



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE CIERRE DE MINA EN RELAVERAS
ANTIGUAS Y REHABILITACIÓN DE GALERIAS EN LA UNIDAD MINERA
“PUCARRAJO”, HUALLANCA – ANCASH, 2020

Línea de investigación:

Tecnología para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de
Ingeniera Ambiental

Autora:

Mejía Pajuelo, Katty Maghaly

Asesora:

Paricoto Simon, María Mercedes

ORCID: 0000-0002-7675-7558

Jurado:

Gómez Escriba, Benigno

Herrera Diaz, Marco Antonio

Aguirre Cordero, Rogelio

Lima - Perú

2024



IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE CIERRE DE MINA EN RELAVERAS ANTIGUAS Y REHABILITACIÓN DE GALERIAS EN LA UNIDAD MINERA "PUCARRAJO", HUALLANCA – ANCASH, 2020

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

9%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	bdigital.upme.gov.co Fuente de Internet	1%
5	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	1%
6	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unamba.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	www.scribd.com Fuente de Internet	<1%



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE CIERRE DE MINA EN RELAVERAS ANTIGUAS

Y REHABILITACIÓN DE GALERIAS EN LA UNIDAD MINERA “PUCARRAJO”,

HUALLANCA – ANCASH, 2020

Línea de investigación:

Tecnología para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de Ingeniera Ambiental

Autora:

Mejía Pajuelo, Katty Maghaly

Asesora:

Paricoto Simon, María Mercedes

ORCID: 0000-0002-7675-7558

Jurado:

Gómez Escriba, Benigno

Herrera Diaz, Marco Antonio

Aguirre Cordero, Rogelio

Lima – Perú

2024

Dedicatoria

A mis queridos hijos, Fabiana y Matheo quienes son mi mayor fuente de inspiración y motivación. A mis padres, a mi esposo y hermanos, este trabajo es el reflejo de su amor y apoyo incondicional.

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, por la lucha constante para formarme en valores y hacerme una persona de bien. A mi esposo e hijos por acompañarme y brindarme su amor incondicional en cada momento de mi vida. A mis hermanos por creer en mí, por su amor y apoyo incondicional.

Agradezco a mis docentes universitarios por los conocimientos que pusieron a mi disposición, por su guía, paciencia y valiosos consejos a lo largo de todo el proceso. Su experiencia y dedicación han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, agradezco a todas las personas que me apoyaron y siempre creyeron en mí. A todos ustedes, muchas gracias.

ÍNDICE

RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
I. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Trayectoria del autor.....	11
1.2. Descripción de la empresa.....	12
1.2.1 Misión.....	12
1.2.2. Visión.....	12
1.3. Organigrama de la empresa.....	13
1.4. Áreas y funciones desempeñadas.....	14
II. IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE CIERRE DE MINA EN RELAVERAS ANTIGUAS Y REHABILITACIÓN DE GALERIAS EN LA UNIDAD MINERA “PUCARRAJO”, HUALLANCA – ANCASH, 2020.....	15
2.1. Generalidades.....	15
2.2. Marco legal.....	16
2.3. Marco teórico.....	16
2.4. Objetivos.....	18
2.4.1. Objetivo general.....	18
2.4.2. Objetivos específicos.....	18
2.5. Ubicación.....	19
2.6. Antecedentes.....	21

	4
2.6.1. Antecedentes internacionales.....	21
2.6.2. Antecedentes nacionales.....	23
2.7. Metodología.....	25
2.7.1. Descripción del área del proyecto.....	26
2.7.2. Características de la mina “Pucarrajo”.....	30
2.7.3. Evaluación del estado de la Relavera Antigua.....	31
2.7.4. Evaluación del estado de las Galerías A y B.....	33
2.8. Procedimiento.....	35
2.8.1. Diseño técnico de rehabilitación para las relaveras antiguas.....	38
2.8.1.1. Manejo de residuos sólidos: clasificación y separación.....	38
2.8.1.2. Capacitación al personal sobre el manejo adecuado de los residuos.....	39
2.8.1.3. Instalación de mantas rapid-cover en relaveras antiguas.....	41
2.8.1.4. Reforestación de las zonas aledañas.....	43
2.8.2. Desarrollar un plan de recuperación ambiental para las galerías A y B.....	44
2.8.2.1. Cruzar el Río Baden en épocas de lluvia.....	45
2.8.2.2. Mantenimiento de la vía de acceso hasta la bocamina de la Galería “A”.....	46
2.8.2.3. Encausamiento del agua de lluvia mediante canales de coronación.....	47

2.8.2.4. Implementación de un sedimentador y sistema de tratamiento de agua ácida.....	48
2.8.2.5. Encausamiento del agua de vertimiento de la galería “a” hacia el río.....	48
2.8.2.6. Implementación de señalización desde el acceso y en las diferentes labores mineras.....	49
2.8.2.7. Implementación de tranqueras, rejas y puertas para el control de ingreso de personas no autorizadas.....	50
2.8.2.8. Construcción de un sedimentador para contener los finos acumulados en la bocamina.....	51
2.8.2.9. Realización de la limpieza de la carga (material grueso y roca) y del lodo acumulado.....	52
2.9. Construcción de cunetas para el encausamiento de agua de mina (ácida).....	53
2.10. Realizar el desmontaje de la tolva de madera en la galería.....	54
2.11. Captación y encausamiento de filtración de agua de niveles superiores.....	54
2.12. Implementar medidas para mitigar la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.....	57
2.13. Resultados.....	58
2.14. Discusión de resultados.....	68

III. APORTES MÁS DESTACABLES A LA EMPRESA.....	70
IV. CONCLUSIONES.....	71
V. RECOMENDACIONES.....	73
VI. REFERENCIAS.....	74
VII. ANEXOS.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de ubicación del área de estudio	19
Tabla 2. Caudales generados en la microcuenca zona de proyecto.....	26
Tabla 3. Clasificación de los suelos.....	27
Tabla 4. Estación pluviométrica de la zona de proyecto.....	29
Tabla 5. Ubicación de las bocaminas.....	31
Tabla 6. Equipos y herramientas.....	33
Tabla 7. Equipos usados en el proceso de inspección.....	34
Tabla 8. Mediciones de Oxígeno y Otros Gases en Galerías A y B.....	58
Tabla 9. Condiciones de Estabilidad Estructural en Galerías A y B.....	59
Tabla 10. Calidad del Agua de Mina Vertida en Galerías A y B.....	60
Tabla 11. Condiciones de Acceso y Seguridad en Galerías A y B.....	61
Tabla 12. Condiciones Ambientales y Geotécnicas.....	62
Tabla 13. Impacto Ambiental y Social.....	63
Tabla 14. Medidas de Mitigación Implementadas.....	64
Tabla 15. Evaluación de Cumplimiento Normativo.....	65
Tabla 16. Eficiencia de las Medidas de Control Implementadas.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Organigrama de la empresa HANDYMAN S.A.C.....	13
Figura 2. Ubicación geográfica.....	19
Figura 3. Rutas de acceso a la UM Pucarrajo.....	21
Figura 4. Flujograma de la metodología de la implementación del Plan de Cierre de mina en Relaveras Antiguas y Galerías.....	25
Figura 5. Ubicación de las Relaveras Antiguas.....	30
Figura 6. Ficha técnica de la inspección a la galería A.....	37
Figura 7. Ficha técnica de la inspección a la galería B.....	37
Figura 8. Clasificación de los residuos sólidos.....	39
Figura 9. Capacitación al personal en Manejo de residuos sólidos.....	41
Figura 10. Instalación de Mantas Rapid-Cover.....	42
Figura 11. Procedimiento para el mantenimiento del cauce del río Baden.....	45
Figura 12. Procedimiento para el mantenimiento de la vía de acceso hasta la bocamina de la galería “A”.....	47
Figura 13. Construcción de pozas de captación.....	56
Figura 14. Pozas de captación para derivación de agua desmontera E-11, E-12, E-13 A Natividad.....	56

RESUMEN

El presente informe tiene como **objetivo** describir la experiencia profesional de la autora en el ámbito de la ingeniería ambiental, específicamente en el proyecto de implementación del plan de cierre de mina en Relaveras Antiguas y la rehabilitación de las Galerías A y B en la Unidad Minera Pucarrajo - Huallanca, para la empresa minera Nyrstar Ancash S.A, ubicado en el Departamento de Ancash. La **metodología** en la etapa preliminar de este proyecto fue la revisión de información de aspectos físicos y geotécnicos de la zona, el ingreso a la unidad minera para los estudios de campo, toma de muestras y análisis para obtener y procesar los resultados, posteriormente elaborando el informe técnico con las actividades a realizar tanto para el manejo adecuado de los residuos contaminantes en el área de las Relaveras Antiguas con la instalación de mantas impermeables, Rapid Cover, de forma permanente, el cual es un laminado manufacturado a base de una trama intermedia de fibras de polietileno de baja densidad; así mismo se realizó trabajos de rehabilitación en las galerías A y B de la unidad minera Pucarrajo Como **resultados** se logró rehabilitar las áreas utilizadas por la unidad minera, los cuales fueron favorables ya que se obtuvo una contención segura de todo los residuos que han sido generados durante la explotación. **Concluyendo** con los trabajos propuestos a la empresa que eran consideradas las debilidades y amenazas en la planificación de cierre de minas, cumpliendo con las leyes y regulaciones ambientales locales y nacionales.

Palabras clave: Unidad minera Pucarrajo, mantas impermeables, relaveras, rehabilitación.

ABSTRAC

The purpose of this report is to describe the professional experience of the author in the field of environmental engineering, specifically in the project for the implementation of the mine closure plan in Relaveras Antiguas and the rehabilitation of Galleries A and B in the Pucarrajo - Huallanca Mining Unit, for the mining company Nyrstar Ancash S.A., located in the Department of Ancash. The methodology in the preliminary stage of this project was the review of information on physical and geotechnical aspects of the area, entering the mining unit for field studies, sampling and analysis to obtain and process the results, then preparing the technical report with the activities to be carried out for the proper management of contaminating waste in the area of the Old Relics with the installation of impermeable blankets, Rapid Cover, permanently, which is a laminate manufactured based on an intermediate weft of low density polyethylene fibers; Likewise, rehabilitation works were carried out in galleries A and B of the Pucarrajo mining unit. As a result, the areas used by the mining unit were rehabilitated, which were favorable since all the waste generated during the exploitation was safely contained. Concluding with the works proposed to the company that were considered the weaknesses and threats in the mine closure planning, complying with the laws.

Keywords: Pucarrajo mining unit, impermeable blankets, tailings, rehabilitation.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Trayectoria de autor

La autora, es bachiller en ingeniería ambiental de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo (FIGAE) de la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV), cuenta con 14 años de experiencia. A continuación se detalla su trayectoria:

En enero del 2009, en la Compañía Minera Santa Luisa S.A, empresa dedicada a la producción de concentrados de zinc, plomo y cobre, desempeñándome como Asistente del Departamento de Seguridad y Medio Ambiente, apoyando en trabajos de campo y gabinete, muestreos de agua, suelo y aire; elaborando y registrando los resultados de los análisis físico químicos de las muestras.

En julio del 2013, presté servicios para la empresa IMEVI Ingenieros S.A.C, empresa dedicada a la ingeniería, construcción y minería, elaborando su Sistema de manejo de residuos sólidos; diseño y capacitación para el personal y clientes de la empresa, enfocados en prácticas sostenibles en cumplimiento de políticas ambientales.

En marzo del 2015, presté servicios para la Municipalidad Distrital de Huallanca, Ancash, encargada de la gestión SSOMA, planes de manejo de residuos sólidos, capacitación en procesos de reciclaje y sensibilización a la población.

En la empresa CM HANDYMAN SAC, donde laboro actualmente desde el año 2018, ocupó el cargo de Representante Cooperativo del Departamento de Gestión Ambiental y Social, mi función principal es realizar estudios para la identificación de posibles impactos ambientales en las actividades de la empresa; así como diseñar y supervisar programas de manejo de residuos sólidos, capacitaciones en temas ambientales para los empleados y clientes directos de la empresa.

1.2. Descripción de la empresa

La empresa CM HANDYMAN S.A.C. esta conformado por profesionales altamente capacitados y comprometidos con la excelencia en cada proyecto. Cuenta con diez años de experiencia. Presta servicios de ingeniería, construcción, mantenimiento tanto para la Industria y en Minería.

Servicios de Interior Mina:

- Planes de cierre
- Gaviones
- Geomembranas
- Canales de coronación
- Instalación de mantas Rapid Cover
- Rehabilitación y limpieza de labores y galerías
- Construcción y mantenimiento de vías

Ejecución de Obras Civiles:

- Movimiento de tierra
- Construcción de almacenes
- Estructuras de concreto
- Mantenimiento vial en carreteras
- Señalización horizontal y vertical en carreteras

Misión: Trabajamos de manera colaborativa con nuestros clientes, escuchando sus necesidades y brindando asesoramiento especializado para encontrar mejores soluciones, a través de la excelencia operativa, la responsabilidad social y el compromiso con el medio ambiente.

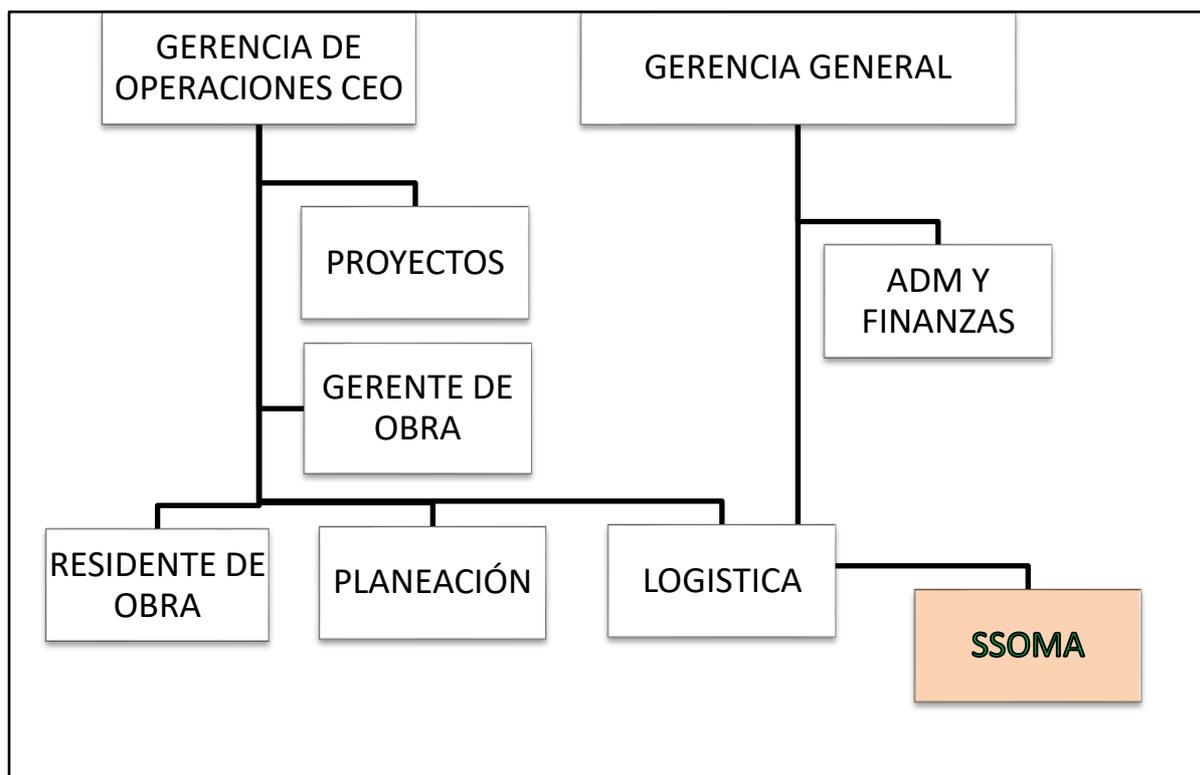
Visión: Es ser una empresa líder en soluciones de mantenimiento, construcción y reparación a nivel nacional e internacional, reconocida por la calidad, confiabilidad y rapidez de nuestros servicios. Buscamos expandir nuestra presencia, incorporando tecnología innovadora en todos los procesos y generar un impacto positivo en las comunidades a las que servimos.

1.3. Organigrama de la empresa

La Empresa Handyman S.A.C. está compuesto por dos áreas principales la Gerencia de Operaciones y la Gerencia General, como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Organigrama de la empresa CM HANDYMAN S.A.C.



Nota: En la figura resaltado de color anaranjado es el área donde la autora del presente informe desempeña sus funciones como Supervisor SSOMA.

1.4. Áreas y funciones desempeñadas

El desempeño profesional del autor como Representante y Supervisor en Gestión Ambiental fue en el departamento de SSOMA perteneciente al área de gerencia general. Durante su trayectoria en la empresa pudo desarrollar diferentes habilidades y fortalecer competencias que le permitieron lograr un desempeño exitoso. A continuación, se describen las áreas y funciones desempeñadas en la empresa CM HANDYMAN S.A.C.:

- Elaboración del Plan de Gestión Ambiental (PGA).
- Difusión de la Política integrada de CM HANDYMAN S.A.C. a todo el personal.
- Asegurar el mantenimiento del Plan de Gestión, revisando los registros y reportes.
- Seguimiento de las exigencias legales contractuales aplicadas a proyecto.
- Inspeccionar su área para detectar condiciones físicas, químicas y biológicas que puedan causar impactos negativos al medio ambiente.
- Investigar los incidentes ambientales después de la comunicación de los mismos según los estándares del Proyecto del cliente.
- Seguimiento de las exigencias legales contractuales aplicadas al proyecto.
- Detener una actividad cuando represente un inminente riesgo de daño al medio ambiente.
- Identificar los potenciales impactos y las emergencias ambientales.
- Planificar las respuestas a los potenciales impactos y emergencias ambientales.

II. IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE CIERRE DE MINA EN RELAVERAS ANTIGUAS Y REHABILITACIÓN DE GALERIAS EN LA UNIDAD MINERA “PUCARRAJO”, HUALLANCA – ANCASH, 2020

2.1. Generalidades

El desarrollo de actividades mineras ha sido una de las principales fuentes de crecimiento económico en muchas regiones del país, sin embargo, el desarrollo de sus actividades genera impactos ambientales y sociales significativos. En ese sentido el presente informe se basa en la experiencia profesional del autor desarrollado en el ámbito de la Ingeniería Ambiental con enfoque en el Plan de Cierre de Mina de la Unidad Minera “Pucarrajo” y la actividad específica que presento es la implementación del plan de cierre de mina en Relaveras Antiguas con metodología de mantas impermeables – Rapid Cover, y la rehabilitación de las galerías A y B, que se encuentran ubicados en la quebrada Sopas, laguna Ishpag, cerro Pucarrajo y quebrada Shahuahuana y Chapin de las provincias de Bolognesi Huari en el departamento de Ancash, La Unidad Minera Pucarrajo se encuentra a una altura aproximada entre 4400 a 5000 msnm, rodeada de cuerpos de agua como: Laguna Cochapampa, Laguna Yanagargo, laguna Shahuana, Laguna Ichic Chacra, laguna Pucarrajo, pertenece a la región hidrográfica del Amazonas, siendo la Unidad Hidrográfica el Alto Marañón. Se encuentra ubicado sobre un yacimiento polimetálico de zinc, plomo y plata, los que ocurren como marmatita, esfalerita y galena argentífera como minerales de mena, y como ganga ocurre la pirrotita, pirita, marcasita y calcita. El objetivo de la implementación del Plan de cierre en las Relaveras y las galerías, es mitigar los daños ambientales en las zonas de influencia de la minera. El cierre de minas es una fase crucial en la vida de una operación minera, el titular del proyecto es CM HANDYMAN S.A.C. empresa especializada en dicho trabajo. Uno de los métodos empleados para lograr una gestión eficaz del

cierre de minas en las relaveras es el uso de mantas impermeables, que se utilizan para cubrir los residuos de la mina, especialmente en las áreas de pilas de lixiviación, depósitos de relaves y vertederos de residuos sólidos.

2.2. Marco legal

- Norma legal: Ley 28271 "Ley que Regula los Pasivos Ambientales de la Actividad Minera", modificada por la Ley 28526, y su reglamento, "Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera", aprobado por DS N° 059-2005-EM, modificado por DS N° 003-2009-EM. Página Web del MEM, <http://www.minem.gob.pe/>.
- Normas ambientales: DS N° 016-93-EM, "Reglamento de Protección Ambiental para las Actividades Minerometalúrgicas, estableció la obligación de presentar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para todos los nuevos proyectos mineros, así como la obligación de presentar un Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA)

2.3. Marco teórico

- **Plan de cierre de minas:** es un proceso que implica la rehabilitación de una operación minera para asegurar que, una vez que esta se cierre, el área no represente riesgos ambientales o de seguridad para las comunidades circundantes y los ecosistemas. Un plan de cierre bien diseñado busca restaurar la zona, prevenir la contaminación y cumplir con las regulaciones ambientales. Existen varios métodos para el cierre de minas, dependiendo del tipo de operación minera, el tipo de residuos generados y las condiciones ambientales locales.
- **Implementar:** proceso que pone en práctica o ejecución un plan o estrategias que implican acciones necesarias para lograr objetivos diseñados con el fin de obtener resultados positivos.

- **Mantas impermeables Rapid – Cover:** son una opción cada vez más utilizada en el cierre de minas debido a su eficiencia y durabilidad. Estas mantas son materiales sintéticos o geosintéticos diseñados para proporcionar una barrera física entre los residuos mineros y el ambiente, impidiendo la infiltración de agua y reduciendo el riesgo de contaminación.
- **Relaveras:** Depósitos e instalaciones en el suelo construidos con el objetivo de almacenar los residuos de los procesos de extracción de minerales. Implican una gran preocupación en el ámbito minero, se componen de los residuos finos, agua, rocas trituradas, productos químicos como cianuro o azufre y metales pesados, que quedan después de recuperar los minerales valiosos de los concentrados,
- **Rehabilitar:** es el proceso de restaurar áreas afectadas por actividades mineras a un estado ambiental, ecológico y socioeconómico seguro, funcional y sostenible a largo plazo, obteniendo como resultado mitigar los impactos negativos de la minería, garantizando la estabilidad física y química del lugar y así promover su integración al entorno natural y social.
- **Galería:** es una excavación horizontal o ligeramente inclinada realizada bajo tierra con la finalidad de acceder y extraer yacimientos de minerales, ventilar obras mineras, permite el transporte de materiales y personal, o drenar aguas subterráneas.
- **Geotécnicas:** término usado en la ingeniería para designar las propiedades físicas y mecánicas de los aspectos terrestres, como las rocas y los suelos, para aplicarlos en el campo de la construcción y el diseño de proyectos de ingeniería.
- **Aguas ácidas:** se dice a aquellos efluentes cuyo pH es menor a 7, que nos indica que son ácidas. En la minería estas aguas son generados por los minerales sulfurosos, que

se oxidan cuando entran en contacto con el agua y el oxígeno, dando como resultado al ácido sulfúrico, contaminando los ecosistemas cercanos a la explotación minera.

- **Manejo de residuos sólidos:** es el proceso de recolección, transporte, disposición y reciclaje de todos los residuos generados en el área de la mina, clasificándolos en contenedores de diferentes colores, con el fin de minimizar el impacto en el ambiente.
- **Restauración:** proceso de volver a su estado original a un ambiente deteriorado por la acción del hombre o de la naturaleza.

2.4. Objetivos

2.4.1 *Objetivo general*

Implementar el plan de cierre de mina en relaveras antiguas y rehabilitación de galerías en la unidad minera “Pucarrajo”, Huallanca – Ancash.

2.4.2. *Objetivos específicos*

- Evaluar el estado de las relaveras antiguas y las galerías A y B de la unidad minera
- Elaborar un diseño técnico de rehabilitación para las relaveras antiguas, que contemple un adecuado manejo de residuos, restauración de suelos y del entorno natural.
- Desarrollar un plan de recuperación ambiental para las galerías A y B.
- Implementar medidas para mitigar la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Post cierre.

2.5. Ubicación

Los trabajos realizados de plan de cierre de mina en relaveras antiguas y trabajos de rehabilitación en las galerías A y B, en la Unidad Minera Pucarrajo, se encuentra ubicado en los andes centrales de norte del Perú en las coordenadas $9^{\circ} 49' 37''$ de latitud sur y $77^{\circ} 05' 49''$ de longitud oeste, a una altitud aproximada entre los 4400 y 5000 msnm. En el Distrito de Huallanca, Provincia Bolognesi, Departamento de Ancash.

Figura 2

Ubicación geográfica



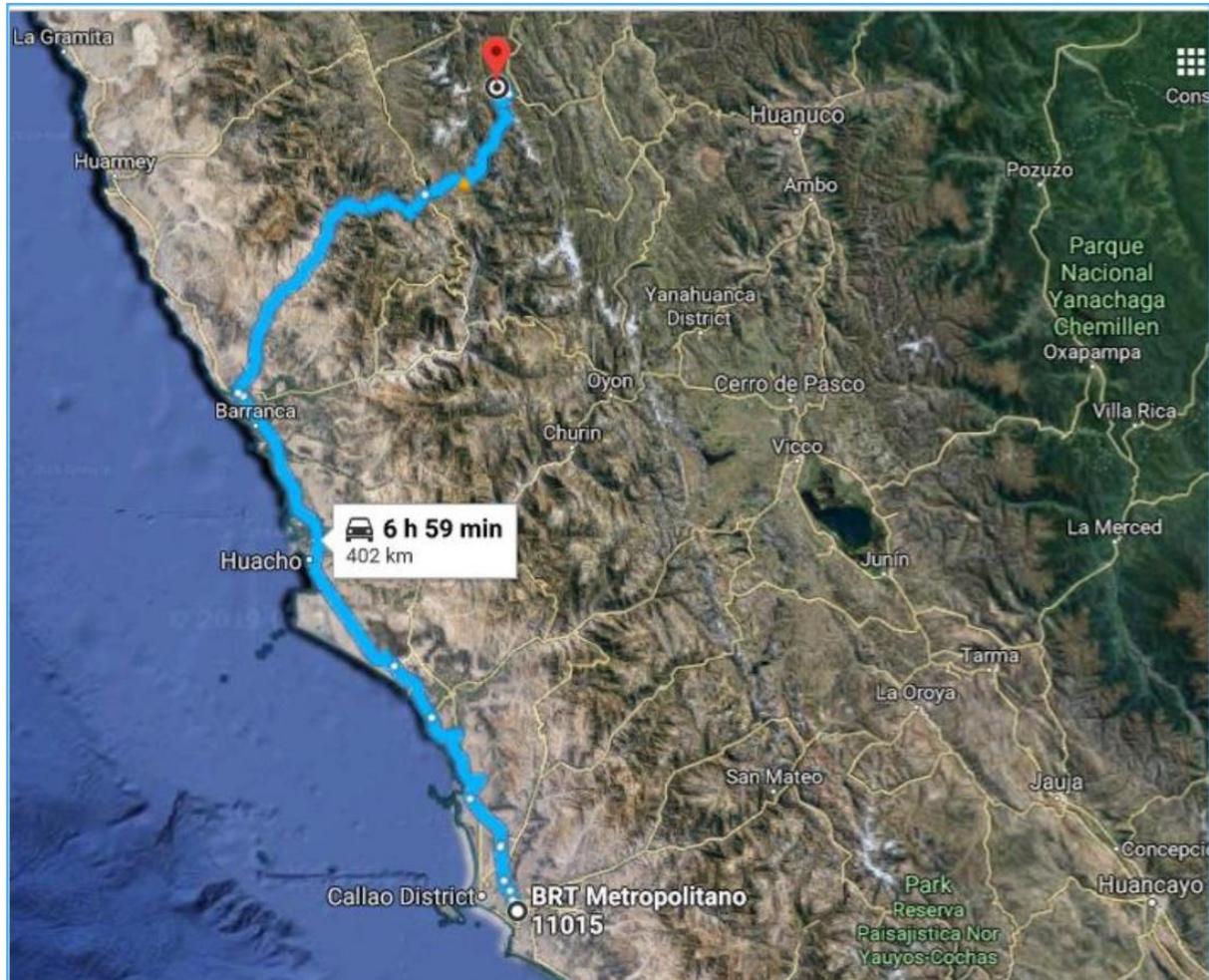
Tabla 1*Coordenadas de ubicación del área de estudio*

UNIDAD MINERA PUCARRAJO

Lugar	Coordenadas UTM		
	Norte	Este	Altitud
Relaveras antiguas	8915,200	271,400	4500 msnm

Figura 3

Rutas de acceso a la UM Pucarrajo



2.6. Antecedentes

2.6.1. Antecedentes internacionales

Riaño y Vargas (2022), según este informe científico en la cuenca del río Ranchería, explora diferentes tipos de impactos: calidad de agua, deforestación, la erosión del suelo y la

pérdida de biodiversidad, analizados bajo el marco legal y regulatorio existente en Colombia y su efectividad en la gestión de los impactos mineros. Su metodología se basa en la selección de los parámetros de calidad de agua, datos hidrológicos, descripción y evaluación de los diferentes escenarios de cambio climático y de plan de cierre de minas, para evaluar su impacto en la calidad del agua. Los objetivos son la identificación de los principales contaminantes, su relevancia y sus fuentes principales, evaluar los impactos acumulativos de la minería en la calidad del agua a largo plazo, analizar los efectos en los ecosistemas acuáticos, evaluar los potenciales riesgos para la salud humana. Como resultados se planteó realizar un modelo hidrológico que permita identificar la calidad del recurso agua y una aproximación al deterioro con posible toma de decisiones para implementar un adecuado plan de cierre de minería. Se concluyó obteniendo aportes y recomendaciones para la aplicación de SWAT, ya que este realiza un análisis completo de la zona de estudio de la cuenca, se obtuvieron datos para los escenarios de cambio climático y las afectaciones de un plan de cierre de mina en un futuro.

Según el informe científico, Arán (2002) se usó Tecnosoles para la recuperación ambiental de la Mina de São Domingos, la existencia de minas abandonadas, muchas de ellas explotadas antes de los años 80; carentes de gestión y responsabilidad ambiental, suponen un problema importante para las instituciones públicas y privadas, el objetivo estratégico de estas entidades públicas es reducir los efectos que producen estas minas abandonadas. En este caso la Empresa de Desenvolvimento Mineiro, tuvo como metodología desarrollar un proyecto para recuperar la mina de São Domingos, en Portugal, utilizando Tecnosoles, que son materiales especialmente creados con cualidades alcalinas y eutróficas para ayudar a rehabilitar la mina. El objetivo de este estudio, fue evaluar la eficacia a largo plazo aproximadamente en 12 meses, se aplicó una capa de 36 cm de Tecnosoles, en un campo de ensayo de 1,5 hectáreas. Los resultados demostraron que los tecnosoles son un sustituto viable que puede elevar el pH y la fertilidad, mantener una capa de vegetación constante y espesa y reducir en más de un 80% la

disponibilidad de contaminantes procedentes de materiales contaminados, como conclusión se puede decir que los Tecnooes son un material ideal que permite adquirir tierras para usos futuros sin poner en peligro el medio ambiente.

En la tesis, Román (2022) destaca que los planes de cierre de mina son un paso crucial en todo proyecto minero después del proceso de producción. El estudio analizó cuantitativamente los procesos involucrados en el cierre, utilizando el método de identificación de costos en un plan de cierre de mina, el objetivo fue establecer las bases para valorar estos costos y consecuentemente reconocer los costos ambientales dentro del marco legal que rige actualmente la minería en Ecuador. Los resultados dieron como viabilidad el tratamiento de aguas ácidas, que es la forma más adecuada al crear una fuente simulada de incertidumbre, se logró mediante el uso de la biorremediación por electroremediación, y humedales anaeróbicos, como conclusión el estudio logró afirmar la importancia de considerar los costos y riesgos ambientales al desarrollar planes de cierre de minas para garantizar prácticas mineras responsables y sostenibles.

2.6.2. Antecedentes nacionales

De acuerdo a Gomez (2020), la instalación del panel test de prueba para el cierre de la unidad minera Lagunas Norte Barrick en Trujillo, tenía como objetivo la instalación de paneles de prueba para medir la estabilidad física de la cobertura, vigilar la escorrentía superficial y percolación. Su metodología se basó en el uso de cuatro tipos de cobertura geosintéticos, top soil y sembrado de acuerdo a un plan de revegetación, en un área total de 1352 m², donde se instaló geomembrana texturada y geomembrana lisa. Con este proyecto se concluyó que la estabilidad física y el control de aguas residuales, va disminuyendo los impactos ambientales, preservando la salud pública y medio ambiental.

En el informe técnico Jara (2021), el plan de cierre y post cierre de minas, su objetivo se centra en la importancia de brindar los criterios y fundamentos para que sean aplicados en la explotación de minerales tanto sub terraneo como a tajo abierto, los minerales son recursos no renovables por lo que las operaciones mineras tienen un ciclo de vida limitado, una vez finalizada el ciclo de las operaciones mineras se debe tener un plan detallado para cerrar las instalaciones de manera segura y responsable, la organización dispone de tales actividades las cuales comprende desde el desarmado, demolición y desinstalación de las infraestructuras que no van a cumplir ninguna función y generar riesgos, alteraciones o impactos en el entorno de la mina. Su metodología establece planes de acción para mitigar los riesgos asociados a accidentes e incidentes y posibles causas de contaminación al suelo, agua y aire. En conclusión este informe concede al futuro Ingeniero de Gestión minera un aprendizaje para que pueda diseñar soluciones que satisfagan necesidades específicas con consideraciones de seguridad, salud pública y bienestar

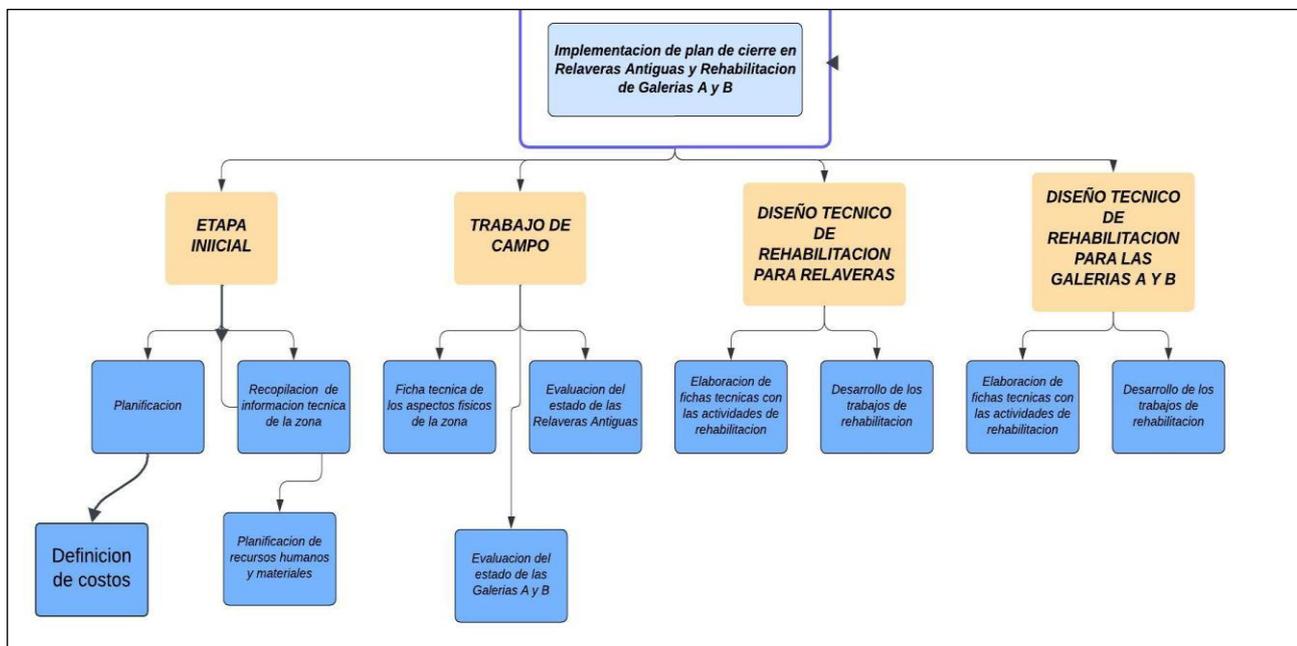
Según la tesis Vidal (2018), el impacto financiero de los planes de cierre de minas en las principales empresas mineras del Perú, se basa en el objetivo central de una planificación adecuada de estas actividades que generan resultados positivos. Se evaluaron las actividades de cierre, para aplicarlas, provisionarlas y fiscalizarlas. La metodología del presente trabajo es la toma de información de cinco principales empresas mineras que operan en el país, presentando el desarrollo de los planes de cierre de cada uno de ellos y sus respectivos estados financieros en los últimos cinco años, se generó el material de apoyo aplicable a cualquier empresa. Como resultado se obtuvo un impacto de planificación exitosa que se demuestra en los estados financieros de las empresas mineras, lo que requiere un proceso suficiente de diseño de medidas técnicas y planificación financiera, se evaluó la implementación, provisión y auditoría de las acciones de cierre. Se concluyó que este estudio tiene el potencial de generar

conocimientos valiosos para la toma de decisiones en el sector minero peruano y contribuir al desarrollo de mejores prácticas en la gestión de los planes de cierre de minas.

2.7. Metodología

Figura 4

Flujograma de la metodología de la implementación del Plan de Cierre de mina en Relaveras Antiguas y Galerías A y B



2.7.1. Descripción del área del proyecto

- **Clima y meteorología:** El clima en esta zona se caracteriza por ser frío y seco durante todo el año, con estaciones lluviosas entre los meses de diciembre y abril. En los meses entre junio y agosto son casi nulas las precipitaciones.

Tabla 2

Caudales generados en la microcuenca zona de proyecto

Generación de caudal medio (m ³ /s)													
MC	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Tayash	0.56	0.70	0.76	0.49	0.19	0.09	0.07	0.08	0.14	0.29	0.29	0.42	0.34
Torres	0.84	1.04	1.14	0.73	0.29	0.14	0.11	0.11	0.20	0.43	0.43	0.62	0.51

Fuente: Datos del PAD, cuadro 16, Oficio N° 182-2022-MINEM-DGAAM-DEAM

- **Geología:** las formaciones que alberga la mineralización de Pucarrajo están representadas en su totalidad por calizas, los tipos de mineralización observados son de calcosilicatos (skam) y brechas mineralizadas. La mineralización en el skam, está constituida por pirita, esfalerita, marmatita, galena, calcopirita, cuarzo, bismutita, calcita y pirrotita. En las brechas, existen los mismos minerales que en los calcosilicatos, con la diferencia que hay presencia de minerales de plata como la galena argentíferay otros sulfosales poco diferenciadas.

- **Fisiográfica:** el relieve de la zona es típico de la parte alta de la cuenca, presenta en la parte alta fuertes pendientes y terrenos escarpados. La parte superior se encuentra delimitada por cadenas de cerros con formaciones topográficas de tipo glaciar y fluvio – glaciar soportando una extensa erosión la cual ha originado valles en V y U, formando depósitos fluvio – glaciares.
- **Suelos:** los suelos son de origen orgánico con alta saturación de base en el perfil, propio de un régimen de humedad, suelos incipientes, el proyecto se encuentra dentro de dos zonas edáficas: Mollisólica y Andosólica. La región Mollisólica comprende los valles interandinos altos a intermedios entre los 2200 y 4000 msnm, clima con temperaturas medias entre 6 y 18 C° y con precipitaciones cercanas a los 1000 mm. De acuerdo a su capacidad de uso mayor, en la zona se encuentran los siguientes suelos:

Tabla 3*Clasificación de los suelos*

Símbolo	Descripción	<i>Consolidaciones/ Asociaciones incluidas</i>		superficie	
			Proporción	Ha	%
P2 sw	Tierras aptas para pastoreo de calidad agrológica media con limitaciones por suelo y	Pajoscocha	100	23.87	8.77

	drenaje imperfecto				
	Tierras aptas para pastoreo de calidad agrológica				
P3 se	baja con limitaciones por suelo y erosión – pendiente.	Cachinán - Rodio	100	60.33	22.17
	Tierras de protección (X)con limitación por suelo (profundidad efectiva).	Misceláneo Roca	100	132.83	48.82
X1	Lagunas Contonga y Pajoscocha		100	30.41	11.18
X2	Instalaciones, depósito de relaves, carreteras, otros.		100	24.66	9.06
			TOTAL	188.43	100.00

Fuente: MINEM, Informe final de evaluación de la actualización del plan de cierre de minas de la unidad minera Nyrstar Ancash S.A.

- **Hidrología:** La información de precipitaciones para el área del proyecto están disponibles en el Servicio Meteorológico Nacional (SENAMHI), para analizar las

condiciones se utilizó los registros máximos de precipitación. Estos datos fueron tomados desde la estación Milpo, que es la estación más cercana y representativa del área de estudio.

Tabla 4

Estación pluviométrica de la zona de proyecto

Estación	Altitud (msnm)	Latitud (Este)	Longitud (Norte)	Período de registro (años)	Tipo de registro
Milpo	4,400	9°53'	76°49'	1990 - 2014	Precipitación máx en 24 h

Fuente: SENAMHI, estación Milpo.

- **Relaves :** Actualmente, el depósito de relaves, se encuentra inoperativo y ocupa una extensión de 8,000 m²aproximadamente y pertenece al cuadrángulo geológico de Recuay 20-i según el Boletín A 76 del Ingemmet.

Figura 5

Ubicación de las Relaveras Antiguas



Fuente: vista satelital de Relaveras Antiguas (Google Earth, 2023)

Las estructuras actuales que conforman el depósito de relaves son el Dren Uña del Enrocado, el Dique de Enrocado, la Presa de enrocado y los Canales de coronación Sur y Norte. Otras estructuras que conforman el depósito de relaves son: las pozas contingencias, la impermeabilización del vaso de depósito de relaves y los piezómetros hidráulicos.

2.7.2. Características de la mina “Pucarrajo”

La mina se dividía en 6 niveles, separadas por 50 metros entre niveles. Distribuidas desde la cota 4050 msnm en el nivel 0 hasta la cota 4516 msnm que corresponde al nivel 455. La sección transversal de las labores mineras de acceso como las galerías van desde 2.10 a 4.5

m de ancho y alturas desde 2.40 hasta 5 m. El método usado para la explotación del mineral era el de acumulación, corte y relleno ascendente.

Tabla 5

Ubicación de las bocaminas

Código	Bocamina	Coordenadas (UTM)		Altitud (msnm)	Sección de la galería	
		Norte	Este		Ancho (m)	Altura (m)
Gal-6	Nivel 0	8949323790	271830649	4061	3.50	3
Gal-5	Nivel 240	8950287783	272437080	4294	4.50	5
Gal-4	Nivel 300	8950278989	272853231	4358	2.10	2.40
Gal-3	Nivel 360	8950174598	2722938326	4418	2.40	2.70
Gal-2	Nivel 415	8950252848	273191577	4471	2.10	2.40
Gal-1	Nivel 455	8950196974	273242543	4516	2.40	2.70

Fuente: MINEM, Informe final de evaluación de la actualización del plan de cierre de minas de la unidad minera Nyrstar Ancash S.A.

2.7.3. Evaluación del estado de la Relavera Antigua

Se hizo mediante una visita de campo con fecha 01 de noviembre del 2020, la empresa HANDYMAN S.A.C. hace ingreso del personal a la unidad minera Pucarrajo con el fin de iniciar la observación directa de la zona, verificando las condiciones físicas, presencia de grietas, erosiones y filtraciones. Dentro del ámbito de influencia no se encontraron riesgos

geodinámicos importantes. Los procesos geodinámicos están relacionados principalmente con los siguientes fenómenos: meteorización por lluvia, falta de cubierta orgánica, vientos, cambios climáticos, erosión y pendientes pronunciadas.

- **Recursos**

En el plan de cierre de mina en relaveras antiguas con metodología de mantas impermeables Rapid-Cover, en el departamento de Ancash, se han empleado los siguientes recursos:

- **Personal**

Ingeniero de Minas – Líder de equipo

Supervisor del proyecto

Coordinador de plan de cierre de minas

Técnico de monitoreo ambiental

Supervisor de campo (capataces) y responsable de seguridad en obra

Operarios

- **Gestión de Seguridad**

1. Examen médico, según política de Nyrstar
2. SCTR para socavón
3. Inducción de Seguridad
4. EPP para interior de mina (Casco minero, lámpara minera, correa de seguridad, lentes de seguridad, guantes de seguridad, botas con punta de acero).

Tabla 6*Equipos y herramientas*

Equipos	Marca / Modelo	Cantidad
Camioneta	Mitsubishi L200	01
Equipo de respiración autónomos	Drager VG 4	02
Detector de gases MSA	Altair 4X	01
Anemómetro	Extech Instruments	01
Barretilla	6 pies	01
Barretilla	4 pies	01
Flexómetro	5 m.	01
Wincha	100 m.	01

2.7.4. Evaluación del estado de las galerías A y B

Se evaluó mediante la visita de campo a las labores, entre las fechas 26 de marzo del 2019 al 27 de marzo del 2019, estando los lugares visitados dentro del área de concesión de la Unidad Operativa Pucarrajo, el trabajo de campo fue realizada con la finalidad de inspeccionar la condición de las galerías A y B, que estaban en estado de abandono.

Las actividades desarrolladas en esta visita se resumen a continuación:

Observación de las condiciones naturales del sitio.

Medición de niveles de oxígeno e identificación de otros gases.

Inspección visual de la estructura rocosa de las galerías (piso, techo y hastia)

Condición de drenaje, identificación de aguas subterráneas.

Tabla 7*Equipos usados en el proceso de inspección*

Item	Descripción	Marca / Modelo	Cantidad	Calibración
1	Camioneta 4 X4	Hilux	01	NA/ operativo
2	Respiradores autónomos	Drager VG 4	02	NA/ operativo
3	Detector de gases	MSA – Altair 4X	01	NA/ operativo
4	Anemómetro	Extech Instruments	01	NA/ operativo
5	Wincha (5m)	Stanley	01	NA/ operativo
6	Wincha Cinta (100 m)	Stanley	01	NA/ operativo
7	Herramientas menores (barretillas)	SM	02	NA/ operativo

2.8.Procedimiento

Se determinó los nombres de referencia a las galerías: Galeria A (4,413.49 m.s.n.m) y Galeria B (4,463.00 m.s.n.m)

- **Verificación de cantidad y calidad de oxígeno:** Antes de cualquier actividad se realizaron mediciones de calidad de oxígeno con un detector de gases, el oxígeno deberá estar en rangos permitidos y que oscilen entre 19.5% y 21.5%. Otros gases a identificar y predominan en estas labores son: CO, CO₂ NO₂. Se hizo uso de los respiradores autónomos, tomando lecturas de % de oxígeno y velocidad de aire.
- **Inspección de la sección de galería:** Se verificó la sección de ingreso y a medida del avance se verificó desprendimientos existentes en los laterales (caja o hastial), el piso y el techo de la labor. La descripción se hizo de manera acertada según el tipo de roca, se determinó fallas, desprendimientos y excavaciones.
- **Registros de agua:** La presencia de agua fué clasificada como: agua de lluvia, producto de la estación y agua subterránea, producto de niveles freáticos y escorrentías. Se tuvo en cuenta el nivel de la labor ya que el agua podría ser de lluvia y acarreada a niveles superiores o niveles inferiores siguiendo la mineralización en la estructura, afectando así el piso de estos componentes. Estos valores fueron trasladados a una ficha de campo, que luego fueron analizados para recomendaciones del consultor.

Figura 6

Ficha técnica de la inspección a la galería A

FICHA TÉCNICA					
UNIDAD MINERA PUCARRAJO					
GALERIA "A"					
<i>Inspección y mediciones</i>					
Ubicación <i>Coordenadas</i>	Norte: 8 912 764.00; Este: 274 065.00				
Zona	18L				
Cota	4,413.49 msnm				
Sección	Variable (3.60 x 3.30) después de la chimenea se reduce (3.60 x 3.10)				
Longitud Galería	150 m				
Labor (es)	Chimenea				
Distancia -Labor	Desde el ingreso de la galería 109 m hasta la chimenea.				
Calidad del aire	% O (19.5% – 21.5%)	19.8%	V(20m/min – 25m/s)	21 m/min	
Presencia de gases	CO	NP	CO2	NP	NO2 NP
Condición					
 <p>Lado = Caja o Hastial</p>	Piso: Escombros, material desprendido, inundaciones sectorizadas, producto de lluvia hasta 40cm de altura.				
	Lado A: Sostenimiento óptimo, roca competente.				
	Lado B: Sostenimiento óptimo, roca competente.				
	Techo: Sostenimiento óptimo, roca competente.				
Comentarios	<p>Deslizamiento de material superficial y rocas en el piso a lo largo de la galería, por causa de las lluvias estacionales. Parte del acceso está obstruido, la colmatación de finos y el agua ha ocasionado un embalsamiento que supera los 40 cm. La chimenea está ubicada a unos 109 m del ingreso. El material que ha caído por la chimenea tapa, casi, en su totalidad la galería. Sobre el material cae agua que dificulta toda visibilidad de identificar la sección de la chimenea. No se ha logrado medir el caudal de ingreso de agua, la caída del agua es en forma de lluvia.</p> <p>Los niveles de oxígeno son los permitidos y oscilan entre 19.8 y 20.1, al acercarse a la chimenea el nivel de calidad de oxígeno disminuye, hasta 18%, esto debido a que, el acceso a la galería-chimenea esta obstruido. No hay presencia de otros gases.</p> <p>A lo largo de la galería se observa que las cajas (caja techo y caja piso) son competentes, no se observa derrumbes o caída de rocas que condicione y ponga en riesgo la inestabilidad, esto permite realizar cualquier actividad a lo largo de la galería de forma segura.</p> <p>La presencia de agua en la galería corresponde, aguas de lluvia que se infiltra por la estructura mineralizada (veta). El material es generador de agua ácida, el PH encontrado es de 4.5. El agua se está vertiendo de forma directa al cauce de río; requiere un tratamiento previo.</p>				

Figura 7

Ficha técnica de la inspección a la galería B

FICHA TÉCNICA						
UNIDAD MINERA PUCARRAJO						
GALERIA "B"						
<i>Inspección y mediciones</i>						
Ubicación <i>Coordenadas</i>	Norte: 8 912 785.00; Este: 273 982.00					
Zona	18L					
Cota	4,463.00 msnm					
Sección	2.50 x 2.50					
Longitud Galería	90 m					
Labor (es)	Ninguna					
Distancia - Labor	Ninguna					
Calidad del aire	% O (19.5% – 21.5%)	20.9%	V(20m/min – 25m/s)	26 m/min		
Presencia de gases	CO	NP	CO2	NP	NO2	NP
Condición						
 <p>Lado = Caja o Hastial</p>	Piso: Presencia de agua puntual a causa de las lluvias, no se identifica una filtración de agua subterránea.					
	Lado A: Desprendimiento de roca, plano de falla, roca mala.					
	Lado B: Sostenimiento óptimo, roca competente.					
	Techo: Sostenimiento óptimo, roca competente.					
Comentarios	<p>El lado izquierdo presenta material desprendido a lo largo del piso, en la zona de contacto se visualiza una franja de material triturado que, se está acumulado por las filtraciones de agua de lluvia y por su baja calidad de tipo de roca. Para ingresar a la galería es recorriendo al hastial derecho que presenta un macizo de roca competente. A 35 m desde la bocamina, existe una cavidad de 10x40x20 metros de profundidad desde el nivel de la galería "B" hacia la parte inferior, la cavidad es producto de extracción de mineral. No se evidencia la ubicación de chimenea en este punto, sin embargo, según el plano debe de estar ubicado en esta zona.</p> <p>El Nivel 4,463.00 y el Nivel 4,423.49 deben estar comunicados por la chimenea y las labores de la galería "A", es por ello que las aguas de mina son encausadas al nivel inferior. La presencia de agua en la galería es puntual a causa de las lluvias, no se identifica filtraciones de agua subterránea. Existe un canal ejecutado de forma manual en la superficie, para el traspase de mineral y/o desmonte del nivel. 4,463.00 (bocamina galería "B") al Nivel. 4,413.49 (bocamina galería "A").</p> <p>El monitoreo de oxígeno tiene lecturas de 19.5%, por lo que, no generaba ningún riesgo para el ingreso de personas.</p>					

2.8.1. *Diseño técnico de rehabilitación para las relaveras antiguas*

La implementación de las medidas de rehabilitación ambiental y seguridad en las Relaveras Antiguas de la Unidad Minera “Pucarrajo”, Huallanca – Ancash, se desarrolló siguiendo una metodología exhaustiva y estructurada que abarcó cada uno de los aspectos críticos necesarios para asegurar una rehabilitación efectiva y sostenible. Este enfoque metodológico se fundamentó en principios de gestión ambiental, seguridad ocupacional y cumplimiento normativo, garantizando así que todas las acciones emprendidas no solo cumplieran con los requisitos legales, sino que también promovieran una cultura de seguridad y responsabilidad ambiental entre todos los colaboradores involucrados. A continuación, se detalla cada una de las áreas clave abordadas en la metodología, proporcionando un análisis profundo y específico de las acciones realizadas, los recursos utilizados y los procedimientos seguidos para alcanzar los objetivos establecidos.

2.8.1.1. Manejo de residuos sólidos: clasificación y separación

Primero se realizó el manejo de todos los residuos sólidos generados durante las operaciones mineras, implementando un sistema de clasificación y separación rigurosa. Según López (2020), la correcta segregación de residuos es fundamental para minimizar el impacto ambiental y facilitar su posterior disposición o reciclaje. Se establecieron zonas específicas dentro de la mina donde se colocaron contenedores claramente etiquetados para distintos tipos de residuos: orgánicos, inorgánicos, peligrosos y reciclables. Además, se desarrollaron protocolos detallados para el manejo seguro de cada tipo de residuo, asegurando que los materiales peligrosos fueran tratados de acuerdo con las normativas vigentes y reduciendo el riesgo de contaminación del entorno.

El sistema de clasificación y separación fue complementado con la implementación de tecnologías avanzadas para la gestión de residuos. Morales (2023) destaca la importancia de

utilizar maquinaria especializada para la recolección y tratamiento de residuos sólidos, lo que permitió una mayor eficiencia en el proceso y una reducción significativa de los residuos enviados a vertederos. Además, se estableció un programa de monitoreo continuo para evaluar la eficacia del sistema de manejo de residuos, realizando ajustes necesarios basados en los resultados obtenidos. Este enfoque sistemático no solo garantizó el cumplimiento de las normativas ambientales, sino que también promovió una cultura de sostenibilidad y responsabilidad entre los trabajadores, contribuyendo a la preservación del medio ambiente local.

Figura 8

Clasificación de los residuos sólidos



Nota: personal realizando la adecuada clasificación de los residuos sólidos

2.8.1.2. Capacitación al personal sobre el manejo adecuado de los residuos

Reconociendo la importancia de la capacitación continua para asegurar el manejo adecuado de los residuos sólidos, se diseñó e implementó un programa de formación exhaustivo

dirigido a todo el personal involucrado en estas actividades. Según Román (2022), la capacitación efectiva es clave para garantizar que los trabajadores comprendan y apliquen correctamente los protocolos de manejo de residuos, reduciendo así el riesgo de errores que puedan resultar en impactos ambientales negativos. El programa incluyó sesiones teóricas y prácticas que abordaron las mejores prácticas en la segregación, almacenamiento y disposición final de residuos, así como la identificación y manejo de materiales peligrosos.

Además de las sesiones formativas, se desarrollaron materiales educativos, como manuales y guías de referencia, que detallaron los procedimientos estándar de operación (SOP) para el manejo de residuos. (Morales y Hantke, 2020) enfatizan que la disponibilidad de recursos didácticos accesibles y comprensibles es fundamental para el aprendizaje continuo y la mejora de las prácticas laborales. Se realizaron evaluaciones periódicas para medir la comprensión y aplicación de los conceptos aprendidos, permitiendo así identificar áreas de mejora y ajustar el contenido del programa según fuera necesario. Este enfoque integral de capacitación no solo mejoró las habilidades técnicas del personal, sino que también fortaleció su conciencia ambiental y su compromiso con la gestión sostenible de los recursos.

Figura 9

Capacitación al personal en Manejo de residuos sólidos



Nota: Autor del informe brindando capacitaciones al personal en manejo de residuos sólidos.

2.8.1.3. Instalación de mantas rapid-cover en relaveras antiguas

En la fase de restauración de suelos, se implementó la instalación de mantas Rapid-Cover en todas las áreas de las relaveras antiguas. Estas mantas fueron seleccionadas por su capacidad para cubrir rápidamente grandes superficies, reduciendo la exposición directa al aire y minimizando la generación de polvo, un factor crucial para prevenir la contaminación atmosférica y proteger la salud de los trabajadores y comunidades circundantes (Jara, 2021). El proceso de instalación se realizó siguiendo estrictamente las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante, garantizando una cobertura completa y uniforme sobre los relaves mineros. Para asegurar la durabilidad y efectividad de las mantas, se utilizó maquinaria especializada que permitió una colocación rápida y precisa, adaptándose a las condiciones topográficas y geomorfológicas del sitio.

Además de la instalación física de las mantas, se desarrollaron protocolos de mantenimiento y monitoreo continuo para asegurar su integridad y funcionalidad a lo largo del tiempo. Se llevaron a cabo inspecciones regulares para identificar y reparar cualquier daño o deterioro de las mantas, así como para evaluar su efectividad en la reducción de polvo y la retención de agua de lluvia. Asimismo, se implementaron medidas complementarias, como la plantación de vegetación nativa sobre las mantas, para mejorar su estabilidad y promover la regeneración natural del ecosistema local (Morales, 2023). Este enfoque multifacético no solo aseguró la protección inmediata del entorno, sino que también contribuyó a la recuperación a largo plazo de las áreas afectadas por las actividades mineras, alineándose con los principios de sostenibilidad y responsabilidad ambiental.

Figura 10

Instalación de Mantas Rapid-Cover



Nota: Personal en trabajos de instalación de Mantas Rapid-Cover

2.8.1.4. Reforestación de las zonas aledañas

La reforestación de las zonas aledañas a las relaveras y galerías mineras fue una acción clave para restaurar la vegetación nativa y mejorar la estabilidad del suelo, contribuyendo así a la recuperación ecológica del área afectada. Se seleccionaron especies de árboles y arbustos autóctonos que son resistentes a las condiciones climáticas y edáficas de Ancash, promoviendo la biodiversidad y facilitando la reintegración de la flora local (Guevara, 2021). El proceso de reforestación comenzó con la preparación del terreno, que incluyó la eliminación de escombros y la nivelación del suelo para asegurar condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas. Posteriormente, se procedió a la siembra de plántulas en patrones densos y uniformes, utilizando técnicas de trasplante que maximizaron la tasa de supervivencia de las plantas.

Para garantizar el éxito de la reforestación, se implementó un programa de mantenimiento continuo que incluyó el riego regular, el control de plagas y enfermedades, y la eliminación de malezas competidoras. Se establecieron viveros en el sitio para la producción local de plántulas, asegurando un suministro constante de plantas nativas y reduciendo la dependencia de proveedores externos. Además, se promovió la participación activa de la comunidad local en las actividades de reforestación, fortaleciendo así los vínculos entre la mina y la población circundante y fomentando una conciencia compartida sobre la importancia de la conservación ambiental (Moreno, 2023). Este enfoque colaborativo no solo mejoró la efectividad de las acciones de reforestación, sino que también contribuyó al desarrollo social y económico de la región, alineándose con los objetivos de sostenibilidad del proyecto.

2.8.2. Desarrollar un plan de recuperación ambiental para las galerías A y B

El desarrollo de un Plan de Recuperación Ambiental específico para las Galerías A y B fue un componente esencial de la metodología, diseñado para abordar de manera integral los impactos ambientales identificados durante la fase de inspección. Este plan se elaboró mediante un enfoque participativo que involucró a expertos en gestión ambiental, geólogos, ingenieros de minas y representantes de la comunidad local, asegurando que todas las perspectivas relevantes fueran consideradas (Rodríguez, 2020). El plan incluyó una evaluación detallada de los impactos ambientales existentes, identificando las áreas más afectadas y priorizando las acciones de mitigación necesarias para cada una de ellas. Además, se establecieron objetivos claros y metas cuantificables que alinearon las acciones de recuperación con las normativas ambientales y los estándares de sostenibilidad establecidos por las autoridades competentes.

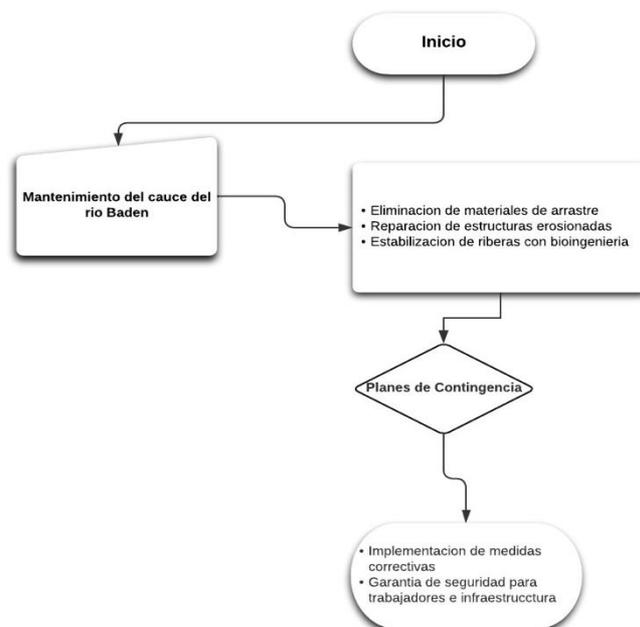
Para garantizar la efectividad del Plan de Recuperación Ambiental, se implementaron medidas de seguimiento y evaluación continua que permitieron monitorear el progreso de las acciones emprendidas y realizar ajustes en función de los resultados obtenidos. Se estableció un sistema de indicadores de desempeño que permitió medir el impacto de las medidas de mitigación en términos de reducción de emisiones, mejora de la calidad del agua y restauración de la vegetación (Jara, 2021). Además, se desarrollaron procedimientos de reporte y comunicación que facilitaron la transparencia y la rendición de cuentas ante las autoridades ambientales y la comunidad local. Este enfoque sistemático y adaptativo aseguró que el Plan de Recuperación Ambiental no solo respondiera a los desafíos inmediatos, sino que también promoviera una recuperación sostenible a largo plazo de las Galerías A y B, garantizando la protección del entorno natural y la salud de las comunidades circundantes.

2.8.2.1. Cruzar el Río Baden en épocas de lluvia

Para garantizar el cruce seguro del Río Baden durante las épocas de lluvia, se realizó un mantenimiento exhaustivo del cauce. Este mantenimiento incluyó la eliminación de materiales de arrastre, la reparación de estructuras erosionadas y la estabilización de las riberas mediante técnicas de bioingeniería (Rojas, 2021). Se estableció un programa de inspección periódica para evaluar las condiciones del cauce antes y durante la temporada de lluvias, permitiendo una respuesta rápida ante cualquier signo de socavación o degradación. Además, se desarrollaron planes de contingencia para implementar medidas correctivas de manera oportuna, asegurando la seguridad de los trabajadores y la integridad de las infraestructuras de acceso.

Figura 11

Procedimiento para el mantenimiento del cauce del río Baden

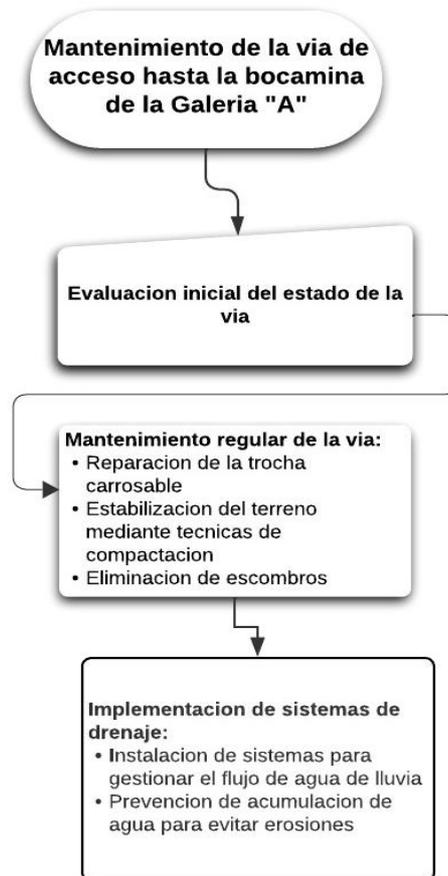


2.8.2.2. Mantenimiento de la vía de acceso hasta la bocamina de la Galería “A”

El mantenimiento continuo de la vía de acceso hasta la Bocamina de la Galería “A” fue esencial para asegurar la operatividad y la seguridad de las operaciones mineras. La vía, que conecta las oficinas administrativas de Pucarrajo con las áreas de trabajo en Domingo Sabio, requería intervenciones regulares para prevenir su deterioro y asegurar condiciones de tránsito seguras para vehículos y personal (Morales y Hantke, 2020). Las actividades de mantenimiento incluyeron la reparación de la trocha carrosable, la estabilización del terreno mediante técnicas de compactación y la eliminación de obstáculos como escombros y piedras que pudieran afectar la movilidad. Además, se implementaron sistemas de drenaje para gestionar el flujo de agua de lluvia y prevenir la acumulación de agua que pudiera causar erosión y socavación del suelo.

Figura 12

Procedimiento para el mantenimiento de la vía de acceso hasta la bocamina de la galería "A"



2.8.2.3. Encausamiento del agua de lluvia mediante canales de coronación

Para gestionar eficazmente el agua de lluvia y evitar su infiltración en las labores mineras superiores, se diseñaron e implementaron canales de coronación en distintos niveles desde la boca de la chimenea hasta la Galería A. Estos canales fueron construidos con materiales impermeables y de alta resistencia, asegurando su durabilidad y capacidad para manejar grandes volúmenes de agua (Jara 2021). El diseño de los canales consideró la

topografía del terreno y el flujo de agua esperado, optimizando la distribución del caudal y minimizando el riesgo de inundaciones en áreas críticas. Además, se instalaron mecanismos de control de flujo, como compuertas y válvulas, que permitieron regular el caudal de agua durante las temporadas de lluvia intensa, evitando así la sobrecarga de los sistemas de drenaje y manteniendo la estabilidad de las infraestructuras mineras.

2.8.2.4. Implementación de un sedimentador y sistema de tratamiento de agua ácida

Para gestionar de manera efectiva el agua proveniente de la Galería A, se implementó un sistema integral que incluye un sedimentador y un sistema de tratamiento químico. El sedimentador fue diseñado para permitir la sedimentación natural de los finos, reduciendo así la carga de lodo en el flujo de agua y facilitando su eliminación posterior (Morales, 2023). Este sedimentador fue construido con materiales resistentes a la corrosión y se situó estratégicamente en el punto de vertimiento para maximizar su eficiencia. El diseño del sedimentador consideró factores como el caudal de agua esperado y la concentración de sólidos suspendidos, asegurando que el sistema pudiera manejar las condiciones operativas específicas del sitio.

2.8.2.5. Encausamiento del agua de vertimiento de la galería “a” hacia el río

Actualmente, el encausamiento adecuado del agua de vertimiento hacia el Río Baden no se está cumpliendo de manera eficiente, lo que representa un riesgo ambiental significativo. Para rectificar esta situación, se diseñaron e implementaron estructuras de canalización que dirigen el agua tratada hacia el cauce del río, evitando su vertimiento directo y no controlado (Morales, 2023). Estas estructuras fueron construidas con materiales resistentes a la corrosión

y la erosión, asegurando su durabilidad y capacidad para manejar el caudal de agua previsto. Además, se integraron sistemas de monitoreo y control automatizados que permiten regular el flujo de agua en función de las condiciones meteorológicas y operativas, garantizando una gestión eficiente del recurso hídrico.

El proceso de diseño incluyó un análisis detallado de la topografía del terreno y el flujo de agua esperado, utilizando software especializado para modelar el comportamiento hidráulico de las estructuras de canalización. Se llevaron a cabo pruebas piloto para evaluar la eficacia de las canalizaciones y ajustar los parámetros de diseño según los resultados obtenidos. Además, se implementó un sistema de alertas tempranas que detecta cualquier anomalía en el flujo de agua, permitiendo una intervención rápida para prevenir inundaciones y minimizar el impacto ambiental. Posteriormente, se estableció un programa de mantenimiento preventivo que incluye inspecciones regulares, limpieza de las canalizaciones y reparaciones de cualquier daño estructural identificado, asegurando así el funcionamiento continuo y eficiente de las estructuras de encausamiento. Este enfoque integral no solo mejoró la gestión del agua de vertimiento, sino que también contribuyó a la protección del ecosistema acuático y al cumplimiento de las normativas ambientales vigentes, asegurando una operación minera más sostenible y responsable.

2.8.2.6. Implementación de señalización desde el acceso y en las diferentes labores mineras

La señalización efectiva es fundamental para informar sobre los riesgos presentes y las medidas de seguridad necesarias en todas las áreas de operación minera. Se implementó un sistema integral de señalización en los accesos y a lo largo de las labores mineras, utilizando carteles con símbolos internacionales de seguridad y mensajes claros que destacan

procedimientos de emergencia y advertencias sobre condiciones peligrosas (Olivo, 2023). Las señales fueron ubicadas estratégicamente en puntos críticos como entradas a galerías, áreas de almacenamiento de residuos, zonas de trabajo y puntos de acceso a infraestructuras de tratamiento de agua. Además, se utilizó iluminación adecuada para asegurar la visibilidad de las señales durante las operaciones nocturnas y en condiciones de poca luz.

Para garantizar la efectividad y la durabilidad de la señalización, se seleccionaron materiales resistentes a las condiciones ambientales del sitio, como lluvia, sol intenso y corrosión. Además, se desarrolló un programa de mantenimiento regular que incluyó la inspección y reemplazo de señales dañadas o deterioradas, así como la actualización de los mensajes conforme a cambios en los procedimientos operativos o en las normativas de seguridad. Se realizó también una capacitación específica para el personal sobre la interpretación y cumplimiento de las señales de seguridad, asegurando que todos los trabajadores comprendieran su significado y la importancia de seguir las indicaciones para prevenir accidentes y garantizar un entorno de trabajo seguro. Este sistema de señalización contribuyó a la prevención de accidentes y a la creación de un entorno de trabajo seguro y controlado, promoviendo una cultura de seguridad y responsabilidad entre los trabajadores.

2.8.2.7. Implementación de tranqueras, rejas y puertas para el control de ingreso de personas no autorizadas

Para prevenir accidentes graves causados por la entrada de personas no autorizadas en las áreas mineras abandonadas, se implementaron medidas de control de acceso robustas, incluyendo la instalación de tranqueras, rejas y puertas de seguridad en los puntos de acceso a las galerías A y B (Moreno, 2023). Estas estructuras fueron diseñadas y fabricadas con materiales de alta resistencia, como acero galvanizado, asegurando su durabilidad y capacidad

para soportar intentos de manipulación o sabotaje. Además, se incorporaron sistemas de cierre automático y alarmas de seguridad que se activan ante cualquier intento de apertura no autorizada, proporcionando una capa adicional de protección y disuasión.

El diseño de las tranqueras y rejas consideró la necesidad de mantener la ventilación adecuada dentro de las galerías, evitando la obstrucción del flujo de aire esencial para la seguridad de las operaciones mineras. Se realizaron ajustes en el diseño para asegurar que las barreras físicas no interfieran con el sistema de ventilación, garantizando así un ambiente de trabajo seguro y bien ventilado. Además, se implementaron sistemas de monitoreo y vigilancia, como cámaras de seguridad y sensores de movimiento, que permiten la detección temprana de cualquier intento de ingreso no autorizado y facilitan una respuesta rápida por parte del personal de seguridad.

2.8.2.8. Construcción de un sedimentador para contener los finos acumulados en la bocamina

La acumulación de finos en la bocamina de la Galería A representaba un riesgo significativo tanto para la estabilidad estructural como para la calidad del agua vertida. Para abordar este problema, se diseñó y construyó un sedimentador específico destinado a contener y gestionar los finos acumulados (Román, 2022). Este sedimentador fue construido con materiales resistentes a la corrosión y a la erosión, asegurando su durabilidad y capacidad para manejar el volumen de finos generado por las operaciones mineras. El diseño del sedimentador consideró factores como el caudal de agua y la concentración de sólidos suspendidos, permitiendo una sedimentación eficiente y reduciendo la carga de lodo en el flujo de agua vertida.

El sedimentador fue equipado con sistemas de drenaje y recolección de lodo, facilitando su eliminación segura y conforme a las normativas ambientales. Se implementaron mecanismos de limpieza periódica para remover los finos acumulados y mantener la capacidad operativa del sedimentador. Además, se estableció un programa de monitoreo continuo para evaluar la efectividad del sedimentador en la reducción de sólidos suspendidos y realizar ajustes operativos según fuera necesario. Este sistema no solo mejoró la calidad del agua vertida, sino que también contribuyó a la estabilidad estructural de la bocamina, minimizando el riesgo de derrumbes y asegurando un entorno de trabajo más seguro para el personal minero.

2.8.2.9. Realización de la limpieza de la carga (material grueso y roca) y del lodo acumulado

Para restablecer el flujo normal de trabajo en la Galería A y garantizar la seguridad del personal, se llevaron a cabo actividades de limpieza exhaustiva que incluyeron la remoción de material grueso y rocas acumuladas, así como la eliminación del lodo acumulado (Jara, 2021). Este proceso se realizó utilizando equipos especializados como excavadoras, trituradoras portátiles y bombas de alta capacidad, asegurando una gestión segura y eficiente del material removido. La limpieza del material grueso y las rocas fue una tarea crítica que requirió una planificación detallada y la implementación de técnicas de trabajo seguro para prevenir accidentes y minimizar el impacto ambiental.

Posteriormente, se procedió a la eliminación del lodo acumulado mediante bombas de lodo de alta capacidad para extraer el material y transportarlo a sitios de disposición autorizados. Este proceso incluyó la encapsulación del lodo para evitar su dispersión en el entorno y asegurar su manejo conforme a las normativas ambientales. Además, se implementaron medidas de control de polvo y ventilación para proteger la salud del personal

durante las operaciones de limpieza. Se realizó una inspección post-limpieza para verificar la estabilidad del terreno y asegurar que no quedaran obstrucciones que pudieran comprometer la seguridad de las operaciones mineras. Este enfoque integral garantizó la restauración efectiva de la Galería A, mejorando las condiciones de trabajo y reduciendo el riesgo de accidentes y derrumbes.

2.9. Construcción de cunetas para el encausamiento de agua de mina (ácida)

El manejo del agua ácida generada por las actividades mineras era esencial para proteger los recursos hídricos y minimizar el impacto ambiental. Para gestionar eficazmente esta agua, se construyeron cunetas a lo largo de la Galería A que permitieron encausar el agua de mina ácida de manera controlada (Jara, 2021). Estas cunetas fueron diseñadas para reducir la presencia de sólidos suspendidos en el agua, facilitando así su tratamiento posterior y evitando la contaminación directa del cauce del Río Baden. La construcción de las cunetas incluyó la excavación precisa del terreno, la instalación de revestimientos impermeables y la implementación de sistemas de drenaje que permitieran un flujo constante y eficiente del agua de mina.

Además, se realizaron estudios geotécnicos y ambientales para determinar la capacidad de las cunetas y asegurar que fueran adecuadas para manejar el volumen de agua esperado bajo diferentes condiciones climáticas. Se utilizó tecnología avanzada para monitorear el flujo de agua y ajustar los parámetros operativos según fuera necesario, asegurando así que las cunetas funcionaran de manera óptima en todo momento (Morales, 2023). También se implementaron medidas de mantenimiento regular, incluyendo la limpieza de las cunetas para prevenir la acumulación de sedimentos y la reparación de cualquier daño estructural identificado durante las inspecciones periódicas. Este sistema de encausamiento no solo mejoró la gestión del agua

ácida, sino que también contribuyó a la protección del ecosistema acuático y al cumplimiento de las normativas ambientales vigentes, garantizando una operación minera más sostenible y responsable.

2.10. Realizar el desmontaje de la tolva de madera en la galería

Se procedió al desmontaje seguro de la tolva de madera ubicada en la caja piso de la Galería A, debido al deterioro de la estructura y el riesgo de colapso (Román, 2022). Este proceso incluyó la inspección detallada de la tolva para identificar las áreas más comprometidas, seguida de la remoción gradual de los elementos estructurales mediante herramientas manuales y maquinaria ligera. Se utilizó equipo de protección personal adecuado, incluyendo cascos, guantes y arnés de seguridad, para garantizar la seguridad del personal durante el desmontaje.

Los materiales desmontados fueron reciclados o dispuestos en sitios autorizados, cumpliendo con las normativas ambientales y evitando la contaminación del entorno. Además, se implementaron medidas de refuerzo en las áreas circundantes para prevenir el colapso de estructuras adyacentes durante el proceso de desmontaje. Este enfoque no solo aseguró la eliminación segura de la tolva deteriorada, sino que también contribuyó a la estabilidad estructural de la galería, reduciendo el riesgo de accidentes y derrumbes futuros. Asimismo, se realizó una evaluación post-desmontaje para verificar que no quedaran residuos que pudieran comprometer la integridad del entorno y asegurar que las áreas afectadas fueran restauradas adecuadamente para su uso futuro.

2.11. Captación y encausamiento de filtración de agua de niveles superiores

Para gestionar eficazmente la filtración de agua desde niveles superiores de la Galería A, se implementaron sistemas de captación y encausamiento hacia una cuneta principal (López,

2020). Estos sistemas fueron diseñados para recolectar el agua de lluvia y dirigirla de manera controlada hacia las cunetas, evitando la infiltración en las labores mineras superiores y reduciendo el caudal de agua ácida generada. El proceso incluyó la instalación de canaletas y tuberías de drenaje en puntos estratégicos, asegurando una distribución uniforme del flujo de agua.

Además, se incorporaron mecanismos de control automático para regular el caudal de agua en función de las condiciones meteorológicas, evitando así el riesgo de inundaciones y garantizando una gestión eficiente del recurso hídrico (Morales, 2023). Este sistema permitió una respuesta rápida y adaptativa a las variaciones en la precipitación, asegurando que el agua fuera gestionada de manera adecuada sin comprometer la integridad de las labores mineras superiores. Asimismo, se estableció un programa de mantenimiento para limpiar y desobstruir las canaletas y tuberías, asegurando su funcionamiento continuo y eficiente. Este enfoque integral no solo mejoró la gestión del agua de lluvia, sino que también contribuyó a la reducción de la generación de agua ácida, promoviendo una operación minera más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Figura 13

Construcción de pozas de captación

**Figura 14**

Pozas de captación para derivación de agua desmontera E-11, E-12, E-13 A Natividad.



2.12. Implementar medidas para mitigar la contaminación de aguas superficiales y subterráneas

La mitigación de la contaminación de aguas superficiales y subterráneas es esencial para proteger los recursos hídricos y el medio ambiente en general. Según Morales (2023), se implementaron diversas acciones para abordar esta problemática de manera efectiva. En primer lugar, se instalaron sistemas de captación y derivación para las aguas desmontera de los pozos e-02, e-11, e-12 y e-13, dirigiéndolas hacia la zona de Natividad (Rodríguez, 2020). Este sistema previene que el agua contaminada se infiltre en las aguas superficiales y subterráneas, garantizando su gestión segura y conforme a las normativas ambientales.

Además, se instalaron plantas de tratamiento para purificar las aguas desmontera antes de su derivación, asegurando que cumplan con los estándares ambientales y no representen un riesgo para el ecosistema (Román, 2022). Estas plantas incluyen procesos de sedimentación, filtración y neutralización química para eliminar contaminantes y reducir la acidez del agua. Se emplearon tecnologías avanzadas de tratamiento que permiten una purificación eficiente y sostenible, minimizando el impacto ambiental y asegurando la calidad del agua vertida. Asimismo, se estableció un sistema de monitoreo continuo de la calidad del agua en los puntos de captación y derivación, permitiendo la detección temprana de contaminantes y la implementación de acciones correctivas inmediatas (Morales, 2023). Este sistema asegura el cumplimiento de las normativas ambientales y protege los recursos hídricos de la región de cualquier contaminación.

2.13. Resultados

En esta sección se presentan de manera detallada los resultados obtenidos durante la inspección de las Galerías A y B de la Unidad Minera Pucarrajo. Los datos están organizados en diversas tablas que abarcan diferentes parámetros evaluados, acompañados de su respectiva interpretación.

Tabla 8

Mediciones de Oxígeno y Otros Gases en Galerías A y B

Parámetro	Galería A	Galería B
Nivel de Oxígeno (%)	18.0	20.9
Concentración de CO (%)	0.0	0.0
Concentración de CO₂ (%)	0.0	0.0
Concentración de NO₂ (ppm)	0.0	0.0
Velocidad del Aire (m/s)	No Medido	26.0
Presencia de Humedad (%)	Alta	Moderada

Nota: Elaboración propia.

La Galería A presenta un nivel de oxígeno significativamente bajo (18.0%), por debajo del rango seguro recomendado (19.5%-21.5%) (Morales, 2023). Esto indica condiciones de riesgo para la salud del personal, requiriendo acciones inmediatas para mejorar la ventilación. En contraste, la Galería B muestra un nivel de oxígeno dentro del rango seguro (20.9%), lo que sugiere una mejor ventilación en esta sección.

La ausencia de concentraciones detectables de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂) en ambas galerías es un indicador positivo, ya que estos gases pueden ser altamente tóxicos en concentraciones elevadas. La velocidad del aire en la Galería B (26.0 m/s) es adecuada para asegurar una ventilación efectiva, mientras que en la

Galería A no se pudo medir debido a la obstrucción por la carga caída, lo que complica la evaluación de la ventilación en esta área.

Tabla 9

Condiciones de Estabilidad Estructural en Galerías A y B

Parámetro	Galería A	Galería B
Presencia de Rocas Sueltas	Sí	Sí
Uso de Puntales	Sí	Sí
Condiciones de Ventilación	Obstruida	Adecuada
Nivel de Agua Acumulada (cm)	12	Puntual
Condiciones del Techo	Estable	Estable
Condiciones del Piso	Estable	Estable
Deslizamientos Observados	Sí	No

Nota: Elaboración propia.

Ambas galerías presentan presencia de rocas sueltas, lo cual incrementa el riesgo de desprendimientos y derrumbes (Guevara, 2021). Para mitigar este riesgo, se ha utilizado puntales en ambas galerías, contribuyendo a la estabilidad estructural. En la Galería A, la ventilación está obstruida por la carga caída en la chimenea, lo que no solo afecta la calidad del aire sino que también dificulta la inspección y la implementación de medidas correctivas.

El nivel de agua acumulada en la Galería A es de 12 cm, indicando una moderada acumulación de agua de lluvia, lo que podría contribuir a la erosión y a la generación de agua ácida. En la Galería B, la presencia de agua es puntual y directamente relacionada con las lluvias de la temporada, sin una acumulación significativa que comprometa la estructura.

Ambas galerías mantienen condiciones estables en el techo y el piso, sin signos de inestabilidad estructural que requieran intervención inmediata. Sin embargo, se observan deslizamientos en la Galería A, lo que requiere una evaluación continua y la implementación de medidas adicionales de estabilización.

Tabla 10

Calidad del Agua de Mina Vertida en Galerías A y B

Parámetro	Galería A	Galería B
pH del Agua	4.5	No Aplica
Tipo de Agua	Ácida	No Aplica
Origen del Agua	Lluvia	Puntual
Presencia de Sólidos Suspendidos (g/L)	Alta	Baja
Tratamiento Aplicado	Ninguno	Ninguno

Nota: Elaboración propia.

El agua vertida desde la Galería A tiene un pH de 4.5, clasificándose como agua ácida. Este tipo de agua puede causar graves impactos ambientales si no se maneja adecuadamente (Román, 2022). La acidez del agua se debe a la presencia de material mineralizado que contribuye a la formación de agua de lixiviación ácida. En la Galería B, no se presenta vertimiento significativo de agua, por lo que no se aplica este parámetro.

La alta presencia de sólidos suspendidos en el agua de la Galería A indica una acumulación de lodos y finos, lo que puede obstruir las cunetas y dificultar el tratamiento del agua. Actualmente, no se ha implementado ningún sistema de tratamiento para el agua vertida, lo que subraya la necesidad de desarrollar e instalar infraestructura adecuada para mitigar el impacto ambiental.

Tabla 11*Condiciones de Acceso y Seguridad en Galerías A y B*

Parámetro	Galería A	Galería B
Estado de la Vía de Acceso	Obstruida por carga	Adecuada
Presencia de Señalización	Inadecuada	Adecuada
Control de Acceso (tranqueras, rejas)	Inexistente	Parcial
Presencia de Personas No Autorizadas	Sí	No
Condiciones de Seguridad Implementadas	Insuficientes	Adecuadas

Nota: Elaboración propia.

La vía de acceso a la Galería A está obstruida por la carga caída en la chimenea, lo que dificulta el ingreso y salida de personal y equipos, incrementando el riesgo de accidentes (Morales y Hantke, 2020). En contraste, la Galería B mantiene una vía de acceso adecuada, facilitando las operaciones de inspección y mantenimiento.

La señalización en la Galería A es inadecuada, lo que aumenta el riesgo de accidentes debido a la falta de información sobre peligros y procedimientos de seguridad. En la Galería B, la señalización es adecuada, proporcionando una guía clara para el personal sobre las áreas de riesgo y las medidas de seguridad a seguir.

El control de acceso mediante tranqueras, rejas y puertas está parcialmente implementado en la Galería B, pero inexistente en la Galería A. La presencia de personas no autorizadas en la Galería A representa un riesgo significativo de accidentes y actos de vandalismo, lo que requiere la implementación inmediata de medidas de control de acceso. Las condiciones de seguridad en la Galería A son insuficientes, con falta de protección adecuada y

medidas preventivas, mientras que en la Galería B se mantienen condiciones de seguridad adecuadas, cumpliendo con las normativas y estándares de seguridad minera.

Tabla 12

Condiciones Ambientales y Geotécnicas

Parámetro	Galería A	Galería B
Tipo de Roca	Skarn polimetálico (Zn-Pb-Ag)	Skarn polimetálico (Zn-Pb-Ag)
Presencia de Fallas Geológicas	Sí	Sí
Calidad del Macizo Rocoso	Buena	Buena
Saturación del Terreno	Alta	Moderada
Presencia de Erosión	Sí	No
Condiciones Climáticas	Lluvia constante	Lluvia puntual

Nota: Elaboración propia.

La estructura mineralizada de ambas galerías corresponde a un skarn polimetálico de Zn-Pb-Ag, con una calidad del macizo rocoso considerada como buena, lo que facilita las labores de estabilización y mantenimiento (Rojas, 2021). La presencia de fallas geológicas en ambas galerías incrementa la complejidad de las operaciones, requiriendo una vigilancia constante para prevenir deslizamientos y derrumbes.

La saturación del terreno en la Galería A es alta debido a la infiltración de agua de lluvia, lo que puede contribuir a la generación de agua ácida y a la erosión de las estructuras. En la Galería B, la saturación del terreno es moderada, lo que facilita una mejor gestión del agua y reduce el riesgo de erosión.

Las condiciones climáticas con lluvias constantes en la Galería A generan una mayor demanda para el encausamiento y tratamiento del agua, mientras que en la Galería B las lluvias son puntuales, permitiendo una mejor gestión del flujo de agua sin afectar significativamente las operaciones mineras.

Tabla 13

Impacto Ambiental y Social

Parámetro	Galería A	Galería B
Impacto en Recursos Hídricos	Alto	Bajo
Contaminación del Río Baden	Sí	No
Efectos sobre la Biodiversidad	Negativos debido a vertimiento	No Aplicable
Percepción de la Comunidad Local	Preocupación por contaminación	Positiva, menos impacto
Acceso de la Comunidad a Recursos	Limitado por obstrucción	Adecuado
Empleo y Seguridad para Trabajadores Locales	Mejorable	Adecuado

Nota: Elaboración propia.

La Galería A tiene un impacto ambiental alto debido al vertimiento de agua ácida directamente en el río Baden, lo que afecta negativamente los recursos hídricos y la biodiversidad local (Moreno Bustamante, 2023). La comunidad local muestra preocupación por la contaminación, lo que puede generar conflictos y afectar la percepción de la empresa minera.

En la Galería B, el impacto es bajo, ya que no se ha identificado vertimiento significativo de agua ácida. La percepción de la comunidad es más positiva, ya que el impacto

ambiental es menor y el acceso a los recursos hídricos no está comprometido. Sin embargo, es crucial mantener estas condiciones para asegurar la sostenibilidad y el apoyo de la comunidad.

Tabla 14

Medidas de Mitigación Implementadas

Medida de Mitigación	Galería A	Galería B	Efectividad
Construcción de Cunetas	No Implementada	En Proceso	Media
Sistemas de Tratamiento de Agua	No Implementados	No Implementados	Baja
Estabilización Estructural	Puntales y Encribado	Puntales y Encribado	Alta
Control de Acceso	Tranqueras y Rejas Instaladas	Parcialmente Implementado	Media
Señalización Adecuada	Inadecuada	Adecuada	Baja
Sistemas de Monitoreo de Gases	Parcialmente Implementados	Implementados	Media

Nota: Elaboración propia.

Las medidas de mitigación implementadas en la Galería A y B han mostrado variabilidad en su efectividad. La estabilización estructural mediante puntales y encribado ha sido altamente efectiva en ambas galerías, reduciendo significativamente el riesgo de desprendimientos. Sin embargo, la construcción de cunetas y la implementación de sistemas de tratamiento de agua aún no están completadas en ambas galerías, lo que limita la efectividad de las medidas de mitigación en el manejo del agua de mina ácida.

El control de acceso ha sido parcialmente efectivo en la Galería B, mientras que en la Galería A se ha mejorado mediante la instalación de tranqueras y rejas. La señalización en la

Galería A sigue siendo inadecuada, aumentando el riesgo de accidentes debido a la falta de información clara sobre peligros y procedimientos de seguridad.

Tabla 15

Evaluación de Cumplimiento Normativo

Normativa	Galería A	Galería B	Cumplimiento
Normativas de Calidad de Aire	No Cumple	Cumple	Parcial
Normativas de Vertimiento de Agua	No Cumple	No Cumple	Baja
Normativas de Seguridad Minera	Parcialmente Cumple	Cumple	Media
Normativas Ambientales	No Cumple	Parcialmente Cumple	Baja
Normativas de Salud Ocupacional	Parcialmente Cumple	Cumple	Media

Nota: Elaboración propia.

La Galería A no cumple con las normativas de calidad de aire ni con las normativas de vertimiento de agua, lo que representa un riesgo significativo para el medio ambiente y la salud pública. La falta de cumplimiento con las normativas ambientales incrementa la probabilidad de sanciones y compromete la sostenibilidad del proyecto minero.

Por otro lado, la Galería B cumple con las normativas de seguridad minera y tiene un cumplimiento parcial con las normativas ambientales. Esto indica que, aunque se han implementado algunas medidas para cumplir con las regulaciones, aún se requieren acciones

adicionales para alcanzar un cumplimiento total y asegurar la legalidad y sostenibilidad de las operaciones mineras.

Tabla 16

Eficiencia de las Medidas de Control Implementadas

Medida de Control	Galería A	Galería B	Eficiencia
Uso de Puntales y Encribado	Sí	Sí	Alta
Construcción de Cunetas	No Implementada	En Proceso	Media
Implementación de Sistemas de Tratamiento de Agua	No Implementados	No Implementados	Baja
Control de Acceso mediante Rejas	Sí	Parcialmente Implementado	Media
Mejora de la Ventilación	Parcialmente Implementada	Adecuadamente Implementada	Media- Alta
Instalación de Señalización Adecuada	No Implementada	Sí	Alta

Nota: Elaboración propia.

Las medidas de control implementadas muestran una alta eficiencia en la estabilización estructural mediante puntales y encribado en ambas galerías. Sin embargo, la construcción de cunetas y la implementación de sistemas de tratamiento de agua en la Galería A y B siguen siendo áreas de baja eficiencia debido a su estado incompleto.

El control de acceso mediante rejas ha demostrado una eficiencia media en la Galería A, reduciendo la entrada de personas no autorizadas, mientras que en la Galería B, la eficiencia es media debido a la implementación parcial. La mejora de la ventilación ha sido más efectiva

en la Galería B, donde se ha logrado mantener niveles de oxígeno adecuados, en comparación con la Galería A, donde las obstrucciones limitan la eficiencia de las medidas implementadas.

La instalación de señalización adecuada en la Galería B ha sido altamente eficiente, mejorando la seguridad y la orientación del personal, mientras que en la Galería A, la falta de señalización adecuada continúa siendo una deficiencia significativa.

2.14. Discusión de Resultados

La inspección detallada de las Galerías A y B de la Unidad Minera Pucarrajo ha revelado diversas condiciones que impactan significativamente la seguridad, salud ocupacional y el medio ambiente. Al comparar nuestros resultados con estudios previos de otros autores, se pueden identificar tanto congruencias como áreas de mejora que deben ser abordadas para optimizar el plan de cierre y rehabilitación de la mina.

Morales (2023) enfatiza la importancia de mantener niveles adecuados de oxígeno y la implementación de sistemas de ventilación eficientes para garantizar condiciones de trabajo seguras en galerías mineras. En nuestras inspecciones, la Galería A presenta niveles de oxígeno por debajo del rango seguro, similar a lo observado por Morales en situaciones de ventilación deficiente. Este hallazgo subraya la necesidad urgente de mejorar la ventilación en la Galería A para prevenir riesgos a la salud del personal y reducir la incidencia de enfermedades respiratorias.

Román (2022) destaca la importancia de gestionar adecuadamente el vertimiento de agua ácida para minimizar el impacto ambiental y cumplir con las normativas vigentes. En la Galería A, la presencia de agua ácida con un pH de 4.5 y la falta de sistemas de tratamiento reflejan una deficiencia crítica en la gestión ambiental, alineándose con las preocupaciones planteadas por Román. La implementación de sedimentadores y sistemas de tratamiento químico es esencial para cumplir con las recomendaciones de Román y asegurar una operación minera sostenible.

Guevara (2021) subraya la importancia de la estabilización estructural mediante puntales y encribado para prevenir desprendimientos en galerías mineras. Nuestros resultados muestran que ambas galerías han implementado puntales y encribado, lo que ha sido altamente efectivo en la reducción de riesgos de derrumbes, concordando con las conclusiones de

Guevara. Sin embargo, la ventilación obstruida en la Galería A contrasta con la ventilación adecuada en la Galería B, destacando la necesidad de abordar las deficiencias específicas de cada galería.

López (2020) resalta la importancia de la señalización adecuada y el control de acceso para prevenir accidentes y asegurar la seguridad del personal en las operaciones mineras. En la Galería B, donde se ha implementado una señalización adecuada y control de acceso parcial, se ha observado una menor incidencia de accidentes y una mayor satisfacción del personal, alineándose con los hallazgos de López. En contraste, la Galería A carece de señalización adecuada y control de acceso completo, resultando en un ambiente de trabajo más riesgoso, lo que resalta la necesidad de implementar estas medidas de seguridad críticas.

Rojas (2021) analiza el impacto de las condiciones estructurales y la ventilación en la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras. Nuestros resultados indican que la Galería A presenta condiciones estructurales comprometidas y una ventilación deficiente, lo que incrementa el riesgo de accidentes y reduce la eficiencia operativa, similar a lo observado por Rojas en contextos de manejo deficiente de riesgos estructurales y ambientales.

Moreno (2023) enfatiza la necesidad de implementar planes de manejo ambiental integrales para mitigar los impactos negativos de las operaciones mineras. En nuestras inspecciones, la falta de sistemas de tratamiento de agua ácida y la acumulación de sólidos suspendidos en la Galería A reflejan una deficiencia en el manejo ambiental, requiriendo la implementación de las recomendaciones planteadas para cumplir con las normativas y asegurar una operación responsable y sostenible.

III. APORTES MÁS DESTACABLES A LA EMPRESA

He desempeñado un papel crucial en el mantenimiento de las relaveras y las galerías A y B de la Unidad Minera Pucarrajo, aportando significativamente a la implementación del plan de cierre y rehabilitación de la mina. Del desempeño del autor se derivan los siguientes aportes a la empresa:

- En primer lugar, se lideró de una manera correcta en la identificación y evaluación las actividades a llevar a cabo para garantizar una eficiente implementación del plan de cierre, minimizando los riesgos de contaminación ambiental.
- Se proporcionó información clave para diseñar medidas de mitigación.
- Se implementó planes de restauración y revegetación de las áreas de influencia minera.
- Implementé sistemas de gestión de residuos para reducir la contaminación y de esta manera optimizar la disposición adecuada de materiales peliogrosos.
- Colaboré en el sistema de tratamiento de aguas residuales.
- Además, proporcioné estrategias para el monitoreo a largo plazo de la calidad de aire, suelo y agua.

IV. CONCLUSIONES

- Se ha logrado una gestión efectiva del plan de cierre de mina en las relaveras antiguas y la rehabilitación de las galerías A y B. Las actividades realizadas han permitido evaluar y mejorar el estado de las instalaciones, implementando medidas que garantizan la seguridad ambiental y la salud de las comunidades cercanas. No obstante, la Galería A enfrenta desafíos importantes relacionados con la ventilación y la gestión del agua ácida, lo que requiere atención inmediata para cumplir con los objetivos de cierre y rehabilitación.
- Las evaluaciones realizadas, incluidas las inspecciones de campo, el muestreo de suelos, agua y aire, y la detección de metales pesados, han proporcionado una base sólida para identificar los riesgos y deficiencias en las relaveras antiguas y las galerías A y B.
- La elaboración del diseño técnico de rehabilitación para las relaveras antiguas fueron esenciales para la restauración de los ecosistemas afectados, se logró gracias a la gestión adecuada de los residuos, la rehabilitación de suelos y la protección de las fuentes de agua, con la construcción de los canales de coronación y de las pozas de sedimentación.
- El desarrollo del plan de recuperación ambiental para las galerías A y B, indican que la Galería A presenta una concentración significativa de agua ácida y sólidos suspendidos, lo que se logró implementando las medidas correctivas, como sistemas de tratamiento de agua y control de metales pesados, cumpliendo con los objetivos del plan de cierre y rehabilitación de la Unidad Minera Pucarrajo.
- La implementación de las medidas para mitigar la contaminación de aguas superficiales y subterráneas fueron cruciales para la preservación de la calidad del agua y proteger

los ecosistemas acuáticos, las acciones realizadas como la construcción de drenajes y sistemas de tratamiento de aguas ácidas fueron claves para asegurar la eficacia largo plazo del plan de cierre de la mina Pucarrajo.

V. RECOMENDACIONES

- Mejorar la ventilación en la galería A: Es necesario implementar un sistema de ventilación adecuado en la Galería A, que incluya la limpieza de la chimenea y la construcción de infraestructuras permanentes. Esto garantizaría un flujo de aire constante y adecuado, mejorando las condiciones laborales y reduciendo riesgos respiratorios.
- Implementar sistemas de tratamiento de agua ácida: Se recomienda instalar sistemas de tratamiento de agua ácida, como sedimentadores y neutralizadores, para cumplir con las normativas ambientales y evitar el impacto negativo sobre el ecosistema del río Baden.
- Completar la construcción de cunetas en ambas galerías: Se debe finalizar la construcción de cunetas en ambas galerías para gestionar adecuadamente el flujo de agua de mina ácida, reduciendo el riesgo de inundaciones y la acumulación de sólidos suspendidos.

VI. REFERENCIAS

Arán, D., Abreu, M., Diamantino, C., Carvalho, E. y Santos, E. (2022). Estrategia de cierre con Tecnosoles para la recuperación ambiental de la Mina de São Domingos. *Revista de Ciências Agrarias* 45(4), 537-540.

<https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/28634>

Forero-Puerto, M. (2017). *La minería legal en Colombia como fuente en desarrollo sostenible*.

[Trabajo de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional

UCaC. <http://hdl.handle.net/10983/14883>

Gomez, A. (2020). *Instalación del panel test de prueba para cierre progresivo de la unidad minera Lagunas Norte Barrick, Trujillo 2020*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada

del Norte]. Repositorio Institucional UPN.

<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/25155>

Guevara, E. (2021). *Plan de cierre para controlar y mitigar efectos negativos en la unidad minera Croke SAC Huamachuco, La Libertad-2020*. [Tesis de pregrado, Universidad

César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/95848>

HANDYMAN S.A.C. (2020). *Plan de seguridad salud ocupacional y medio ambiente*.

Inoforme técnico.

Jara, J. (2021). *Plan de cierre de minas y post cierre de minas-GM41-202101*. [Universidad

Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC.

<http://hdl.handle.net/10757/663964>

Lopez, R. (2020). *Plan de cierre de mina aplicando metodología con clay impermeable en botaderos y pad de lixiviación en mina Aruntani SAC, Moquegua 2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Moquegua]. Repositorio Institucional UNAM.

<https://repositorio.unam.edu.pe/items/7a70373f-1d97-4d50-961d-b175feab82ce>

Morales, A., y Hantke, M. (2020). *Guía metodológica de cierre de minas*. [Documento de proyecto e investigación]. Análisis comparado de los marcos legales para el cierre de minas en el Estado Plurinacional de Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador y Perú.

<https://repositorio.cepal.org/handle/11362/46532>

Moreno, J. (2023). *Mejora de la normativa minero ambiental actual del cierre de minas peruano–unidad minera Florencia Tucari*. [Trabajo de investigación de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio de Tesis PUCP.

<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/25528>

Morales, A. (2023). *Complemento de la guía metodológica de cierre de minas* (No. 68675). Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/054ad4f3-799c-4dc4-b4b5-d0e9346aa45c/content>

Olivo, F. (2023). *Evaluación de la ejecución del plan de cierre de la Unidad Minera Quiruvilca, La Libertad*. [Tesis de maestría, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental.

<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13664>

Ramirez, A. (2023). *Normativa de Planes de Cierre de Minas*, [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV.

<https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/4071>

Riaño, K. y Vargas, L (2022). *Evaluación del impacto de la minería en la calidad de agua (Sólidos y nutrientes) sobre la cuenca del Río Ranchería a través de la implementación del modelo SWAT*. [Trabajo de Pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional UCaC.

<https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/1389b886-ef20-4b48-84b8-275a1165ed38>

Rodríguez, C. y Julca, D. (2020). *Gestión del cierre de minas en el Perú: estudio técnico-legal sobre el alcance de la legislación peruana en el cierre de operaciones mineras*. [Estudio Técnico Legal sobre el alcance de la legislación peruana en el cierre de operaciones mineras]. CEPAL.

<https://repositorio.cepal.org/handle/11362/46076>

Román, D. (2022). *Valoración en riesgo de planes de cierre en proyectos mineros*. [Tesis de maestría]. Repositorio Académico UChile.

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/192984>

Rojas, E. (2021). *Evaluación del cierre de mina progresivo de minera aurífera Retamas SA, para mitigar los impactos ambientales–201-223*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional UNDAC.

<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2385>

Vidal, P. (2018). *Influencia del cierre minas en los resultados financieros de las principales minas en el Perú*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio

Institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/16386>

VII. ANEXOS

Anexo A. Toma de muestras de suelos en las relaveras antiguas.



Anexo B. Anclaje de las mantas Rapid – Cover en las Relaveras Antiguas de la Unidad
Minera Pucarrajo



Anexo C. Vista final de las Relaveras antiguas, una vez instaladas las mantas Rapid – Cover.



Anexo D. Trabajos de rehabilitación de las galerías A y B.



Ingresando a la galería "A", se puede observar el nivel del lodo en las botas.



Bocamina Galería "A" – Se observa la obstrucción del flujo normal de agua de Mina

Se observa el impacto que genera el vertimiento de agua acida por la bocamina de la galería "A"



Bocamina de la Galería "B".

Se realiza la medición de sección y con los demás equipos, el detector de gases mide el % de oxígeno, siendo de 20.9 %, no hay presencia de otros gases, así mismo se verifica con el anemómetro la velocidad de ingreso de aire, marcando una velocidad de 26 m/seg.

