



EDITORIAL
NAVEGANTE



REVISIÓN DOCUMENTAL SOBRE LA **CARACTERIZACIÓN** **MINERALÓGICA** DE RELAVES POLIMETÁLICOS Y SU POTENCIAL DE **RECUPERACIÓN** **DE METALES**

Osmer Ignacio Blanco Campos

Teofanes Salas Orihuela

Elvis Jesus Paredes Lopez

Eduardo Jesús Mayorca Baldoceda



Osmer Ignacio Blanco Campos

Correo: oblancoc@undac.edu.pe

Perfil: Doctor en Ciencias de la Educación, Maestro en Planificación y Proyectos de Desarrollo, Ingeniero Metalurgista.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9000-6409>

Afiliación: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

Teofanes Salas Orihuela

Correo: tsalaso@undac.edu.pe

Perfil: Maestro en Gestión Ambiental, Ingeniero Metalurgista.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3182-7489>

Afiliación: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

Elvis Jesus Paredes Lopez

Correo: eparedesl@undac.edu.pe

Perfil: Maestro en Docencia en el Nivel Superior, Ingeniero de Minas, Ingeniero de Sistemas y Computación.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1777-5235>

Afiliación: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

Eduardo Jesús Mayorca Baldoceda

Correo: emayorca@undac.edu.pe

Perfil: Doctor en Ciencias de la Educación, Maestro en Planificación y Proyectos de Desarrollo, Ingeniero Metalurgista.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6427-1078>

Afiliación: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

REVISIÓN DOCUMENTAL SOBRE LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE RELAVES POLIMETÁLICOS Y SU POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE METALES

Osmer Ignacio Blanco Campos

Teofanes Salas Orihuela

Elvis Jesus Paredes Lopez

Eduardo Jesús Mayorca Baldoceda



EDITORIAL
NAVEGANTE

Todas nuestras publicaciones son sometidas a revisión doble-ciego de pares externos (*Peer Review Double Blinded*).

Esta publicación cuenta con licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada 3.0 Unported License.



ISBN: 978-628-7736-83-2

© Osmer Ignacio Blanco Campos

© Teofanes Salas Orihuela

© Elvis Jesus Paredes Lopez

© Eduardo Jesús Mayorca Baldoceda

2026

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19472475>

©Editorial Navegante

www.editorialnavegante.com

Queda prohibida la reproducción bajo cualquier modalidad de toda o una parte de esta obra sin autorización expresa del titular de los derechos.

Diseño de carátula y composición: Editorial Navegante

Edición electrónica: Editorial Navegante

Editado en Colombia/ *Published in Colombia*

REVISIÓN DOCUMENTAL SOBRE LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE RELAVES POLIMETÁLICOS Y SU POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE METALES

Osmer Ignacio Blanco Campos

Teofanes Salas Orihuela

Elvis Jesus Paredes Lopez

Eduardo Jesús Mayorca Baldoceda



EDITORIAL
NAVEGANTE

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	9
INTRODUCCIÓN.....	11

CAPÍTULO I

CONTEXTO DE LOS RELAVES POLIMETÁLICOS EN EL ESCENARIO MINERO PERUANO	13
1.1. Panorama Actual de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) En El Perú.....	14
1.2. Clasificación y Génesis de los Relaves Polimetálicos	19
1.3. Marco Normativo y Ambiental.....	22
1.4. Desafíos de la Estabilidad Física y Química	25

CAPÍTULO II

METODOLOGÍAS DE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA AVANZADA	31
2.1. Muestreo Representativo en Depósitos de Relaves	32
2.2. Técnicas Instrumentales de Análisis	36
2.2.1 Difracción de Rayos X (DRX) para la Identificación de Fases Cristalinas.....	37
2.2.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM/EDX) y Mineralogía Automatizada (QEMSCAN/MLA)	39
2.2.3 Fluorescencia de Rayos X (FRX) para Determinación Elemental	41
2.3. Análisis de la Liberación Mineral.....	42
2.4. Geoquímica Ambiental	46

CAPÍTULO III

POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE METALES Y VALORIZACIÓN DE RELAVES	51
3.1. Evaluación del "Remining" en el Perú.....	52
3.2. Tecnologías de Retratamiento	54
3.2.1. Flotación Selectiva de Sulfuros Remanentes.....	54
3.2.2. Lixiviación (Cianuración, Lixiviación Ácida y Bacteriana) .	55
3.2.3. Separación Magnética y Gravimétrica de Alta Intensidad. ..	57
3.3. Recuperación de Metales Críticos y Estratégicos.....	58

3.4. Economía Circular	60
------------------------------	----

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE CASOS DE ESTUDIO Y PERSPECTIVAS FUTURAS.	63
--	----

4.1. Revisión de Proyectos Emblemáticos de Reaprovechamiento en los Andes Centrales.....	64
--	----

4.2. Análisis Costo-Beneficio de la Recuperación Metalúrgica frente al Cierre de Minas.....	72
---	----

4.3. Impacto Socio-Ambiental	79
------------------------------------	----

4.4. Conclusiones y Hoja de Ruta para la Investigación Científica en la Minería Peruana al 2030	84
---	----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
----------------------------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de Variables.....	17
Tabla 2 Datos corporales: edad de las cobayas.....	78

INTRODUCCIÓN

En Perú el reaprovechamiento de relaves ha dejado de ser una quimera de la ingeniería minera para convertirse en el epicentro de una metamorfosis metalúrgica necesaria, aunque tardía, considerando que el país históricamente ha gestionado sus desechos mineros bajo una lógica de confinamiento y olvido, acumulando miles de depósitos que, hasta hace poco, se consideraban únicamente pasivos ambientales de alto riesgo geotécnico y químico; sin embargo, la investigación contemporánea, impulsada por la escasez de nuevos yacimientos y la demanda de metales críticos, está redefiniendo estos depósitos como “yacimientos secundarios” que toman nueva vida al integrar la economía circular como eje estratégico, apoyando el curso de la minería actual que busca romper el ciclo lineal de remediación activa, al procesar el relave y neutralizar su potencial contaminante, transformando un legado de degradación en un motor de reactivación económica y ambiental.

Sin embargo, a pesar de este optimismo, el futuro de la minería se enfrenta a una encrucijada crítica que exige una honestidad rigurosa al declarar que la viabilidad del reaprovechamiento no depende nada más de la metalurgia de precisión, sino de un cambio de paradigma en la gobernanza y la licencia social, no bastando con presentar la economía circular como la filosofía única de la sostenibilidad. La investigación aquí desarrollada, propone entonces que el tratamiento de relaves debe ser el estándar operativo de la minería moderna, donde el éxito no resulte medido por las toneladas extraídas, sino que tenga por eje calificador la capacidad de generar capital natural, siendo que, solo a través de un análisis crítico de los fracasos del modelo anterior y la implementación de sistema de monitoreo en tiempo real, podrá la minería peruana asegurar que el aprovechamiento de sus

pasivos sea, de hecho, el primer paso hacia una industria que devuelva al territorio su equilibrio sistémico.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I: CONTEXTO DE LOS RELAVES POLIMETÁLICOS EN EL ESCENARIO MINERO PERUANO

El residuo sólido de granulometría fina generado por el procesamiento metalúrgico de minerales complejos recibe la denominación de Relave Polimetálico, cuyo origen se determina al ser el remanente de la ganga tras haber extraído los sulfuros valiosos de cobre, plomo y zinc, con una composición que reúne una fase sólida mineral y a una fase líquida con trazas de reactivos químicos (Peña et al., 2021). Al concebirse la complejidad química derivada de la coexistencia de múltiples metales, se exige una gestión física y química rigurosa, con el pretendido de prevenir la liberación de elementos traza al entorno, pues la estabilidad de estos depósitos depende directamente de sus propiedades reológicas y del control de la humedad, siendo estos factores críticos para evitar fallas estructurales o fenómenos de licuación que comprometan la seguridad operativa.

Dentro del ámbito minero peruano, la formación de relaves se encuentra intrínsecamente ligada a la geología de la Cordillera de los Andes, por ser rica en depósitos de tipo skarn y epitermales de alta y baja sulfuración, lo

que forja un alto potencial de generación de drenaje ácido de roca (DAR) si la presencia de minerales reactivos no es confinada de manera adecuada. Aquí la interacción de tales residuos con las condiciones hidroclimáticas de las zonas altoandinas, definida por grandes precipitaciones y variabilidad térmica, acelera los procesos de oxidación y lixiviación, lo desvaía la atención de la ingeniería local para situarse sobre la caracterización geoquímica predictiva, donde utilizan pruebas estáticas y dinámicas para lograr determinar la capacidad de neutralización de los residuos antes de su disposición final en las presas respectivas.

1.1. Panorama Actual de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) En El Perú

El estudio realizado por Anida Yupari (2003) explica que la noción de Pasivos Ambientales (PAM) en el marco minero alude a las secuelas dañinas producidas por actividades extractivas descuidadas con o sin responsables ubicables, en las cuales no se ejecutó un plan de cese de labores normado y avalado por el organismo competente en la materia, abarcando inclusive, las consecuencias que derivan de desechos sólidos, fluidos y volátiles, siempre que se hubieren originado durante las distintas etapas del ciclo productivo minero, y que permanezcan acumulados en depósitos de desmonte, careciendo de un control ecológico adecuado.

Esta misma línea de concepción es asumida por el Estado peruano bajo la Ley Nro. 28271, conocido como el estatuto que regula los Pasivos Ambientales de la labor extractiva, donde la definición adjunta abarca aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuo resultantes de faenas mineras que se encuentran desentendidas o paralizadas, capaces de representar un peligro constante para el bienestar ciudadano, el entorno biológico cercano y los bienes que allí se instalen.

Además, el inciso 4.8 del Decreto Supremo Nro. 059-2005-EM puntualiza que el riesgo es esa factibilidad o contingencia de que un agente tóxico logre provocar daños perjudiciales a la integridad humana, a los seres que conforman los biomas o a la propia condición de tierras e hidrografía, basándose en las propiedades y en el volumen que interactúa con los elementos expuestos (Rosales, 2024).

Entonces, la deuda ecológica minera se vincula con yacimientos o labores desentendidas que son capaces de producir un perjuicio adverso a la integridad de las personas y al entorno natural, representando una amenaza latente y crítica que requiere de una intervención inmediata, donde existe una clara necesidad de categorizar el nivel de riesgo o el peligro potencial que genera cada pasivo.

Esto último se logra a través de la implementación de inventarios, que no son más que registros oficiales que identifican, ubican y caracterizan las instalaciones, residuos, efluentes o emisiones generadas por operaciones mineras abandonadas o paralizadas, cuya herramienta en el Perú está a cargo del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), siendo este el ente que anualmente promulga el Inventario de Pasivos Ambientales Mineros a través de resoluciones ministeriales que detallan la ubicación y el peligro de cada hallazgo, permitiendo categorizar los pasivos según su nivel de riesgo: muy alto; alto; moderado o bajo, para posteriormente gestionar su debida atención y/o remediación, de acuerdo al riesgo que estos representen (Rosales, 2024), priorizando aquellos que impactan directamente en las cuencas hidrográficas.

En vista de ello, el proceso de registro incluye la verificación en campo, la georreferenciación y la evaluación técnica de la estabilidad física y/o química de los residuos encontrados, donde si bien la distribución geográfica de los PAM en suelo peruano es heterogénea, es evidente la alta

concentración que existe de los mismos en las regiones de la Sierra Central y el Norte, donde la actividad minera ha sido históricamente más intensa. Esta concentración se debe a la presencia de la Franja Metalogenética de los Andes, debido a que allí se asentaron los depósitos de pórfidos de cobre, oro y sistemas de reemplazamiento de plata y plomo, lo que hace que regiones como Pasco, Junín, Lima, Áncash y Cajamarca desde la época colonial hayan sido sometidas a explotaciones superficiales y subterráneas ante una geología que facilitó el afloramiento de minerales de alta ley.

Por tanto, al ser zonas con una mineralización tan densa, los puntos de extracción independientes se multiplicaron, lo que hizo que cada uno de los centros generara sus propios residuos que, tras el agotamiento del mineral o ante una crisis económica, fueron abandonados sin planes de cierre, acumulándose por décadas en las cabeceras de cuenca (Zegarra et al., 2022). El panorama de los PAM en las regiones de la Sierra Central y el Norte reúne los siguientes datos históricos:

Tabla 1. Pasivos Ambientales por Regiones

REGIONES	2006	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2019	2020	2021	2022
PASCO	40	391	429	429	429	454	454	575	545	546	525	530	379
JUNÍN	51	378	395	502	550	637	637	715	687	666	669	608	607
LIMA	60	203	293	528	530	613	613	693	703	680	652	636	629
ÁNCASH	133	804	1115	1202	1199	1200	1251	1284	1378	1362	1235	1221	1161
CAJAMARCA	20	976	1019	1022	1022	1050	1075	1183	1156	1156	1156	1156	917
TOTAL	304	2752	3251	3683	3730	3954	4030	4450	4469	4419	4237	4151	3693

Nota. Elaboración Propia. Adaptado de Anuario Minero 2022 del Ministerio de Energía y Minas (2023), p.37.

El cuadro adjunto exhibe la evolución del número de pasivos ambientales (entiéndase minas abandonadas, relaves, botaderos, entre otros) identificados por el MINEM entre los años 2006 y 2022, de donde se infiere: (1) Una tendencia general hacia un incremento explosivo entre el período de 2006 y 2018, lo que no debe entenderse como un aumento en la contaminación, sino que, por el contrario, fue el Estado peruano el que mejoró sus concesos e inventarios para identificar lo que se encontrada abandonado desde hace décadas y; (2) Un punto de quiebre a partir del año 2018, donde la cifra comienza a estancarse, para luego bajar ligeramente de 4.469 a 3.663, lo cual refleja el inicio de los planes de cierre y remediación ejecutado por las empresas estatales, por ejemplo, Activos Mineros S.A.C. Igualmente, por región se destacan diversas puntualidades:

1. Áncash se mantiene como la región con mayor carga de pasivos mineros en el territorio patrio, siendo el sustento de la crisis la presencia de PAM de “alto riesgo”, lo que obliga al estado a intervenir de oficio debido a que los responsables originales legalmente no existen. A su vez, la problemática actual recae en el Drenaje de Ácido de Roca (DAR), que ocurre cuando los metales relaves entran en contacto con el agua de lluvia, acidificándola y liberando metales pesados; ante este escenario, la inversión pública se ha enfocado en proyectos como la remediación de la ex unidad minera Pasto Bueno, donde se busca proteger la actividad agrícola de la zona baja (MINEM, 2024).
2. Cajamarca presenta una tendencia a la baja, por ser la región donde el modelo de cierre progresivo ha funcionado con mayor éxito. La empresa estatal Activos Mineros S.A.C ha reportado avances significativos, a partir de la remediación de cientos de bocaminas y depósitos de desmontes; aquí el sustento técnico es la recuperación de suelos, para lo cual se está implementando tecnología de coberturas multicapa para lograr evitar la infiltración de agua, permitiendo que la vegetación crezca nuevamente (AMSAC, 2024).

3. Lima por su parte una criticidad extrema ante la cercanía que mantiene con la cuenca del río Rímac, donde los pasivos en zonas como Casapalca y San Mateo continúan siendo una amenaza latente frente a fenómenos climáticos como El Niño. Actualmente, su fortaleza legal recae en el Plan Maestro de Optimización de SEDAPAL que exige la remediación inmediata de PAM aguas arriba para reducir los costos de tratamiento del agua potable (OEFA, 2024).
4. Junín enfrenta la contaminación del Lago Junín (Chinchaycocha), donde si bien el número de pasivos no aumenta, la dispersión de los sedimentos antiguos sigue afectando la fauna silvestre. La inversión que se utiliza recae en el Proyecto Delta Upamayo, que reúne una obra de ingeniería hidráulica para confinar los sedimentos contaminados y así evitar que se sigan esparciendo (INGEMMET, 2023).
5. Por último, Pasco se enfoca en la remediación de suelos urbanos contaminados por plomo, cuyo conteo según autoridades puede llegar a ser cualitativamente más grave que en otras regiones, pues el contacto humano es directo, razón por la cual se están implementando planes de reasentamiento y pavimentación especial para sellar el polvo contaminado en las calles.

1.2. Clasificación y Génesis de los Relaves Polimetálicos

Como se mencionó, la formación de los relaves polimetálicos comienza con la extracción de minerales complejos que contienen diversos metales de valor industrial, los cuales se someten a procesos de molienda extrema para reducir su tamaño y liberar las partículas de la roca sin valor, conocida como ganga, donde posteriormente se agregan los reactivos químicos que permiten separar los concentrados metálicos, dejando como residuo una pulpa compuesta por agua y sólidos triturados. Bustamante (2021) expresa que el material resultante constituye el relave, el cual conserva una firma mineralógica heredada del yacimiento

original, pero con una estructura física alterada que, al ser transportado y depositado en presas o tanques, inician una nueva etapa de interacción con el entorno que determina su comportamiento ambiental, llegando a experimentar una transformación dinámica influenciada por factores climáticos del entorno.

Durante el proceso, los minerales primarios persiguen otro equilibrio químico, dando lugar a la formación de otros secundarios capaces de atrapar o liberar elementos metálicos, pues el origen de tales depósitos se centra en la transición continua que atraviesa desde un estado sólido controlado por la ingeniería, hasta desembocar en un sistema geoquímico activo.

En el Perú la clasificación de relaves se realiza principalmente bajo dos enfoques: (1) por su comportamiento geoquímico se categorizan según su potencial de Drenaje Ácido de Mina (DAM), pudiendo ser generados o no de ácido, es decir, si el residuo contiene altas proporciones de pirita o pirrotita se categoriza como un material con alto riesgo de generar ácido al entrar en contacto con el aire y el agua, lo que requiere estrategias de encapsulamiento o tratamiento químico inmediato para neutralizar su pH y; (2) por su estado físico, pues dependiendo de la tecnología de disposición, se clasifican en relaves convencionales (de alta fluidez), espesados, en pasta o filtrados, siendo una determinación necesaria en la geografía andina para garantizar la estabilidad de los depósitos ante la sismicidad y las lluvias intensas (MINAM, 2021).

Sin embargo, la categorización de un relave no comienza en la planta de procesos, sino en el tipo de depósito de donde se extrajo el material, ya que esto es lo que determina la mineralogía de la ganga (el material sin valor que se descarta) y su reactividad química, por lo que, los verdaderos protagonistas de la minería polimetálica son los depósitos, entre los cuales destacan:

1. Depósitos tipo Skarn. La relación que mantiene con los relaves polimetálicos es predominantemente de mitigación natural, porque la formación de dichos yacimientos se debe al reemplazamiento de rocas carbonadas, lo que hace que el material de desecho resultante contenga una abundancia de minerales como la calcita y la dolomita. Estos componentes actúan como agentes neutralizantes dentro de la presa de relaves, lo que permite clasificar los residuos como No Generadores de Ácido (NAG), facilitando una gestión ambiental menos agresiva al mismo tiempo que, reduce el riesgo de lixiviación de metales base como el cobre y el zinc.
2. Depósitos Cordilleranos. Presentan un vínculo crítico con la estabilidad química, debido a que su génesis implica una mineralogía compleja rica en sulfuros masivos y metales pesados, por ejemplo, el plomo y el arsénico, que al ser procesados, producen relaves con un alto Potencial de Generación de Ácido (PAG), lo que obliga a clasificarlos como residuos de alta peligrosidad que requieren sistemas de impermeabilización como geomembranas y controles de efluentes estrictos para evitar la degradación de las cuencas hidrográficas andinas.
3. Depósitos Epitermales. Establecen una interacción de alta reactividad con el entorno debido a su alteración hidrotermal previa, que suele dejar una ganga silíceo o arcillosa con nula capacidad de neutralización. Es importante destacar que, en los sistemas de alta sulfuración, los relaves resultantes son extremadamente propensos a la oxidación rápida, lo que acelera la movilidad de elementos tóxicos si no se mantiene un control adecuado del ingreso de oxígeno y agua, siendo esto lo que determina el diseño de ingeniería de la presa, dictando si el relave debe ser almacenado bajo una cobertura húmeda para prevenir la oxidación o si, por el contrario, debe recibir tratamiento de adición de cal (Silliteo, 2010).

1.3. Marco Normativo y Ambiental

El sistema regulatorio peruano para relaves mineros se fundamenta en el Reglamento de Protección y Gestión Ambiental (8 de junio, 2021) aplicado sobre las actividades de dicha índole minera, actualizado mediante el Decreto Supremo N. 040-2014-EM y sus recientes modificaciones, como es el caso del Decreto Supremo N. 005-2020-EM; normativa que, en conjunto, establece que los titulares de este nivel son legalmente responsables de asegurar que el almacenamiento de residuos polimetálicos no genere afecciones en la salud humana, ni tampoco alteraciones en el equilibrio del ecosistema circundante durante la etapa del proyecto. Para ello, antes de iniciar cualquier labor de disposición, se exige la aprobación de un Instrumento de Gestión Ambiental (IGA) y del Estudio de Impacto Ambiental detallado (EIA-d), cuya documentación debe contemplar rigurosamente el diseño de ingeniería, la ubicación estratégica del depósito y por supuesto, las medidas de mitigación para el caso de riesgos físicos y químicos inherentes (Aguedo, 2025).

El reglamento señalado consagra la obligación del titular minero de presentar un Plan de Cierre de Minas (Ley N.28090) que garantice la estabilidad física y química del depósito tras el cese de operaciones, así como la constitución de garantías financieras que cubran los costos de remediación, evitando que el Estado asuma la carga económica de posibles pasivos a futuro. A su vez, introduce auditorías ambientales direccionadas a verificar si la construcción del depósito se ciñe estrictamente a lo aprobado en el IGA original, siendo un enfoque preventivo que procura minimizar la generación de Drenaje Ácido de Roca, como problema común en relaves polimetálicos debido a la oxidación de sulfuros.

Un avance crítico en la legislación es la Ley N. 3121 del 8 de junio de 2021, cuyo marco de regulación recae específicamente, en el transporte y la disposición final de relaves para empresas minero-metalúrgicas en territorio nacional, siendo una ley que consagra un imperativo sobre las operadoras respecto a la implementación de sistemas de conducción

dentro de un esquema de protección física acorde, en aras de evitar que el material entre en contacto con el suelo o se infiltre en el subsuelo; en otras palabras, la norma busca garantizar que el flujo de desechos polimetálicos sea estanco y no genere PAM por derrames accidentales. Además, su contenido exige la actualización semestral de planes de contingencia para el sistema de transporte, los cuales son supervisados por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), pues de lo contrario, el incumplimiento de estas adecuaciones técnicas conlleva sanciones severas.

Así, bajo esta ley, las empresas han tenido que migrar hacia tecnologías de transporte más seguras, como lo es el uso de tuberías de alta densidad con sensores de detección de fugas, toda vez que, se persigue el aseguramiento de estaciones de control y pozas de emergencia en cada tramo del relaveoducto, capaces de contener el volumen total en tránsito ante una rotura inesperada. Dicho control logístico es indispensable en la geografía peruana, donde las pendientes pronunciadas aumentan el riesgo de erosión y contaminación de cuencas hidrográficas, posicionándose la Ley 31211 como el estándar técnico para la integridad del transporte de lodos mineros.

Por otra parte, en el ámbito técnico-ambiental la gestión se rige por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y suelo, junto con los Límites Máximos Permisibles (LMP) actualizados al 2025-2026, presentándose como parámetros que definen los niveles de sustancia como el arsénico, plomo cadmio y zinc, los cuales pueden estar presentes en el entorno sin representar un riesgo obligando a las empresas a tratar las aguas de contacto antes de su vertido. Aunado a ello, la promulgación del Decreto Supremo N. 006-2025 ha reforzado las garantías financieras, exigiendo que los titulares no sólo cubran la estabilidad geotécnica de las presas, sino también la operación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y el monitoreo de acuíferos por décadas, procurando asegurar que la sostenibilidad del cierre de los depósitos y la neutralización efectiva de la carga contaminante presente en metales pesados (MINEM).

Igualmente, la supervisión y fiscalización de tales normas cobra cabida en el marco de su respectivo cumplimiento, las cuales recae en una estructura institucional tripartita conformada por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), el Ministerio del Ambiente (MINAM) y el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), pues mientras el MINEM dicta las políticas y aprueba los proyectos, es el OEFA quien posee la potestad de realizar auditorías de campo, instalar sensores de monitoreo en tiempo real y sancionar infracciones administrativas relacionadas con el manejo de lodos.

Finalmente, el marco normativo aborda también la remediación de Pasivos Ambientales Mineros (PAM) a través de la Ley. 28271 promulgada el 6 de junio de 2004, la cual regula la identificación y cierre de depósitos de relaves abandonados, permitiendo que nuevos titulares mineros reutilicen o reaprovechen tales pasivos polimetálicos siempre que implementen medidas de manejo ambiental y asuman la responsabilidad de su estabilidad definitiva, para así fomentar la economía circular en el sector, transformando residuos antiguos en fuentes de minerales mediante nuevas tecnologías de procesamiento que son más limpias y eficientes, asegurando que el riesgo ambiental sea mitigado progresivamente a nivel nacional (Aguedo, 2025).

Esta ley es complementada a través de reglamentos que priorizan la remediación de aquellos depósitos situados cerca de cabeceras de cuenca o centros poblados, tratándose de un proceso que incluye la encapsulación de relaves antiguos para evitar la dispersión de polvos metálicos por acción del viento y la lixiviación de metales por lluvias. Persiguiendo objetivos, el inventario de pasivos es actualizado anualmente por la Dirección General de Minería, permitiendo una planificación estratégica de las inversiones estatales para la recuperación de suelos degradados.

1.4. Desafíos de la Estabilidad Física y Química

La naturaleza heterogénea y potencialmente reactiva de los componentes que integran los relaves polimetálicos representa un desafío constante en la gestión que se emprende de los mismos en la industria extractiva contemporánea, toda vez que, estos residuos derivados de procesos de flotación y concentración requieren un confinamiento que garantice la seguridad pública y la preservación ambiental mediante de una dualidad operativa principal: (1) la integridad mecánica, enfocada en la contención física de grandes volúmenes de material para evitar desplazamientos o colapsos y; (2) la resiliencia geoquímica, que busca neutralizar las interacciones moleculares que generan lixiviados tóxicos. Por lo tanto, un análisis exhaustivo de la estabilidad debe integrar variables hidrogeológicas, sísmicas y mineralógicas para predecir el comportamiento del depósito durante su etapa operativa y claro está, en su posterior cierre definitivo.

1. Estabilidad Física

Es entendida como la capacidad del depósito para mantener su integridad estructural ante fuerzas estáticas y dinámicas, evitando desplazamientos masivos o fallas catastróficas; su configuración depende estrictamente de la técnica de disposición seleccionada, sea mediante presas de retención (por ejemplo, métodos de agua arriba, aguas abajo o eje central) o por el uso de relaves filtrados de alta densidad, procurando alcanzar un sistema con un funcionamiento óptimo basado en el control riguroso de la presión de poros y la saturación del material siendo estos factores que determinan la resistencia al corte.

Vick (1990) manifiesta que el éxito operativo de esta configuración reside en la gestión eficiente del balance hídrico y la consolidación del material depositado, debido a que el funcionamiento se apoya en sistemas de drenaje interno y chimeneas de evacuación que permiten disipar la presión hidrostática, componente o elemento principal que

suele desencadenar fenómenos de licuación estática. Así, en los relaves polimetálicos la interacción entre las partículas finas y los procesos de sedimentación exige una geometría del dique capaz de soportar la carga litostática sin causar deformaciones plásticas excesivas, pues la estabilidad física no solo busca evitar el colapso del muro, sino también pretende mitigar el riesgo de erosión interna garantizando que la estructura permanezca resiliente durante la vida útil de la mina y en su etapa de post-cierre definitivo.

2. Estabilidad Química

Egboka y Okoyeh (2022) la definen como la capacidad que tienen los residuos mineros para mantener sus componentes minerales en un estado sólido e inerte, evitando la liberación de metales pesados o de drenaje ácido al entorno; su configuración físico-química es compleja, debido a que los lodos contienen una mezcla de sulfuros, silicatos y carbonatos cuya reactividad depende directamente del potencial de hidrógeno (pH) y del potencial de oxidación-reducción (Eh).

Por su parte, el funcionamiento de este equilibrio se centra en el control de la cinética de oxidación, dado que, si el oxígeno y el agua permean la estructura del relave se desencadenan reacciones biogeoquímicas que disuelven los metales, razón por la cual, la estructura técnica procura maximizar la presencia de minerales neutralizantes o, en su defecto, aplicando barreas geoquímicas que inhiban la hidrólisis de los sulfuros, garantizando que los elementos tóxicos permanezcan inmovilizados dentro de la matriz mineral del depósito de manera permanente.

Para lograr que la estabilidad sea óptima, se emplean estrategias de configuración avanzada como la codisposición de residuos o el recubrimiento con coberturas secas y húmedas, siendo sistemas que actúan como una barrera de flujo que limita el transporte de reactivos químicos hacia el interior de la masa de relaves, manteniendo condiciones de anoxia que previenen la formación de ácido sulfúrico. En relaves

polimetálicos la heterogeneidad de metales exige que la estabilidad química más allá de depender de la neutralización ácida, requiere de fenómenos de absorción y precipitación secundaria, donde ciertos minerales actúan como esponjas atrapando iones metálicos en solución, lo que se realiza para alcanzar un equilibrio termodinámico entre las fases sólidas y líquidas de las interacciones producidas, minimizando la lixiviación de contaminantes y asegurando que el depósito sea ambientalmente seguro frente a fluctuaciones climáticas o variaciones en la capa freática (Egboka y Okoyeh, 2022)

En el Perú, esta noción se interpreta como un equilibrio precario entre la imponente geografía andina y la rigurosa ingeniería de contención necesaria para combatir riesgos catastróficos, pues al ser un país marcado por una sismicidad severa y una hidrología vertical extrema, la integridad física de los depósitos trasciende el simple cálculo de factores de seguridad para convertirse en un compromiso de resiliencia territorial, donde la transición hacia el uso de relaves filtrados y espesados no sólo se entienda como una mejora técnica, sino como una respuesta adaptativa a la escasez hídrica y a la mera necesidad de reducir la energía potencial de las masas depositadas en valles estrechos.

A su vez, desde una perspectiva geoquímica, la estabilidad en el contexto polimetálico nacional se exterioriza como una lucha contra la reactividad natural de los sulfuros ante la exposición de oxígeno y agua, donde la complejidad mineralógica de los yacimientos peruanos, que a menudo contiene metales pesados y metaloides, convierte a cada depósito en un reactor potencial de drenaje de ácido si no se interviene de manera proactiva, produciendo una evolución desde el simple cumplimiento de límites máximos permisibles hacia una estrategia de encapsulamiento preventivo y de control respecto a la cinética de oxidación a largo plazo, perfilándose como soluciones integrales que buscan la pasivación del residuo una vez concluida la vida útil de la mina.

De este modo, la divergencia de una sismicidad severa, una hidrología altoandina extrema y una mineralogía rica en sulfuros reactivos genera un escenario de alta vulnerabilidad operativa en el Perú, cuyos desafíos son precisos atender para garantizar que la integridad física y química de los depósitos no sólo sean entendidos como un imperativo técnico para prevenir desastres ambientales, sino como una condición estratégica para la viabilidad social y económica de la minería en el territorio nacional. Los desafíos puntuales que están presentes en estas dos dimensiones se resumen en:

- El diseño de estructuras que soporten aceleraciones sísmicas elevadas (PGA) sin sufrir licuación técnica, sobre todo en la costa y sierra peruana, donde se debe garantizar que el relave no pierda su resistencia al corte ante un evento de gran magnitud.
- La gestión de escurrimientos y el fenómeno El Niño, dado que, la orografía andina presenta un riesgo de desbordamiento.
- La consolidación del terreno y el control de la filtración para evitar la erosión interna de la presa (un fenómeno crítico para la estabilidad de taludes).
- El control del DAR, en aras de evitar la oxidación masiva.
- El mantenimiento de un pH neutro o alcalino estable para impedir que los elementos se vuelvan solubles y contaminen las cuencas hidrográficas que abastecen a la agricultura local.

Especial mención merece el comportamiento de las presas de relaves frente a la geodinámica externa peruana, siendo uno de los retos de ingeniería más complejos debido a la interacción directa entre la fragilidad de las estructuras de contención y un entorno natural agresivo (Manrique y Agurto, 2022). En el contexto patrio, la geodinámica externa se manifiesta principalmente mediante fenómenos hidrometeorológicos

extremos, como las precipitaciones intensas vinculadas al Fenómeno de el Niño (anteriormente mencionado), las cuales activan procesos de erosión acelerada, inundaciones y claro está, movimientos en masa.

A momento en que estas fuerzas actúan sobre una presa de relaves polimetálicos, la estabilidad física se ve comprometida por el aumento crítico de la presión de poros dentro del cuerpo de la presa y la saturación de los taludes, lo que puede derivar en fallas de licuación estática o en el desborde de la estructura por excedencia de la capacidad de almacenamiento, a lo que se le une la accidentada topografía andina, que suele facilitar que los eventos como los huaycos o aluviones impacten la infraestructura de soporte, aumentando el riesgo de una ruptura catastrófica que liberaría grandes volúmenes de lodo hacia los valles inferiores.

Por ende, existe la imperiosa necesidad de elaborar un diseño integral que trascienda la resistencia estructural convencional para adaptarse a un entorno de alta energía geológica e hidrológica, pues la estabilidad física y química de dichos depósitos polimetálicos no puede gestionarse de forma aislada, porque los fenómenos precisados actúan catalizadores de fallas mecánicas y reacciones químicas contaminantes simultáneamente.

En consecuencia, la ingeniería de relaves en territorio peruano debe priorizar sistemas de drenaje redundantes y coberturas de clausura resilientes que sean capaces de soportar la erosión y los asentamientos del terreno sin comprometer el confinamiento de los desechos, ya que solo mediante una compresión profunda de los procesos exógenos de la cordillera y el estricto cumplimiento de normativas como la Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros del MINEM, se podrá garantizar el mantenimiento de la integridad de las estructuras a largo plazo, mitigando riesgos de desastres ambientales y sociales en las cuencas hidrográficas del Perú.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍAS DE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA AVANZADA

La mineralógica avanzada se presenta como una disciplina cuyo centro de estudio e investigación recae en la estructura de los sólidos cristalinos desde una perspectiva físico-química que trasciende la simple identificación visual o taxonómica de los ejemplares, desentrañando la íntima relación entre la estructura atómica interna, la composición química y las propiedades macroscópicas de los minerales, para lo cual utiliza herramientas de alta tecnología como la difracción de rayos X, la espectroscopía y la microscopía electrónica de transmisión. A su vez, es una ciencia que permite comprender los fenómenos complejos al operar en la escala de los nanómetros, lo que resulta indispensable para estudiar e interpretar la historia geológica de la tierra a través de las condiciones de presión y temperatura que los minerales registraron en su formación, promoviendo en ese proceso el desarrollo de nuevos materiales tecnológicos con aplicaciones en la industria energética y medioambiental.

Con ello, se desplaza el enfoque descriptivo y morfológico que se limitaba a la catalogación basada en caracteres como el color, brillo, dureza o la forma de los cristales, cuya mayor utilidad recaía en la clasificación taxonómica o en la mera extracción minera (Ministerio de Minas y Energía, 2015), de ahí que cada ejemplar fuese manejado como un objeto estático, para dar lugar a un sistema dinámico y complejo, donde la importancia no sólo desemboca en la identidad del elemento químico presente, sino en la arquitectura exacta de su red cristalina y cómo esta responde a los cambios sutiles de presión, temperatura o radiación.

2.1. Muestreo Representativo en Depósitos de Relaves

Consiste básicamente, en la extracción sistemática de muestras de los residuos mineros almacenados, con el propósito de caracterizar sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas; debido a la segregación granulométrica natural que ocurre durante la descarga del material, tales depósitos presentan una alta heterogeneidad espacial, lo que exige la aplicación de protocolos estandarizados de perforación y recuperación de núcleos. Por tanto, el objetivo principal recae en determinar la estabilidad geotécnica del depósito, evaluar el potencial de generación de Drenaje Ácido de Mina (DAM) y cuantificar la presencia de valores metálicos residuales, para lo cual se emplean técnicas que abarcan desde el muestreo superficial mediante calicatas hasta sondes profundos con equipos sónicos o de rotación, garantizando que el perfil estratigráfico obtenido refleje fielmente la composición del cuerpo del relave.

Ancca (2024) infiere que “la obtención de una muestra implica tomar una porción pequeña de un volumen mayor de material, de modo que al analizar las características de esta muestra se puedan estimar las características del conjunto de manera representativa”, es decir, esta refleja la complejidad de un depósito de residuos mineros, pues a diferencia de una roca sólida, la configuración de los relaves se debe a una mezcla entre lodo y arena que se ha acumulado de forma desigual a lo largo de los años; por tanto, para que la muestra sea útil, deben realizarse perforaciones profundas en

sus puntos estratégicos en aras de captar las capas ocultas, de lo contrario, si el muestreo falla en este paso inicial, cualquier análisis posterior, por avanzado que sea, arrojará resultados distorsionados que no sirven para la futura toma de decisiones ambientales.

En este contexto, el protocolo de muestreo debe preservar la integridad química y física de las fases minerales para su análisis mediante técnicas de alta resolución, donde una vez obtenidas las muestras, se aplican métodos de mineralogía cuantitativa automatizada que permiten mapear texturas, asociaciones minerales y el grado de liberación de especies valiosas, siendo este nivel de detalle el que permite transformar una serie de desechos en una oportunidad de negocio, identificando minerales valiosos que antes simplemente se descartaban.

Toda esta información se organiza para crear un modelo de predicción que permite deducir cómo se comportará el material si se decidiera procesarlo nuevamente; en otras palabras, la integración de tales datos bajo un enfoque de geometalurgia de relaves permite transformar un PAM en un activo estratégico mediante la predicción de la conducta metalúrgica, según Abreu y Naidu (2020). Entonces, el desafío inicia con la comprensión de la naturaleza misma del depósito, el cual se comporta como un cuerpo sedimentario con una heterogeneidad extrema producto de la segregación hidráulica durante su deposición, siendo esta variabilidad la que obliga al diseño de muestreo representativo de asumir la aplicación estricta de la Teoría de Muestreo de Pierre Gy para mitigar el error fundamental.

Al reconocer que las partículas finas y gruesas se distribuyen de forma predecible, pero no compleja, se establece la necesidad imperante de seleccionar técnicas de perforación que no sólo penetren el terreno, sino que además, preserven la estructura original de las capas para un análisis fidedigno (Bustamante, 2017). Bajo esta premisa, la elección de la técnica de perforación mecánica se convierte en el primer eslabón operativo, donde métodos como el CPTu (ensayo de penetración de cono) y el SPT (ensayo de penetración estándar) ofrecen un equilibrio entre la caracterización

geotécnica y la recuperación del material, donde:

- El CPTu permite mapear la estratigrafía y la presión de poros de forma continua sin extraer muestra.
- El SPT facilita la obtención de sedimentos en intervalos específicos, permitiendo correlacionar la resistencia del relave con su composición física.

En conjunto, esta fase de perforación es la que dicta la calidad del dato primario, pues cualquier alteración mecánica o contaminación durante la hincada del “toma muestras” invalidaría los estudios posteriores de estabilidad o toxicidad efectuados. Sin embargo, si se presenta el caso en donde el depósito posea condiciones de saturación crítica o donde requiera un perfil químico ininterrumpido, la propia industria opta por la perforación sónica, al tratarse de una tecnología que utiliza vibraciones con una recuperación cercana al 100%, manteniendo la muestra en un estado casi prístino, así lo expone Pitard (2019). Una vez que este núcleo de relave alcanza la superficie, el proceso se sumerge en una etapa de transición donde la preservación inmediata es la única garantía de que los resultados de laboratorio visualicen la realidad del depósito y no una alteración post-muestreo.

Así, esta preservación exige protocolos rigurosos de sellado y control térmico, especialmente si se pretende cuantificar especies químicas sensibles a la oxidación, como sucede con los sulfuros reactivos presentes en muchos relaves metalíferos; las muestras deben ser encapsuladas en bolsas de alta densidad, evacuando el oxígeno y, en casos particulares, refrigerándolas a temperaturas controladas para detener procesos biogeoquímicos que transformarían la composición mineralógica. Luego, una vez se encuentre en laboratorio, la preparación mecánica modifica el núcleo de perforación en una pulpa analítica mediante ciclos controlados de secado, trituration y pulverización, bajo la premisa de no introducir sesgos por contaminación cruzada.

Conforme a ello, el uso de equipos de cuarteo autonómico es obligatorio para reducir el volumen de la muestra de forma representativa, asegurando que cada gramo enviado al análisis químico sea estadísticamente idéntico al lote recolectado, siendo un rigor que conecta la geología del depósito con la precisión del dato químico, cuyo flujo de trabajo se sostiene sobre un andamiaje de Aseguramiento y Control de Calidad QA/QC) que monitorea cada transición, desde el primer metro perforado hasta el último análisis del laboratorio, pues se procura que la integración coherente entre la técnica de perforación, la preservación cuidadosa y la preparación mecánica estandarizada, es la que permite gestionar a través de la ingeniería moderna los depósitos de relaves con un margen mínimo de error (Bustamante, 2017).

Se destaca, que tanto las técnicas de perforación como los protocolos de preparación son indispensables en una revisión documental, ya que permite la construcción de la trazabilidad y defensa técnica del proyecto propiamente, porque cuando el consultor o auditor analiza los informes de un depósito de relaves, no sólo busca resultados finales de laboratorio, sino que persigue la evidencia de que tales datos se obtuvieron bajo condiciones que minimizan el sesgo; de no ser así, una técnica de perforación mal documentada o un protocolo ambiguo invalidan automáticamente cualquier modelo geológico-geotécnico, pues no existe certeza de que la muestra analizada sea un reflejo fiel de la realidad del depósito.

En síntesis, en una revisión de esta índole, el experto evalúa si la técnica elegida fue la adecuada para el tipo de relave, al mismo tiempo que, se percata si los protocolos de preparación respetaron los tamaños de muestra críticos según la masa del lote, siendo dichos instrumentos el principal soporte frente a la responsabilidad legal y ambiental.

2.2. Técnicas Instrumentales de Análisis

Actualmente, los investigadores del área mineral disponen de una amplia gama de procedimientos analíticos para realizar sus respectivos estudios, cuyas herramientas mantienen su foco hacia determinados puntos de expresa relevancia dentro del diagnóstico mineralógico, por tratarse de estrategias de examen y medición que facilitan el hallazgo de datos fidedignos sobre componentes químicos, del ordenamiento atómico y de los diversos rasgos físicos de cada espécimen; por ejemplo, instrumentos como la microsonda electrónica o el análisis por rayos X e ICP-MS ofrecen alternativas avanzadas para precisar los elementos que constituyen las unidades minerales.

Estas vías conforme a Skoog et al., (2018) permiten calcular y describir con rigor las cualidades cristaloquímicas y el comportamiento de los minerales; las primeras se definen según su constitución química (entiéndase por ella la proporción de componentes, nomenclatura, trazas y origen, reemplazos atómicos, firmas isotópicas, entre otras) junto a su red cristalina (cantidad de moléculas por celda, arquitectura estructural, posición atómica y posibles imperfecciones en la red), al mismo tiempo que, evalúa morfología y organización interna, por ejemplo, las bandas de crecimiento o los cambios geológicos. Dentro de las facultades minerales destinadas a un examen minucioso, destacan por su relevancia:

- Las químicas: capacidad de disolución, reactividad, fenómenos galvánicos.
- De gravedad: masa específica, peso por volumen, espacios vacíos.
- De calor: nexos termo-magnéticos, transmisión térmica, alteraciones por temperatura.
- De otras índoles: emisión de partículas, reacción a rayos X, ondas de luz coherente o láser, entre otras.

De manera pues, tales técnicas desempeñan un papel crítico tanto en el contexto de la sostenibilidad ambiental, como en el de la economía circular, toda vez que, permiten realizar un análisis de balance ácido-base mucho más preciso, identificando minerales generadores de acidez frente a minerales neutralizantes, lo que resulta indispensable para prevenir el DAM. Ante ello la categorización inicial de estos métodos modernos puede dividirse en: (1) sistemas respaldados en la respuesta de la sustancia ante ondas o electrones, cuyo enfoque es químico y estructural y; (2) sistemas fundamentados en las reacciones tras un estímulo externo sobre el cuerpo que revelan los atributos vinculados. A su vez, todos los estudios físicos que parten del contacto entre la materia y la energía radiante se agrupan según un par de variables conjuntas en dicho proceso, como son el tipo de radiación (región del espectro electromagnético) y la forma de contacto (microscopía, espectroscopía, entre otros), siendo preciso ahondar en sus fundamentos.

2.2.1. Difracción de Rayos X (DRX) para la Identificación de Fases Cristalinas.

Se presenta como una técnica analítica no destructiva que permite determinar la estructura atómica y molecular de los materiales cristalinos, basándose en la interacción de un haz de radiación electromagnética de corta longitud de onda con los electrones de los átomos que conforman una red periódica. Cuando los rayos X inciden sobre un cristal son dispersados por los centros atómicos, lo que genera un fenómeno de interferencia únicamente en direcciones específicas, rigiéndose tal comportamiento por la Ley de Bragg, que relaciona la longitud de onda de la radiación con la distancia entre los planos atómicos y el ángulo de la incidencia, lo que permite obtener un patrón de difracción que funciona como una huella dactilar única para cada sustancia sólida, alcanzando su identificación precisa (Tuesta y Huaypar, 2008).

Dentro de la etapa de precisión de fases, la técnica ayuda a distinguir entre diferentes compuestos químicos o polimorfos que poseen la misma composición, pero distinta estructural espacial; al realizar un barrido angular, el detector registra la intensidad de los rayos difractados, generando un difractograma compuesto por una serie de picos o reflexiones, donde cada uno de ellos corresponde a una familia de planos cristalográficos específicos dentro de la muestra analizada, con una posición determinada por la geometría de la celda unitaria.

Por ende, para llevar a cabo el análisis, la muestra generalmente se prepara en forma de polvo fino para asegurar que los microcristales estén orientados de manera aleatoria, lo cual es indispensable para asegurar desde una postura estadística, que existan cristales orientados en el ángulo adecuado para cumplir con la condición de difracción de Bragg mencionada. El equipo implementado es denominado difractómetro, consta de una fuente de rayos X, un portamuestras y un detector móvil que se desplaza mediante un arco goniométrico (Cullity y Stock, 2014); a medida que el ángulo cambia, es el detector el que capta las variaciones de intensidad, transformándolas en señales eléctricas que luego son procesadas digitalmente, obteniendo como resultado final una representación gráfica de la intensidad frente al ángulo de dispersión, que refleja la periodicidad tridimensional de la red atómica.

Los diversos retos técnicos que resuelve la difracción de rayos X se determinan de la siguiente manera:

- Identificación precisa: Determinar especies minerales, variedades, fases ocultas o soluciones sólidas.
- Análisis estructural: Examinar series isomorfas y detallar la arquitectura del cristal (defectos, simetría, orden, texturas).
- Propiedades físicas: Medir el tamaño de los cristales y su respectivo nivel de dispersión.

- Resistencia y estabilidad: Evaluar cómo reaccionan los minerales ante factores externos como el calor y la radiación.
- Cuantificación de materiales: Realizar análisis cualitativos y cuantitativos en rocas, menas y procesos industriales, donde se incluye el estudio de sustancias amorfas.

Por todo lo mencionado, se trata de una técnica que permite identificar con precisión la fase cristalográfica, diferenciando sustancias con idéntica química, pero con distintas propiedades físicas, extendiéndose su análisis a toda la arquitectura atómica del material, hasta el punto de determinar su comportamiento y utilidad en el orbe de la tecnología moderna.

2.2.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM/EDX) y Mineralogía Automatizada (QEMSCAN/MLA).

A diferencia de la microscopía óptica que utiliza fotones, señalan Newbury y Ritchie (2013) que la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) es entendida como una técnica de caracterización de materiales que utiliza un haz de electrones altamente enfocado para escanear la superficie de una muestra sólida, es decir, el SEM emplea electrones para interactuar con los átomos de la superficie, generando señales que proporcionan información detallada sobre la topografía y la composición química, arrojando como resultado una imagen tridimensional de alta resolución que permite observar detalles nanométricos imperceptibles para otros métodos.

Un complemento para determinar la composición cualitativa y cuantitativa es el Sistema de Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX-EDS), debido a que, cuando el haz de electrones impacta la muestra, se desplazan electrones de las capas internas de los átomos, donde el vacío resultante es llenado por otros de las capas superiores, emitiendo energía en forma de rayos X. Cada elemento químico posee una firma energética única, lo que ayuda al detector en la identificación precisa de

los componentes presentes en un punto específico o en un área mapeada, lo cual, unido a la SEM, arroja un análisis químico puntual en microescala, generando mapas de distribución química que revelan la heterogeneidad de la muestra analizada.

En papel de la mineralogía automatizada responde a un enfoque netamente tecnológico, brindando una evolución en la materia al integrar el hardware del SEM/EDX con un software de procesamiento de datos altamente sofisticado, como lo es el QEMSCAN o MLA, desplazando la dependencia tradicional respecto a la interpretación manual de un operador, pues estos sistemas automatizan la adquisición de datos químicos en miles de puntos por segundo sobre una sección delgada, debido a que el software compara las firmas de rayos X obtenidas con una base de datos de minerales conocidos, permitiendo la identificación automática de cada fase mineralógica presente en la muestra realizada (Coetzee et al., 2011).

De acuerdo a ello, esta relación se esquematiza de la siguiente manera: (1) el microscopio electrónico de barrido SEM aporta la infraestructura física y el haz de electrones; (2) el sistema de microanálisis EDX proporciona la huella química de los elementos y; (3) el software de la mineralogía automatizada actúa como el cerebro que coordina tales señales para realizar miles de mediciones por segundo de forma autónoma, siendo que, en minería esta tríada permite pasar de una observación subjetiva a una base de datos estadística sobre la composición de la mena. En pocas palabras, sin el SEM/EDX la automatización no tendría ojos ni sensores químicos; y sin el software el análisis manual de partículas sería humanamente imposible.

Uno de las aplicaciones que resulta de esta unión recae en sobre la caracterización de los relaves o colas ante la búsqueda de oportunidades de recuperación secundaria, debido a que, muchas minas antiguas contienen valores económicos que no lograron ser recuperados con la tecnología de su época ante la complejidad de las texturas mineras, las cuales al pasarse ahora por un análisis automatizado, permite la identificación de

los minerales portadores de valor remanente y ayuda a entender el por qué no se recuperaron originalmente. Este enfoque de economía circular transforma los pasivos ambientales en recursos potenciales, basándose en la precisión del microanálisis electrónico, pues la técnica no sólo optimiza el presente, sino que también reevalúa el pasado minero bajo una nueva lente científica de alta resolución.

2.2.3. Fluorescencia de Rayos X (FRX) para Determinación Elemental.

Para Skoog et al., (2017) su principio fundamental reside en la emisión de rayos X secundarios denominados “fluorescentes”, que surgen de un material cuando este es excitado por una fuente de radiación de alta energía; al incidir los rayos X primarios sobre la muestra, interactúan con los átomos presentes, provocando transiciones electrónicas que son únicas para cada elemento químico, siendo una capacidad inherente a la técnica para alcanzar su identificación sin producir alteración en la integridad física o química de la muestra.

El proceso físico comienza cuando un fotón de rayos X impacta un electrón de las capas internas de un átomo, generalmente de las capas K o L, lo que proporciona la energía suficiente para expulsar el electrón de su órbita, dejando al átomo en un estado excitado e inestable con una vacante electrónica, ameritando para recuperar la estabilidad, que un electrón de la capa orbital superior se desplace para ocupar dicho hueco. Aquí, debido a que los niveles de energía externos son mayores que los internos, el electrón debe liberar el exceso de energía, emitiendo el sobrante en forma de un fotón de rayos X característico, cuya longitud de onda es específica del elemento.

De mencionado pueden extraerse la instrumentación necesaria para efectuar la técnica: (1) una fuente de excitación, que suele ser un tubo de rayos X, aunque en aplicaciones muy particulares pueden utilizarse fuentes radiactivas o radiación de sincrotrón; (2) un sistema de detección, que tiene la función crítica de captar fotones emitidos y convertir su

energía en señales eléctricas procesables y; (3) un soporte para la muestra. Igualmente, las configuraciones principales se dividen en dos vertientes: la dispersión de longitud de onda (WDXRF) que destaca por su alta resolución y la dispersión de energía (EDXRF), valorada por su rapidez y por permitir el diseño de equipos portátiles muy versátiles (Potts y West, 2008).

De manera que, una de las mayores ventajas de la FRX es su capacidad para realizar análisis tanto cualitativos como cuantitativos con una mínima preparación de la muestra, identificando elementos presentes mediante la medición de la energía o longitud de onda de los fotones emitidos, y midiendo la radiación emitida, la cual es proporcional a la concentración del elemento de la muestra, revistiendo de una versatilidad que permite trabajar con muestras sólidas, líquidas o en polvo.

2.3. Análisis de la Liberación Mineral

Se define como el proceso físico a través del cual las partículas de un mineral valioso se desprenden del material sin valor (ganga) mediante la conminución (reducción del tamaño de las rocas extraídas), con el objetivo de alcanzar un estado donde las fases de interés queden expuestas para su posterior recuperación química o física; si un mineral no se encuentra correctamente liberado, permanece atrapado o en forma de partículas mixtas, lo que reduce drásticamente la eficiencia en etapas como la flotación o la lixiviación. Ante lo señalado, Zuluaga et al., (2020) recoge en su texto lo siguiente:

La liberación corresponde a la cantidad de mineral de interés que puede quedar libre de material estéril cuando se realiza una determinada reducción de tamaño. Esta liberación está en función tanto de la probabilidad de ruptura como del tamaño al que se fracciona. (p.43)

Como en la naturaleza los minerales se encuentran íntimamente entrelazados con otros componentes dentro de una matriz rocosa sólida y compleja, es imperativo a la hora de emprender un proceso de concentración, reducir el tamaño de la roca hasta que cada grano mineral quede físicamente expuesto, pues de no ser así, el metal al quedar atrapado dentro de partículas compuestas, genera una pérdida significativa de eficiencia y con ello, una recuperación económica pobre durante la operación industrial.

Como se mencionó, el mecanismo principal para lograr esta separación es la conminución, que abarca las etapas críticas de trituración y molienda mediante la aplicación de fuerzas mecánicas intensas, buscando a través de tales etapas, que la fractura de la roca ocurra preferencialmente a lo largo de los límites de los granos de los distintos minerales presentes en la muestra; si la fractura llegare a atravesar el grano de forma aleatoria en lugar de seguir sus bordes, se generan partículas mixtas o “middlings” que contienen tanto mineral valioso, como ganga indeseada. Así, el objetivo técnico es alcanzar un equilibrio donde la mayoría de las partículas sean liberadas, es decir, que exclusivamente, consistan en una sola especie mineralógica para facilitar su posterior captura (Zuluaga et al., 2020)

Bajo este análisis cobra relevancia la noción del tamaño de liberación, entendido como la dimensión específica a la cual un mineral se desprende de su matriz de forma absoluta, cuya determinación requiere estudios detallados de microscopía y caracterización mineralógica, ya que moler por debajo de este punto consume energía innecesaria y genera lamas o finos excesivos. Por el contrario, una molienda insuficiente deja el mineral valioso recubierto de ganga, impidiendo que los reactivos químicos interactúen con la superficie del metal en los procesos químicos de recuperación, razón por la cual, la eficiencia de una planta minera depende directamente de qué tan cerca se trabaje de este tamaño, maximizando la pureza del producto final.

Ahora bien, la caracterización de la liberación no es simplemente visual, sino que en la actualidad encuentra apoyo en tecnologías avanzadas de análisis de imágenes automatizadas como el QEMSCAN o el MILA, siendo estas herramientas las que permiten medir cuantitativamente dicho grado de liberación, calculando el porcentaje del área superficial del mineral que está libre de asociaciones con otros componentes. Por ende, un estudio profundo revela si los granos están liberados, encapsulados o vinculados en texturas complejas, lo que facilita a los ingenieros el ajuste de los circuitos de molienda en tiempo real, al tratarse de un diagnóstico indispensable para predecir el comportamiento del mineral en la celda de flotación, donde solo las superficies libres reaccionan de manera predecible ante los colectores químicos (Sutherland y Gottlieb, 1991).

Desde una perspectiva económica y ambiental, esta etapa es la que consume mayor cantidad de energía eléctrica en toda la cadena de producción minera; aproximadamente el 50% de los costos operativos de una mina pueden atribuirse a la molienda, lo que subraya la importancia de no sobremoler el material de forma indiscriminada. En este caso, optimizar la liberación permite descartar la ganga lo más pronto posible, evitando procesar rocas estériles en etapas posteriores que son costosas y que requieren grandes volúmenes de agua, lo cual además de mejorar la rentabilidad, reduce la huella de carbono al hacer un uso mucho más eficiente de los recursos energéticos disponibles.

Bajo este análisis, Evans (2010) sostiene que es la evaluación de texturas minerales la que se constituye como pilar para predecir el comportamiento de una mena durante el procesamiento metalúrgico, yendo más allá de la simple composición química, pues son las texturas el registro histórico de la cristalización que define la resistencia mecánica de la roca, siendo un estudio que permite mapear la variabilidad del yacimiento, para luego diseñar diagramas de flujo que no solo sean teóricamente posibles, sino económicamente viables; de no ser así, se corre el riesgo de subestimar la energía necesaria para la conminución.

De modo que, las asociaciones minerales definen la vecindad química y física en la que se encuentran los metales de interés, dictando las interacciones superficiales durante procesos como la flotación; en el caso de sulfuros de cobre, plomo y zinc es imperante identificar si la calcopirita está asociada a la pirita o a gangas silicatadas, debido a que esto altera la selectividad de los reactivos. Una asociación íntima entre el oro y sulfuros refractarios como la arsenopirita, puede blindar el metal precioso frente al ataque de cianuro, exigiendo una etapa previa de oxidación; básicamente, el estudio de estas asociaciones ayuda a predecir la composición del concentrado y la posible presencia de elementos penalizables que afecten la comercialización la final.

Por su parte, el grado de entrampamiento es, quizás, el concepto más crítico para determinar el límite de recuperación de metales, referido a la fracción de metal que permanece confinada dentro de la red de un mineral de ganga o de otro sulfuro, incluso tras el proceso de molienda, siendo un fenómeno que obliga a los ingenieros a evaluar el equilibrio entre el costo energético de una molienda ultrafina y el valor del metal que se pretende recuperar, lo cual lleva a preguntarse hasta qué punto es rentable seguir fracturando la roca para liberar una partícula de plata atrapada en una cristal de cuarzo. El análisis cuantitativo mediante técnicas como SEM-EDX o QEMSCAN permite establecer la curva de liberación teórica frente a la real (Evans, 2010).

En el estudio específico de los metales base, el entrampamiento suele manifestarse en texturas de exsolución como las famosas gotas de calcopirita en la esfalerita; este tipo de intercrecimiento micrométrico impide obtener concentrados limpios de zinc sin arrastrar cobre, lo que reduce la calidad del producto final y complica la fundición. La evaluación de estas micro asociaciones permite decidir si es preferible aceptar una menor recuperación en favor de una mayor pureza o viceversa, siendo este análisis el que acompaña al geometalurgo para comprender el comportamiento del bloque minero antes de que llegue a la molienda.

Por esta razón, la integración de la evaluación de texturas y el grado de entrapamiento debe considerarse una herramienta de sostenibilidad y eficiencia operativa en la minería moderna, al entender exactamente cómo están asociados los metales de interés es posible reducir el consumo de agua y energía, evitando procesar material que no liberará sus valores. La visión de este proceso, que abarca desde la captura de la imagen mineralógica hasta el balance metalúrgico, cierra la brecha entre la geología y la planta, siendo una invitación a dejar de mirar la roca como una masa inerte, para ahora apreciarla como un rompecabezas de alta complejidad que requiere una solución personalizada para cada yacimiento, deduciendo en dicho escenario, que la optimización del grado de liberación es, en última instancia, un acto de respeto hacia el recurso mineral, maximizando su extracción con el menor impacto posible

2.4. Geoquímica Ambiental

La ciencia que se encarga de estudiar la composición química de la tierra y demás reacciones que se suscitan entre las rocas, los suelos y las interacciones de estos con la atmosfera y la hidrosfera es denominada geoquímica; en marco ambiental, es una disciplina que como bien expresan Oyarzun et al., (2010) “estudia los efectos de los procesos químicos naturales o antrópicos (inducidos por el hombre) sobre el medioambiente”. Lo que, al trasladarse al ciclo de vida de un proyecto minero, permite comprender las reacciones químicas de los materiales y desechos al interactuar con el ecosistema, consolidando una relación que comienza con la caracterización del yacimiento, donde la geoquímica predice la presencia de elementos tóxicos o minerales reactivos que la metalurgia debe procesar.

Como se ha referido, el ejercicio de la metalurgia extractiva produce desechos que provienen de cuatro orígenes: (1) las emanaciones de las torres de fundición, cuyos componentes terminan depositándose en la superficie terrestre, cerca o lejos del foco emisor; (2) los depósitos de rocas, con insumos presuntamente inertes, pero cargados de sustancias

muy inestables al aire, como la pirita, (3) los relaves, al igual que los desmontes que poseen azufres que resultaron descartados en las etapas de enriquecimiento y; por último, (4) las pozas de lixiviados que suelen albergar sustancias tan peligrosas como el cianuro o el ácido sulfúrico, además de iones de cobre o hierro; dichos reservorios líquidos son característicos de la extracción actual de oro (cianuración) y de cobre (procesos hidrometalúrgicos).

Dentro de este marco, una de las dificultades más graves en la industria respecto a los causes hídricos o acuíferos radica en la disolución de minerales que no están en armonía con el entorno químico, por ejemplo, un sulfuro metálico con oxígeno; justo cuando el elemento pesado se desprende de su estructura original, es que el ion queda libre para incorporarse a los flujos de agua. Este escenario resulta relevante en zonas geográficas con una trayectoria minera consolidada, donde su actividad, al igual que cualquier manufactura, altera la pureza del recurso hídrico bajo dos mecanismos centrales:

- La aparición del denominado flujo de ácido de mina, producto de la degradación por oxígeno y el lavado de componentes sulfurados, lo que provoca una caída de pH y el deterioro del agua por la esencia de las rocas extraídas, como elementos pesados tipo Cu, Pb, Zn, As, Hg, entre otros.
- La degradación hídrica causada por el empleo de metodologías de regado sobre el mineral apilado, donde el fluido solvente puede constituirse de ácido sulfúrico o bien, cianuro sódico.

Todo este proceso se visualiza como una perturbación drástica del “Paisaje Geoquímico” preexistente; bajo condiciones naturales, los elementos químicos se encuentran en un estado de síntesis y equilibrio relativo dentro de la corteza terrestre, pero como la minería actúa como un agente antrópico, acelera la descomposición de dichos materiales al exponerlos a condiciones atmosféricas oxidantes. Esta transición de un

entorno subterráneo cerrado a un sistema abierto en superficie rompe la estabilidad fisicoquímica de minerales como la piritita, desencadenando reacciones que la geoquímica ambiental se encarga de cuantificar y modelar para predecir cómo estos elementos se integrarán en el entorno, respectivamente (Higueras y Oyarzun, 2004)

Esta vinculación se manifiesta de forma crítica cuando los residuos mineros, como las escombreras y los relaves, liberan cationes metálicos que alteran la calidad de las aguas, donde la disciplina in comento interviene no sólo para identificar la presencia de contaminantes, sino para aplicar modelos matemáticos que permitan discernir si las concentraciones son parte del fondo geoquímico natural o del resultado directo de la lixiviación de desechos industriales. Al entender la movilidad de estas especies metálicas en función del pH y el potencial de oxidación, se transforma la observación de un problema (como lo es el drenaje ácido) en una capacidad predictiva sobre el comportamiento de los metales pesados en los cursos fluviales y acuíferos, lo cual se realiza mediante dos ensayos:

1. Ensayos estáticos, también conocidos como Contabilidad de Ácidos y Bases (ABA), que consiste en una serie de pruebas químicas aplicadas a muestras de roca triturada para determinar su potencial teórico de generación de ácido frente a su capacidad de neutralización. En este análisis, se mide el contenido total de azufre para calcular el Potencial de Acidificación (AP) y se somete la muestra a una digestión ácida para determinar el Potencial de Neutralización (NP), cuyo resultado es un balanceo de masas que clasifica a la roca como Potencialmente Generadora de Ácido (PAG), No Generado (nPAG) o de Incertidumbre, basándose exclusivamente en la composición mineralógica presente en ese momento (Callister y Rethwisch, 2020)

Una vez obtenidos los valores de AP y NP, se calculan los indicadores de riesgo: el Potencial de Neutralización Neto ($NNP = NP - AP$) y la Razón de Potencial de Neutralización ($NPR = NP/AP$); en caso de que el NPR sea

menor a 1, el material se considera ácido de forma inherente, en cambio, si es mayor a 3, es entendido como seguro. Sin embargo, cuando los valores se encuentran en un rango intermedio, es decir, entre 1 y 2, la prueba estática no es suficiente para predecir el comportamiento real en el medio ambiente, debido a que no informa sobre la velocidad a la que ocurrirán estas reacciones químicas.

2. Ensayos dinámicos o pruebas de cinética que se realizan con la idea de complementar los resultados del ABA, principalmente mediante celdas húmedas o columnas de lixiviación. En esta etapa, las muestras se exponen a ciclos repetitivos de aire seco, aire húmedo y lavado con agua destilada durante periodos prolongados, siendo un proceso que simula de manera acelerada el efecto de la meteorización natural (lluvia y oxígeno) sobre la roca, llegando a medir la tasa de reacción al observar semana tras semana cómo varía el pH y la liberación de metales y sulfatos en el agua de lixiviado (Callister y Rethwisch, 2020).

En vista de ello, como la producción del DAR depende de una tríada de factores: la mineralogía de la roca, la disponibilidad de reactantes y la presencia de microorganismos que actúan como catalizadores biológicos, su gestión moderna debe enfocarse en la prevención, utilizando los datos de los ensayos ABA y dinámicos para diseñar planes de manejo de residuos, como la segregación de minerales reactivos, el diseño de coberturas impermeables o la disposición submarina para evitar que la reacción química se inicie.

Para conseguir un estudio amplio de estas metodologías se recomienda consultar el GRAD Guide de la Red Internacional para la Prevención de Ácidos (INAP), que se constituye como estándar global que detalla desde la toma de muestras hasta la interpretación de diagramas de clasificación geoquímica, permitiendo a los profesionales predecir con rigor científico el comportamiento de los estériles y relaves mineros frente a la meteorización; en otras palabras, es un recurso dinámico que sintetiza

décadas de investigación académica e industrial sobre la predicción, prevención y control del DAR. Esta organización no sólo define los umbrales críticos para los ensayos ABA, sino que también promueve el uso de modelos hidrogeoquímicos para anticipar cómo la geología de un sitio interactuará con el clima local asegurando que las estrategias de cierre de minas se basen una gestión de riegos técnica y sólida desde el punto de vista científico.

CAPÍTULO III

POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE METALES Y VALORIZACIÓN DE RELAVES

El potencial de recuperación de metales y la valorización de relaves representa hoy una de las mayores oportunidades de innovación estratégica para la minería peruana, permitiendo la transición de una gestión de residuos pasivas hacia la aplicación de un modelo de minería circular de alto valor añadido, potencial que puede sustentarse en el hecho de que miles de toneladas de depósitos antiguos albergan leyes marginales de metales base y preciosos que, debido a las ineficiencias tecnológicas del pasado, no fueron extraídas, pero actualmente resultan económicamente viables gracias a los avanzados métodos de retratamiento y al incremento del precio de las materias primas. La valorización de relaves abre la puerta a la obtención de elementos críticos como el Indio, el Germanio y Tierras Raras, esenciales todas para las tecnologías globales, mientras que la fracción mineral inerte remanente ofrece una materia prima secundaria ideal para la fabricación de materiales de construcción sostenibles como geopolímeros y ladrillos mineros.

En concordancia, surge pues la necesidad de redefinir la gestión de los residuos mineros en Perú, planteando un análisis integral que articule la viabilidad remining con las exigencias de la economía circular contemporánea, razón por la que, goza de interés demostrar cómo la aplicación de tecnologías de vanguardia en el retratamiento de leyes marginales habilita la recuperación de metales críticos y la transformación de la fracción inerte en insumos industriales de alto valor, en tanto se propone una ruta estratégica que convierte el desafío de la remediación en una oportunidad de desarrollo tecnológico para el sector.

3.1. Evaluación del "Remining" en el Perú

Al tratarse de una técnica de minería de segunda generación que consiste en procesar materiales que fueron descartados en el pasado, como los relaves, desmontes o escombreras, para recuperar metales o minerales que no pudieron ser extraídos en el primer ciclo de operación, el remining de acuerdo con Solano (2019), es el proceso de volver a extraer valor de los desechos mineros al reducir el volumen de los depósitos de desechos y eliminar contaminantes, por ello, la evaluación de esta técnica en Perú supone la evolución de una simple medida de remediación ambiental a consolidarse como una estrategia de aprovechamiento económico de activos subutilizados. Este cambio de paradigma, importa saber, se sustenta en que los relaves antiguos, acumulados durante décadas de operación convencional, contienen concentraciones de metales que, aunque marginales, hoy resultan atractivas gracias a la apreciación de la materia prima.

La existencia de miles de pasivos ambientales mineros en Perú representa un inventario masivo de material ya extraído y molido, lo que elimina los costos y riesgos asociados a la voladura y fragmentación primaria, permitiendo que la viabilidad del proyecto se centre exclusivamente en la eficiencia del beneficio metalúrgico y la gestión de residuos; esta oportunidad económica, sin embargo, depende directamente de una caracterización mineralógica rigurosa, ya que el estado físico de los relaves

antiguos impone el primer gran reto técnico, donde al haber estado expuesto a la intemperie por años, estos materiales suelen presentar canas de oxidación y una granulometría extremadamente fina que dificulta su recuperación mediante métodos tradicionales. La factibilidad técnica en Perú está ligada, por tanto, a la capacidad de liberar metales atrapados en matrices complejas, lo que requiere el despliegue de tecnologías de molienda ultrafina y el uso de colectores químicos de última generación.

Consta así que, solo mediante este entendimiento profundo de la anatomía del relave se puede garantizar que el procesamiento de leyes marginales no derive en pérdidas operativas por bajas tasas de recuperación, siendo que, una vez superado el desafío de la caracterización, la implementación de procesos de recuperación eficientes debe enfrentarse a la necesidad de mover grandes volúmenes con costos operativos mínimos. Para que el procesamiento de estas leyes marginales sea rentable en el contexto peruano, la factibilidad técnica se apoya en la minería hidráulica y el bombeo de pulpas, métodos que permiten trasladar el material hacia las plantas de beneficio de manera continua y económica, pues la integración de circuitos de flotación de celdas de gran volumen o sistemas de lixiviación intensiva permite tratar el flujo masivo de relaves, optimizando el consumo de energía y reactivos, siendo el modo en que la ingeniería de procesos logra que el umbral de rentabilidad descienda, en tanto permite que depósitos que antes eran desechos se conviertan en fuentes de alimentación viables para la planta (Solano, 2019).

En definitiva, la viabilidad técnica del remining se cierra con la gestión del nuevo residuo generado, integrando la recuperación de valores con la estabilidad física definitiva del depósito, donde al procesarse los relaves antiguos, se tiene la oportunidad técnica de eliminar minerales reactivos, como las piritas, reduciendo significativamente el potencial de generación de drenaje ácido de mina. El material resultante del procesamiento puede ser dispuesto bajo estándares modernos, como el espesado de alta densidad o el filtrado para su uso como relleno hidráulico, logrando el ciclo del remining en Perú recuperar metal de leyes marginales y transformar a su

vez un riesgo ambiental que lleva años consolidándose, en lo que ahora puede ser un depósito estable, seco y controlado, alineando la rentabilidad técnica con la sostenibilidad a largo plazo.

3.2. Tecnologías de Retratamiento

La implementación de tecnologías de retratamiento en Perú representa hoy la frontera más avanzada de la ingeniería metalúrgica adaptativa, donde el éxito técnico depende de la capacidad de procesar matrices minerales alteradas por el tiempo, cosa que, a diferencia de la minería de tajo abierto o subterránea convencional, el aprovechamiento de relaves antiguos en el territorio peruano exige la integración de sistemas de clasificación granulométrica de alta precisión, siendo las tecnologías de retratamiento no más que el conjunto de procesos fisicoquímicos y mecánicos diseñados para limpiar y extraer el mineral valioso que las plantas antiguas dejaron pasar hacia los relaves; dado que el material en un presa de relaves ya es fino (parecido a la arena o al lodo), estas tecnologías no se enfocan en romper rocas grandes, sino en la separación selectiva de partículas minúsculas. Así, estas rutas tecnológicas toman las siguientes formas:

3.2.1. Flotación Selectiva de Sulfuros Remanentes.

La flotación selectiva es un proceso físico-químico que aprovecha la afinidad de ciertos minerales por las burbujas de aire para separarlos del lodo o relave, cosa que en el contexto de los relaves antiguos en Perú, es una ruta fundamental porque muchos depósitos aún contienen partículas microscópicas de cobre, plomo y zinc que no pudieron ser atrapadas originalmente; en la práctica, este proceso comienza acondicionando el relave con reactivos químicos llamados “colectores”, que actúan como una especie de impermeabilizante que solo recubre a los minerales valiosos, así, al inyectar aire en tanques especiales (celdas de flotación), las burbujas se pegan exclusivamente a estos minerales y los elevan hacia la superficie

en forma de espuma, mientras que la arena y el material sin valor se hunden, permitiendo una separación mecánica sumamente precisa de leyes que antes se consideraban invisibles (Ramos y Santisteban, 2019).

La factibilidad técnica de esta ruta en depósitos antiguos depende de la limpieza de la superficie del mineral, ya que años de exposición al aire suelen crear capas de oxidación que impiden que los reactivos funcionen, por lo que, para solucionar esto, la ingeniería moderna utiliza procesos de activación química que remueven esa capa de óxido, devolviendo al mineral su capacidad de flotar. Esta tecnología es especialmente valorada en la minería peruana porque, además de recuperar metal vendible, extrae la pirita (sulfuro de hierro), de esta forma, al momento en que la retira del relave viejo, se elimina el principal agente que genera acidez al contacto con el agua de lluvia, lo que convierte a la flotación selectiva en una herramienta doble: Una fuente de ingresos económicos y una solución definitiva para la estabilidad ambiental del pasivo minero (MINEM, 2023).

3.2.2. Lixiviación (Cianuración, Lixiviación Ácida y Bacteriana).

De acuerdo con Solano (2019), la lixiviación es una ruta hidrometalúrgica que, a diferencia de la flotación, no intenta hacer flotar el mineral, buscan más bien disolverlo completamente para pasarlo de un estado sólido a uno líquido, razón por la que, en los proyectos de remining de oro o cobre en Perú, el material del relave se somete a un baño de soluciones químicas (como cianuro para el oro o ácido sulfúrico para el cobre) que actúan como un imán químico, separando el metal de la roca y llevándolo al agua. Este proceso, como se ve, es ideal para leyes marginales porque permite tratar volúmenes masivos de tierra de forma económica, especialmente mediante la lixiviación en pilas, donde el relave se amontona y se riega con estas soluciones de manera controlada para recolectar el néctar mineralizado en la base, listo para ser purificado y convertido en barras de metal.

Dentro de esta ruta, destaca a su vez la lixiviación bacteriana (biolixiviación), que distinto de la lixiviación de naturaleza química, es una tecnología que hace uso de microorganismos vivos para acelerar la descomposición de los minerales, pues estas bacterias consumen el hierro y el azufre que normalmente mantienen al oro o al cobre atrapados dentro de cristales muy duros, por lo que, actúan como un pre-tratamiento biológico que libera el metal precioso sin usar químicos agresivos ni calor extremo. Según investigaciones de MINSUS (2024), esta tura es sumamente atractiva para los relaves de la pequeña minería en regiones como Puno, ya que requiere poca inversión en maquinaria pesada y aprovecha la actividad natural de bacterias que ya existen en el entorno minero, logrando recuperar valores metálicos que de otro modo serían imposibles de extraer mediante métodos químicos simples.

Entre estas variantes de lixiviación aplicadas al retratamiento de relaves, según su naturaleza química o biológica, se encuentran las siguientes:

- Por cianuración: Es la ruta estándar para recuperar oro de relaves antiguos, utilizando una solución química que disuelve el metal precioso para luego atraparlo con carbón activado, dependiendo su éxito en Perú de controlar los químicos que substraen cianuro (como el cobre soluble), permitiendo convertir lodos viejos en lingotes de oro (MINEM, 2023).
- Lixiviación Ácida: Se usa específicamente para relaves ricos en cobre oxidado, donde se riega el material con ácido sulfúrico para lavar el metal y pasarlo a una fase líquida, de donde se extraen cátodos de cobre puro, siendo muy eficiente en la minería de la costa peruana, ya que aprovecha los relaves que ya están listos para ser procesados sin moler (Solano, 2019).
- Lixiviación Bacteriana: Es una opción “eco-amigable” que usa microorganismos para liberar metales atrapados en rocas duras o sulfuros, en este caso, las bacterias actúan como mineros biológicos

que degradan la pirita, dejando libre el oro o cobre para su relación, siendo ideal para relaves de baja ley en zonas como Puno, debido a su bajo costo y mínima huella ambiental (MINSUS, 2024).

3.2.3. Separación Magnética y Gravimétrica de Alta Intensidad.

Es la ruta tecnológica de separación física que incluye los métodos magnéticos y gravimétricos, basada exclusivamente en las diferencias naturales de peso y magnetismo de los minerales, sin utilizar químicos reactivos, aquí la separación gravimétrica utiliza la fuerza de gravedad multiplicada mediante equipos centrífugos que giran a altas velocidades haciendo que las partículas de oro o estaño, que son mucho más densas que la arena del relaven se queden atrapadas en ranuras internas mientras el material ligero es expulsado. Se trata de una tecnología de “fuerza bruta controlada” que ha permitido que ha permitido a empresas en el Perú recuperar concentrados de alta pureza a partir de arenas que antes se consideraban basura, simplemente aprovechando que el metal es, por naturaleza, más pesado que el residuo que lo rodea.

Por su parte, la separación magnética de alta intensidad utiliza electroimanes extremadamente potentes para atraer minerales que tienen una respuesta magnética muy débil, como ciertas formas de hierro o manganeso presentes en los relaves, ciertamente, esta ruta resulta vital para limpiar el material antes de que pase a otros procesos o incluso para purificar el relave de tal manera que el residuo final sea arena limpia apta para fabricar ladrillos o concreto (Asencios, 2021). La gran ventaja técnica de esta ruta es su bajo costo operativo y su nulo impacto químico, lo que la convierte en el primer paso obligatorio en casi cualquier planta de retratamiento en Perú, permitiendo descartar rápidamente gran parte del material sin valor y concentrar los esfuerzos en la pequeña fracción que realmente contiene el metal precioso (Villanueva et al, 2021).

3.3. Recuperación de Metales Críticos y Estratégicos

La recuperación de metales críticos y estratégicos a partir de relaves mineros representa una de las fronteras más prometedoras para la minería peruana, transformando la percepción tradicional de estos depósitos de ser simples pasivos ambientales a considerarse auténticos yacimientos secundarios, así, en un mundo que transita aceleradamente hacia la descarbonización y la digitalización, elementos como el Indio, el Germanio y las Tierras Raras se han vuelto indispensable para la fabricación de paneles solares, pantallas de alta tecnología y baterías de vehículos eléctricos. Perú, al ser un productor de clase mundial de metales base como el zinc, el cobre y el plomo, ha generado en su historicidad depósitos de relaves que contienen trazas significativas de estos elementos estratégicos, los cuales no fueron recuperados en su momento debido a la falta de demanda o de tecnologías de separación específicas, quedando atrapados en los residuos de las concentradoras (Ildefonso, 2020).

Desde un enfoque técnico, el rol de los relaves como fuente de estos metales es sumamente estratégico porque el material ya ha pasado por las etapas más costosas de la minería: La extracción de roca y la molienda fina, donde elementos como el Indio y el Germanio suelen encontrarse asociados a la esfalerita (mineral de zinc), mientras que las Tierras Raras pueden hallarse en los residuos de tipo IOCG (Óxidos de Hierro-Cobre-Oro) o en rocas pegmatíticas procesadas. La ventaja competitiva para el Perú radica en que, al procesar estos relaves mediante técnicas modernas de lixiviación selectiva y extracción por solventes, se podría obtener una producción limpia de metales críticos sin la necesidad de abrir nuevas minas a cielo abierto, reduciendo el impacto ambiental y aprovechando la infraestructura ya existente en las regiones mineras de los Andes centrales y del sur.

Sin embargo, el camino hacia una producción comercial de estos elementos en Perú aún enfrenta barreras tecnológicas y de caracterización, pues históricamente la minería peruana ha centrado su análisis de laboratorio

exclusivo en el metal principal, ignorando el contenido de subproductos de alta tecnología en sus relaves; para que el remining de estas tierras raras y metales críticos sea factible, el país necesita de una modernización de sus protocolos de muestreo y una inversión robusta en metalurgia extractiva avanzada, pues no basta con saber que el metal está ahí, es necesario desarrollar rutas de procesamiento que permitan separar, por ejemplo, trazas microscópicas de germanio de grandes volúmenes de silicatos y óxidos de hierro, lo cual requiere una precisión técnica muy superior a la utilizada en la minería convencional.

Ocurre entonces que, la recuperación de estos metales estratégicos ofrece una oportunidad de provecho para mejorar la reputación del sector minero y resolver conflictos sociales vinculados a los pasivos ambientales, donde al convertir un relave potencialmente peligroso en una fuente de materiales para la energía verde, la industria minera peruana se alinea con los objetivos de la economía circular y la seguridad de suministro global (Valeriano, 2022). Esto es especialmente relevante ante el dominio casi monopolístico de ciertas potencias en el mercado de tierras raras, donde Perú podría posicionarse como un proveedor confiable y ético de metales críticos para Occidente, utilizando sus propios desechos mineros como moneda de cambio tecnológica y economía en el escenario internacional.

El éxito de esta transición depende de una visión integrada que combine la academia, el Estado y la empresa privada para cerrar las brechas de conocimiento actuales, cuestión por la que, la factibilidad técnica debe ir acompañada de un marco legal que incentive el retratamiento de relaves, permitiendo que las empresas operen sobre estos pasivos con seguridad jurídica y beneficios fiscales. Así, si el Perú logra consolidar una cadena de valor que incluya la identificación, extracción y refinación de metales como el Indio y las Tierras Raras a partir de sus relaves, no solo estará mitigando riesgos ambientales que provienen de tiempos antiguos, sino que su salto sería todavía más a nivel cualitativo, pasando de ser un potente exportador de rocas concentradas a ser un actor crucial en la industria de la tecnología global de punta.

3.4. Economía Circular

Representa un modelo de gestión y de producción diseñado para romper con el esquema tradicional de “extraer, fabricar, usar y tirar”, proponiendo en su lugar un sistema de bucle cerrado donde el valor de los productos, materiales y recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, con ello en mente, este enfoque busca la eficiencia en el uso de recursos, pero también se fundamenta en la generación de los sistemas naturales y el diseño de procesos que, desde su origen, minimicen la generación de residuos (Paucar y Vera, 2021). En sectores industriales críticos como la minería, la economía circular transforma radicalmente la visión del negocio integrado estrategias de ecodiseño, simbiosis industrial y la valorización de subproductos, de modo que los remanentes de una operación se conviertan en los insumos estratégicos de otra, reduciendo así la huella ambiental y extendiendo la rentabilidad socio-económica a largo plazo.

De acuerdo con Julca (2022), en este modelo los relaves mineros pasan a ser entendidos como una fuente de materias primas secundarias, y ya no como desechos simples de la actividad, pues su fin tras recuperar los metales valiosos mediante procesos de retratamiento, queda una gran cantidad de material remanente conocido como “fracción inerte”, la cual está compuesta mayormente por silicatos y aluminosilicatos que poseen propiedades físicas y químicas muy similares a los agregados naturales utilizados en la construcción, lo que abre una ventana de oportunidad para integrarlos en una cadena de valor circular que conecta la minería con la infraestructura civil.

Una de las aplicaciones más modernas y sostenibles para esta fracción inerte es la fabricación de geopolímeros que, a diferencia del cemento tradicional, cuya producción genera una huella de carbono masiva debido a la descarbonatación de la caliza, los geopolímeros se crean mediante la activación química de los minerales presentes en el relave (como la sílice y el aluminio) con una solución alcalina; este proceso da como resultado un

material cementante de alta resistencia, durabilidad y, lo más importante, una estabilidad química muy superior que permite encapsular cualquier traza de metal pesado que pudiera quedar en el residuo (Ruiz y Villa, 2026). En Perú, esta tecnología es factible para la creación de estructuras de sostenimiento en las mismas minas o para elementos de construcción urbana, reduciendo en el trayecto la necesidad de extraer canteras de arena naturales.

A su vez, el desarrollo de ladrillos mineros a partir de relaves es otra ruta técnica que refuerza la economía circular, permitiendo la producción intensiva de unidades de albañilería con un costo energético menor al de los ladrillos convencionales, ocurriendo así que, mediante procesos de prensado a alta presión y, en algunos casos, curado térmico controlado, la fracción inerte del relave se compacta para formar bloques con propiedades mecánicas que cumplen con las normas técnicas de edificación; esta práctica, vale decir, ofrece una alternativa económica para proyectos de vivienda social en zonas aledañas a las operaciones mineras, cerrando el ciclo de vida material de forma productiva y socialmente responsable.

La factibilidad de esta transición hacia materiales de construcción mineros depende de una rigurosa estandarización técnica y de la superación de barreras culturales, siendo imperativo que estos materiales pasen por pruebas de lixiviación a largo plazo para garantizar que, bajo condiciones de lluvia o humedad, no liberen sustancias nocivas al ambiente, lo que ha generado que en Perú instituciones y empresas hayan comenzado a validar que la fracción inerte de relaves polimetálicos, una vez neutralizada, es un material inerte y seguro. Así, la aceptación de estos “ladrillos verdes” por parte del sector construcción requiere, además de evidencia científica en su resistencia, un marco normativo que facilite su comercialización y uso de obras públicas, promoviendo una compra estatal verde que incentive a las mineras a invertir en estas plantas de transformación.

Finalmente, el impacto de implementar la economía circular mediante geopolímeros y ladrillos mineros trasciende la gestión de residuos, convirtiéndose en un motor de desarrollo regional, donde al transformar los relaves en materiales de construcción se generan también nuevas oportunidades de empleo, así como la creación de industrias locales que no dependen directamente de la extracción de mineral. Al finalizar la vida útil de una mina, este enfoque permite que el legado se convierta en una industria de materiales sostenibles que continúa aportando valor a la sociedad, y no un depósito de desechos que requiere mantenimiento eterno, haciendo que el Perú, en este caso, pueda lograr demostrar que la ingeniería y la innovación pueden convertir los mayores desafíos ambientales en los cimientos de una infraestructura circular y resiliente.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE CASOS DE ESTUDIO Y PERSPECTIVAS FUTURAS

El análisis y la revisión del reaprovechamiento de relaves en Perú presenta una transición crítica desde un modelo de minería lineal hacia una economía circular plenamente integrada, donde los depósitos de residuos dejan de ser vistos como pasivos ambientales para transformarse en activos económicos estratégicos de alta complejidad, por lo que, el presente estudio emplea un diseño no experimental de corte bibliográfico o documental (Arias, 2012), cuyo objetivo es caracterizar los depósitos de relaves sin manipular las variables físicas del terreno, basado en una estrategia de búsqueda, selección y revisión sistemática de artículos científicos, informes técnicos y tesis de grado, con lo cual es posible considerar el estado de potencial económico de los pasivos mineros sin realizar intervenciones de campo.

Resuena esto último en el contexto de un futuro minero por su enfrenta a leyes minerales decrecientes en los yacimientos primarios, donde la “reminería” surge como una solución innovadora que aprovecha tecnologías de procesamiento avanzado para extraer metales valiosos y

minerales críticos que antes eran descartados, reduciendo simultáneamente la huella ambiental y los riesgos de estabilidad física y química de las presas de relaves, sosteniendo su basamento teórico en el análisis documental que se apoya en el uso de fichas bibliográficas y matrices de síntesis como instrumentos de recolección, aplicando en el proceso la exploración en bases de datos académicas, investigativas, documentales y teóricas, permitiendo extraer y organizar de manera estructurada los datos químicos y mineralógicos naturales de la actividad y necesarios para la investigación (Arias, 2012).

El estudio se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, ya que se orienta a la comprensión y descripción de las propiedades mineralógicas de los relaves polimetálicos a partir de la interpretación de datos existentes, sin buscar la experimentación directa, sino el análisis crítico de hallazgos previos para identificar patrones en la composición mineral y determinar la viabilidad teórica de la recuperación de metales valiosos mediante procesos metalúrgicos documentados (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018), planteando una visión a largo plazo que busca la eficiencia operativa y la rentabilidad mediante la recuperación de recursos ya extraídos y triturados, fundamentada en la sostenibilidad como eje de la licencia social al permitir que la industria peruana lidera un estándar de cero residuos que optimiza el uso del agua y rehabilita el entorno geográfico, así, el estudio integral de estos depósitos se convierte en el pilar de una minería moderna, resiliente y responsable, capaz de convertir los desafíos del pasado en los motores de innovación y suministro metálico del mañana.

4.1. Revisión de Proyectos Emblemáticos de Reaprovechamiento en los Andes Centrales.

El reaprovechamiento de los relaves en los Andes Centrales, teniendo por enfoque a Perú, no es solo una cuestión de optimización técnica, puesto que, supone más bien una respuesta imperativa a la herencia histórica de prácticas mineras que durante décadas operaron

bajo paradigmas de disposición final hoy día obsoletos en su mayoría. La geografía peruana está marcada por una accidentada cordillera y cuencas hidrográficas sensibles donde los pasivos ambientales mineros y las presas de relaves activas representan tanto un riesgo latente, como un yacimiento secundario sin explotar, razón por la que los proyectos emblemáticos que surgen en estas regiones buscan transformar la percepción del relave, pasando de ser un residuo tóxico y costoso de mantener, a convertirse en una fuente de valor económico mediante la recuperación de metales valiosos (oro, cobre o zinc que no fueron extraídos en procesos primarios menos eficientes), y la creación de materiales de construcción sostenibles.

Esta transición hacia una economía circular minera es fundamental para mitigar la huella ambiental en ecosistemas de alta montaña, donde la estabilidad física y química de estos depósitos es crítica para la seguridad de las comunidades locales y la preservación del recurso hídrico, lo que hace de la implementación de estas iniciativas de reaprovechamiento una tarea con trabas que enfrenta constantemente desafíos multidimensionales que no se estacan solo en la metalurgia compleja. Así, al analizar casos específicos en el Perú, se observa que el éxito de estos proyectos depende de un marco regulatorio robusto que incentive la remediación a través de la inversión privada y de una licencia social que reconozca los beneficios ambientales directos de limpiar el territorio mientras se genera rentabilidad, puesto que, el reaprovechamiento permite reducir el volumen total de desechos y, en muchos casos, facilita el cierre definitivo de minas antiguas mediante la estabilización de residuos remanente.

En el caso de Perú, la evolución del reaprovechamiento en los Andes Centrales tuvo inicio en la década de 1990-2000 con el proyecto del Consorcio Minero Horizonte (CMH) en el distrito de Parcoy (Provincia de Pataz), el cual representa uno de los hitos fundacionales de la minería circular en los Andes del norte peruano, al ser pionero en la instalación de plantas de cianuración para retratar relaves antiguos de oro; históricamente la región de Pataz enfrentó en su momento una acumulación crítica de relaves provenientes de la minería aurífera, donde la mayoría fueron

depositados en quebradas y áreas inestables bajo estándares ambientales antiguos (Guzmán y Reyes, 2018), de ahí que el Consorcio Minero Horizonte fuese el primero en romper el paradigma de “residuo estático” al implementar plantas de cianuración y procesos de lixiviación diseñados específicamente para procesar estos depósitos antiguos que aún contenían leyes de oro económicamente viables debido a las ineficiencias de los procesos metalúrgicos a mediados del siglo XX.

El impacto de este proyecto fue doblemente gratificante para el contexto peruano de antaño, puesto que: Por un lado, permitió la recuperación de valores metálicos sin la necesidad de nuevas excavaciones a cielo abierto, y por otro, facilitó la estabilización física y química de pasivos ambientales que representaban un riesgo de contaminación por mercurio (común en la minería artesanal de la zona) y cianuro cercanos a la cuenca del río Marañón, de tal forma, esta iniciativa demostró que la remediación de pasivos puede ser una actividad financieramente autosustentable cuando se combina con tecnología de recuperación de finos (Chereque, 2019). Con tales referencias, para fechas más próximas (2004-2012) se desarrolló el proyecto de la Sociedad Minera El Brocal (Pasco), constituyendo un referente técnico en la minería de los Andes Centrales por su capacidad de integrar el reaprovechamiento de minerales complejos dentro de una operación de tajo abierto y subterránea a gran escala, inspirado por la proyección del CMH.

Específicamente esta nueva iniciativa trajo consigo el desarrollo de la Planta Marcapunta y con ello, la optimización de sus procesos de flotación que permitieron abordar el desafío vivo de los relaves y minerales con altas concentraciones de arsénico y otros metales bases que, en décadas pasadas, eran difíciles de procesar con eficiencia; en consecuencia, se inició la implementación de circuitos de flotación selectiva de ultrafinos con el propósito de capturar las partículas de cobre y plata que anteriormente se perdían en las colas finales y terminaban depositadas como pasivos en la relavera de Huancapata (Buenaventura, 2022), pues al maximizar la recuperación metalúrgica en tiempo real y tratar materiales de baja ley

que antes eran descartados, El Brocal consiguió extender la vida útil de su operación en una de las zonas mineras más altas del mundo, y redujo la huella ambiental al disminuir la toxicidad y el volumen de desechos finales mediante una gestión de relaves espesados que mejora la estabilidad física del depósito frente a eventos sísmicos o climáticos extremos.

De esta forma, tras la consolidación de la Sociedad Minera “El Brocal” como un referente en la recuperación de valores metálicos mediante la flotación de ultrafinos en Pasco, la industria minera peruana comprendió que la tecnología no servía únicamente para maximizar la producción corriente, al contrario, podía en realidad llegar a ser la clave para resolver deudas ambientales históricas; mientras que El Brocal demostraba que era posible extraer riqueza de lo que antes se descartaba de la operación diaria, surgió la necesidad de aplicar esa misma capacidad técnica a depósitos de residuos abandonados que ya no pertenecían a una operación activa, sino que constituía pasivos críticos para el Estado. Es en este punto de inflexión donde el modelo de negocio vira hacia la minería de remediación, encontrando en el proyecto de Minería Colquirrumi el ejemplo más robusto de cómo transformar un pasivo ambiental en un activo económico y ecológico.

El proyecto de la Compañía Minera Colquirrumi, anexa de Buenaventura, en el distrito de Hualgayoc (Cajamarca), representa uno de los ejemplos más exitosos y emblemáticos de “minería de remediación” en los Andes Centrales que, a diferencia de las operaciones convencionales, este proyecto nació de la necesidad crítica de gestionar pasivos ambientales mineros que databan de décadas de explotación informal y antigua en una zona de alta sensibilidad hídrica. El impacto de Colquirrumi fue disruptivo porque logró integrar la recuperación metalúrgica de concentrados de zinc, plomo y plata con la rehabilitación física y química del ecosistema, logrando por medio del retratamiento de antiguos relaves y desmontes que generaban drenaje ácido de mina, no solo el retorno económico del financiamiento de las labores de limpieza, sino también ejecutar el cierre definitivo de cientos de bocaminas y depósitos de residuos que

amenazaban la calidad del agua de las comunidades que se encontraban aguas abajo (Rodríguez y Vigil, 2018).

Este enfoque logró la transformación de un paisaje degradado en áreas recuperadas con cobertura vegetal, estableciendo principalmente un precedente sobre cómo la inversión privada puede resolver pasivos estatales de manera eficiente; desde una perspectiva social y técnica, el Proyecto desarrollado en Hualgayoc es considerado representativo porque redefinió la licencia social en la región a través de resultados ambientales tangibles y medibles, demostrando que el reaprovechamiento es la herramienta más poderosa para la economía circular en minería, dejando de ser el residuo una amenaza, para convertirse en el insumo de una operación que limpia y produce al mismo tiempo, siendo este proyecto un caso de estudio por excelencia sobre cómo cerrar el ciclo de vida de una mina de forma responsable, logrando que el estado peruano a través de organismos como la OEFA y el MINEM reconozca la viabilidad de modelos donde la remediación y el aprovechamiento trabajan conjuntamente para mitigar los conflictos socioambientales históricos de la región.

Bajo esta misma premisa, el Proyecto Shahuindo en Cajamarca (2016 - Actualidad) emerge como un hito de transición, puesto que, mientras que los proyectos anteriores se enfocaron en rescatar metales de relaveras ya abandonadas, Shahuindo representa la evolución hacia sistemas de lixiviación dinámica y gestión de ripios, donde el material procesado se dispone de forma que permita un reaprovechamiento continuo de soluciones y una estabilidad química superior, minimizando la generación de nuevos pasivos ambientales desde el inicio de su vida útil (Pan American Silver Perú, 2022). Su punto fuerte radica en la capacidad de recirculación de soluciones cianuradas en un circuito cerrado, lo que reduce drásticamente el consumo de agua y evita el vertido de efluentes, un aspecto crítico para la agricultura en la cuenca del valle de Condebamba, convirtiendo al proyecto en un referente de cómo el reaprovechamiento interno (es decir, volver a lixiviar materiales en las pilas para agotar su contenido metálico) puede convivir con estándares de seguridad ambiental

que priorizan la impermeabilidad de vanguardia y el monitoreo constante de aguas subterráneas.

Para Perú, Shahuindo destaca por su plan de cierre progresivo y el reaprovechamiento del área de sus pads de lixiviación, donde al finalizar el ciclo de extracción, el proyecto contempla la detoxificación de los ripios (el residuo sólido de lixiviación) para transformarlos en una geoestructura estable y, en lo posible, inerte, que puede ser integrada al paisaje original (Sánchez, 2019); este proyecto supuso en sus inicio el ejemplo de la “nueva minería” de los Andes, es decir, una que entiende que el residuo minero debe ser gestionado como un activo químico controlado y no como un desecho abandonado, logrando una armonía operativa en una de las regiones con mayor vigilancia social del país, siendo este modelo de gestión el que ha permitido que la operación mantenga una coexistencia productiva con las actividades agropecuarias locales, demostrando que la tecnología de lixiviación bien aplicada es una herramienta de desarrollo sostenible.

En la actualidad, el renombrado proyecto se mantiene como una de las operaciones auríferas más dinámicas y eficientes en la región de Cajamarca, consolidándose bajo un modelo de minería de precisión y gestión hídrica de vanguardia mientras opera bajo una unidad activa que extiende el aprovechamiento de minerales de baja ley mediante un sistema de lixiviación en pilas (pads) que funciona bajo una política de cero vertimiento, recirculando continuamente las soluciones de proceso para minimizar el consumo de agua fresca, lo que caracteriza a su estatus actual con la ejecución de cierre progresivo, donde la empresa Pan American Silver realiza labores de perfilado y revegetación en áreas que ya han cumplido su ciclo operativo, integrando la recuperación ambiental de manera simultánea a la producción (Sánchez, 2019).

Por último, el Proyecto de Retratamiento de Relaves de Quiulacocha en Pasco no puede ser concebido como un único proyecto más dentro del repertorio, pues se trata del punto culminante de la evolución de la minería circular en Perú al representar el desafío técnico y ambiental más ambicioso de la región cubriendo aproximadamente 115 hectáreas y almacena cerca de 75 millones de toneladas de residuos mineros depositados desde la década de 1920, pasando de la compañía Cerro de Pasco Copper Corporation a la estatal Centromin Perú; en retrospectiva, lo que hace a este proyecto emblemático y vigente es que ha dejado de ser visto únicamente como un foco de contaminación de metales pesados para ser reconocido como un yacimiento secundario de clase mundial (Activos Mineros S.A.C, 2024).

Actualmente, se encuentra bajo el liderazgo de Activos Mineros (AMSAC) y la participación de Cerro de Pasco Resources, encontrándose en una fase crítica de desarrollo técnico y permisos, en la búsqueda de implementar una planta de procesamiento de última generación que utilice tecnologías de flotación selectiva y lixiviación para recuperar plata, zinc, plomo e incluso cobre y oro que no pudieron ser extraídos con la tecnología del siglo pasado. El impacto de Quiulacocha es multidimensional y marca el futuro de la industria minera por tres razones fundamentales:

1. A diferencia de los cierres convencionales que consisten en simplemente “tapar” el residuo, este proyecto propone removerlo, procesarlo y disponer de los nuevos residuos de forma inerte, solucionando de raíz el problema de drenaje ácido de mina que afecta a los ríos cercanos al Cerro de Pasco (Vásquez y Tello, 2021).
2. Al tratarse de relaves con una química muy compleja y heterogénea, el éxito de Quiulacocha servirá como validación para otros miles de pasivos ambientales en los Andes para los que actualmente se evalúan métodos de separación magnética y metalurgia hidrometalúrgica que podrían revolucionar el costo de remediación global.

3. El proyecto es la clave para la sostenibilidad de la ciudad de Cerro de Pasco, donde al aprovechar estos relaves se liberan áreas que han estado degradadas por un siglo, permitiendo una planificación urbana más saludable, y generando una fuente de empleo e impuestos que no dependen de la apertura de nuevos tajos abiertos sino de la limpieza del territorio existente.

La revisión de estos proyectos de reaprovechamiento de relaves en el Perú permite concluir que el país ha transitado con éxito de una minería de disposición final a una minería de economía circular, teniendo en cuenta iniciativas pioneras como las de Consorcio Minero Horizonte y la Sociedad Minera “El Brocal” que demostraron que la innovación tecnológica (específicamente en la recuperación de finos y la metalurgia compleja) podía transformar residuos considerados “estériles” en recursos económicamente viables; esta maduración técnica sentó las bases para que proyectos como Colquirrumi y Shahuindo integraran la sostenibilidad como un pilar operativo y no como un costo adicional, logrando la remediación voluntaria de pasivos históricos y la implementación de sistemas de vertimiento cero que protegen la vulnerabilidad hídrica de los ecosistemas altoandinos (Cerro de Pasco Resources, 2023).

Es así que, el estatus actual de proyectos de gran envergadura como el de los Relaves de Quiulacocha marca el inicio de una era donde el aprovechamiento se convierte en la principal estrategia de remediación ambiental del Estado y el sector privado, puesto que, la experiencia peruana en los Andes Centrales demuestra que la gestión de pasivos ya no debe abordarse únicamente bajo una lógica de confinamiento, en su lugar, debe tomarse como una oportunidad para establecer una “minería secundaria” capaz de financiar la restauración de territorios degradados, por tanto, el éxito futuro de esta industria en Perú dependerá de la armonización entre un marco legal que incentiva la inversión en pasivos, el uso de tecnologías de bajo impacto ambiental y un compromiso social que reconozca en el reaprovechamiento una vía efectiva para el desarrollo sostenible

4.2. Análisis Costo-Beneficio de la Recuperación Metalúrgica frente al Cierre de Minas.

La transición entre la fase de recuperación metalúrgica y el cierre de minas no es un evento abrupto, se trata más bien de un solapamiento estratégico de flujos de caja y responsabilidades ambientales, lo que lleva a considerar que, proyectos como Shahuindo (Cajamarca) y Quiulacocha (Pasco) representan dos de los desafíos más significativos para la industria, siendo que, el primero es una operación activa que busca la máxima eficiencia en la recuperación de metales preciosos para postergar un cierre costoso, y el segundo, un pasivo ambiental histórico que requiere de la innovación metalúrgica para ser remediado de manera financieramente viable, razones por las que resulta necesario realizar un análisis de costo-beneficio que desglose las variables críticas de ambos proyectos, evaluando si la inversión en tecnología y la extensión de las operaciones ofrecen un retorno superior a la ejecución inmediata de un plan de cierre.

En el caso de Shahuindo, la información más reciente revelada por Pan American Silver deja de manifiesto que el proyecto ha puesto en marcha una estrategia agresiva para extender su vida útil hasta el año 2032, considerando sabiamente que, no se trata de una elección operativa, sino de una estrategia financiera de optimización de activos que redefine por completo el balance costo-beneficio del proyecto. En la actualidad, el beneficio de la recuperación metalúrgica extendida supera al cierre temprano de las minas porque permiten que la empresa aproveche una infraestructura ya amortizada para procesar mineral de baja ley que, de otro modo, se convertiría en un recurso desperdiciado, donde al mantener el riego de los pads de lixiviación y expandir los tajos abiertos, Shahuindo genera un flujo de caja positivo que actúa como un “fondo de reserva” dinámico”, donde tal capital circulante es vital para absorber los altos costos fijos de mantenimiento, gestión de aguas y planillas, transformando lo que sería un gasto de cierre inminente en una inversión productiva que maximiza el valor para los accionistas y el Estado peruano a través del

canon minero (Vásquez, 2020).

El beneficio de continuar con la producción radica en la eficiencia del Cierre Progresivo integrado, es decir, realizar labores de remediación como el perfilado de botaderos o la cobertura de áreas agotadas mientras la flota de maquinaria pesada aún está operativa y en el sitio, reduce los costos logísticos de cierre en aproximadamente un 30% en comparación con un escenario de cierre post-operativo (MINEM, 2023). En Shahuindo, el uso de las mismas excavadoras y camiones que transportan mineral para realizar tareas de rehabilitación ambiental crea una economía de escala interna, consiguiendo este enfoque que el costo del cierre se diluya dentro de los gastos operativos diarios, evitando que la compañía deba enfrentar un desembolso masivo de capital en un momento en que la mina ya no genera ingresos, lo que asegura una transición financiera mucho más estable y predecible hacia el cese definitivo de actividades.

Al extender la vida de la mina, Shahuindo puede implementar ciclos de lixiviación secundaria en los pads antiguos, recuperando onzas de oro que requieren un costo marginal mínimo, dado que el mineral ya fue extraído, triturado y apilado en años anteriores, este beneficio se potencia en un contexto de precios de metales altos, donde incluso una mejora del 1% o 2% en la recuperación final puede representar millones de dólares adicionales en utilidades líquidas (Sánchez, 2021); en contraste, un cierre temprano obligaría a la neutralización inmediata de las soluciones cianuradas, “congelando” el metal precioso dentro de la pila y convirtiendo un activo potencial en un pasivo ambiental que debe ser gestionado sin generar retorno económico algunos.

Este análisis costo-beneficio de la extensión operativa proyecta un impacto sustancialmente más positivo que el cierre prematuro para la provincia de Cajabamba, puesto que, la continuidad de Shahuindo hasta el año 2032 asegura la estabilidad laboral de miles de trabajadores y contratistas locales, viéndose la permanencia desde un punto social y regional, siendo que además, logra con ello mantener el dinamismo de la cadena de suministro

local (territorial) que depende directamente de la mina. Esto supone que, si se opta por un cierre en el corto plazo, el choque económico para la región sería devastador, pudiendo derivar en conflictos sociales que aumentarían los costos de seguridad y gestión de crisis para la empresa; la recuperación extendida permite que Pan American Silver cumpla con sus compromisos sociales de manera gradual, financiando programas de desarrollo productivo que preparen a la población para la economía post-minera, lo cual es un beneficio intangible pero crucial para la viabilidad de sus otros proyectos en el país (Gutiérrez y Alva, 2021).

A nivel ambiental, el mayor desafío y costo de Shahuindo es la gestión de los excedentes hídricos en una zona de alta pluviosidad como Cajamarca, en este caso, la extensión de la vida útil permite que la planta de tratamiento de aguas ácidas y de procesos se mantenga operativo bajo estándares de producción, garantizando que el agua descargada al río Condebamba cumpla rigurosamente con los Límites Máximos Permisibles (LMP). El provecho de esta operatividad prolongada es la reducción del riesgo de incidentes ambientales derivados del abandono de infraestructura, pues al estar la mina activa, existe un monitoreo técnico constante y una respuesta inmediata ante eventos climáticos extremos, donde este control preventivo es significativamente más económico y efectivo que intentar remediar un desastre ambiental ocurrido en una unidad en etapa de post-cierre mal supervisada o con presupuestos recortados.

En último lugar, la integración de ambos escenarios concluye que el futuro de Shahuindo está diseñado como una transición técnica responsable donde la metalurgia financia la ecología, siendo que, el mayor beneficio de la recuperación extendida no reside solo en la rentabilidad inmediata, más bien, tiene lugar en la capacidad de ejecutar un cierre de mina de “clase mundial” que garantice la estabilidad física y química del terreno a perpetuidad. Así, hacia el 2032, cuando la mina agote finalmente sus reservas económicas, la empresa habrá logrado rehabilitar gran parte de la huella operativa mediante el cierre progresivo, dejando un pasivo mínimo y manejable, siendo la ruta optima la situación actual de expansión de

Shahuindo para equilibrar la responsabilidad ambiental con la rentabilidad minera, demostrando que un cierre bien planificado es aquel que utiliza la riqueza generada por la propia tierra para asegurar su restauración definitiva.

En correspondencia, el proyecto de Reutilización de Relaves Quiulacocha, en la histórica ciudad de Cerro de Pasco, presenta una naturaleza distinta a la de Shahuindo, pues aquí no se discute la extensión de una mina activa, sino la remediación de un pasivo ambiental masivo mediante la minería circular, donde en el caso de Quiulacocha el beneficio no proviene de la extracción de roca virgen, procede en cambio, en la remediación de un pasivo histórico masivo donde la recuperación metalúrgica pasa de ser una opción comercial a convertirse en la única vía financiera viable para ejecutar un cierre ambiental definitivo que sane la histórica deuda ecológica de Cerro de Pasco. Ocurre entonces que, la relavera de Quiulacocha almacena aproximadamente 70 millones de toneladas de desechos mineros polimetálicos depositados durante décadas, los cuales contienen valores significativos de zinc, plomo, plata y cobre, por tanto, el beneficio central de la recuperación metalúrgica en este proyecto liderado por Cerro de Pasco Resources (CDPR), radica en transformar un foco de contaminación activa en una fuente de riqueza económica.

A diferencia del cierre convencional, que simplemente buscaría encapsular el material tóxico, la recuperación metalúrgica permite extraer el valor residual del relave, financiando así una limpieza ambiental profunda que el Estado peruano, por sí solo, difícilmente podría costear debido a la magnitud de la inversión requerida. En cuanto al costo-beneficio a nivel financiera, la recuperación del área se fundamenta en un modelo de economía circular donde los ingresos por la venta de concentrados de Zn y Ag compensan los costos de remediación, pues según datos del proyecto, las leyes de mineral de los relaves son lo suficientemente atractivas para justificar el procesamiento industrial (Vásquez, 2020), especialmente con el uso de tecnologías modernas de flotación y lixiviación que no existían cuando esos desechos fueron depositados, de tal modo, el beneficio de este

enfoque frente al cierre de minas tradicional, es que este último representa un gasto neto hundido, estimado en cientos de millones de dólares para una remediación total del lugar, sin retorno de capital.

Al procesar el relave, el proyecto además de generar utilidades para la empresa, produce un residuo final mucho más estable, menos voluminoso y químicamente inerte, reduciendo en gran medida los costos de monitoreo y tratamiento de aguas ácidas a largo plazo, los cuales son actualmente un pasivo crítico para la cuenca del río San Juan; en consideración, visto desde la gestión de riesgos ambientales, el proyecto de Quiulacocha se enfrenta al desafío del Drenaje Ácido de Roca (DAR) que emana de los relaves antiguos, contaminando suelos y fuentes hídricas subterráneas, dicho así, el cierre de minas convencional mediante coberturas de arcilla o geomembranas suele ser una solución moderadora que requiere mantenimiento perpetuo con el riesgo constante de filtraciones, mientras que, el beneficio que trae consigo la recuperación metalúrgica consiste en la remoción física del material reactivo, donde al pasar el relave por una planta de procesamiento, se eliminan las piritas y otros sulfuros que generan la acidez, donde este proceso ofrece un beneficio ambiental superior al cierre temprano, porque resuelve el problema de raíz, en lugar de intentar ocultarlo (Sotelo, 2021).

Según Villar (2023), la meta del proyecto es liberar áreas ocupadas por la relavera para su posterior rehabilitación urbana o industrial, algo que un cierre estático nunca lograría, pues el terreno seguiría siendo inútil para la expansión de la ciudad de Cerro de Pasco, cuya economía ha girado en torno a la minería por siglos y que hoy enfrenta una crisis de sostenibilidad urbana debido a los pasivos ambientales; la implementación de la planta de recuperación promete la creación de cientos de empleos directos e indirectos durante al menos 10 o 15 años de operación, además de generar regalías y canon para el Gobierno Regional de Pasco, por tanto, si se considera un “cierre” de minas convencional, en este contexto, se estaría hablando de la pérdida de una oportunidad histórica para revitalizar la economía local, puesto que, la actividad de “limpiar produciendo” permite

que la comunidad perciba la remediación como la transición hacia una minería más limpia y responsable, y no como el fin de la actividad económica.

De acuerdo con los cosos operativos, la recuperación metalúrgica de Quiulacocha requiere una inversión inicial alta en infraestructura de dragado y plantas de beneficio, pero estos costos se ven mitigados por la ausencia de gastos de minado tradicionales (perforación y voladura), ya que el material se encuentra en la superficie y está finamente molido, lo que ocasiona un mayor ahorro de energía y logística considerable si es comparado con una operación de tajo abierto nueva. No obstante, el riesgo reside en la volatilidad de los precios de los metales, donde una caída drástica en el precio del zinc podría comprometer la viabilidad del proyecto, inclinándolo la balanza hacia un cierre subsidiado por el Estado, pero lo cierto es que, bajo los precios actuales y las proyecciones de demanda de metales para la transición energética, el beneficio de extraer el cobre y el zinc residuales de Quiulacocha se posiciona como una opción financieramente superior y estratégicamente necesaria para el desarrollo de la región Pasco (Vásquez, 2020).

Por último, la integración del plan de cierre con la recuperación metalúrgica en Quiulacocha define un nuevo estándar para la minería en Perú, ya que, mientras que en proyectos como Shahuindo el debate se centra en cuándo detener la producción, en Quiulacocha el debate es cómo iniciarla para poder, finalmente, cerrar un capítulo de contaminación histórica. La situación actual del proyecto es de avance hacia los permisos de construcción tras exitosas campañas de perforación que confirmaron la rentabilidad del relave; en conclusión, el beneficio de la recuperación metalúrgica frente al cierre de minas tradicional en este proyecto es absoluto, a razón de que, permite la remediación ambiental efectiva, genera ingresos para el desarrollo local y elimina un pasivo que ha afectado la salud de la población de Cerro de Pasco durante generaciones, demostrando que la mejor forma de cerrar una mina del pasado es procesando sus residuos con tecnología del futuro.

Tabla 2. *Indicadores Claves de Factibilidad entre Shahuindo y Quiulacocha.*

Indicador	Shahuindo (Cajamarca)	Quiulacocha (Pasco)
Naturaleza del Proyecto	Extensión de mina de tajo abierto activa.	Reutilización de relaves (economía circular).
Principal Beneficio	Flujo de caja para financiar el cierre futuro.	Remediación de un pasivo ambiental histórico.
Factor de Factibilidad	Precio del Oro (Au) y eficiencia en arcillas.	Precio del Zinc/Plata y tecnología de dragado.
Impacto Social	Continuidad del empleo y canon regional.	Limpieza de la ciudad y salud pública.
Recomendación Final	Continuación (Expansión LOM al 2032).	Continuación (Inicio de reaprovechamiento).

Nota. Elaboración Propia.

En conclusión, de acuerdo con el análisis costo-beneficio de cada proyecto, se demuestra que la continuación de las actividades a través de la recuperación metalúrgica es técnica y financieramente más factible que un cierre prematuro o convencional, aunque por razones distintas: En Shahuindo, la extensión operativa permite diluir los costos de remediación futura y maximizar el valor de un activo presente, mientras que, en Quiulacocha la explotación de relaves es la única estrategia capaz de transformar un pasivo ambiental crítico en un proyecto de remediación autofinanciado; en ambos escenarios, el cierre técnico sin aprovechamiento metalúrgico resultaría en una pérdida neta de valor económico y una gestión de riesgos ambientales menos eficientes, confirmando que la minería moderna en Perú encuentra su mayor beneficio en la sinergia entre producción y remediación progresiva, asegurando que la sostenibilidad ambiental sea económicamente viable y socialmente responsable.

4.3. Impacto Socio-Ambiental

Desde tiempos anteriores la minería es considerada el motor económico de Perú, pero su legado ambiental, al mismo tiempo, representa uno de los desafíos más complejos para la sostenibilidades del país, pues los relaves mineros (desechos compuestos por roca molida, agua y reactivos químicos) se acumulan en grandes depósitos que, si no se gestionan adecuadamente, pueden llegar a alterar drásticamente los ecosistemas circundantes, como por supuesto, ha ocurrido en la historicidad de estas prácticas. En regiones andinas, vale decir, donde la actividad minera es intensiva, la rotura de presas o la filtración de lixiviados no solo degradan la calidad del suelo, también comprometen la salud de las comunidades locales que dependen de la agricultura y la ganadería, ocasionando que el impacto socio-ambiental se manifieste en tensiones civiles por el uso de recursos y el temor legítimo a la contaminación por metales pesados.

La orografía del Perú, caracterizada por pendientes pronunciadas y una alta actividad sísmica convierte a las presas de relaves en estructuras de alta vulnerabilidad que se hallan expuestas a que un fallo estructural o una filtración no controlada no solo implique un desastre ecológico inmediato, sino el desencadenamiento de un conflicto socio-ambiental prolongado donde las comunidades campesinas vean amenazado su derecho fundamental al agua limpia y a la seguridad alimentaria, ya que los metales pesados pueden bioacumularse en los pastizales y el ganado, afectando directamente su sustento y salud a largo plazo. Este impacto se ve agravado por la ubicación geográfica de estas operaciones, situadas frecuentemente en las cabeceras de cuenca, donde al ser estas zonas el origen de los ríos que abastecen tanto la sierra como la costa, cualquier contaminación por relaves tiene un efecto “aguas abajo” que puede extenderse por cientos de kilómetros (Pichasaca y García, 2019).

La reducción de la huella hídrica en la gran minería supone un indicador que más allá de la eficiencia técnica, sirve como un mecanismo de supervivencia ecosistémica y paz social en regiones de estrés hídrico

severo, al tiempo en que adquiere valor crítico e inclusive sagrado en las cabeceras de cuenca de la región andina, donde los relaves convencionales, dispuestos en forma de lodos de baja densidad, retienen grandes volúmenes de agua que quedan atrapados en la estructura del depósito, perdiéndose irremediablemente por evaporación o filtración hacia el subsuelo; en estos casos, la implementación de un circuito cerrado y tecnologías de relaves filtrados permiten que las operaciones mineras capturen y reutilicen el agua del proceso de manera casi infinita, disminuyendo en su mayoría la captación de agua fresca de fuentes naturales como glaciares, bofedales y lagunas altoandinas.

De acuerdo con Aparicio y Huamán (2021), la implementación de tecnologías de vanguardia, como los relaves espesados o los relaves filtrados, permiten recuperar hasta más del 90% del agua utilizada en el proceso de concentración para su recirculación inmediata en la planta, logrando esta eficiencia no nada más disminuir la presión sobre las fuentes hídricas naturales y los ecosistemas frágiles, pues su real propósito trasciende a la reducción del riesgo de fallas catastróficas por licuación en los depósitos. Esta optimización resulta vital, ya que muchas operaciones se sitúan en áreas donde el equilibrio hídrico es extremadamente frágil, por lo que, al reducir su consumo, la industria libera caudales críticos que son esenciales para mantener la biodiversidad local y garantizar el riego de cultivos ancestrales que sostienen la economía rural; técnicamente, esto se logra mediante el espesamiento de alta densidad que extrae el agua de los relaves antes de su disposición, evitando que este quede “secuestrado” y contaminando grandes presas de lodos, transformando la gestión del agua en un modelo de consumo lineal a uno de custodia circular (Sánchez y Castillo, 2020).

Dicho así, la disminución de la huella hídrica actúa como la herramienta más potente para la prevención de conflictos sociales en el Perú, donde el acceso al agua es el principal detonante de movilizaciones campesinas, es por ello que, cuando una empresa minera demuestra la reducción real y auditable en su demanda hídrica, se mitiga el temo legítimo de las

comunidades sobre la escasez de agua para sus actividades agropecuarias y el consumo humano, este enfoque genera una licencia social basada en hechos tangibles: la protección de los acuíferos y la seguridad de que la actividad extractiva no competirá deslealmente por el recurso vital, además, una menor huella hídrica implica a su vez un menor volumen de afluentes que tratar y descargar, lo que reduce la percepción de riesgo por contaminación química en los ríos.

En última instancia, la eficiencia hídrica permite que la minería coexista con la agricultura en un modelo de desarrollo territorial integrado, donde la tecnología sirve para blindar el derecho fundamental al agua y fortalecer la resiliencia de las comunidades frente a los efectos adversos del cambio climático en los Andes, no obstante, recuperar el agua es solo la mitad de la ecuación, pues la calidad de esa agua y la seguridad del residuo sólido restante dependen de la desulfuración por flotación, donde este proceso técnico interviene justo después de la concentración del mineral valioso, sometiendo a los relaves finales a una etapa adicional de celdas de flotación, siendo su objetivo capturar y retirar los sulfuros remanentes, como la pirita, que son los responsables de reaccionar con el oxígeno y el agua para generar ácido sulfúrico (Aparicio y Huamán, 2021). Al integrar la desulfurización, la mina no solo devuelve agua más limpia al ciclo de producción, pues además, genera un “relave verde” o inerte que es clave para una remediación de suelos exitosa, ya que elimina el riesgo de drenaje ácido a perpetuidad.

La implementación de la desulfuración por flotación, vale acotar, no se trata solo de una medida de prevención química, pues más bien actúa como un catalizador para la eficiencia hídrica extrema donde al retirar los sulfuros reactivos del flujo principal de relaves, el material resultante adquiere propiedades físicas más favorables para los procesos de sedimentación y filtrado. Los relaves desulfurizados suelen presentar una menor viscosidad y una mejor respuesta a los polímeros floculantes, lo que facilita la obtención de un “queque” de filtrado con menor contenido de humedad; esta optimización técnica permite que el agua recuperada

sea de mejor calidad, con menores concentraciones de sulfatos y metales disueltos, lo que reduce los costos de tratamiento antes de su recirculación al proceso minero, cerrando efectivamente el ciclo del agua en regiones con alto estrés hídrico.

Desde la perspectiva de la remediación de suelos, la desulfurización transforma radicalmente la estrategia, tradicionalmente, los depósitos de relaves requieren coberturas complejas y costosas (capas de arcilla, geomembranas y suelos orgánicos) para evitar que el oxígeno y el agua entren en contacto con la pirita y generen ácido, de este modo, al disponer de relaves previamente desulfurizados, estos pueden utilizarse como “suelos artificiales. Al carecer de potencial acidificante, es posible mezclar estos residuos con enmiendas orgánicas para permitir el crecimiento directo de especies vegetales nativas, cosa además de acelerar la estabilización física del depósito contra la erosión eólica e hídrica, permite una integración paisajística más natural con el entorno original de la puna o los valles interandinos (Pichasaca y García, 2019).

Este enfoque tecnológico mitiga uno de los temores más persistentes de las poblaciones rurales en el Perú: La contaminación invisible y de largo plazo, donde el Drenaje Ácido de Mina es un proceso que puede durar siglos si no se controla, convirtiéndose en una herencia tóxica para las futuras generaciones, dicho así, la desulfurización ofrece una garantía tangible de seguridad, pues al demostrar mediante pruebas de laboratorio que el relave es “no generador de ácido”, las empresas mineras pueden construir una base de confianza con las comunidades; esta transferencia reduce la conflictividad social, ya que el riesgo de que los metales pesados migren hacia los pastizales o bofedales (fundamentales para la ganadería de camélidos y ovinos) se reduce a niveles mínimos, protegiendo la cadena trófica local.

La adopción de estas técnicas un cambio de estas técnicas representa un cambio de paradigma hacia la minería circular y responsable, pues la desulfurización permite que el concentrado de pirita recuperado, que antes

era un residuo peligroso, pueda ser procesado en plantas metalúrgicas para la producción de ácido sulfúrico comercial o para la recuperación de metales preciosos (como oro y cobre) que suelen estar atrapados en la matriz sulfurosa. Así, al convertir un pasivo en un activo o en un insumo inerte para la construcción de carreteras y ladrillos, se reduce a su vez la extensión territorial ocupada por los depósitos de relaves, siendo este aprovechamiento integral del recurso mineral la respuesta más sólida ante las demandas de una sociedad que exige una minería que aparte de generar riqueza económica, deje territorio sano y productivo tras el cese de sus operaciones (Pichasaca y García, 2019).

Visto así, la integración de la reducción de la huella hídrica y la desulfurización de relaves presenta el avance tecnológico más significativo hacia una minería de “impacto neto positivo” en el Perú, al combinar la recuperación extrema de agua mediante relaves filtrados con la eliminación de sulfuros reactivos a través de la flotación, se logra quebrar el ciclo de degradación ambiental histórico de la industria; esta sinergia además de optimizar el uso de un recurso vital y escaso en los Andes, logra transformar un desecho masivo y peligroso en un material químicamente apto para la remediación de suelos. Un relave desulfurizado permite una rehabilitación del paisaje mucho más orgánica y acelerada, ya que, al carecer de potencial acidificante, puede actuar como base para tecnosuelos que sustenten la vegetación nativa, eliminando la necesidad de coberturas sintéticas costosas y garantizando que el cierre de la mina no sea una carga perpetua para el Estado y la sociedad.

En perspectiva, este enfoque dual actúa como un pilar fundamental para la resolución de conflictos y la construcción de confianza territorial, donde la capacidad de una operación minera para demostrar que no compite por el agua de las comunidades y que el residuo final es inerte, reduce en gran medida la percepción de riesgo y la ansiedad social ligada a la salud pública y la seguridad alimentaria. En un país donde la agricultura y la minería a menudo colisionan por el uso del suelo y el agua, la desulfurización y la eficiencia hídrica ofrecen una plataforma de coexistencia real, razón

por la que, al mitigar el Drenaje Ácido de Mina (DAM) y proteger las cuencas hidrográficas, la industria además de cumplir con los estándares de cumplimiento normativo también asegura su aprobación continua en sociedad, garantizando que el legado minero sea un territorio recuperado, productivo y seguro.

4.4. Conclusiones y Hoja de Ruta para la Investigación Científica en la Minería Peruana al 2030.

La industria minera en el Perú, históricamente centrada en la extracción de yacimientos polimetálicos de alta ley, enfrenta hoy el desafío crítico de gestionar un volumen creciente de pasivos ambientales acumulados durante décadas, ocasionando que, estos depósitos de relaves lejos de ser residuos inertes, constituyen verdaderos “yacimientos secundarios” que albergan un potencial económico significativo debidos a las ineficiencias de las tecnologías de procesamiento del siglo XX. Es por ello que, el propósito de esta revisión documental identifica la heterogeneidad mineralógica como uno de los obstáculos técnicos más críticos para el aprovechamiento de relaves polimetálicos en Perú, dado que estos depósitos no son cuerpos geológicos uniformes, sino acumulaciones antropogénicas con una variabilidad extrema, originándose esta complejidad tanto en la mineralogía primaria del yacimiento, como en las ineficiencias de los procesos metalúrgicos de tiempos pasados, que dejaron atrás partículas valiosas atrapadas en matrices de ganga (Castilla y Vizcarra, 2021).

En el contexto peruano, es común encontrar que metales como el cobre, el zinc o la plata se hallan en fracciones de tamaño de partículas ultra finas e inclusive encapsuladas mecánicamente dentro de minerales de piritita o arsenopirita, donde esta disposición textural impide que los reactivos de flotación convencionales entren en contacto con la superficie del metal de interés, lo que obliga a la implementación de etapas de pre-tratamientos químicos complejos que, a menudo, comprometen la rentabilidad

económica del proyecto si no se cuenta con una caracterización previa de alta precisión mediante técnicas específicas, como la difracción de rayos X. Así, la variabilidad mineralógica se ve exacerbada por los fenómenos de alteración post-deposicional o meteorización química que ocurren dentro de las presas de relaves o a lo largo de los años, donde la actividad hídrica o los cambios térmicos mercados generan condiciones ácidas que alteran la estabilidad de los minerales primarios, inhibiendo la recuperación por métodos hidrometalúrgicos tradicionales, exigiendo el desarrollo de diagramas de flujo específicos y adaptativos.

Conjunto a ello, se concluye a su vez que la influencia del tiempo y la meteorización en los depósitos de relaves polimetálicos peruanos no es un fenómeno simple de degradación física, puesto que el mineral pasa por una transformación química profunda que redefine la metalurgia del yacimiento secundario, donde a medida que los relaves quedan expuestos a las condiciones atmosféricas cíclicas de la región andina, los sulfuros remanente, especialmente la pirita, inician un proceso de oxidación exotérmica que altera la estabilidad mineral original, dando paso a la formación de minerales secundarios que actúan como “trampas” geoquímicas. Esta evolución temporal dicta que la ventana de oportunidad para la recuperación económica de un relave se estrecha conforme aumenta su antigüedad, debido a que la pasivación de las superficies metálicas por capas de óxido dificulta la selectividad en los procesos de flotación, lo que conlleva a considerar que, la caracterización de un pasivo minero no puede ser estática, sino adaptativa, mientras se exige al sistema minero diseñar estrategias de retratamiento diferenciadas.

La revisión documental subraya que, más allá de los metales base como el cobre o el zinc, muchos depósitos en Perú albergan concentraciones de elementos como el germanio (Ge), galio (Ga) y tierras raras (REE), los cuales en el contexto de la transición energética global, han adquirido un valor de mercado superior debido a su escasez, lo cual concluye en que, la viabilidad económica de los proyectos de retratamiento en Perú no deben depender exclusivamente de la fluctuación de los preciosos de

metales mayores cuando se tiene la capacidad técnica para separar estos subproductos de alto valor con la capacidad de actuar como un crédito económico que compense los elevados costos operativos de la remediación ambiental (Castilla y Vizcarra, 2021).

En estos casos, la identificación de los metales críticos y estratégicos en los relaves puede representar un cambio de paradigma en la valoración de pasivos mineros, transformando lo que tradicionalmente se consideraba un desecho en una reserva estratégica de recursos de alta tecnología, no obstante, indican Castillo y Santibáñez (2020), el aprovechamiento de este potencial económico enfrenta el reto de la especiación química, requiriendo métodos de refinación extremadamente selectivos para ser comercializables; pese a estas dificultades, la investigación indica que la recuperación de estos elementos diversifican la matriz de exportación minera del país, posicionando a Perú como un actor relevante en la cadena de suministro de componentes para tecnologías limpias, por lo tanto, el análisis de relaves supone necesariamente una evolución hacia caracterizaciones multielementales exhaustivas, que no dejen perder el enorme capital geológico que representan.

El eslabón final para una minería sostenible en Perú conlleva la integración de la economía circular en la gestión de relaves polimetálicos, por lo que, tal proyección requiere de un tratamiento de pasivos que no concluya en la mera extracción de los metales, sino que apunte a la transformación total del residuo en materia prima para otras industrias (Julca, 2022); esta sinergia permite que, tras la recuperación de elementos valiosos mediante procesos hidrometalúrgicos o de flotación, la fracción mineral remanente sea acondicionada para la fabricación de materiales de construcción como ladrillos, cerámicos o geopolímeros de alta resistencia, logrando este enfoque mitigar el riesgo ambiental al reducir el volumen de desechos que requieren almacenamiento perpetuo y a su vez, eliminar la necesidad de canteras de agregados naturales, con lo que se disminuye la huella de carbono global.

Agregado a ello, aunque Perú posee un potencial geológico excepcional en sus pasivos, su aprovechamiento integral se ve frenado por un marco regulatorio que históricamente ha priorizado el confinamiento y el cierre pasivo sobre la valorización activa, lo que ha creado una brecha tecnológica y normativa en el campo minero, pues a pesar de los avances en tecnologías de desaguado (relaves en pasta y filtrados) y el uso de sensores en tiempo real para la estabilidad física, aún existe una desconexión entre las normativas de cierre de minas y los principios de la economía circular, donde las leyes vigentes a menudo no ofrecen incentivos claros para que terceros procesen relaves antiguos, y haciendo de la obtención de permisos para “minería secundaria” una tarea tan compleja como obtener los de un proyecto nuevos.

Esta brecha exige una actualización normativa que simplifique la reclasificación de los relaves de “desechos” a “recursos”, acompañada de una inversión agresiva en centros de pilotaje tecnológico que permitan escalar las pruebas de laboratorio (como la lixiviación selectiva de metales críticos) a niveles industriales de manera rentable y segura, por tanto, para consolidar una minería de vanguardia al finalizar la presente década, debe estructurarse una hoja de ruta para la investigación científica en minería peruana, con miras al 2023, donde se transite de una gestión de riesgos hacia la generación sistémica de valor, siendo imperativo que dentro de este periodo, se estandaricen los protocolos de caracterización multielemental que incluyan metales estratégicos para la transición energética y se reevalúe el potencial de otros enfoques metalúrgicos:

1. El primer paso de esta hoja de ruta debe centrarse pues en la revalorización del inventario mineralógico nacional, enfocándose en elementos de tierras raras y metales clave para la descarbonización global, priorizando en la investigación científica el desarrollo de protocolos estandarizados de caracterización multielemental que utilicen microanálisis electrónico y espectroscopía de masas, siendo el objetivo identificar la “firma mineralógica” de los depósitos de relaves en las regiones emblemáticas del país (como Pasco y

Junín), determinando la viabilidad de recuperar elementos como el germanio y el cobalto, donde al entender la especiación química de estos elementos, puede Perú posicionarse como un proveedor estratégico para la industria, transformando pasivos ambientales en reservas estratégicas de alta tecnología.

2. Una vez mapeado el potencial, la investigación debe migrar hacia el desarrollo de tecnologías de separación de alta selectividad para partículas de tamaño sub-micrónico, que son las que mayoritariamente escapan a los métodos de flotación actuales, posicionándose en un periodo venidero (2027-2028) con el fomento del estudio de la biolixiviación extrema (como el uso de microorganismos acidófilos adaptados a la altura) y la flotación por aire disuelto para recuperar valores metálicos de relaves antiguos y oxidados. Estas soluciones deben ser diseñadas específicamente para las condiciones geográficas de Perú, donde la baja presión de oxígeno y las temperaturas extremas de la cordillera desafían los procesos metalúrgicos convencionales, siendo la meta alcanzar una eficiencia de recuperación superior al 15% adicional sobre los estándares actuales, haciendo que el retratamiento de pasivos sea financieramente autónomo.
3. La investigación científica, como tercer pilar, deberá enfocarse en la desulfuración total de los relaves sobrantes para su conversión en precursores de geopolímeros y materiales cementantes verdes, todo ello desde la convergencia entre la minería y la ingeniería de materiales bajo el enfoque de economía circular, dado que, al remover la pirita y otros sulfuros reactivos, el material estéril se vuelve inerte y apto para ser utilizado en la construcción de infraestructura nacional (carreteras, viviendas sociales y presas), permitiendo este avance que para el año 2029 las nuevas operaciones mineras en Perú

puedan proyectar un diseño de “depósito cero” donde el 100% de la ganga procesada tenga un mercado secundario, eliminando el riesgo de colapso de presas de relaves, en lo que se reduce a su vez la huella de carbono del sector construcción.

4. Por último, la hoja de ruta debe terminar con la integración de una minería evolucionada en la gestión de pasivos ambientales, teniendo pues que investigarse sobre la implementación de Gemelos Digitales que utilicen redes de sensores IoT y aprendizaje automático para monitorear en tiempo real la estabilidad química y física de los depósitos de relaves remanentes. Estos modelos predictivos permitirán simular escenarios de cambio climático, como inundaciones extremas o sismos, y prevenir desastres ambientales mediante alertas tempranas basadas en datos; en teoría, para el 2030, el sistema científico peruano debería contar con una plataforma nacional de datos geocientíficos abiertos, donde la transparencia en la gestión de residuos mineros fortalezca la licencia social y atraiga inversiones de capital ético y sostenible.

Fundamentalmente, el futuro de la minería peruana al 2030 no posee como único propósito la expansión de la frontera extractiva, al contrario, se instaure como una guía hacia la sofisticación tecnológica de su gestión de residuos a sabiendas de que la transición hacia una minería de valor total exige que la investigación científica deje de ser un esfuerzo aislado de laboratorio para convertirse en un pilar estratégico de la política nacional, concluyendo en que la viabilidad del sector dependerá de su capacidad para transformar los pasivos mineros en fuentes de metales críticos necesarios para la transición energética global, integrando procesos de economía circular que eliminen por fin el concepto de “desecho” en la actividad minera; si se alcanzara este nivel de madurez tecnológica, el Perú además de mitigar sus riesgos ambientales históricos, también se posicionaría como un referente de innovación en la industria minera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, A. S., & Naidu, R. (2010). Environmental Characterization of Mine Tailings. *Developments in Environmental Science*, Vol. 10.

Activos Mineros S.A.C. (2024). Plan Estratégico Institucional: Remediación de Pasivos Mineros de Alto Riesgo en la Cuenca de Pasco. Lima, Perú.

Activos Mineros S.A.C. (2025). Estudio de Retorno Social de la Inversión (SROI). <https://www.amsac.pe/wp-content/uploads/2025/04/1.-Estudio-SEROI-AMSAC.pdf>

Aguedo, A. (2025). Poderosa: Casos destacados. DEEV. <https://deev.pe/wp-content/uploads/2025/11/Poderosa-Antony-Aguedo-Casos-Destacados.pdf>

Anida Yupari (2003). Informe “Pasivos Ambientales Mineros en Sudamérica”. Informe elaborado para la CEPAL, BGR, SERNAGEOMIN, Santiago de Chile.

Annca, E. (2024). Reestructuración de un Sistema de Muestreo Automático para Optimizar el Proceso de Recuperación en Relaves en la Compañía Minera Areas, unidad operativa Inmaculada, distrito de Oyolo, provincia Páucar del Sara Sara, Ayacucho. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica. <https://repositorio.continental.edu.pe/backend/api/>

core/bitstreams/80264501-a8bf-4a0e-a4a7-27541fede78a/content

- Aparicio, J. & Huamán, R. (2021). Gestión de Relaves Mineros y su Impacto en los Recursos Hídricos en las Zonas Altoandinas del Perú. Editorial Universitaria de Ingeniería.
- Arias, F. (2012). El Proyecto de Investigación: Introducción a la Metodología Científica (6ta ed.). Editorial Episteme.
- Asencios, A. A. (2021). Evaluación Técnica del Aprovechamiento de Relaves Auríferos como Materiales de Construcción Prefabricados Mediante Geopolímeros. SRK Consulting / SNMPE.
- Buenaventura, C. M. (2022). Memoria Anual 2021: Operaciones en Sociedad Minera El Brocal S.A.A. Lima, Perú: Gerencia de Comunicaciones.
- Bustamante, J. P. (2021). Geoquímica ambiental y gestión de residuos mineros: De la caracterización a la estabilidad química. Editorial Técnica Minera.
- Bustamante, R. & Labbé, M. (2017). Manual de Muestreo de Relaves: Guía para la caracterización de depósitos de relaves. SERNAGEOMIN.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Ciencia e ingeniería de materiales (10.^a ed.). Reverté.
- Castilla, M. & Vizcarra, T. (2021). Caracterización Mineralógica y Metalúrgica de Pasivos Ambientales Mineros en la Región De Pasco: Desafíos para el Retratamiento. Revista de la Facultad de Ingeniería de Minas (UNMSM), 24(48), 15-28.
- Castillo, J. & Santibáñez, R. (2020). Potencial de Recuperación de Metales Estratégicos (Indio y Germanio) a Partir de Relaves de Flotación Selectiva

en la Sierra Central Del Perú. Revista de Investigaciones de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica (UNMSM), 18(2), 85-94.

Cerro de Pasco Resources Inc. (2023). Informe Técnico sobre el Depósito de Relaves de Quiulacocha: Actualización de la Estimación de Recursos Minerales. Montreal, Canadá.

Chereque, J. A. (2019). Optimización de la Recuperación de Cobre en la Planta Concentradora Marcapunta - Sociedad Minera El Brocal S.A.A. (Tesis de Ingeniería Metalúrgica). Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, Perú.

Coetzee, L. L., et al. (2011). Automated Chemical and Mineralogical Characterisation. Minerals Engineering, 24(12), 1246-1251.

Congreso de la República. (2021). Ley N° 31211: Ley que dispone la adecuación del transporte y disposición final de relaves. El Peruano.

Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2014). Elements of X-Ray Diffraction (3rd ed.). Pearson Education Limited

Egboka, B. C., & Okoyeh, E. I. (2022). Environmental Geochemistry of Mine Tailings: Management and Remediation Strategies for Sustainable Mining. Springer Nature.

Evans, C. L. (2010). Process Mineralogy and its Application in Mineral Processing. JKMRC Monograph.

Gabriel Tuesta, E., & Huaypar Vásquez, Y. (2008). Aplicación de la técnica de difracción de rayos X (DRX) en la industria minera [Ponencia]. XIX Congreso Peruano de Geología, Cusco, Perú. <https://app.ingemmet.gob.pe/>

biblioteca/pdf/CNM9-011.pdf

Gutiérrez, R. & Alva, J. (2021). Análisis de la Estabilidad de Taludes en la Zona de Tajo Abierto: Caso Unidad Minera Shahuindo. Universidad Nacional de Cajamarca.

Guzmán, A. & Reyes, M. (2018). Tratamiento de Relaves Cianurados para la Recuperación de Oro mediante el Proceso Merrill-Crowe en la Zona de Pataz. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ingeniería, Trujillo, Perú.

Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, C. P. (2018). Metodología de la Investigación: Las Rutas Cuantitativa, Cualitativa y Mixta. McGraw-Hill.

Higueras, P. y Oyarzun, R. 2004. Curso de Mineralogía y Geoquímica Ambiental. http://www.uclm.es/users/higueras/mga/Port_MGA.htm.

<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/668031>

Ildefonso, R. (2020). Gestión de Pasivos Ambientales Mineros y su Potencial de Reaprovechamiento en el Perú. Revista de Glaciología y Recursos Hídricos.

Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2023). Padrón Minero Nacional 2023. https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/4368/1/Ingemmet-Padron_Minero_Nacional-2023.pdf

Julca, D. (2022). La Economía Circular en la Minería Peruana. [Archivo PDF] http://data.sedema.cdmx.gob.mx:9000/circular/storage/app/media/publicaciones/S2200222_es.pdf

- Lillo, J., Oyarzun, R., Higuera, P., & Carretero, M. I. (2010). Geoquímica ambiental. Aula2punto.net; Universidad Complutense de Madrid. https://www.aulados.net/GEMM/Documentos/San_Quintin_Innova/Geoquimica_ambiental.pdf
- Manrique, M., & Agurto, A. (2022). Caracterización geoquímica y mineralógica de relaves mineros La Ciénaga – La Libertad. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3702>
- Ministerio de Energía y Minas. (2021). Guía para el manejo de relaves mineros en el Perú. Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros. Lima, Perú.
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). Anuario Minero del Perú 2022. Dirección General de Minería.
- Ministerio de Energía y Minas. (2024). Resolución Ministerial N° 351-2024-MINEM/DM. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6908387/5966041-rm-351-2024-minem-dm.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). Glosario Técnico Minero. Agencia Nacional de Minería. República de Colombia. <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>
- MINSUS. (2024). Reaprovechamiento de Relaves Abandonados: Experiencias y Resultados de la Cooperación Técnica con la Empresa Minera SMRL - Acumulación los Rosales en Puno, Perú. Proyecto Cooperación Regional para la gestión sustentable de los recursos mineros en los países andinos (BGR/GIZ).

- Newbury, D. E., & Ritchie, N. W. (2013). Is SEM/EDS microanalysis "quantitative"? Scanning, 35(3), 141-168.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2024). Reporte OEFA 2024. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/8976704/7386147-reporte-oeфа-2024.pdf>
- Paucar, J. & Vera, L. (2021). La Economía Circular como Estrategia de Sostenibilidad en la Minería Peruana. Revista de Gestión Energética y Ambiental.
- Peña, V., Duran, C., Palominos, F., Benavides, R., & Carrasco, R. (2021). Towards tailings recycled production technologies. IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON 2021. <https://doi.org/10.1109/CHILECON54041.2021.9702970>
- Pichasaca, J. & García, C. (2019). Evaluación de la Desulfurización por Flotación de Relaves Mineros como Estrategia de Prevención de Drenaje Ácido. Revista De Metalurgia y Medio Ambiente, 14(2), 45-58.
- Pitard, F. F. (2019). Theory of Sampling and Sampling Practice. 3rd Edition, CRC Press.
- Potts, P. J., & West, M. (2008). Portable X-ray Fluorescence Spectrometry: Capabilities for In Situ Analysis. RSC Publishing.
- Ramos, R. & Santisteban, J. (2019). Evaluación de la Heterogeneidad Textural en Relaves Polimetálicos y su Impacto en la Recuperación por Flotación Selectiva. Revista de Metalurgia y Materiales, 12(2), 45-59.

- Rodríguez, J. & Vigil, M. (2018). Modelos de Remediación Voluntaria de Pasivos Ambientales Mineros: El Caso Exitoso de Colquirrumi en Cajamarca. (Tesis de Maestría en Gestión Ambiental). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.
- Rosales Suárez, S. Y. (2024). Un llamado a la remediación de la historia del Perú: pasivos ambientales mineros. *Justicia Ambiental*, 4(6), 79-110. <https://doi.org/10.35292/justiciaambiental.v4i6.886>
- Ruiz, K. & Vargas, L. (2026). La Economía Circular y su Relación con la Competitividad en las Exportaciones de las Empresas Mineras Peruanas de Cobre SPN 2603.00.00.00 a China en el Período 2016-2021. [Archivo PDF]
- Sánchez, E. (2019). Optimización del Proceso de Lixiviación en Pilas para Minerales de Baja Ley de Oro en la Unidad Shahuindo, Cajamarca. (Tesis de Ingeniería de Minas). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Sánchez, F. (2019). Economía de la Remediación Minera en el Perú: Un Enfoque de Costo-Beneficio para la Gran Minería. Editorial Académica Española.
- Sánchez, M. & Castillo, L. (2020). Optimización de la Huella Hídrica mediante el Uso de Relaves Filtrados en la Minería Polimetálica del Centro del Perú. Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2018). *Principles of Instrumental Analysis*. (7^a ed.). Cengage Learning.
- Solano, J. (2019). Tratamiento de Relaves Mineros: Una Revisión Sistemática en la Literatura Minera de los Últimos 10 Años [Tesis de grado, Universidad

Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN.

Sotelo, M. (2021). Estudio Geofísico y Metalúrgico de los Depósitos de Relaves de Quiulacocha para su Puesta en Valor. Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

Sutherland, D. N., & Gottlieb, P. (1991). Application of automated quantitative mineralogy in mineral processing. *Minerals Engineering*

Valeriano, J. (2022). Tecnologías Emergentes para el Retratamiento de Relaves de Flotación en la Minería Polimetálica Peruana. Editorial Universitaria.

Vásquez, A. (2020). Minería y Conflicto Social en Cajamarca: Un Análisis de la Sostenibilidad Económica. Editorial Horizonte.

Vásquez, J. & Tello, P. (2021). Potencial de Recuperación de Valores Metálicos en las Relaveras de la Sierra Central del Perú mediante Nuevas Tecnologías de Flotación. *Revista de la Facultad de Ingeniería de Minas (UN-MSM)*, 24(48), 15-28.

Vick, S. G. (1990). Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams. BiTech Publishers.

Villanueva, M. Balcazar, J. Nuñez, J. & Román, B. (2021). Utilización de Ensayos CPTu para la Caracterización de Relaves Antiguos de Minas de Cobre. SRK Consulting.

Villar, E. (2023). Impacto Socioeconómico de la Remediación de Pasivos Mineros en Cerro de Pasco. Editorial Horizonte Minero.



EDITORIAL
NAVEGANTE