyó artículos que no contengan información sobre las estrategias señaladas
Se incluyeron todos los artículos en español e inglés.	Se omitieron artículos que no están en español o inglés.
Se incluyeron artículos con acceso abierto y con contenido completo	Se excluyó artículos que no contengan información sobre las estrategias señaladas

Nota. Fuente: Elaboración propia.

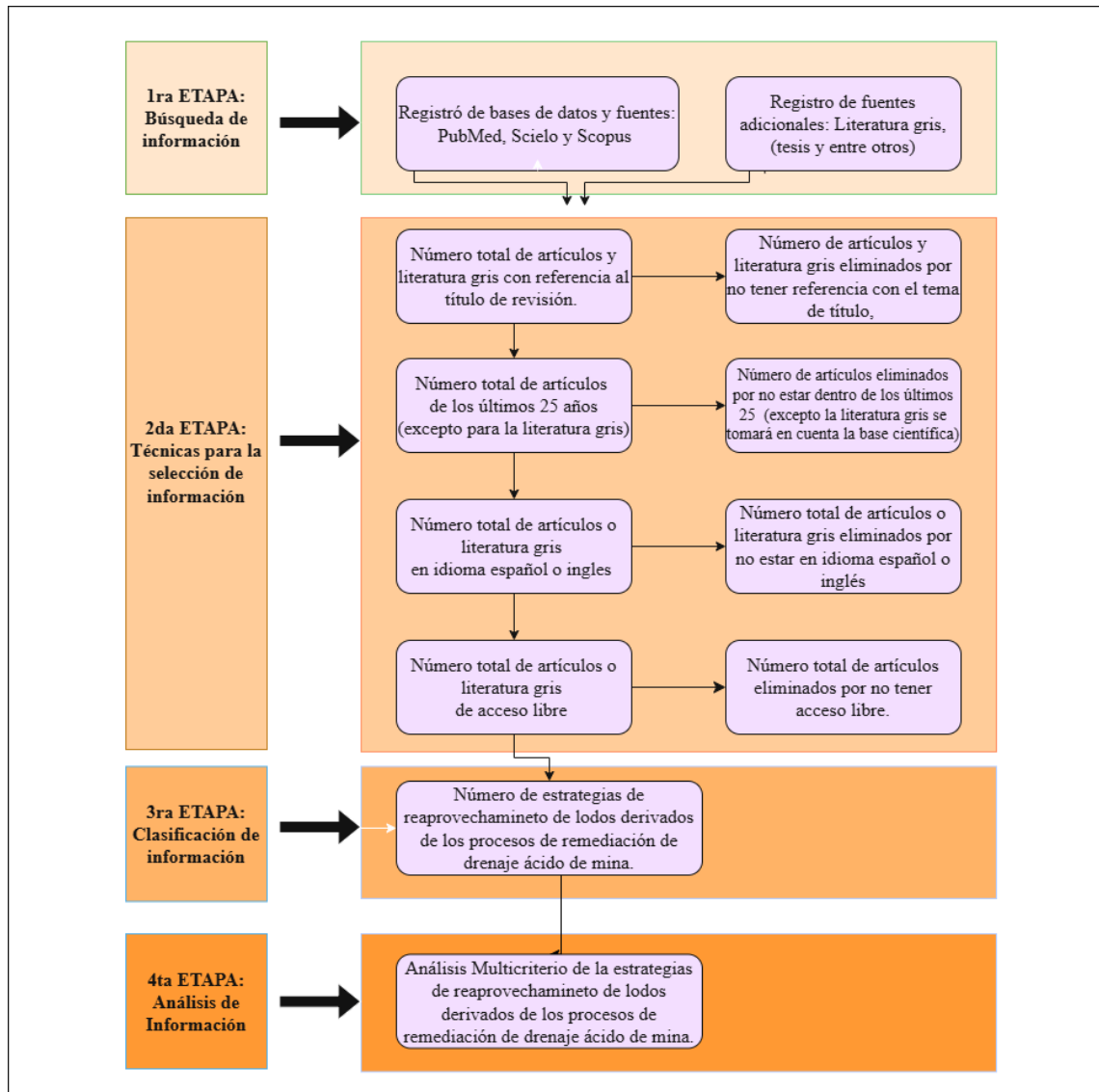


FIGURA 8. ESQUEMA DE LAS ACTIVIDADES DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Para la **estrategia de reaprovechamiento de lodos generados por DAM por AMSAC** se llevó a cabo a través de 2 fases. La primera fase consistió en la **recopilación de datos de AMSAC**. Tras obtener dicha información, se procedió con la segunda fase, que se centró en el **análisis de la información** utilizando un **Análisis Multicriterio**, el cual se centró en las **propiedades fisicoquímicas** del caso de estudio.

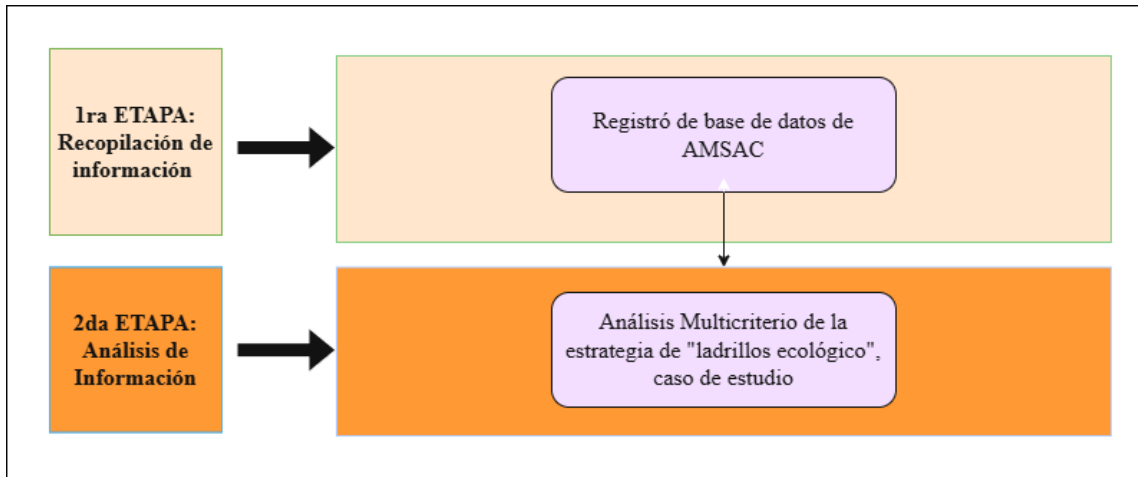


FIGURA 9. ESQUEMA DE LAS ACTIVIDADES DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 2.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Con respecto a **determinar alternativas ambientalmente sostenibles para el reaprovechamiento del PAM y lodos generados por el tratamiento de DAM en las plantas de Pucará y Azalia** de esta investigación, en la primera etapa se recopiló las sumatorias de los puntajes de las estrategias ambientalmente sostenibles en base a experiencias globales y nacionales, y el caso de estudio. La segunda etapa se realizó con un gráfico de barras mediante el programa de Microsoft **Excel**, que permite un **análisis comparativo visual** para lo cual se utilizaron los datos estandarizados de las sumatorias de las estrategias.

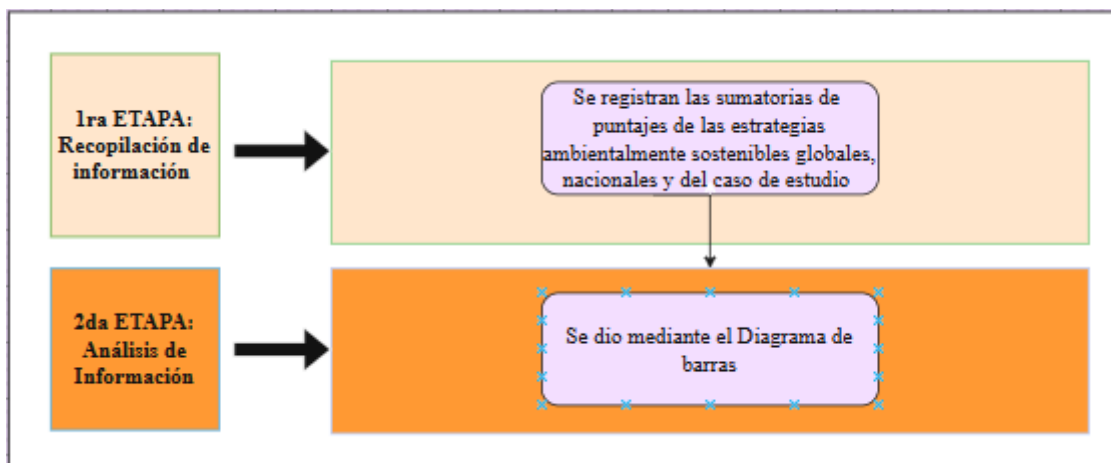


FIGURA 10. ESQUEMA DE LAS ACTIVIDADES DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 3.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.4 Operacionalización de variables

En el estudio para determinar la sostenibilidad de las estrategias de reaprovechamiento, se tomó en cuenta el contenido porcentual de sulfuros y de metales reaprovechables, y tipo de granulometría que fueron variables independientes. La importancia de elección de variables independientes es porque, los sulfuros, al oxidarse, generan ácido que disminuirá el pH y facilita la solubilización de metales pesados. Por otro lado, los metales pesados como plomo, arsénico, cadmio y hierro, su remoción y reaprovechamiento en procesos de reutilización representan una variable independiente de gran importancia ambiental, ya que su control podrá minimizar la toxicidad del DAM (Trujillo,2023) y favorecer estrategias de recuperación ambientalmente sostenible. En cuanto a la granulometría es un elemento independiente que influye en la generación del DAM y en la liberación de contaminantes (Osorio,2022), a su vez permite caracterizar el tamaño y la distribución de partículas, influyendo en la reactividad de los residuos y, por ende, en la estabilidad del DAM. Las variables mencionadas se utilizaron como criterios para analizar las estrategias globales y nacionales orientadas a la reutilización de los PAMs y los lodos generados en el tratamiento del DAM. De la misma forma estos criterios fueron considerados para el caso de la estrategia de producción de ladrillos ecológicos elaborados por AMSAC.

TABLA 4. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Indicadores	Tipo y Escala	Rango
Sulfuro (independiente)	Compuestos de azufre combinados con metales, como la pirita (FeS ₂).	Estos datos de sulfuros se obtendrán mediante los objetivos específicos 1 y 2	Porcentaje (%)	Cuantitativa, discreta.	$x < 0.2$ Muy Buena, $0.2 \leq x \leq 0.3$ Bueno y $0.3 < x$ Malo
Granulometría (independiente) mm	Medida del tamaño y la dispersión de las partículas presentes en los desechos.	Se obtendrá de los estudios revisados, mediante los objetivos específicos 1 y 2.	Tamaño de partícula promedio, distribución porcentual de tamaños.	Cuantitativas, discreto	$x < 0.001$ Muy Bueno, $0.001 \leq x \leq 0.1$ Bueno, $0.1 < x$ Malo
Lodos, relaves o metales reaprovechables	Los lodos son derivados de los procesos de tratamiento de DAM, el relave minero es el residuo que se genera	Se obtendrá los diferentes % de los lodos, relaves o metales que son reaprovechables	Porcentaje de lodos relaves o metales reaprovechables (%)	Cuantitativas, discreto	$0 \leq x < 33.33$ Malo, $33.33 \leq x \leq 66.66$ Bueno, $66.66 < x$ Muy bueno

(independiente) después de la extracción de los minerales valiosos y los elementos metálicos.

Estrategias de reaprovechamiento (dependiente)	Procesos de reutilizar, recuperar o valorizar materiales, residuos o recursos que de otro modo serían desechados o permanecerán sin uso (Baird, 2012).	Viabilidad de las estrategias de reaprovechamiento	Sin unidades	Cuantitativa, discreta	1 a 9
--	--	--	--------------	------------------------	-------

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para determinar **estrategias sostenibles** para el reaprovechamiento de los PAMs y los lodos derivados del tratamiento del DAM, se utilizaron las **variables ambientales** independientes mencionadas anteriormente, ya que estas permiten evaluar las características fisicoquímicas de las estrategias de valorización propuestas. Estas propiedades al ser modificadas generalmente provocan impactos negativos al medio ambiente.

5.5 Análisis de Información

La información recopilada con respecto a los objetivos específicos 1 y 2 se analizó mediante el **Análisis Multicriterio** (Grajales-Quintero et al., 2013). Esta herramienta permitió evaluar distintas estrategias de reaprovechamiento para la zona de estudio a partir de un conjunto diverso de criterios en función de las variables, a los que se asignó pesos según el nivel de importancia que los evaluadores consideraron que debe tener. En primer lugar, se asignó los pesos con referencia a las escalas para los criterios de contenido porcentual de sulfuros y de metales reaprovechados, así como el tipo de granulometría (**tabla 5**), siendo “x” dato del artículo. En segundo lugar, el criterio de contenido porcentual de sulfuros y porcentaje de reaprovechamiento; y granulometría (**tablas 6,7 y 8**).

TABLA 5. ESCALA Y PESOS PARA LOS CRITERIOS DE CONTENIDO PORCENTUAL DE SULFUROS Y PORCENTAJE DE LODOS, RELAVES O METALES REAPROVECHARLES Y TIPO DE GRANULOMETRÍA

Escala	Muy bueno	Bueno	Malo
Pesos	3	2	1

Nota. Fuente: Elaboración propia.

TABLA 6. ESCALA Y RANGO PARA CONTENIDO PORCENTUAL DE SULFUROS

Escala	Muy buena	Bueno	Malo
Rango (%)	$x < 0.2$	$0.2 \leq X \leq 0.3$	$0.3 < x$

Nota. Fuente: Elaboración propia.

TABLA 7. ESCALA Y RANGO PARA TIPOS DE GRANULOMETRÍA

Escala	Muy bueno	Bueno	Malo
Rango (mm)	$x < 0.001$	$0.001 \leq X \leq 0.1$	$0.1 < x$

Nota. Fuente: Elaboración propia

TABLA 8. ESCALA Y RANGO PARA CONTENIDO PORCENTUAL DE LODOS, RELAVES O METALES REAPROVECHABLES

Escala	Malo	Bueno	Muy bueno
Lodos o relaves reaprovechables (%)	$0 \leq x < 30$	$30 \leq x \leq 60$	$60 < x$

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para analizar el **objetivo específico 1** se desarrolló mediante la matriz multicriterio (**tabla 9**)

TABLA 9. MATRIZ MULTICRITERIO PARA LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DE LAS ESTRATEGIAS GLOBALES Y NACIONALES

Estrategias	% Sulfuros	% lodos, relaves o metales reprovechables	Granulometría	Sumatoria
Estrategia 1				
Estrategia 2				
.....				
Estrategia "N"				

Nota. Fuente: Adaptado de Contreras et al. (2008).

Con respecto al desarrollo del análisis de la estrategia de “ladrillos ecológicos” realizado por AMSAC se dio mediante la matriz multicriterio (**tabla 10**).

TABLA 10. MATRIZ MULTICRITERIO PARA LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DE LA ESTRATEGIA DEL CASO DE ESTUDIO AMSAC

Estrategia	% Sulfuros	% Lodos, relaves o metales reprovechables	Granulometría	Sumatoria
Ladrillos Ecológicos para Pucará por AMSAC				
Ladrillos Ecológicos para Azalia por AMSAC				

Nota. Fuente: Adaptado de Contreras et al. (2008).

Una vez identificadas las estrategias de mayor prioridad para la gestión de PAMs y los lodos generados en sus tratamientos, tanto a nivel nacional como global, se procedió a su comparación con el caso de estudio. Esta comparación se visualizó mediante **gráfico de barras** que fusiona los resultados de ambos objetivos específicos mencionados. Esta representación conjunta permitió determinar alternativas ambientalmente sostenibles para el reaprovechamiento de PAM en zonas mineras del Perú y los lodos generados por las plantas de tratamiento de Pucará y Azalia.

VI. Resultados

6.1 Identificación y clasificación de estrategias ambientalmente sostenibles

En la primera etapa de búsqueda de información para cumplir con el objetivo específico 1 (**figura 8**), se identificaron un total de 120 referencias a nivel global y nacional de las bases de datos de PubMed, Scielo, ScienceDirect y literatura gris. Por otro lado, en la segunda etapa de selección de información (**figura 8**) se optaron por 13 referencias que cumplieron con los criterios de inclusión y exclusión (**tabla 3 y anexo A**). Para la tercera etapa de clasificación (**figura 8**), fueron 12 tipos diferentes de estrategias de reaprovechamiento de los PAMs y lodos generados por el tratamiento activo del DAM (**tabla 11**). Finalmente, en la etapa de análisis de información, predominaron 4 estrategias (**anexo E**): Materia prima para adoquines, extracción de metales, extracción de Zn y eliminación de contaminación en el agua (**tabla 12 y figura 11**), estas estrategias fueron las más ambientalmente sostenibles debido a la sumatoria de los pesos de las variables independientes (contenido porcentual de sulfuros y lodos, relaves o metales reaprovechables, y tipo de granulometría) (**tabla 4, 5, 6,7 y 8**) consideradas con más de 5 cada una, siendo el mayor ideal 9 (**tabla 12**).

TABLA 11. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE LAS ESTRATEGIAS AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES PARA EL REAPROVECHAMIENTO DE LOS PAMS Y LOS LODOS DERIVADOS DEL TRATAMIENTO ACTIVO DEL DAM

N°	Estrategias identificadas	Definición operacional
1	M. P. para ladrillos	La elaboración de ladrillos teniendo como parte de la M.P. (materia prima) al relave minero .
2	M.P. para carreteras	Los relaves mineros como M.P. (materia prima) en la construcción de carreteras.
3	M.P. para adoquines	Los relaves mineros como M.P. (materia prima) en la elaboración de adoquines.
4	M.P. para ladrillos de arcilla cocida	Los lodos generados en el tratamiento de DAM fueron reutilizados para la producción de ladrillos de arcilla cocida ecológicos.
5	M.P. para generación de geopolímeros	Producción de geopolímero poroso a partir del lodo de drenaje de minas de carbón, cenizas volantes y ganga de carbón
6	M.P. para geopolímeros/ladrillos	Los relaves mineros se utilizaron como M.P. para formar geopolímeros y con ello elaborar ladrillos.
7	Eliminar contaminantes en el agua	La reutilización de los lodos generados por el tratamiento del DAM sintético para eliminación de contaminantes en el agua.
8	Extracción de metales.	La extracción de los metales en los lodos generados por el tratamiento activo del DAM.
9	Extracción de Zn	La extracción de zinc (Zn) en los lodos generados por el tratamiento de DAM.
10	Extracción de H ₂ SO ₄	Extracción de ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) del DAM.

- 11 Extracción de Fe/coagulante. de La extracción de hierro (Fe) en los **lodos generados** del tratamiento de DAM. Estos usados como coagulantes para las aguas residuales
- 12 Barrera de oxígeno para prevenir DAM. La mezcla de **lodos generados** en el tratamiento de DAM con suelo natural como barrera de oxígeno en los residuos mineros con el objetivo de disminuir la generación de DAM.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

TABLA 12. *ESTRATEGIAS AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES PARA EL REAPROVECHAMIENTO DE LOS PAMS Y LOS LODOS DERIVADOS DEL TRATAMIENTO ACTIVO DEL DAM CON LOS PESOS ASIGNADOS*

Estrategias identificadas	% Sulfuros	% Lodos, relaves o metales reaprovechables	Granulometría	Sumatoria de los pesos
M. P. para ladrillos	1	1	2	4
M.P. para carreteras	0	2	1	3
M.P. para adoquines	2	2	2	6
M.P. para ladrillos de arcilla cocida	1	2	1	4
M.P. para generación de geopolímeros	1	2	1	4
M.P. para geopolímeros/ladrillos	1	1	1	3
Eliminar contaminantes en el agua	0	2	3	5

Extracción de metales.	3	3	1	7
Extracción de Zn	2	3	1	6
Extracción de H ₂ SO ₄	0	3	1	4
Extracción de Fe/coagulante.	1	2	1	4
Barrera de oxígeno para prevenir DAM.	1	2	1	4

Nota. Fuente: Elaboración propia. *M.P. = Materia prima

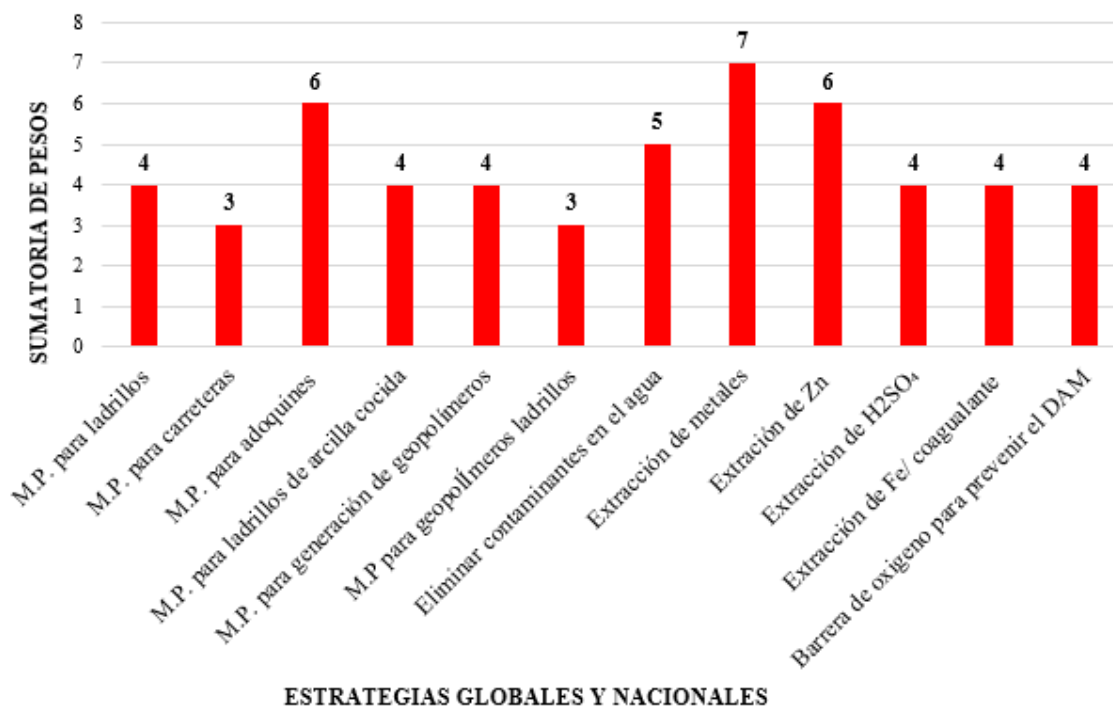


FIGURA 11. SUMATORIA DE LOS PESOS ASIGNADOS PARA CADA ESTRATEGIA GLOBAL Y NACIONAL PARA EL REAPROVECHAMIENTO DE PAMS Y LODOS DERIVADOS DEL TRATAMIENTO ACTIVO DEL DAM. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

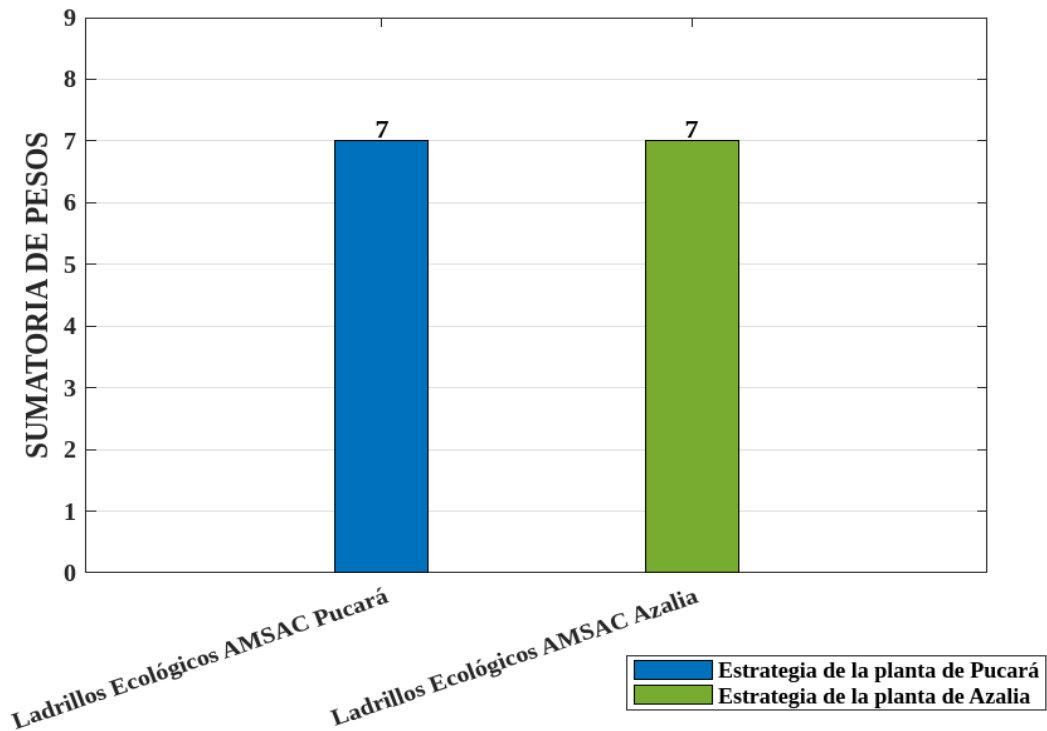
6.2 Evaluación de la sostenibilidad ambiental para el caso de AMSAC.

En la primera etapa de recopilación de datos para cumplir con el objetivo específico 2 (**figura 9**), se solicitó a la empresa AMSAC los análisis de laboratorio de las características fisicoquímicas de los lodos generados en las plantas de tratamiento activo de Pucará y Azalia (**anexos B, C y D**) con la finalidad de caracterizar ambientalmente la estrategia de producción de “ladrillos ecológicos” (**tabla 13**). De igual manera, en la segunda etapa de análisis de información (**figura 9**), se optaron por seleccionar los valores del contenido porcentual de sulfuros y lodos reaprovechables, y tipo de granulometría para dichas plantas (**tabla 13**), seguidamente poder asignar pesos (como se indica en operacionalización de variables) a cada variable siendo 1 malo, 2 bueno y 3 muy bueno (**tabla 4, 5, 6, 7 y 8**), y realizar la sumatoria de los pesos con la finalidad de evaluar la sostenibilidad ambiental de las estrategias del caso de estudio (**figura 13**).

TABLA 13. DATOS DE LA ESTRATEGIA DE PRODUCCIÓN DE LADRILLOS ECOLÓGICOS ELABORADOS POR AMSAC CON LOS PESOS ASIGNADOS

Estrategia	% Sulfuros	% Lodo reaprovechable	Granulometría	Sumatoria de los pesos
Ladrillos Ecológicos por AMSAC para la planta Pucará	3	2	2	7
Ladrillos Ecológicos por AMSAC para la planta Azalia	3	2	2	7

Nota. Fuente: Elaboración propia.



ESTRATEGIAS DEL CASO DE ESTUDIO

FIGURA 12. SUMATORIA DE LOS PESOS ASIGNADOS DE LA ESTRATEGIA DE PRODUCCIÓN DE LADRILLOS ECOLÓGICOS ELABORADOS POR AMSAC EN LAS PLANTAS DE PUCARÁ Y AZALIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

6.3 Estrategias alternativas y ambientalmente sostenibles para el reaprovechamiento de PAMs y lodos con el caso de AMSAC.

En la primera etapa de recopilación de información para cumplir con el objetivo específico 3 (**figura 10**), se contó con la sumatoria de pesos asignados de las 12 estrategias (**figura 11 y tabla 12**) de reaprovechamiento de PAMs y lodos de tratamiento de DAM, de la misma forma con la sumatoria de pesos destinados a los ladrillos ecológicos que AMSAC planea implementar en las plantas Pucará y Azalia (**figura 12**). En la segunda etapa de análisis de información (**figura 10**), se realizó una comparación e interpretación de datos con dichas sumatorias de pesos (**tabla 4, 5, 6, 7 y 8**) con el propósito de determinar qué alternativas ambientalmente sostenibles para el reaprovechamiento de PAMs en zonas mineras del Perú y de los lodos generados por plantas de tratamiento de Pucará y Azalia se podría implementar (**figura 13**). Siendo materia prima para adoquines, extracción de metales, extracción de Zn y eliminación de contaminación en el agua

(anexo E), las estrategias que obtuvieron mayores valores en la sumatoria de pesos más de 5 cada una, permitiendo identificar rápidamente los mejores rendimientos (figura 13).

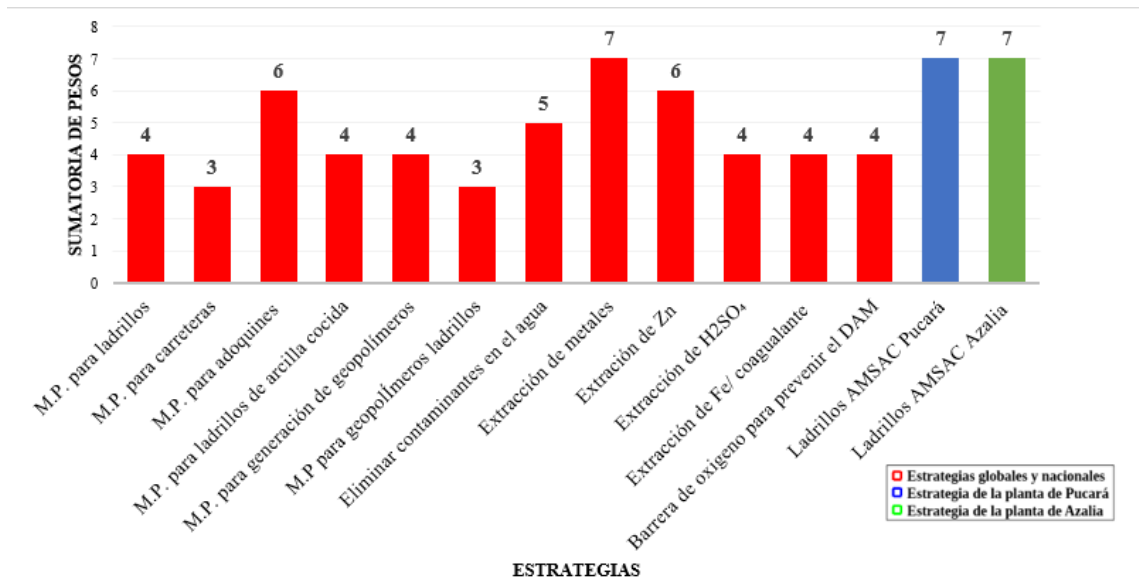


FIGURA 13. COMPARACIÓN DE PESOS ASIGNADOS PARA CADA UNA DE LAS ESTRATEGIAS AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES PARA EL REAPROVECHAMIENTO DE PAM. FUENTE. ELABORACIÓN PROPIA

VII. Discusión

7.1 Estrategias ambientalmente sostenibles para el reaprovechamiento de PAMs y lodos.

La identificación de estrategias para el reaprovechamiento sostenible de los lodos generados por el DAM (Trujillo,2023) responde a la necesidad urgente de transformar un PAM (tabla 1) en un recurso valioso (Torres, 2024; Enriquez, 2002; Zinck, 2006). Con esta mirada, desde el enfoque de sostenibilidad, diversos estudios han demostrado que los residuos mineros pueden ser valorizados sostenibles ambientalmente (Kümmerer et al., 2016; Torres et al.,2024) si se consideran las variables fisicoquímicas (tabla 4) como el contenido porcentual de sulfuros y lodos, relaves o metales reaprovechables, y el tipo de granulometría del lodo (Benzazoua et al., 2008; Kümmerer et al., 2016). Para ello, en esta investigación, durante la primera fase, se recopilaron y evaluaron 120 fuentes científicas, de las cuales 13 fueron seleccionadas (anexo A) mediante criterios de inclusión y exclusión (artículos recientes considerados, referencia al título, idioma y acceso a artículos) (tabla 3). A partir de ello, se identificaron 12 estrategias diferentes (tabla 11)

relevantes tanto a nivel global como nacional, las cuales fueron sometidas a una evaluación mediante un Análisis Multicriterio (Grajales-Quintero et al., 2013) (**tabla 9**) bajo las tres variables fisicoquímicas mencionadas (**tabla 4**). De acuerdo con los resultados obtenidos (**figura 10**), la estrategia con mayor sumatoria de peso fue la extracción de metales (7 puntos) (**figuras 11 y 12**), seguida por la reutilización del lodo como materia prima para adoquines (Enríquez, 2002), la recuperación de zinc, todas estas con una sumatoria de 6; y la estrategia de eliminación de contaminantes en el agua con una sumatoria de 5. Estas estrategias fueron valoradas positivamente por su capacidad de reducir el riesgo ambiental asociado a la lixiviación de metales pesados (Osorio, 2022).

En particular, la extracción de metales se posiciona como una estrategia prioritaria debido a su doble beneficio: mitigación ambiental y valorización directa de elementos como hierro, zinc o manganeso, tal como lo sostienen Macías et al. (2017) y Zinck (2006). Asimismo, estrategias como la adsorción con materiales derivados de lodos —aplicadas a la remoción de contaminantes como el fósforo— han demostrado ser viables en contextos de aguas afectadas por minería (Wang et al., 2013). Desde esta perspectiva ambiental, estas alternativas representan un avance sustancial frente a los más de 6000 PAMs (MINEM, 2025) y los lodos que son derivados del tratamiento de DAM (Arroyo et al., 2021), ya que permite convertir un residuo potencialmente tóxico en un insumo útil para procesos industriales o de remediación (Hughes & Williams, 2010). Este enfoque está respaldado por Arroyo et al. (2021), quienes destacan que los PAMs son reaprovechables, mediante la recuperación del hierro en el lodo de DAM para usarlo como coagulante y minimizar la cantidad de lodo residual; y por Benassi et al. (2016), quienes demostraron que los procesos térmicos pueden inmovilizar metales pesados en fases vítreas estables, reduciendo significativamente su movilidad ambiental. En síntesis, el análisis de las estrategias ambientalmente sostenibles a nivel global y nacional para el reaprovechamiento de PAMs y lodos derivados de procesos de tratamiento de DAM, permitió construir una base técnica rigurosa ambientalmente para priorizar posibles estrategias replicables (Macías et al., 2017; Chappuis, 2019) en contextos mineros como los de Pucará y Azalia.

7.2 Viabilidad ambiental de la estrategia de producción de AMSAC.

La revisión de criterios de sostenibilidad ambientalmente en la estrategia de Ladrillos Ecológicos implementada por AMSAC y aplicados en las plantas Pucará y Azalia, permitió identificar una alternativa técnicamente sólida (**tabla 13, figura 12**) para la valorización de PAMs. Esta evaluación se basó en tres variables fisicoquímicas que explican su alto desempeño: bajo contenido de sulfuros ($x < 0.2$) (**tabla 6 y anexo B**), granulometría fina (≤ 0.001 mm) (**tabla 7 y anexo D**), y una concentración significativa del porcentaje de lodo reaprovechable ($\geq 30\%$) (**tabla 5 y anexo C**); como se muestran los datos analizados (**tabla 12**), tanto los lodos de Pucará como los de Azalia obtuvieron una puntuación total de 7 sobre 9 (**figura 11**), destacando en las variables de sulfuros (3/3) y granulometría (2/3), lo cual evidencia una alta viabilidad ambiental para su transformación en insumos de construcción (**tabla 13**). En este sentido, los lodos presentan características que favorecen su estabilización térmica: un contenido de sulfuros bajo (0.01 %) (AMSAC, 2016; **anexo B**), que reduce el riesgo de formación de acidez secundaria (López et al., 2002), y una granulometría fina (0.075 mm) (AMSAC, 2024; **anexo D**), ideal para el prensado y conformación de piezas cerámicas.

Estos resultados coinciden con lo señalado por Park et al., 2019 que indica que los sulfuros desempeñan un papel crítico, pues al oxidarse generan ácido sulfúrico, lo que disminuye el pH y facilita la solubilización de metales pesados. En segundo lugar, los metales pesados como Pb, As, Cd y Fe constituyen un factor determinante (**anexo D**), dado que su control contribuye a reducir la toxicidad del DAM y favorecer estrategias de recuperación sostenibles (Trujillo, 2023). Finalmente, para Osorio, 2022, la granulometría influye en la generación del DAM y en la liberación de contaminantes, además de determinar la reactividad y estabilidad de los residuos. Por otra parte, si bien el porcentaje de lodos reaprovechables, 30% (AMSAC, 2024; **anexo C**) en los lodos fue evaluado como “bueno” (2/3); la convergencia entre alternativas como adoquines y recuperación de metales refuerza el enfoque de economía circular en la minería (Macías et al., 2017 y Benassi et al., 2016), al transformar residuos en insumos útiles y comercializables.

Desde una perspectiva más amplia, la implementación de esta estrategia no solo se alinea con los principios de economía circular minera (Romero & Flores, 2010), sino que

también ofrece una estrategia replicable para otras zonas afectadas por DAM (Ford, 2003; Denegri & Iannacone, 2020), reduciendo la dependencia de depósitos de seguridad y favoreciendo la transición hacia modelos de producción más sostenibles Park et al. (2019). Sin embargo, se debe reconocer que esta evaluación ha considerado únicamente variables ambientales (Palma, 2018; Chávez, 2020). En conclusión, la estrategia de AMSAC basada en la producción de ladrillos ecológicos (**tabla 13 y figura 12**) representa una opción ambientalmente sostenible para el reaprovechamiento de los lodos de DAM en Pucará y Azalia. Su implementación podría consolidarse como modelo de referencia, siempre que se complemente con validaciones experimentales, monitoreo postproducción y articulación con políticas de gestión de residuos mineros.

7.3 Comparación de las mejores estrategias globales y nacionales con el caso de AMSAC.

Con base en la síntesis de experiencias internacionales y nacionales sobre el reaprovechamiento de PAM en zonas mineras del Perú y lodos generados por plantas de tratamiento de Pucará y Azalia de la mina de carbón de Goyllarisquizga (Meneses, 2022; Carrascal, 2020), se identificaron cinco alternativas que destacan por su sostenibilidad ambiental a nivel global y nacional: extracción de metales, extracción de zinc, elaboración de adoquines y la estrategia de ladrillos ecológicos propuesta por AMSAC en ambas plantas (**figura 13**). Todas estas opciones obtuvieron una sumatoria mayor o igual a 5 (**anexo E**) en la evaluación multicriterio (**tabla 3**). Las estrategias de extracción de metales y los ladrillos AMSAC (Pucará y Azalia) alcanzaron la puntuación máxima de 7 (**tabla 13**), lo que indica una alta viabilidad técnica, ambiental y replicabilidad. En cuanto a la extracción de metales, por ejemplo, ha sido ampliamente respaldada por estudios como los de Zinck (2006) y Macías et al. (2017), quienes demuestran que, bajo condiciones controladas, los lodos de DAM pueden servir como fuente secundaria de elementos como Zn, Fe y Mn. Por su parte, la estrategia de ladrillos ecológicos de AMSAC, al haber alcanzado también una sumatoria de 7 tanto en Pucará como en Azalia (**figura 12**), podría ser un potencial modelo replicable en otros contextos mineros, considerando algunas limitaciones que se detallan más adelante.

Además, las estrategias de elaboración de adoquines (Enríquez et al. 2022, Romero & Flores 2010), resultan funcionales en entornos con necesidades ambientales específicas

(anexo E). Tal como lo señalan Wang et al. (2013), los procesos de adsorción aplicados a residuos mineros pueden reducir significativamente la carga contaminante de cuerpos hídricos, especialmente en cuencas afectadas por efluentes ácidos. Estos resultados tienen importantes implicancias para la gestión de PAMs en Perú (Kümmerer et al., 2016). En primer lugar, confirman que existen alternativas ambientalmente sostenibles (**anexo E**) que pueden complementar o sustituir la actual estrategia de AMSAC (ladrillos ecológicos). Y, en segundo lugar, evidencian que la elección de una estrategia no debe basarse únicamente en disponibilidad de lodo, considerando que la empresa genera 16,000 sacos mensuales de relave minero y 4,000 m³ anuales de lodos (AMSAC, 2023), sino también en su calidad fisicoquímica (**tabla 6**), finalidad del producto (materiales de construcción, extracción de metales y eliminación de contaminantes) (**tabla 11**) y beneficios ambientales esperados (Rodríguez-Galán et al., 2024).

VIII. Conclusiones

La presente investigación demuestra que existen cuatro estrategias ambientalmente sostenibles para el reaprovechamiento de los lodos generados en el tratamiento de DAM en las plantas de Pucará y Azalia. En ese sentido, el análisis de estrategias aplicadas a nivel global como nacional permitió establecer un conjunto de estrategias con potencial de sostenibilidad ambiental. Entre estas, cuatro destacaron por los criterios de contenido porcentual de sulfuros y relaves, lodos o metales reaprovechados; y tipo de granulometría, los cuales son: materia prima para adoquines, extracción de metales, extracción de Zn y eliminación de contaminantes en el agua; comuna sumatoria de 6,7,6 y 5 respectivamente; siendo 9 el valor máximo ideal. Asimismo, la evaluación de la sostenibilidad ambiental de la estrategia propuesta por AMSAC, basada en la producción de ladrillos ecológicos a partir de lodos generados por las plantas, evidenció una alta sostenibilidad ambiental con un peso de sumatoria de 7 de 9. Al comparar esta opción con las estrategias encontradas a nivel global y nacional, se constató que los ladrillos ecológicos presentan un puntaje comparable e incluso superior en algunos casos.

IX. Recomendaciones:

A partir del análisis multicriterio, se reconoce las limitaciones del estudio, entre ellas el hecho de cumplir con los parámetros fisicoquímicos; es decir, con datos completos como

la cantidad de porcentajes de sulfuros (solo se mencionan que existe sulfuro en el DAM mas no la cantidad exacta) o el porcentaje de reaprovechamiento. Por otra parte, la información solicitada a AMSAC data del año 2016 en cuanto a la cantidad de lodos generados, y respecto a los parámetros fisicoquímicos son del año 2024; lo que podría restringir a la precisión de los parámetros mencionados. Simultáneamente, estas variables, fueron exclusivamente orientadas al ámbito ambiental, sin considerar aspectos económicos o sociales. Finalmente, se sugiere que AMSAC, desarrolle proyectos piloto para validar, en condiciones reales, la viabilidad de las estrategias priorizadas (de sumatoria de 6 o 7) para el reaprovechamiento ambientalmente sostenible de lodos de DAM; y realizar programas de monitoreo periódico que actualicen las características de los lodos generados en las plantas de Pucará y Azalia, permitiendo ajustar las estrategias de reaprovechamiento de ladrillos ecológicos.

X. Bibliografía

1. Aduvire, O. (2006). Drenaje Ácido de Mina: Generación y Tratamiento. In Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. https://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf
2. Alméciga, A. M. & Muñoz, M. (2013). pH, historia de un concepto. Análisis en textos de educación superior. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/297>
3. Alsaiari, A., & Tang, H. L. (2018). Field investigations of passive and active processes for acid mine drainage treatment: Are anions a concern? *Ecological Engineering*, 122, 100-106. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.035>
4. Anekwe, I. M. S., & Isa, Y. M. (2023). Bioremediation of acid mine drainage – Review. *Alexandria Engineering Journal*, 65, 1047-1075. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822006470?via%3Dihub>
5. Antony, F., & Terrones, Z. (2024). Estabilización de la subrasante arenosa con ceniza de cebada y yeso en una localidad costera peruana Stabilization of sandy subgrade with

- barley ash and gypsum in a peruvian coastal locality Introducción. 4–11.
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/56066>.
6. Arango Aramburo, M. & Olaya, Y. (2012). Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. *Revista Gestión y Ambiente*. 15(3), 125-132
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/36286/37829>
 7. Arroyo et al. (2021). Evaluation of acid mine drainage sludge for its use in cold-pressed bricks and pavers. *Construction and Building Materials*, 284, 122739.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122739>
 8. Ayala-Muñoz *et al.* (2022) Microbial carbon, sulfur, iron, and nitrogen cycling linked to the potential remediation of a meromictic acidic pit lake. *ISME J* 16, 2666–2679 .
<https://doi.org/10.1038/s41396-022-01320-w>
 9. Benassi, L., et al. (2016). Use of mine sludge in fired bricks: Thermal behavior and leaching properties. *Journal of Environmental Management*, 181, 626–633.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.008>
 10. BHP. (2024). ¿Qué son los relaves y las instalaciones de almacenamiento de relaves? <https://www.bhp.com/es/sustainability/tailings-storage-facilities/what-are-tailings-storage-facilities>
 11. Bojacá, et al. (2022). CBR cíclico como método alternativo para la determinación del módulo resiliente en suelos blandos de subrasante. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 32(2), 85–98
<https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/5896>.
 12. Camps D. Estudio bibliométrico general de colaboración y consumo de la información en artículos originales de la revista *Universitas Médica*, período 2002 a 2006, *Universitas Médica* 2007; 48(4): 358-365.
 13. Cajina, et al. (2021). Evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con residuos de PVC tipo

blíster. Infraestructura Vial, 23(42), 13–22.

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/44688>

14. Calva Herrera, L. O., & Muñoz Pérez, S. P. (2022). Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente incorporando escorias de acero. *Infraestructura Vial*, 24(43), 1–10. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/48421>
15. Cárdenas, M., & Reina, M. (2008). La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal (Fedesarrollo). <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/893>
16. Carrascal, A. (2020). *Carbón en el Perú: Exploración, explotación, reservas y producción*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3270>
17. Chandra, A. P., & Gerson, A. R. (2010). The mechanisms of pyrite oxidation and leaching: A fundamental perspective. *Surface Science Reports*, 65(9), 293–315. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167572910000609>
18. Chandra, V. & Souza P. (2018). Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation In V. C.Pandey and K. Bauddh (Eds.). *Phytomanagement of Polluted Sites Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation* (pp. 51 - 82). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128139127000028>
19. Chaparro Corso, J. Y., & Ruiz Ardilla, N. (2018). Evaluación a escala de laboratorio del gradiente de acidez de drenaje ácido de mina, mediante el uso de columnas de caliza como sistema pasivo de neutralización. [Tesis de pregrado], Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Sogamoso, Escuela de Ingeniería Geológica
20. Chappuis, M. (2019). Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el Perú. *Medio Ambiente y Desarrollo*, 1–50. <https://minsus.net/Media-Publicaciones/remediacion-y-activacion-de-pasivos-ambientales-mineros-pam-en-el-peru/>

21. Choque Gonza, Y. (2020). Anteproyecto de mejoramiento y ampliación de la planta de tratamiento de agua de drenaje ácido de mina para la unidad Minera Coimolache, en el distrito de Hualgayoc, provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca. Universidad Nacional de San Agustín, Facultad de Ingeniería de Procesos, Escuela Profesional de Ingeniería Química, Arequipa.
22. Convención de Ramsar, (2013). Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 6a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza). 6(1), 1-30.
[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/63CDE791FF2EB4CD05h257C630051708F/\\$FILE/1_pdfsam_Manual_convenci%C3%B3n_de_Ramsar_2013.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/63CDE791FF2EB4CD05h257C630051708F/$FILE/1_pdfsam_Manual_convenci%C3%B3n_de_Ramsar_2013.pdf)
23. De La Cruz Vega, et al. (2022). Determinación de índice de serviciabilidad y capacidad resistente. Caso práctico: pavimentos en Azángaro, Puno, Perú. *Infraestructura Vial*, 24(43), 1–8.
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/48563>.
24. De la Cruz García, C. J., & Coronel Zárate, H. G. (2017). *Estudio de optimización del sistema de tratamiento de las aguas ácidas de un efluente minero* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería].
25. Defensoría del Pueblo (2024). Reporte de conflictos sociales N.º 240. <https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2024/03/Reporte-Mensual-de-Conflictos-Sociales-n.%C2%B0-240-Febrero-2024.pdf>
26. Denegri, J. E., & Iannacone, J. (2020). Tratamiento de Drenaje Ácido de Minas Mediante Humedales Artificiales. *Biotempo*, 17(2), 345–369. <https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Biotempo/article/view/3349/4105>
27. Díaz, et al. (2003). Biosorción de Fe, Al y Mn de drenajes ácidos de mina de carbón empleando algas marinas sargassum sp. en procesos continuos. *Revista Facultad De*

Ingeniería Universidad De Antioquia, (30), 34–48.
<https://doi.org/10.17533/udea.redin.327309>

28. Duffus, J. H. (2002). “Heavy metals”—A meaningless term? *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793–807. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>
29. Enríquez, et al. (2022). Estudio de caso para el aprovechamiento de relaves mineros procedentes de la concesión Campanillas, Zamora Chinchipe-Ecuador, como agregado para la elaboración de adoquines. *GEO Latitud* 5(1),24-42
<https://geolatitud.geoenergia.gob.ec/ojs/ojs/index.php/GeoLatitud/article/view/114/101>
30. ERANO Ingenieros Consultores SRL. *Proyecto de Plan de Cierre de la Relavera - Planta Concentradora de Mesapata*. UNASAM.
31. Espejo de la Cruz, F. (2021). *Evaluación de la calidad de efluentes mineros del túnel Pucará y bocamina Azalia de propiedad de Activos Mineros en el distrito de Goyllarisquizga* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Ucayali.
http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/4239/1/T026_72118889_T.pdf
32. Ford, K. L. (2003). Passive treatment systems for acid mine drainage. National Science & Technology Center <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1018&context=usblmpub>
33. Gaikwad, R., & Gupta, D. (2007). Acid mine drainage (AMD) managment. *Journal of Industrial Pollution Control*(23), 283-295
<https://www.icontrolpollution.com/articles/acid-mine-drainage-amd-management-283-295.pdf>
34. García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). *Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*.
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/2474>
35. Garcia-Troncoso et al. (2022). Comparative mechanical properties of conventional concrete mixture and concrete incorporating mining tailings sands. *Case Studies in*

Construction Materials, 16(January), e01031.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01031>

36. Goli, A. (2022). The study of the feasibility of using recycled steel slag aggregate in hot mix asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, 16(December 2021), e00861.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521003764?via%3Dihub>

37. Hernández, I. A., & Sulbarán, B. C. (2017). Modelado de humedales artificiales empleando parámetros de calidad de agua. 14(1), 1-12.

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/12628>

38. Huaccanqui Apaza, S. E. (2019). *Remoción de hierro en las infiltraciones ácidas de las bocaminas de Azalia - Pasco mediante sistemas de producción sucesiva de alcalinidad* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur].

39. Huaranga-Moreno et al. (2021). Bioindicator species of contamination by mining tailings in the Samne Sector, La Libertad-Perú, 2021. *Arnaldoa*, 28(3), 633–650

<https://journal.upao.edu.pe/index.php/Arnaldoa/article/view/1630/1375>

40. Hughes, J. D., & Williams, D. (2010). The impact of mining on the environment and the economy of southern Peru. *Journal of Latin American Geography*, 9(2), 35-56.

<https://www.jstor.org/stable/25041849>

41. Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). (2019). *Informe de emergencia N° 759: Derrame de relave minero en el distrito de San Pedro de Coris, Huancavelica* (Informe de emergencia No. 15-002). <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/09/INFORME-DE-EMERGENCIA-N%C2%BA-759-30SEP2019-DERRAME-DE-RELAVE-MINERO-EN-EL-DISTRITO-DE-SAN-PEDRO-DE-CORIS-HUANCAVELICA-15-002.pdf>

42. Instituto Peruano del Deporte (2023, 27 de julio). *El Estadio Nacional cumple 71 años desde su inauguración*. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/institucion/ipd/noticias/857211-el-estadio-nacional-cumple-71-anos-desde-su-inauguracion>
43. Jansen et al. (2024). Revealing the Protective Dynamics of an Ecologically Engineered Wetland against Acid Mine Drainage: A Case Study in South Africa. *Applied Sciences*, 14(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/app14177441>
44. Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment*, 338(1-2), 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>
45. Kefeni et al. (2017). Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, 151, 475-493. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.082
46. Kümmerer et al. (2016). Estrategias de gestión y valorización de lodos residuales de la neutralización de aguas residuales industriales. *Science of the Total Environment*, 565, 1056-1063. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616315220>
47. Llagas et al. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM (Vol. 15, pp. 85–96). https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9_n17/a11.pdf
48. Loaiza, E., & Arcos, F. (2024). *Actividad minera artesanal en la zona central del Perú, regiones Pasco, Junín y Huancavelica* (Boletín Serie E: Minería, N° 18). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). <https://repositorio.ingemmet.gob.pe>
49. López et al. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: Estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 113(1), 3–21. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-del-centro-del-Peru/quimica/4-articulo-cientifico/23426286>

50. López, A., & Sánchez, P. (2015). *Environmental impacts of mining activities in the Peruvian Andes: The case of gold mining in the region of Puno*. *Science of the Total Environment*, 536, 177-187. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.084>
51. MacDonald, A., & Blenkinsop, S. (2009). *The impact of environmental change on mining communities: A case study of environmental degradation and development in Latin America*. *Resources Policy*, 34(1), 51-63. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.03.003>
52. Macías et al. (2017). Management strategies and valorization for waste sludge from active treatment of extremely metal-polluted acid mine drainage: A contribution for sustainable mining. *Journal of Cleaner Production*, 141, 1057-1066. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.181>
53. Meneses Rivas, J. L. (2022). *Teatro y memoria: La representación del conflicto armado interno en la dramaturgia peruana contemporánea* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/4589/MENESES%20RIVAS%20JOSE%20LUIS%20-%20DOCTORADO.pdf?sequence=1>
54. MCA. (2014). *M2014_6*. Recuperado de https://mca.edu.co/wp-content/uploads/2019/09/m2014_6.pdf
55. Ministerio de Energía y Minas. (2004). Ley N° 28271 - Ley que Regula los Pasivos Ambientales de la Actividad Minera. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/3588-28271>
56. Ministerio de Energía y Minas. (2021). Perú: Un país minero lleno de oportunidades. https://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=1&idTitular=159&idMenu=sub149&idCateg=159
57. Ministerio de Energía y Minas. (2024). Anexo: Inventarios de PAM -.'- Resolución Ministerial N° 335-2022-MINEM/DM (pp.1-301). [5966041-anexo-inventario-351-2024_publicacion_.pdf](https://www.gob.pe/_publicacion_.pdf) (www.gob.pe)

58. Montano et al. (2022). *El drenaje ácido de roca y sus potenciales impactos ambientales*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM).
<https://repositorio.inaigem.gob.pe/server/api/core/bitstreams/cf630013-7d9d-4d0f-a8af-5a90db9dd540/content>
59. Montenegro et al. (2019). Prácticas de biorremediación en suelos y aguas. In *Ecapma* Vol. 1, Issue 2.
<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/notas/article/view/3451/3723>
60. Munyengabe et al. (2020). Characterization and reusability suggestions of the sludge generated from a synthetic acid mine drainage treatment using sodium ferrate (VI). *Heliyon*, 6(10), e05244. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05244>
61. Münkkel et al. (2021). Efecto de polímeros y aceite de cocina en el rango de desempeño del asfalto. *Infraestructura Vial*, 23(42), 71–81.
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/47587>.
62. Muñoz et al. (2021). Factores influyentes en la resistencia al deslizamiento en pavimentos flexibles. *Ciencia Nicolasita*, 83–99.
<https://www.cic.cn.umich.mx/cn/article/view/535>.
63. Ñañez, D. A. (2016). Estudio y selección de especies vegetales con potencial biorremediador en drenajes ácidos de roca y relaves minerales de la Cuenca del Río Santa (Áncash, Perú) [Tesis para optar el título de Licenciada en Biología., Universidad Peruana Cayetano Heredia].
<https://repositorio.upch.edu.pe/handle/20.500.12866/6445>
64. Olías et al. (2010). La contaminación minera de los Ríos Tinto Y Odiel. In Facultad de Ciencias Experimentales Universidad de Huelva
<https://core.ac.uk/download/pdf/60665732.pdf>

65. Ospino, J. (2021). La actividad minero-metalúrgica del Cu, Zn, Pb y su influencia en el crecimiento económico del Perú, 1996-2018. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48), 279–286.
<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/21781/17515>
66. Palma, G. A. (2018). Evaluación del funcionamiento de un biorreactor pasivo utilizando bacterias sulfato-reductoras para el tratamiento de drenajes ácidos de mina”, Puno, Perú. [Tesis de pregrado], Universidad Nacional de San Agustín. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6096>
67. Palo, C. D. R. (2021). *Evaluación del tratamiento activo de drenajes ácidos de mina provenientes del distrito de Yarabamba, Arequipa* (Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa). Repositorio Institucional UNSA. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/9a611670-185e-46c3-9718-8896b0c0f99b>
68. Park et al. (2019). A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling. *Chemosphere*, 219, 588-606.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.132>
69. Pastor et al. (2017). Humedales Construidos para la Depuración de Aguas Residuales. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/121214/Pastor%20et%20al..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
70. Pérez, J. (2020). *Análisis de la gestión empresarial en el sector metalmeccánico de la región Arequipa* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <https://repositorio.unsa.edu.pe/bitstreams/c1de2e0f-b9d2-4250-8339-47b27142d3c6/download>

71. Pérez et al. (2024). Optimización de procesos logísticos en empresas de transporte. *Journal of Logistics Research*, 50(7), 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.jlr.2024.05.009>
72. Pineda-Martínez et al. (2020). Analysis of severe storms and tornado formation in the northern region of Mexico. *Revista Bio Ciencias*, 7(492), 15. <https://revistabiociencias.uan.edu.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/view/885/pdf>
73. Pondja et al. (2014). A Survey of Experience Gained from the Treatment of Coal Mine Wastewater. *Journal of Water Resource and Protection*, 6, 1646-58.
74. Pozo et al. (2017). Tratamiento Microbiano de Aguas Ácidas Resultantes de la Actividad Minera: Una Revisión. VIII, 75-91. <https://www.redalyc.org/journal/3535/353551866005/html/>
75. Ritchie, A. I. M. (1994). Sulfide oxidation mechanisms: controls and rates of oxygen transport. In J. L. Jambor, D. W. Blowes, & I. M. Ritchie (Eds.), *The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-wastes* (Vol. 22). Mineralogical Association of Canada. https://www.researchgate.net/publication/228885471_Basic_concepts_of_environmental_geochemistry_of_sulfide_mine-waste
76. Rodríguez, D. T. (2003). El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos. *Revista Ecosistemas*, 12 (2) <https://www.redalyc.org/pdf/540/54012219.pdf>
77. Romero, A., A. & Flores, S., L. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas industriales. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 13(2), 75-82. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/idata/article/view/6193>
78. Rutherford (2001). [Presentación de Anova y Ancova: un enfoque GLM](#) . SABIO.
79. Salager, J. L. (2007). *Granulometría – Teoría* (Cuaderno FIRP N° S554A, versión 2). Laboratorio FIRP, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. <https://es.firp-ula.org/wp-content/uploads/2019/07/S554A.pdf>

80. Sánchez, P., & López, A. (2016). *Environmental impacts of mining activities: A case study of gold mining in the Peruvian Andes*. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(10), 10672-10684. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7733-7>
81. Sanchez et al. (2016). DRENAJES ÁCIDOS DE MINA Alternativas de tratamiento. *Revista de Medio Ambiente y Minería* 1,2-10. http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/n1/n1_a03.pdf
82. Sandoval et al. (2019). Correlación del CBR con la resistencia a la compresión confinada. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 29(1), 135– 152. <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/3478>
83. Sandström, A., & Mattsson, E. (2001). Bacterial ferrous iron oxidation of acid mine drainage as pre-treatment for subsequent metal recovery. *International Journal of Mineral Processing*, 62(1–4), 309–320. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751600000624>
84. Shim et al. (2015). Water quality changes in acid mine drainage streams in Gangneung, Korea, 10 years after treatment with limestone. *Journal of Geochemical Exploration*, 159, 234–242. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674215300728?via%3Dihub>
85. Shuan, F. (2023). Inmovilización de metales pesados en el humedal construido, para la recuperación del drenaje ácido de mina en mesapata, recuay – Áncash, 2022, 50-55. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNM_da71f003c0501c4bdfef415eff130041
86. Silva, R. (2024, agosto 7). *Chavimochic anuncia restricción indefinida de captación de agua por contaminación minera en el río Santa*. Infobae Perú. <https://www.infobae.com/peru/2024/08/07/chavimochic-anuncia-restriccion-indefinida-de-captacion-de-agua-por-contaminacion-minera-en-el-rio-santa/>
87. Stroup, W. (2016). *Modelos Mixtos Lineales Generalizados: Conceptos, Métodos y Aplicaciones Modernos*. Prensa CRC

88. Taylor et al. (2005). A Summary of Passive and Active Treatment Technologies for Acid and Metalliferous Drainage (AMD). In Proceedings of the 5th Australian Workshop on Acid Drainage (Issue 29).https://www.earthsystems.com.au/wp-content/uploads/2012/02/AMD_Treatment_Tech_nologies_06.pdf
89. Tejada et al. (2017). Carbamazepine removal in three pilot-scale hybrid wetlands planted with ornamental species. *Ecological Engineering*, 1-8. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857416302269?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8bea068eefc46835
90. Torres et al. (2024). Valorización de Residuos Mineros como Áridos para la Construcción de Carreteras: Economía Circular en la Región Andina del Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas – Journal of High Andean Research* 26(2), 70-78. <https://huajsapata.unap.edu.pe/index.php/ria/article/view/605/342>
91. Vijayaraghavan, K. & R. Balasubramanian. (2015). Is biosorption suitable for decontamination of metalbearing wastewaters? A critical review on the state-of-the-art of biosorption processes and future directions. 160 (1),283–296 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479715301225?via%3Dihub>
92. Villanueva et al. (2005). Experiencia en biorremediación a través de humedales para el tratamiento de Drenajes Ácidos de Mina (DAM), planta concentradora Mesapata - Áncash. VI Congreso Nacional de Ecología, Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/58fa5354-e8f7-4950-9809-74e6931a72a2/content>
93. Wang et al. (2013). Utilizing acid mine drainage sludge and coal fly ash for phosphate removal from dairy wastewater. *Environmental Technology*, 34(24), 3177–3182. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.808243>
94. Yang et al. (2024). A review on ‘source prevention, process control, end recocer’ trinity-comprehensive treatment technology for acid mine drainage. *Process Safety And Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.125>

95. Zhou et al. (2016). *Bioremediation of contaminated soils: A review of techniques and applications*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(9), 2164-2173. <https://doi.org/10.1016/j.esc.2016.07.019>
96. Zinck, J. (2006). *The role of passive treatment systems in the remediation of mine drainage*. Proceedings of the 2006 International Symposium on Mining and the Environment, 2604-2611. American Society of Mining and Reclamation. <https://www.asrs.us/Publications/Conference-Proceedings/2006/2604-Zinck.pdf>
97. Zipper, C., & Skousen, J. (2014). Passive Treatment of Acid Mine Drainage. *Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils: Causes, Assessment, Prediction, Prevention, and Remediation*, 339–353. <https://doi.org/10.1002/9781118749197.ch30>

Anexos.

ANEXO A. CARACTERÍSTICAS DE LAS 13 ESTRATEGIAS SELECCIONADAS A NIVEL GLOBAL Y NACIONAL

Nº	Título	Año	Idioma	Estrategias identificadas	Acceso
1	Estudio de caso para el aprovechamiento de relaves mineros procedentes de la concesión Campanillas, Zamora Chinchipe-Ecuador, como agregado para la elaboración de adoquines.	2022	Español	Adoquines.	https://geolatitud.geoenergia.gob.ec/ojs/ojs/index.php/GeoLatitud/article/view/114/101
2	Reuso de Relaves Minerales como Insumo para la Elaboración de Agregados de Construcción para Fabricar Ladrillos y Baldosas.	2010	Español	Ladrillos y agregados de construcción.	Redalyc.Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas

3	Valorización de Residuos Mineros como Áridos para la Construcción de Carreteras: Economía Circular en la Región Andina del Perú.	2024	Español	Materiales para la construcción.	Vista de Valorización de Residuos Mineros como Áridos para la Construcción de Carreteras: Economía Circular en la Región Andina del Perú Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research
4	Caracterización y sugerencias de reutilización del lodo generado a partir del tratamiento de drenaje ácido de mina sintético utilizando ferrato de sodio (VI).	2020	Inglés	Reutilización como adsorbente de nitrógeno.	https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440(20)32087-9.pdf
5	Estrategias de gestión y valorización de lodos residuales del tratamiento activo de drenaje ácido de minas extremadamente contaminadas con metales: una contribución a la minería sostenible.	2016	Inglés	Reutilización como una fuente de metales.	Management strategies and valorization for waste sludge from active treatment of extremely metal-polluted acid mine drainage: A contribution for sustainable mining - ScienceDirect

6	Una revisión de las estrategias recientes para la prevención del drenaje ácido de minas y el reciclaje de relaves mineros.	2018	Inglés	Materiales de construcción.	de A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling - ScienceDirect
7	Reciclaje y reutilización de lodos en el tratamiento de drenaje ácido de minas	2000	Inglés	Reciclaje de lodos en el proceso de tratamiento de DAM.	Sludge Recycle and Reuse in Acid Mine Drainage Treatment on JSTOR
8	Evaluación de la sostenibilidad de la recuperación y utilización del ácido del drenaje ácido de minas	2016	Inglés	Recuperación del ácido sulfúrico del DAM.	Sustainability assessment of the recovery and utilisation of acid from acid mine drainage - ScienceDirect
9	Reciclaje y reutilización de lodos en el tratamiento de drenaje ácido de minas	2017	Inglés	Recuperación de oxihidróxidos de hierro (ocre).	de Recovery and reuse of sludge from active and passive treatment of mine drainage-impacted waters: a review Environmental Science and Pollution Research
10	Uso de lodos de tratamiento de drenaje ácido de minas en combinación con un suelo natural como	2016	Inglés	Barrera de oxígeno.	Use of acid mine drainage treatment sludge by combination

	cubierta de barrera de oxígeno para la recuperación de desechos mineros: pruebas de columna de laboratorio y pruebas de campo a escala intermedia				with a natural soil as an oxygen barrier cover for mine waste reclamation: Laboratory column tests and intermediate scale field tests - ScienceDirect
11	Transformación verde de residuos mineros: efectos sinérgicos de los lodos de drenaje de minas de carbón y los subproductos industriales en la producción de geopolímeros de alto rendimiento y beneficios ambientales	2025	Inglés	Mejora la estructura del geopolímero.	Green transformation of mining waste: Synergistic effects of coal mine drainage sludge and industrial by-products in high-performance geopolymer production and environmental benefits - ScienceDirect
12	Enfoque innovador para el aprovechamiento de residuos industriales para la remediación del drenaje ácido de minas y la reutilización de material gastado: un enfoque de economía circular rentable	2025	Inglés	Uso de subproductos industriales.	Innovative approach to industrial waste utilization for acid mine drainage remediation and Spent material reuse: A cost-effective circular economy approach - ScienceDirect

13	Evaluación del ciclo de vida de las prácticas de gestión/valorización de lodos metálicos del tratamiento del drenaje ácido de minas	2023	Inglés	Recuperación de metales.	de Life cycle assessment of management/valorisation practices for metal-sludge from treatment of acid mine drainage - ScienceDirect
----	---	------	--------	--------------------------	---

Nota. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B . EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD QUÍMICA DE LOS LODOS DE LA ESTRATEGIA AMSAC

Muestra	% S	Muestra	% S
Lodo seco Pucará	0.01	Lodo seco Azalia	0.01

Nota. Tabla adaptada de Reporte N°1: Análisis y caracterización de lodos provenientes del tratamiento de aguas del túnel Pucará y bocaminas de Azalia -1261–Nivel PAC:1261, por Activos Mineros S.A.C., 2016, Lima, Perú.

ANEXO C. PRUEBAS DE MATERIALES DE LA ESTRATEGIA DE AMSAC

Prueba	% Reaprovechamiento	% Materiales	% Cemento
Lodo Pucará	30 %	58 % arena fina/ gruesa	12 %
Lodo Azalia	30 %	58 % arena fina/ gruesa	12 %

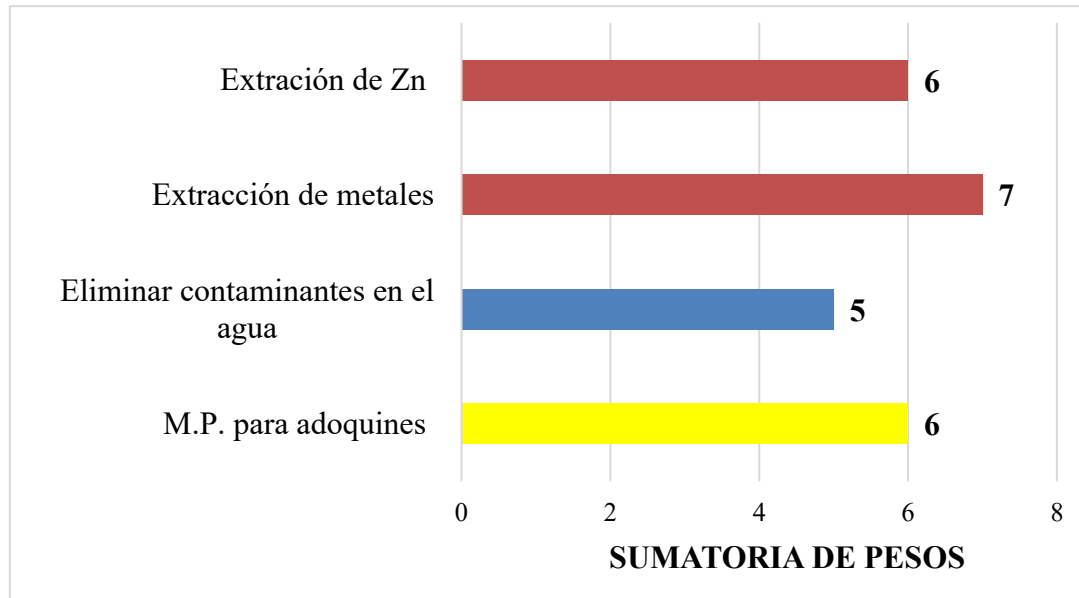
Nota. Tabla adaptada de Ensayo de materiales: Pruebas de ladrillos tipo LEGO para Activos Mineros S.A.C., por EcoKallpa M&C S.A.C., 2024.

ANEXO D . ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ESTRATEGIA DE AMSAC

Plantas	Composición	Clasificación	Tamaño	Malla
Pucará	Arcilla, limo y coloides (99%) Arena (1%)	Suelos finos	0.075 mm	N°200
Azalia	Arcilla, limo y coloides (99%) Arena (1%)	Suelos finos	0.075 mm	N°200

Nota. Tabla adaptada de Servicios de granulometría y clase textural para proyectos de ladrillos ecológicos de Activos Mineros S.A.C., por F. Caicedo, 2024.

ANEXO E. MEJORES ESTRATEGIAS AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES A NIVEL GLOBAL Y NACIONAL.



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO F . ANÁLISIS DE METALES PESADOS EN LODOS DE LAS PLANTAS DE PUCARÁ Y AZALIA DEL AÑO 2021

Metal Pesado	Concentración Muestra en Azalia (mg/kg)	Concentración Muestra en Pucará (mg/kg)
Hierro (Fe)	148852,90	177277,51
Manganeso (Mn)	4062,35	747,25
Níquel (Ni)	159,39	219,08
Cobalto (Co)	190,00	133,13
Zinc (Zn)	0,04	168,07
Cromo (Cr)	0,58	45,41
Cadmio (Cd)	27.61	19,89
Cobre (Cu)	48.78	7,13
Plomo (Pb)	10.03	1,49

Nota. Tabla adaptada de *Informes de ensayo IE-21-14541 e IE-21-14740: Análisis de metales pesados en lodos de las plantas de tratamiento Pucará y Azalia*. Lima, Perú. Datos obtenidos bajo el Convenio Específico de Cooperación Institucional suscrito entre Activos Mineros S.A.C. y la Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH)(2021).