

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

Diseño de un sistema automatizado para mejorar el monitoreo y control de niveles de agua en piezómetros de relavera

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Antonio Carlos Lozano Souto

 [0000-0006-1367-0785](https://orcid.org/0000-0006-1367-0785)

Asesor

MSc. Jose Antonio Corimanya Mauricio

 [0000-0003-1078-4155](https://orcid.org/0000-0003-1078-4155)

LIMA – PERÚ

2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por darme fortaleza en los momentos difíciles; a mi padre, Antonio, mi fuente de inspiración y sabiduría, y, aunque ya no esté físicamente conmigo, su espíritu y amor continúa guiándome en cada paso de este camino; a mi madre Carmen, por su amor y sacrificio; a mi esposa Carmina, que ha sido mi ancla por su amor y apoyo incondicional; y a mis amadas hijas Carmen y Ana, que iluminan cada uno de mis días.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi asesor, MSc. Ing. José Antonio Corimanya y a mi especialista MBA Ing. Eder León Salazar Dulanto por su guía, dedicación y paciencia durante el desarrollo de esta tesis. Su experiencia y acompañamiento fueron fundamentales para alcanzar este logro.

A mis docentes y compañeros, por compartir conmigo conocimientos, experiencias y momentos que enriquecieron mi formación profesional.

Especialmente, al Ing. Julio Iman Ancajima, colaborador, compañero y amigo, a quien, con su trabajo, experiencia, entusiasmo y fe, le debo el haber podido culminar los estudios de grado universitario.

Y, finalmente, a todos los que, de una u otra manera, contribuyeron en este camino, les expreso mi más sincera gratitud.

Resumen

La presente investigación denominada “Diseño de un sistema automatizado para mejorar el monitoreo y control de niveles de agua en piezómetros de relavera” tiene como fin diseñar un sistema automatizado que mejore el monitoreo de los niveles piezométricos de la relavera Quiulacocha, ubicada en la región Pasco. Este sistema busca mejorar la recolección de datos geotécnicos que son fundamentales para mantener la estabilidad física de la relavera, mediante la aplicación de sensores de nivel con elementos de transmisión inalámbrica de datos y plataforma de gestión que permita manejar, analizar y presentar los datos en tiempo real.

El estudio consideró la selección de equipos geotécnicos que se adapten a la realidad de la relavera Quiulacocha, así como equipos de seguridad que las mantengan en funcionamiento en todo momento. Asimismo, se desarrolló una metodología que permita garantizar las mediciones y su confiabilidad.

Además, se realizó un análisis comparativo entre los métodos manuales y el sistema automatizado, evidenciando mayor eficiencia, precisión, mayor disponibilidad de la data y la reducción de riesgos para el personal que realiza las mediciones.

Los resultados muestran que el sistema automatizado permite detectar con mayor efectividad las variaciones de los niveles piezométricos, lo cual permite una gestión preventiva del riesgo geotécnico permitiendo salvaguardar la integridad de la relavera.

Se concluye que la implementación de tecnologías modernas de automatización en relaveras presenta una alternativa superior a la toma de datos manual y que es viable a mediano y largo plazo, pues previene accidentes a la comunidad aledaña, daños ambientales y multas elevadas innecesarias que podrían evitarse con este sistema.

Palabras clave — Monitoreo automatizado, piezómetro, nivel piezométrico, minería, estabilidad geotécnica, Quiulacocha.

Abstract

The present research, entitled “Design of an Automated System to Improve the Monitoring and Control of Water Levels in Tailings Dam Piezometers,” aims to design an automated system that enhances the monitoring of the piezometric levels at the Quiulacocha tailings dam, located in the Pasco region. This system seeks to improve the collection of geotechnical data, which is essential for maintaining the physical stability of the tailings dam, through the application of level sensors, wireless data transmission, and a platform that enables real-time data management, analysis, and transmission.

The study involved the selection of geotechnical equipment adapted to the specific conditions of the Quiulacocha tailings dam, as well as safety equipment to ensure continuous operation. Additionally, a methodology was developed to guarantee the reliability and accuracy of the measurements.

A comparative analysis between manual methods and the automated system was also carried out, revealing greater efficiency, higher precision, increased data availability, and a reduction in risks for the personnel performing the measurements.

The results show that the automated system more effectively detects variations in the piezometric levels, allowing for a preventive approach to geotechnical risk management and thereby safeguarding the integrity of the tailings dam.

It is concluded that the implementation of modern automation technologies in tailings dams presents a superior and viable alternative to manual methods in the medium and long term, as it helps prevent accidents affecting nearby communities, environmental damage, and avoidable high fines.

Keywords — Automated monitoring, piezometers, piezometric level, tailings dam, geotechnical stability, mining, Quiulacocha.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Descripción del problema de investigación	1
1.2.1 Formulación del problema	2
1.3 Objetivos del estudio	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4. Hipótesis y operacionalización de variables	3
1.4.1 Hipótesis general.....	3
1.4.2 Hipótesis específicas.....	4
1.4.3 Operacionalización de las variables	4
1.5 Antecedentes investigativos	5
1.5.1 Antecedentes internacionales.....	5
1.5.2 Antecedentes nacionales	9
1.5.3 Antecedentes locales	11
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual.....	14
2.1 Marco teórico.....	14
2.1.1 Relave y depósitos de relaves	14
2.1.2 Tipos de depósitos de relave	19
2.1.3 Incidentes en depósitos de relaves.....	20
2.1.4 Modos de falla en depósitos	21
2.1.5 Sistema de monitoreo geotécnico.....	23
2.1.6 Monitoreo del depósito de relave	25

2.1.7	Variables geotécnicas monitoreadas	26
2.1.8	Métodos usados en el monitoreo de las variables geotécnicas	32
2.1.9	Manejo de la data recopilada.....	37
2.1.10	Importancia del monitoreo continuo.....	38
2.1.11	Construcción, operación y monitoreo en el Perú	38
2.2	Marco Conceptual	40
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		44
3.1	Metodología de la investigación.....	44
3.1.1	Unidad de análisis	44
3.1.2	Fuentes de información	44
3.2	Tipo y nivel de investigación.....	45
3.2.1	Tipo de investigación.....	45
3.2.2	Nivel de investigación.....	46
3.3	Diseño de la Investigación.....	46
3.4	Diseño del sistema automatizado en la relavera Quiulacocha	46
3.4.1	Estado actual de la relavera	46
3.4.2	Descripción de equipos instalados	47
3.4.3	Ejecución de actividades	52
3.4.4	Control de la calidad.....	63
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados		67
4.1	Análisis gráfico de resultados	67
4.2	Formulación de las hipótesis	72
4.2.1	Hipótesis alternativa (H_A).....	72
4.2.2	Hipótesis nula (H_0).....	72
4.3	Análisis estadístico comparativo entre el monitoreo tradicional a mano y el sistema automatizado	72
4.4	Contrastación de las hipótesis.....	75
4.5	Discusión de resultados obtenidos	83

Conclusiones	85
Recomendaciones	87
Referencias bibliográficas	88
Anexos	90

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Operacionalización de las variables	4
Tabla 2: Eventos gatilladores que alteran parámetros críticos	22
Tabla 3: Equipos instalados en campo	52
Tabla 4: Medición de los piezómetros.....	70
Tabla 5: Comparativa entre el método tradicional y el sistema automatizado	72
Tabla 6: Comparativas numéricas entre los dos métodos de monitoreo	72
Tabla 7: Tiempo de respuesta estimado realista en horas	73
Tabla 8: Estadística obtenida de 15 monitoreos en la relavera Quiulacocho.....	74

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Depósito de relave visto desde arriba	15
Figura 2 : Depósito de relave, vista lateral	16
Figura 3 : Método constructivo aguas abajo.....	17
Figura 4 : Método de construcción eje central.....	18
Figura 5 : Método constructivo aguas arriba	19
Figura 6 : Instrumentos invasivos en mecanismos de falla.....	35
Figura 7 : Instrumentos semi-invasivos en mecanismos de falla.....	36
Figura 8 : Instrumentos no invasivos en mecanismos de falla.....	36
Figura 9 : Piezómetro 4500S	48
Figura 10: Barómetro 4580-1	48
Figura 11: Nodo Ackcio BEAM-VW-S1	49
Figura 12: Nodo Gateway Ackcio.....	50
Figura 13: Interconexión entre los nodos y el nodo Gateway Ackcio.....	51
Figura 14: Pararrayo	51
Figura 15: Conexión entre poste pararrayo y pozo a tierra	53
Figura 16: Poste pararrayo instalado	53
Figura 17: Instalación del piezómetro	54
Figura 18: Primeras mediciones del piezómetro	55
Figura 19: Instalación del piezómetro	55
Figura 20: Conexión del sensor barométrico.....	56
Figura 21: Instalación del sensor barométrico con su nodo	57
Figura 22: Prueba de suministro de energía del Gateway.....	58
Figura 23: Conexiones internas del Gateway y del pozo a tierra.....	58
Figura 24: Instalación del Gateway	59
Figura 25: Conexión entre los nodos con el Gateway vista desde Ackcio	60
Figura 26: Nodos de transmisión vistos desde Ackcio	60

Figura 27: Sensores visualizados desde la plataforma Ackcio	61
Figura 28: Distribución de nodos y el sistema de comunicación en la relavera	61
Figura 29: Configuración del proyecto en Ackcio	62
Figura 30: Capacitación al personal vía online.....	63
Figura 31: Certificado de calidad de los piezómetros, barómetros y los cables.....	64
Figura 32: Ubicación geográfica y elementos circundantes.....	65
Figura 33: Mapa de zonas de peligrosidad circundante a la relavera Quiulacochoa	66
Figura 34: Vista aérea de la relavera Quiulacochoa, mostrando los niveles de agua registrados en los piezómetros.....	67
Figura 35: Ubicación de piezómetros en la relavera Quiulacochoa.....	71
Figura 36: Comparación de tiempo de respuesta.....	73
Figura 37: Resultados de la pregunta 1	76
Figura 38: Resultados de la pregunta 2	77
Figura 39: Resultados de la pregunta 3	77
Figura 40: Resultados de la pregunta 4	78
Figura 41: Resultados de la pregunta 5	80
Figura 42: Resultados de la pregunta 6	80
Figura 43: Resultados de la pregunta 7	81
Figura 44: Resultados de la pregunta 8	82
Figura 45: Resultados de la pregunta 9	82
Figura 46: Resultados de la pregunta 10	83

Introducción

En la actualidad, la gestión de relaveras constituye un factor fundamental dentro de la minería moderna para garantizar la seguridad ambiental, social y de operaciones en la relavera. Una de las acciones clave en dicha gestión es el monitoreo continuo de los niveles de agua en el interior de las estructuras donde se acumulan los relaves, pues dicha variable influye directamente en la estabilidad del depósito.

En forma tradicional, los monitoreos se han realizado mediante métodos manuales que, si bien han sido utilizados de gran manera tiempo atrás, presentan serias limitaciones importantes en cuanto a fiabilidad de los datos y la frecuencia de medición. Otro punto a considerar es el factor geográfico, los técnicos deben exponerse a condiciones de riesgo para realizar las mediciones correspondientes. En respuesta a esta problemática, el avance de la tecnología ha desarrollado los sistemas automatizados de medición de datos en forma remota, los cuales muestran ser una alternativa mucho más eficiente que las tradicionales y sobre todo, permita asegurar la integridad de las estructuras de las relaveras.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal realizar el diseño e implementación de un sistema automatizado que permita mejorar el monitoreo y control de los niveles de agua en piezómetros de relavera, siendo el caso de estudio en la relavera Quiulacocha, ubicado en el distrito de Simón Bolívar, Pasco. Esta relavera, en base a su antigüedad, ubicación y condición geotécnica, muestra ser una alternativa ideal donde se pueda implementar este sistema.

Durante el desarrollo del presente estudio, se abordaron temas como selección de equipos especializados, la implementación de una plataforma amigable que permita tratar los datos en tiempo real y los beneficios que muestra este sistema automatizado frente al sistema manual, con el fin de demostrar la viabilidad de esta propuesta.

Esta investigación mejora los procesos de control de seguridad en la minería y permite cumplir con las exigencias legales y el enfoque preventivo que debe promover la minería responsable del país.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1. Generalidades

La presente investigación aborda el análisis y evaluación de las condiciones hidrogeológicas y geotécnicas en la relavera Quiulacocha, la cual está ubicada en la región de Pasco, Perú. Este estudio se centra especialmente en los niveles de agua en piezómetros, así como su impacto en la estabilidad estructural del depósito de relave, para diseñar un sistema automatizado de monitoreo y control continuo en la relavera Quiulacocha.

Previo al diseño del sistema automatizado, se revisaron antecedentes bibliográficos sobre estabilidad de depósitos y las diversas fallas que suceden en ellas. Además, también se recopiló información geotécnica y ambiental de la zona.

En base a esta información, la investigación propone un sistema automatizado que mejore el monitoreo de los niveles de agua en los piezómetros, de manera que permita aumentar la seguridad de los depósitos de relave y mejore también la capacidad de respuesta ante fallas o inestabilidad.

Este estudio contribuye con un enfoque innovador al integrar sistemas automatizados en depósitos de relave, aportando con conocimiento en el campo geotécnico y monitoreo continuo. Además, proporciona base técnica en mejoras de seguridad y sostenibilidad en relaveras abandonadas o que actualmente siguen operando.

1.2. Descripción del problema de investigación

El Perú es uno de los países que tiene mayor actividad minera, siendo también uno de los sectores más importantes con respecto a la economía del país. Sin embargo, durante su actividad, ha dejado una gran cantidad de depósitos de relaves abandonados los cuales están distribuidos a lo largo del territorio peruano, los cuales contienen residuos producto de la extracción de minerales. (Cerda, 2022)

Estos depósitos de relaves, al no ser gestionados de forma adecuada podrían presentar riesgos ambientales y de seguridad, especialmente en los ecosistemas acuáticos

de las comunidades aledañas como los ríos, lagos y lagunas. La posible filtración de agua contaminada de los relaves, así como la falta de monitoreo geotécnico adecuado sobre los niveles de presión intersticial en los piezómetros, dificulta la detección de fallas que comprometen a la estabilidad estructural del depósito. (Catripán, 2024)

Sin embargo, estos monitoreos se hacen de forma manual y ocasional, lo que conlleva a que sean limitadas. Esto ocasiona que los datos tomados sean imprecisos lo cual no se pueda hacer una correcta toma de decisiones. En zonas remotas donde hay dificultades de acceso junto a condiciones climáticas desfavorables se generan los siguientes problemas:

- **Falta de datos en tiempo real:** Dado que el monitoreo es en forma manual, la información obtenida no es de forma continua, de manera que impide la identificación temprana de anomalías en el depósito.
- **Riesgos de errores:** Si el monitoreo es manual, existe la posibilidad de cometer errores en el registro de la información, así como la interpretación de datos.
- **Condiciones de trabajo adversas:** Si el depósito de relaves se encuentra en una zona de difícil acceso, el monitoreo será impreciso, costoso y lento.
- **Impacto en la toma de decisiones:** Dado que no es posible contar con data confiable y precisa, el plan de mantenimiento de los depósitos puede no ser efectivos, ocasionando que las probabilidades de falla aumenten.

Estos desafíos no solo comprometen la integridad de las estructuras de los depósitos de relaves, sino también la seguridad ambiental de las comunidades aledañas y el cumplimiento de la parte ambiental.

1.2.1 Formulación del problema

1.2.1.1 Problema general. ¿En qué medida la aplicación del sistema tradicional de monitoreo afecta la confiabilidad y eficiencia de los datos piezométricos en una relavera?

1.2.1.2 Problemas específicos.

- ¿En qué medida la deficiente selección de los equipos de automatización afecta la confiabilidad en las mediciones de los piezómetros ubicados en zonas geográficas diversas de las relaveras?
- ¿En qué medida las limitaciones del sistema de transmisión de datos y las condiciones ambientales del entorno afectan negativamente la confiabilidad y disponibilidad de la data tomada en tiempo real por los piezómetros?
- ¿En qué medida el uso del monitoreo manual en los piezómetros de relaveras impacta negativamente en los costos operativos y eficiencia del control de niveles de agua, en comparación de usar sistemas automatizados?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un sistema automatizado que permita mejorar el monitoreo continuo y eficiente de los niveles de agua en los piezómetros de las relaveras.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las especificaciones técnicas de los equipos de automatización que permita una medición continua de los niveles de agua y se adapte a las características geográficas de las relaveras.
- Implementar una metodología que permita recopilar los datos de los piezómetros garantizando su confiabilidad y disponibilidad en tiempo real.
- Comparar los costos y beneficios de los sistemas automatizados frente a los métodos manuales tradicionales en el contexto de control y monitoreo de niveles de agua.

1.4. Hipótesis y operacionalización de variables

1.4.1 Hipótesis general

El diseño de un sistema automatizado permitirá el monitoreo continuo y eficiente de los niveles de agua en los piezómetros de las relaveras.

1.4.2 Hipótesis específicas

- La determinación de las especificaciones técnicas de los equipos de automatización permitirá garantizar una medición continua de los niveles de agua asegurando su adaptabilidad a las características geográficas de las relaveras
- La implementación de una metodología para la recopilación de la data de los piezómetros permitirá mejorar su confiabilidad y disponibilidad de información en tiempo real.
- Los sistemas automatizados para el monitoreo y control de niveles de agua serán más rentables que los métodos manuales tradicionales, al minimizar errores y optimizar tiempos de respuesta.

1.4.3 Operacionalización de las variables

Tabla 1

Operacionalización de las variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADOR
Independiente Sistema de automatización	Es el proceso de crear una solución tecnológica que permita medir de forma precisa y continua el nivel de agua de los depósitos de relaves, usando sensores, transmisión de datos in situ y algoritmos de control que permita garantizar la estructura del depósito y reducir los daños al medio ambiente	El sistema automatizado se diseñará en función a la selección y tipos de sensores en los piezómetros, sistema de comunicación entre sensores, algoritmo de control automatizado, infraestructura del software de automatización y el tiempo junto a la calibración del sistema al implementarse.	Tecnología de sensores	Error promedio de las lecturas
			Algoritmos de control automático	Tiempo de respuesta del sistema en segundos
			Sistema de comunicación de datos	Porcentaje de disponibilidad del sistema automatizado
Dependiente Precisión del monitoreo de niveles de agua	Es el proceso sistemático de medición de los niveles de agua dentro del depósito de relave, mediante el uso de un sistema automatizado, con el objetivo de mantener la seguridad estructural y reducir la contaminación ambiental	El monitoreo eficiente de los niveles de agua en el piezómetro se da mediante un sistema automatizado que mide de forma continua el nivel de agua del depósito, el tiempo de respuesta por parte del algoritmo, una precisión y una fiabilidad de manera que no tenga interrupciones	Eficiencia del control	Porcentaje de data valida transmitida
			Fiabilidad de los datos del monitoreo	Porcentaje de tiempo en rango ideal
			Rapidez en la detección y corrección	Tiempo promedio entre la detección y la acción correctiva en segundos

Fuente: Elaboración propia

1.5 Antecedentes investigativos

1.5.1 Antecedentes internacionales

Catripán C. (2024) elaboró una estrategia para reducir la instrumentación mínima en el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves en Chile con el fin de mejorar la calidad de la data para la toma de decisiones respecto a la operación y la estructura del depósito.

Tuvo como problemática la mala gestión de los relaves mineros, los cuales pueden representar riesgos serios para las personas, así como el medio ambiente.

Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- Definir una estrategia que permita reducir la instrumentación de monitoreo geotécnico de depósitos de relaves de forma ordenada y sistemática.
- Revisar antecedentes sobre incidentes de depósitos de relaves clasificándolos en base al país de ubicación, año y su causa de fallo.
- Revisar la normativa nacional e internacional referente al diseño, operación y monitoreo de los depósitos de relaves.

La investigación es del tipo aplicada pues pretende proponer una estrategia en el monitoreo, con un enfoque cualitativo pues se centra en el análisis, interpretación y comparación de la bibliografía, con un alcance descriptivo y propositivo pues describe las fallas y propone una estrategia que defina la instrumentación mínima, con un diseño documental no experimental pues realiza análisis bibliográfico y recolecta información de campo, pero sin manipular las variables

Los resultados obtenidos fueron:

- Se observó que la cantidad de instrumentación se correlaciona directamente con el volumen del depósito, el cual es proporcional a la automatización que necesita para su correcto funcionamiento.
- Un correcto análisis de modos de falla muestra los riesgos más importantes que se deben priorizar.
- La estrategia se centra en abordar fallas delicadas que resulte imposible preverlas o mitigarlas, a fin de alertar a la población cercana que pueda ser afectada.

Cerda V. (2022) realizó una propuesta de monitoreo geotécnico avanzado para depósitos de relaves, de manera que se combinen métodos tradicionales y modernos a fin de monitorear diversas variables de control para controlar la falla de manera efectiva.

Tuvo como problemática abordar la necesidad de realizar constante monitoreo sobre los depósitos de relaves, pues su falla produciría una catástrofe medioambiental poniendo en peligro a las personas y la biodiversidad del lugar.

Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- Desarrollar una propuesta metódica de monitoreo geotécnico que combine sistemas invasivos y no invasivos agregando instrumentos modernos que aporten a la causa.
- Revisión bibliográfica de las características de los depósitos de relaves, sus fallas comunes junto a las variables geotécnicas a analizar.
- Revisión de métodos invasivos y no invasivos clasificándolos en base a sus ventajas y desventajas.

La investigación es del tipo aplicada pues pretende proponer una metodología para dar mejora al monitoreo geotécnico, con un enfoque cualitativo pues se centra en el análisis e interpretación de la bibliografía, con un alcance descriptivo y propositivo pues describe los métodos de monitoreo existente y propone una metodología en base a las ventajas de los mismos, con un diseño documental no experimental pues realiza análisis bibliográfico y recolecta información de campo pero sin manipular las variables

Los resultados obtenidos fueron:

- Se observó que se realiza el seguimiento de las variables geotécnicas se realiza de forma individual y no integrada como debería ser.
- Los sistemas de instrumentación chilenos que son más robustos centran su atención en el nivel freático y las presiones de los poros.
- No existe diversidad de instrumentación en el monitoreo de las deformaciones, especialmente en deformaciones puntuales, internas y asociadas a un área.

- Se observó que, a medida del desarrollo de esta investigación, se van modernizando los sistemas de instrumentación en depósitos

Trevisan D. (2022) determinó un índice de estabilidad física para depósitos de relaves con el fin de estandarizar un sistema de gestión del manejo de los residuos sólidos de estos en Brasil.

Tuvo como problemática evitar la rotura de depósitos que contaminan ríos y hectáreas de vegetación. El gobierno de Brasil implementó una legislación que es ineficiente pues solo monitorea datos externos del depósito mas no los datos internos como la licuación estática.

Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- Proponer un Índice de estabilidad física para los depósitos de relaves como medida preventiva a la normativa actual brasileña.
- Revisar data actual de los relaves brasileños para determinar el índice de estabilidad física.
- Clasificar los depósitos de relaves en base a su vulnerabilidad y peligrosidad que están contemplados en la normativa brasileña.
- Identificar los vacíos en la normativa y proponer cambios que contribuyan a la mejora de la estabilidad del depósito de relave.

La investigación es del tipo aplicada pues propone una mejora en la normativa brasileña con respecto a los relaves, con un enfoque cualitativo pues analiza la normativa brasileña como fallas y sistemas de monitoreo en los depósitos, con un alcance descriptivo y propositivo pues detalla la situación actual de los depósitos de relaves, así como la normativa que la rige y propone la adaptación de un índice de estabilidad física con un diseño documental no experimental pues revisa bibliografía como datos de catastros sin manipular variables debido a que solo realiza comparaciones.

Los resultados obtenidos fueron:

- Se aplicó el Índice de Estabilidad Física de Chile a Brasil, pues agrega más parámetros estructurales externos a monitorear.

- El Índice de Estabilidad Física es una herramienta robusta que ofrece una gestión de riesgo eficiente al momento de fallo del depósito de relave.
- Se hizo una estimación de los mecanismos de falla y que parámetros, de ser simples o combinados, los desatan.

Álvarez et al. (2023) realizaron un análisis completo y actualizado en el área de la instrumentación geotécnica en los depósitos de relaves.

Tuvo como problemática los diversos errores cometidos en la instrumentación, especialmente en los sensores mal colocados que no dieron data correcta ocasionando el fallo del depósito, lo cual contribuye a una contaminación ambiental hacia las comunidades aledañas.

Tuvo como objetivo principal plantear una metodología que identifique la instrumentación actual más usada para monitorear de forma continua en base a un software que facilite la transmisión de data en tiempo real para su almacenamiento y permitir realizar un plan de contingencia ante una falla.

Esta investigación es del tipo teórica, pues analiza la estabilidad estructural y geotécnica de los depósitos, con un enfoque cualitativo pues analiza datos técnicos de estabilidad, fallas, normativas y selección de instrumentos, con un alcance descriptivo y explicativo, pues detalla los problemas asociados a la estabilidad estructural y el monitoreo continuo de los depósitos de relave, con un diseño documental y no experimental, pues realiza revisión de antecedentes, normativas y textos técnicos, de manera que no realiza pruebas experimentales.

Los resultados obtenidos fueron:

- En el desarrollo de la ingeniería de diseño estructural de los depósitos, es necesario actualizar la instrumentación geotécnica y los sistemas informáticos que permitan manejar la data de forma adecuada.
- El análisis de instrumentación geotécnica de depósitos justifica que se requiera de una metodología que permita seleccionar la instrumentación correcta según sea el requerimiento.

- La gestión de riesgos requiere que se analice los riesgos particulares que presentan cada depósito de relave, pues cada depósito pese a tener la misma infraestructura, poseen variables distintas de manera que se eviten fallos.

1.5.2 Antecedentes nacionales

Cabrera R. (2018) Evaluó el sistema de monitoreo y control geotécnico adecuado que se debe implementar en el depósito de relave de la Unidad Minera Yauricocha.

Tuvo como problemática evitar la rotura del depósito de relave pues la liberación de residuos tóxicos provoca el deslizamiento de taludes y vulnerabilidad en su infraestructura como es el caso del depósito de la Unidad Minera Yauricocha que ya se encuentra en su cuarta etapa de expansión y no cuenta con un sistema de monitoreo que mantenga su estabilidad.

Los objetivos específicos fueron:

- Monitorear la infraestructura del depósito de relave de manera continua.
- Tener un plan de mantenimiento preventivo y contar con un plan de contingencia ante el fallo o rotura del depósito de relave.
- Emitir informes continuos con referencia al monitoreo de los depósitos de relaves.

Esta investigación es del tipo aplicada pues propone solucionar un problema en la Unidad Minera Yauricocha con el monitoreo geotécnico del depósito, con un enfoque cuantitativo pues se realizan mediciones como desplazamiento y medidas de niveles de agua para evaluar la estabilidad del depósito, con un alcance descriptivo y correlacional, pues describe las variables geotécnicas que influyen en la estabilidad y busca relacionar estas variables con la estabilidad del depósito de relave.

Los resultados obtenidos fueron:

- Las variables geotécnicas si influyen en la integridad del depósito de relave, especialmente en las condiciones del talud, filtraciones de agua, granulometría y los movimientos superficiales del talud.
- Los prismas de monitoreo GPR112, un inclinómetro portátil y 3 piezómetros tipo Casagrande, con estos instrumentos se logra cubrir los objetivos trazados.

- La implementación de los instrumentos de medición fue ejecutada de forma adecuada, considerando los movimientos superficiales de 1cm/día, velocidad de formación es menos de 0.5cm/día y con respecto al nivel de agua, descendió 22.78m, lo cual se puede considerar que el depósito de relave es estable.

Rodríguez N. (2023) plantea una remediación del medio ambiente producido por el desbordamiento del relave en la CIA Minera Shuntur S.A.C.

Tuvo como problemática la inadecuada gestión de los relaves y desmontes que han causado filtraciones, drenaje de ácidos y contaminación de masas de agua, así como daños irreparables en los ecosistemas terrestres que afectan a la biodiversidad.

Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- Diseñar el sistema de la remediación del medio ambiente producido por el desbordamiento de los depósitos de relaves en la compañía minera Shuntur.
- Identificar los impactos ambientales producidos por el actual desbordamiento y remodelación de la relavera en la compañía minera Shuntur.
- Construir una relavera que permita gestionar de forma adecuada los residuos mineros, evitando la contaminación del agua y del suelo.

Esta investigación es del tipo aplicada, pues busca generar las buenas prácticas para remediar los impactos ambientales producidos por el desbordamiento de los relaves, tiene un enfoque cualitativo, pues analiza el beneficio ambiental, los desvíos necesarios y la reducción de los efectos del desbordamiento de los relaves, con un alcance descriptivo y explicativo, pues detalla la situación actual del problema ambiental y propone una solución explorando las relaciones causales entre la remediación y los efectos dañinos al medio ambiente, tiene un diseño no experimental pues observa y analiza sin manipular las variables de estudio.

Los resultados obtenidos fueron:

- Los parámetros geotécnicos aplicados en este modelo geotécnico se basaron en resultados de laboratorio y antecedentes bibliográficos.

- Los datos recopilados en el área de trabajo permiten establecer correlaciones entre el antes y después.
- El análisis de estabilidad estático en este caso presenta factores de seguridad cerca de 1, lo cual muestra que el depósito es muy inestable.
- El análisis de estabilidad desarrollado muestra que es posible generarse una falla por licuación estática en el depósito de relave.

1.5.3 Antecedentes locales

Salinas C. (2020) evaluó el factor de seguridad de una presa de almacenamiento de relaves usando un sistema de filtro extendido hacia aguas arriba.

Tuvo como problemática que la falta de estabilidad y seguridad en las presas de relave pueden ocasionar impactos muy severos en comunidades aledañas y al medioambiente. Además, los sistemas de filtrado usados actualmente no evidencian que la presa sea segura, por ello se requiere de un mejor monitoreo.

Los objetivos específicos fueron:

- Evaluar la estabilidad e infiltración en el depósito de relaves.
- Evaluar la estabilidad e infiltración en el depósito de relaves agregando un sistema de filtro extendido aguas arriba.

Esta investigación es del tipo aplicada pues abordar el problema y permite plantear estrategias que mejoren la estabilidad de las presas. Tiene un enfoque cuantitativo, pues hace énfasis en los factores numéricos como infiltración y los factores de seguridad en diferentes escenarios. Tiene un alcance descriptivo y explicativo, pues describe como se encuentran actualmente las presas de relave, determinar su estabilidad y determina la influencia del sistema de filtro extendido en la seguridad estructural de la presa. Posee un diseño experimental pues compara situaciones usando el filtro extendido y sin usarlo para evaluar el impacto de las variables de estudio.

Los resultados obtenidos fueron:

- La implementación del sistema de filtro extendido hacia aguas arriba mejora la estabilidad de la presa en un 43.7% reduciendo la presión de poros y la falla por el nivel freático.
- De las alturas de presa analizadas, el factor de seguridad se puede incrementar hasta un 45.7% aplicando el sistema de filtro extendido.
- El factor de seguridad empleado es independiente de la longitud que tiene el filtro aguas arriba, mientras se cubra la base de la presa de relave.
- La relación entre la longitud del filtro y del caudal están en relación directa debido a que existe una mayor superficie de captación.
- La altura de la presa y su estabilidad están en relación inversa, de manera que, a más altura de presa, el factor de seguridad disminuye.

Concepción A. (2020) determinó la mecánica de flujos de relaves mineros en canales abiertos para tener presas de relave más eficientes que requieran menos agua y mejore el transporte de estos materiales reduciendo los costos operativos.

Tuvo como problemática la escasa investigación en el manejo de relaves mineros y su movilización en canales abiertos, el cual permite que se hagan sobredimensionamientos de estructuras y haciendo uso excesivo de agua que reduce la resistencia al movimiento, generando costes elevados e impacto ambiental.

- Fortalecer las bases teóricas sobre la reología de flujos hiperconectados, haciendo énfasis en el comportamiento mecánico de los relaves.
- Evaluar situaciones experimentales que determinen el comportamiento de los relaves mineros variando las condiciones como concentración de sólidos y condición estructural de los canales.
- Modelar matemáticamente la relación entre la velocidad del flujo y parámetros físicos clave en el transporte de relaves.

Esta investigación es del tipo aplicada pues está centrada en mejorar el diseño y la eficiencia de los transportes de relave en canales abiertos. Tiene un enfoque cuantitativo

pues se basa en la experimentación y determinación de datos medibles como velocidad de flujo y concentración de sólidos. Tiene un alcance descriptivo – explicativo pues detalla el comportamiento mecánico del flujo de relave variando las condiciones y explica las relaciones de causa entre las características del canal y el comportamiento mecánico. Tiene un diseño experimental pues manipula las variables en una situación controlada que permita determinar el comportamiento del flujo.

Los resultados obtenidos fueron:

- El análisis de tiempo en el estudio lagrangiano del movimiento de la onda requiere que se eliminen fotogramas repetidos o traslapados entre ellos.
- Los desfases temporales entre los registros de cámaras pueden ser ajustado mediante extrapolación y usando la posición espacial del eje central de la onda.
- El análisis de correlación entre la variable velocidad de frente de onda y las otras variables en estudio es más efectivo cuando se toman números adimensionales, mejorando la comprensión de las relaciones de variables.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Relave y depósitos de relaves*

Rodríguez (2023) lo define como “Un recinto diseñado para poder contener y almacenar lodos de desecho, ya sean de minería o industria”.

El relave es el material sobrante que se obtiene de las extracciones mineras que no tienen valor económico luego de pasar por las diferentes etapas de molienda fina que tiene la mina. (Carvajal, 2018)

Su almacenamiento se da en los depósitos de relaves, que es toda infraestructura que pueden contener los relaves producto de la extracción de manera que su acumulación sea segura y permita la recuperación del agua que transporta estos sólidos desde la planta de concentración húmeda. (Catripán 2024)

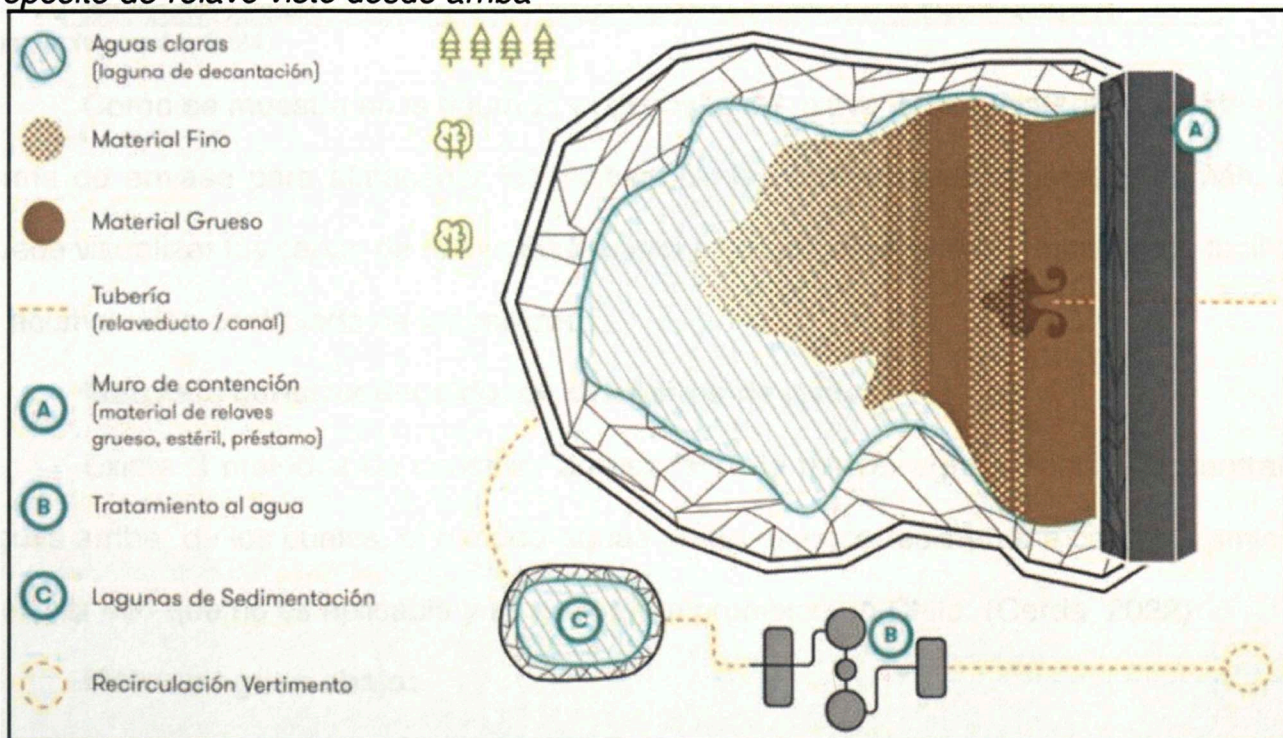
Según el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), los depósitos de relaves se componen de las siguientes partes:

- **Muro de contención:** El borde del depósito de relaves debe estar al mismo nivel del perímetro natural, formando la zona de la cubeta.
- **Zona de cubeta:** Es la zona donde se acumularán los fragmentos del material sobrante en base al grano más fino.
- **Laguna de aguas claras:** Es el cuerpo de agua que se forma en la zona de la cubeta como resultado de la decantación de las partículas sólidas, lo cual permite la clarificación del agua.
- **Revanca:** Es la diferencia menor entre la línea del muro de contención y la superficie vecina de la superficie del agua, que se producen en los depósitos de relaves.
- **Sistema de drenaje:** Es el conjunto de estructuras diseñadas para reducir el nivel freático dentro del muro de contención, por lo general se construyen debajo de este.

- **Canal de contorno:** Es un canal que cumple la función de desviar las aguas de la cuenca, el cual capta y dirige las corrientes superficiales de manera que evita que ingresen a la cubeta del depósito.
- **Playa activa:** es la zona del depósito de relaves donde los relaves se descargan, su nombre deriva ya que tiene una superficie seca similar a una playa de arena fina. Además, De acorde con Rodríguez (2023), sustenta que los depósitos de relave tienen los siguientes materiales empleados para su construcción:
 - Uso de materiales cercanos al sitio del depósito.
 - Se aprovecha una parte de residuos como arena que se encuentran separados en la playa de descarga producto de un ciclón separador.
 - Mezcla de tierra natural y residuos.

Figura 1

Depósito de relave visto desde arriba

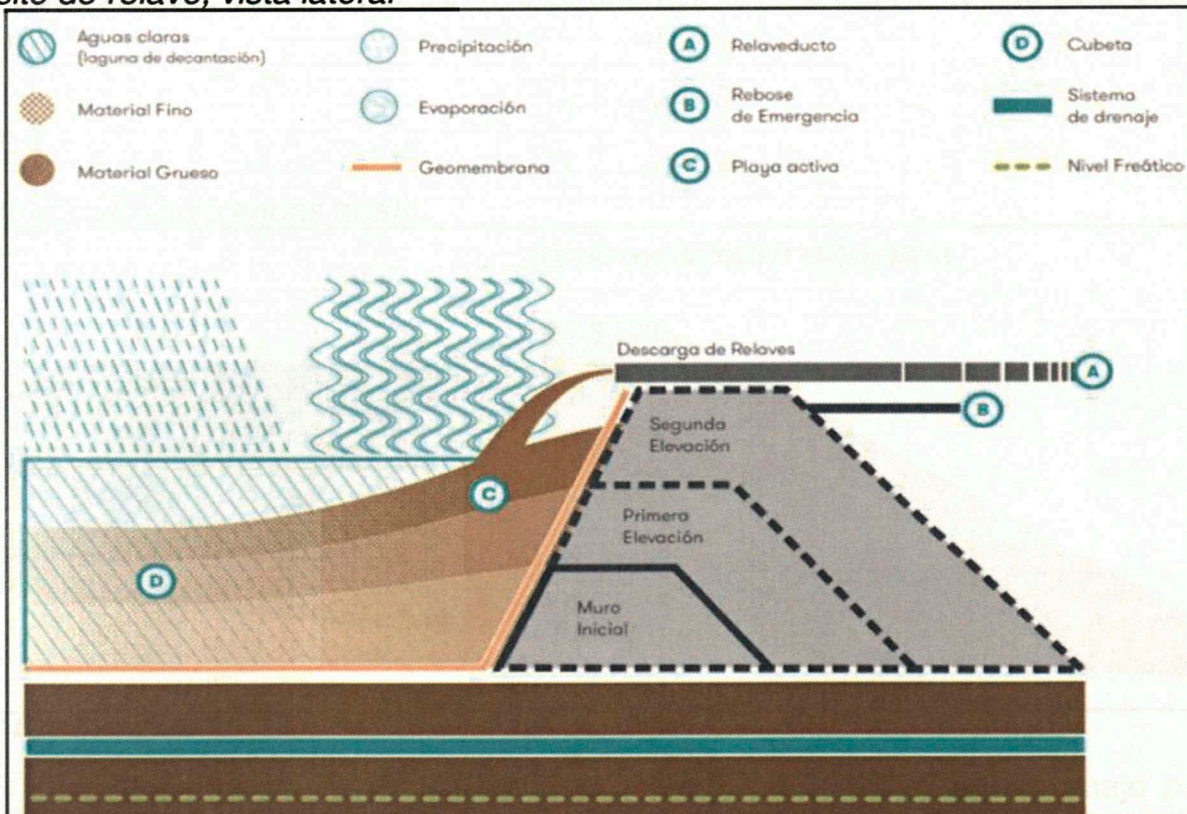


Fuente: (Catripán, 2024)

Como se muestra en la figura 1, en esta vista superior del depósito de relaves, se pueden observar las dimensiones y la distribución del área de almacenamiento. También son visibles los canales de drenaje, los cuales son necesarios para el manejo del agua intersticial y el control de agua dentro del depósito.

Figura 2

Depósito de relave, vista lateral



Fuente: (Catripán, 2024)

Como se muestra en la figura 2, el depósito de relave visto en lateral presenta una forma de envase para almacenar los relaves de las operaciones mineras. Además, se puede visualizar las capas de relave dispuestas en forma escalonada, permitiendo facilitar la acumulación controlada de los residuos.

Métodos constructivos de los depósitos de relave:

Existe 3 métodos de construir un depósito de relave, aguas abajo, eje central y aguas arriba, de los cuales, el método aguas arriba es poco resistente a cargas sísmicas y es por ello que no es aplicable y se encuentra prohibido en Chile. (Cerde, 2022)

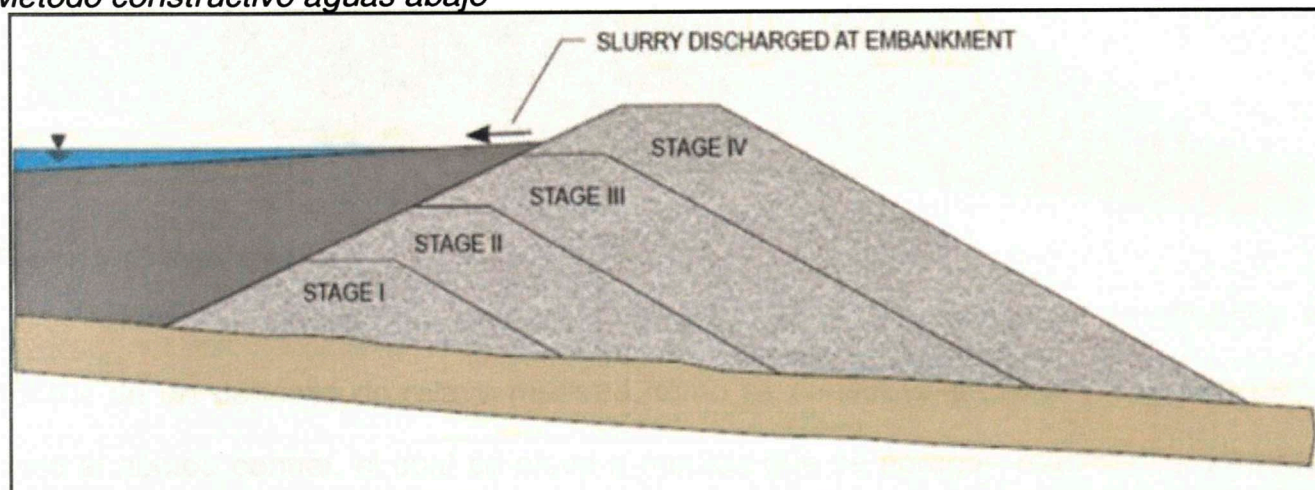
Método aguas abajo:

Su construcción comienza con un muro base compactado, a partir del cual se levantan pisos consecutivos, ubicados sobre el borde superior del depósito y se desplaza en dirección del avance de los relaves en el depósito. Dado que este método requiere un gran volumen de arena, compensa que su construcción presenta una buena estabilidad frente a cargas sísmicas. (Cerde, 2022)

Rodríguez (2023) comenta que “En este tipo de construcción se añade una nueva sección del depósito sobre la pendiente existente, en la zona aguas debajo de la estructura inicial”.

Figura 3

Método constructivo aguas abajo



Fuente: (Catripán, 2024)

Como se muestra en la figura 3, el método constructivo aguas abajo para un depósito de relaves, el muro de contención se eleva a medida que el volumen de los relaves aumenta. En este tipo de construcción, las capas se compactan entre sí, permitiendo el crecimiento del depósito de relave.

Método eje central:

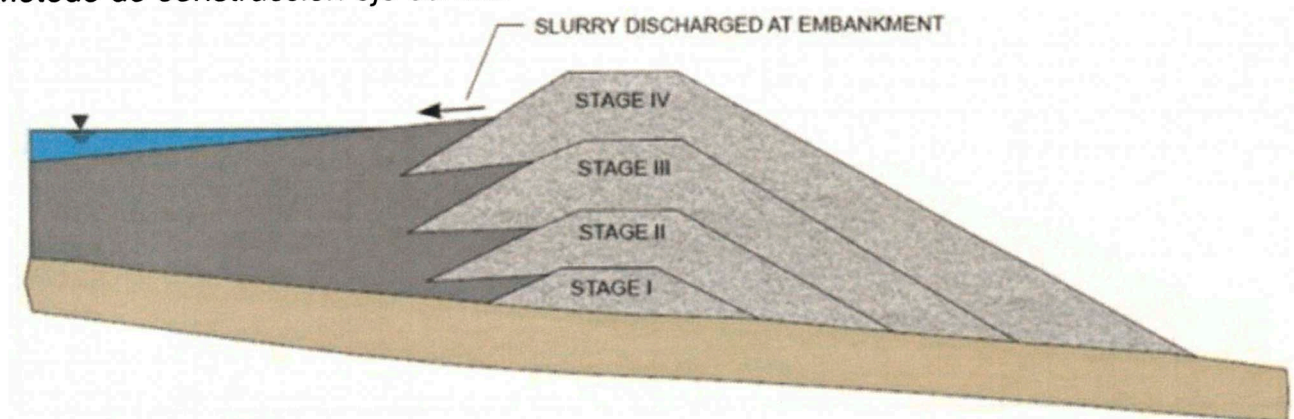
Su construcción inicia con un muro base compactada, el cual se le depositan las arenas hacia el lado de aguas abajo y los sedimentos finos hasta el lado aguas arriba. En este tipo de construcción, los pisos se realizan sobre el borde superior del piso anterior sin desplazarse con respecto al piso inferior.

De igual forma que el método anterior, se requiere un gran volumen de arena motivo por el cual también da estabilidad al depósito. (Cerde, 2022)

Rodríguez (2023) afirma que “Este tipo de método constructivo es un híbrido de las estructuras aguas arriba y aguas abajo, de manera que se mantiene inalterado el eje central de la pila inicial”.

Figura 4

Método de construcción eje central



Fuente: (Catrepán, 2024)

Como se muestra en la figura 4, la vista lateral del método de construcción eje central de un depósito de relave muestra cómo se construye el muro de contención en base al núcleo central, el cual se eleva a medida que se agregan más capas de relave. Este método permite tener una distribución controlada de los materiales, proporcionando un mejor soporte minimizando el riesgo de fallas estructurales.

Método aguas arriba:

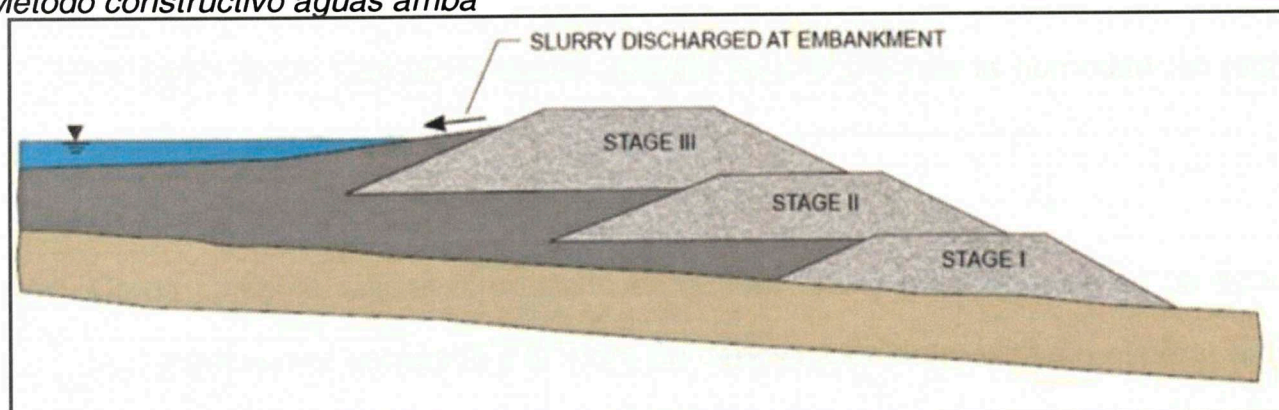
Cerda (2022) afirma que "Su construcción está prohibida debido a que no son confiables con respecto a una carga sísmica.

Los pisos se construyen sobre el borde superior del piso anterior desplazándose desde donde llegan los relaves, tomando una forma de playa en la que las partículas más pesadas se sedimentan. Dado que requiere menor volumen de arena, ofrecen menor resistencia sísmica.

Rodríguez (2023) detalla que "En la construcción aguas arriba, los terraplenes sucesivos están desplazados del terraplén anterior entre 1 y 2 metros sobre el nivel del lodo".

Figura 5

Método constructivo aguas arriba



Fuente: (Catrepán, 2024)

Como se muestra en la figura 5, en esta vista lateral del método constructivo aguas arriba, su construcción inicia desde el borde superior avanzando hacia abajo a medida que se agregan más capas en el muro de contención, el cual las capas de relave se compactan en dirección opuesta al flujo de agua elevando la estructura de manera constante.

2.1.2 Tipos de depósitos de relave

Las características del depósito de relave se basan en el porcentaje de sólidos que se usó para su construcción (Carvajal, 2018):

▪ **Embalse de relaves:**

Es el depósito donde el muro de contención está hecho de un material grueso y su talud interno hasta el coronamiento se encuentra impermeabilizado. (Cerde, 2022)

▪ **Tranque de relaves:**

Según Cerda, es el depósito donde el muro de contención está hecho de relave grueso o también conocido como arenas mientras la parte fina se llama lamas y va en el depósito.

▪ **Relave espesado:**

Cerde afirma que es el depósito donde los relaves se sedimentan antes de depositarse, esto con el fin de eliminar una gran parte del agua que contienen el cual se puede reutilizar. Dado que no contienen un muro de contención, este tipo de depósito se construye de tal forma que el relave no fluya hacia otro lado del emplazamiento determinado.

- **Relave filtrado:**

Cerda comenta que es el depósito en que su relave es sometido a filtración antes de depositarse. Con filtros especializados se asegura que la humedad del relave oscile entre el 20 y 30%.

- **Relave en pasta:**

Cerda sustenta que es el depósito en que su relave se encuentra en un estado intermedio entre espesado y filtrado. Su depositación se realiza sin esperar a que se compacte.

2.1.3 Incidentes en depósitos de relaves

Los incidentes asociados a depósitos de relaves varían dependiendo si estos se encuentran en estado activo o inactivo. Además, estos eventos se clasifican en fallas y accidentes. (Catripán, 2024)

- **Accidentes en depósitos de relaves:**

De acuerdo con Catripán, son los daños físicos que sufren los depósitos como las grietas o el deslizamiento de los taludes, siendo estos últimos un indicativo que existen problemas estructurales comprometiendo la estabilidad del depósito y, por ende, al medio ambiente.

- Accidente Activo: Se da cuando un depósito en funcionamiento sufre el incidente.
- Accidente Inactivo: Se da cuando un depósito abandonado sufre el incidente.

- **Fallas en depósitos de relaves:**

Tomando las ideas de Catripán, son los defectos estructurales que sufren los depósitos de relaves que pueden terminar en la liberación parcial o total del material contenido.

- Falla Activa: Se da cuando un depósito en pleno funcionamiento sufre el incidente.
- Falla Inactiva: Se da cuando un depósito abandonado sufre el incidente.

2.1.4 Modos de falla en depósitos

Trevisan (2022) indica: "Los escenarios de falla son una combinación de situaciones anormales detectadas en el depósito que puede provocar la inestabilidad de la misma".

Clarkson (2021) determinó que los principales modos de falla son: Inestabilidad de taludes, rebalse, licuación sísmica, erosión interna, filtraciones y capacidad de soporte.

- **Inestabilidad de taludes:**

Es el deslizamiento de una parte del muro de contención provocado por actividad sísmica. Su monitoreo para su prevención es a través de deformaciones o variación en el nivel freático.

- **Rebalse:**

Esta falla se produce cuando el depósito de relave supera su capacidad de almacenamiento de material, lo cual ocurre por el exceso de lluvia, diseño inadecuado del sistema de drenaje, deslizamiento de tierras o eventos sísmicos.

- **Licuación sísmica:**

Esta falla se produce cuando el suelo se encuentra saturado de agua en sus poros y pierde su rigidez o capacidad de soporte producto del movimiento sísmico.

- **Erosión interna:**

Esta falla se produce cuando la corriente de agua que fluye dentro de la estructura transporta sólidos finos que lo erosionan formando canales que debilitan su estructura ocasionando su fallo repentino.

- **Filtraciones:**

Esta falla se produce cuando el agua se filtra en las paredes o la base del muro de contención debido a un mal diseño o falta de mantenimiento que permita que la presión hidrostática aumente en el dique.

- **Capacidad de soporte:**

- Esta falla se produce debido a que el suelo no tiene la capacidad suficiente de soportar el peso del relave, usualmente se da por mal diseño pues esto se analiza antes de su construcción.

Tabla 2

Eventos gatilladores que alteran parámetros críticos

PARÁMETRO CRÍTICO	MODO DE FALLA	EVENTO GATILLADOR
Nivel freático	Rebalse Inestabilidad de taludes Licuación sísmica	Lluvia, crecidas o viento
		Obstrucción de los sistemas de drenaje
		Falla de vertedero de emergencia
		Falla del sistema de recuperación de aguas claras
Presión de poros	Falla de fundación Inestabilidad de taludes Licuación sísmica	Filtración desde sistema de drenaje hasta la fundación
		Lluvias que saturan los estratos
		Sismos que inducen movimientos de fundación
		Gradiente hidráulico elevado
Filtraciones	Falla de fundación Erosión Interna Inestabilidad de taludes	Colapso del sistema de drenaje
		Asentamientos diferenciales por sismos u operación
		Lluvias
		Gradiente hidráulico elevado
Deformaciones	Falla de fundación Inestabilidad de taludes	Colapso del sistema de drenaje
		Falla de los canales perimetrales
		Sismos que inducen movimientos de fundación
		Cargas asociadas a mayores disposiciones de relave
Aceleraciones sísmicas	Inestabilidad de taludes Licuación sísmica	Reducción del prisma resistente por excavaciones
		Sismos
		sismicidad inducida por actividad minera
Esfuerzos totales	Inestabilidad de taludes Falla de fundación	sismicidad inducida por exploración
		Cargas asociadas a mayores disposiciones de relave
Distancia a la laguna	Rebalse	Estratos del suelo no identificado que puedan disminuir la capacidad de soporte de la fundación
		Lluvias, crecidas, viento o deshielo
		Falla de vertedero de emergencia
Revancha	Rebalse	Gradiente hidráulico elevado
Turbidez	Erosión Interna	Lluvias, crecidas, viento o deshielo
		Filtraciones desde el drenaje hacia la fundación
Índices hidro químicos	Erosión interna Inestabilidad de taludes	Colapso u obstrucción del sistema de drenaje
		Colmatación de drenes
		Meteorización química (diluciones, precipitaciones, cementaciones)

Fuente: (Catripán, 2024)

2.1.5 Sistema de monitoreo geotécnico

Niño (2023) afirma que “El monitoreo es utilizado para controlar las estructuras y proveer información en investigación de campo, verificación de diseños y el comportamiento de estructuras”

Actualmente, las normativas que rigen la minería requieren que exista control y vigilancia a los depósitos de relaves por ser muy peligrosos debido al material que contienen en su interior.

Este sistema está compuesto por diversa instrumentación que permita la observación y análisis continuo del depósito con el fin de tomar decisiones de forma rápida al momento de suscitar alguna falla como los mencionados anteriormente.

El sistema de auscultación, especificando un monitoreo más especializado con mejor instrumentación, tiene como fin establecer prevención ante fallas por movimiento. Usualmente se centran en los siguientes (Cabrera, 2018):

Proveer una señal anticipada de inestabilidad:

Cabrera comenta que el sistema de monitoreo tiene como objetivo principal prevenir riesgos de manera que exista un tiempo mínimo prudente para realizar las medidas correctivas y preventivas antes que la falla se agrave. Es por ello que la data en tiempo real debe ser actualizada frecuentemente y así se pueda identificar patrones de riesgo para poderlo incluir en el plan de riesgo o en su defecto, implementar un plan de contingencia. A fin de salvaguardar a las personas que se encuentren en los alrededores del depósito de relave.

Analizar los desplazamientos del depósito:

Cabrera indica que el sistema de monitoreo, en base a su instrumentación específica, brinda datos cualitativos y cuantitativos acerca de los diversos movimientos que poseen sus estructuras. Los movimientos pueden ser superficiales (se detectan por estaciones totales) o internos (se detectan por piezómetros).

Estos movimientos son muy importantes en el monitoreo, lo cual es crucial entender y analizar los mecanismos de inestabilidad, como:

- Deslizamientos lentos debido a la saturación que tiene el terreno
- Movimientos abruptos como es el caso de los sismos
- Asentamientos diferenciados solo en caso de presas con rellenos de volumen variable.
- Como este análisis se da por áreas, permite identificar que zonas requieren de más atención que otras.

Diseñar medidas correctivas:

Cabrera señala que, con la información obtenida del monitoreo, es posible hacer planificaciones y diseñar medidas correctivas que puedan reducir los riesgos que se detectaron. Además del factor naturaliza que influye en los fallos, también existen otros problemas como:

- Mejoras en el drenaje: con el fin de mitigar la presión de poros en el suelo evitando la saturación
- Refuerzos estructurales: es el más importante, especialmente a muros de contención y a los anclajes de estos muros.
- Re compactación del terreno: Esto ayudará a dar mejor estabilidad al depósito y permite aumentar su resistencia.
- Reubicación y rediseño de las operaciones: Esto se da solo en casos donde las áreas en análisis sean demasiado vulnerables y requieren de traslación hacia otra ubicación.

Mantenimiento de los procedimientos de seguridad:

Cabrera considera que la data obtenida del monitoreo no solo es útil para salvaguardar la estructura del depósito, sino también permiten garantizar que la operación del depósito se realice de manera segura, lo cual incluye:

- Reconocimiento y establecimiento de zonas de trabajo seguras para el personal minero, evitando áreas de alto riesgo como derrumbes, gases tóxicos y maquinaria pesada en movimiento, entre otros.

- Protección de los equipos y maquinarias que son muy importantes o frágiles de manera que operen en condiciones estables.
- Implementar protocolos de evacuación en el plan de riesgos el cual contemple alertas tempranas, así en caso de emergencia se asegure el bienestar del personal.

Como se detalló anteriormente, el sistema de monitoreo no solo es una herramienta preventiva, sino que es esencial en la gestión integral de riesgos del depósito. Contribuye en la seguridad de los operarios, preservar el medio ambiente y sobre todo que el depósito continúe con sus labores de almacenamiento. Es por ello que, como abarca la parte tecnológica, ingeniería y gestión, requiere de instrumentación actualizada, así como la mano de obra.

2.1.6 Monitoreo del depósito de relave

Las variables que se deben tener más en consideración de acorde a su importancia en el monitoreo del depósito son (Cabrera, 2018):

- Determinar la distancia entre la parte más alta del depósito con respecto al nivel de agua de la poza.
- La variación de los movimientos verticales y horizontales del borde superior del depósito y del talud (inclinación de los lados del depósito) aguas abajo.
- La medición de la superficie freática es una de las variables importantes que asegura la estabilidad de la presa. El piezómetro mide esta variable y se debe colocar cerca de los drenajes.
- La variación vertical en los depósitos de relaves es notable y esto se origina generalmente por la compactación de su propio peso junto al proceso de consolidado. Estos movimientos se monitorean desde un sistema de control topográfico tomando puntos de referencia a una distancia considerable de la presa, de manera que no se vean afectados por su peso. Además, un aumento repentino es señal de que existe erosión interna en el depósito, lo cual implica un riesgo de colapso del mismo.

2.1.7 Variables geotécnicas monitoreadas

Al realizar el diseño, construcción y operación de los depósitos de relave, el monitoreo es crucial para garantizar la estabilidad estructural previniendo las posibles fallas. Estas variables nos permiten determinar el comportamiento estático y dinámico del depósito, lo cual nos es posible tomar decisiones más acertadas en tiempo real. Se detalla a continuación las principales variables geotécnicas que deben considerarse detallando su importancia y los métodos de monitoreo usados en su monitoreo. (Cerda, 2022)

Nivel freático:

Se define como el nivel de agua subterránea en un depósito de relave, en donde la presión del agua en los poros del suelo se iguala a la presión atmosférica. Esta variable permite confirmar si existe presencia o ausencia de agua.

Además, en condiciones estáticas, un nivel freático elevado incrementa el peso del muro debido a la mayor saturación que tiene el material, sin embargo, disminuye su resistencia al corte afectando la estabilidad. Los instrumentos que se usan para medir esta variable son los sensores de temperatura y piezómetros. (Niño, 2023)

Los problemas relacionados a esta variable son (Cerda, 2022):

- **Reducción de la resistencia de corte.**

Si el nivel freático es elevado permite aumentar la saturación del suelo, reduciendo la resistencia de corte de los muros del depósito, lo cual conlleva al deslizamiento de taludes y colapso.

- **Generación de fuerzas imprevistas.**

Si el nivel freático es elevado produce el aumento del peso de los materiales, los cuales generan fuerzas que reducen la estabilidad del depósito.

- **Riesgo de licuación.**

Si el nivel freático es elevado, es posible la formación de licuación de suelos de materiales granulares.

- **Filtraciones y erosión interna.**

Si el nivel freático es elevado puede ocasionar filtraciones inesperadas erosionando la base y los muros del depósito.

Para reducir estos problemas, las medidas de control más importantes son:

- **Sistema de drenaje.**

Esto permite controlar el nivel freático canalizando las aguas de los muros y del suelo del depósito, lo cual incluyen drenes y pozos de alivio.

- **Aplicación de materiales impermeables.**

La aplicación de geomembranas evita la filtración de agua de manera que se reduzca el nivel freático.

- **Gestión de la laguna de aguas claras.**

Es importante mantener el nivel de la laguna de aguas claras dentro de la cubeta, es por ello que se requiere el monitoreo continuo y aplicación de sistemas de bombeo en caso de ser necesario.

Presión de poro:

Es la presión que ejerce el agua en los poros del suelo. Tiene importancia en la mecánica de suelos y geotecnia, pues esta variable afecta directamente la resistencia de las estructuras en los depósitos de relave. Además, permite controlar los niveles de rellenos y la efectividad de los sistemas de drenaje, de forma que el suelo no drenado del suelo cuando se da una actividad sísmica desarrolla elevadas presiones de los poros. Los instrumentos que se usan para medir esta variable son los tubos verticales y los piezómetros. (Niño, 2023)

Los problemas relacionados a esta variable son (Cerde, 2022):

- **Disminución de los esfuerzos del depósito.**

Reduce la capacidad de soporte del suelo, el cual produce la pérdida de resistencia al corte provocando deslizamientos en los taludes.

- **Licuación de suelos.**

En situación de sobrecarga o por sismo, el aumento de la presión de los poros puede producir licuación en el suelo, siendo perjudicial en suelos saturados de grano fino.

- **Deformación de las estructuras.**

La presión de los poros afecta directamente a la estructura del depósito, el cual puede generar levantamientos o asentamientos no previstos variando su diseño inicial.

Para reducir estos problemas, las medidas de control más importantes son:

- **Sistema de drenaje.**

Esto permite controlar y reducir la presión de poros del suelo, el cual incluye los drenes, pozos de alivio y drenes de filtro.

- **Materiales de construcción adecuados.**

Al construir la base del depósito, se debe tener en cuenta esta variable motivo por el cual los materiales usados deben ser los más compactos y de ser posible la aplicación de geomallas que ayuden a reforzar la estabilidad.

- **Construcciones que reduzcan la saturación.**

El diseño de los taludes con una inclinación adecuada permite el drenaje de la superficie. Además, los canales evitan la acumulación de agua en el suelo del depósito. Si ya se detectó existencia de presión de poros, podría ayudar el rebajado de los taludes, reforzar los muros e incrementar la capacidad del sistema de drenaje.

Filtraciones:

Es el desplazamiento de las aguas a través de los poros del suelo debido a diferencial en el gradiente hidráulico. Esta variable mide el agua que se filtra en los muros o el suelo del depósito de forma que se pueda corroborar la variación entre el caudal de salida con respecto al caudal de diseño, además de analizar los componentes químicos se

encuentre en el rango adecuado. Los instrumentos que miden esta variable son los pozos de monitoreo, lectores de flujo y piezómetros. (Niño, 2023)

Los problemas relacionados a esta variable son (Cerde, 2022):

- **Reducción de la resistencia del depósito.**

La saturación de agua en los suelos o en el muro de contención reduce su resistencia de corte haciendo que la estructura falle por deslizamiento de taludes o el colapso.

- **Filtraciones no controladas.**

Su mala gestión puede provocar fugas de agua contaminada afectando además del depósito, al medio ambiente y masas de agua de las comunidades cercanas.

Para reducir estos problemas, las medidas de control más importantes son:

- **Sistemas de impermeabilización.**

La aplicación de geomembranas o revestimientos sintéticos, se instalan en zonas debidamente identificadas que podría fallar por filtración. Es la primera línea de protección ante este tipo de falla.

- **Sistemas de drenaje.**

Son estructuras que permite capturar agua que se filtra dentro del depósito, los cuales pueden ser drenes horizontales y verticales, pozos de alivio y sistemas de recolección.

Deformaciones:

Cerde (2022) lo describe como el cambio de la forma original del depósito de relave debido a fuerzas externas o internas al depósito. Los más comunes son:

- **Movimientos horizontales.**

Son desplazamientos asociados principalmente a la presión de los relaves.

- **Movimientos verticales.**

Relacionado a los hundimientos o levantamientos que deforman la topografía del depósito.

- **Movimientos rotacionales.**

Son giros que pueden indicar inestabilidades en las estructuras.

- **Movimientos traslacionales.**

Son deslizamientos completos de una porción de los taludes debido a fallas estructurales.

Los instrumentos que miden estos movimientos son las celdas de asentamiento, extensómetros magnéticos y de barra, inclinómetros y teodolitos. (Niño, 2023)

Cerda subraya que los problemas relacionados a esta variable son:

- **Pérdida de estabilidad estructural.**

Debido al cambio en las estructuras, los taludes pueden debilitarse lo cual puede afectar la capacidad de contener los relaves.

- **Sistema de drenaje alterado.**

Debido a que el depósito puede sufrir movimientos no previstos por esta falla, es posible que no mida el nivel freático y las presiones de poros, aumentando los riesgos de licuación.

- **Erosión y filtración no controlado.**

Debido a los cambios en los muros y suelo, pueden originarse grietas facilitando que el agua contaminada se filtre y a su vez, erosione partes del muro.

Para reducir estos problemas, las medidas de control más importantes son:

- **Revisión de factores externos al depósito.**

Se deben realizar estudios geotécnicos antes de la construcción del depósito para seleccionar materiales de diseño que reduzcan las deformaciones

- **Sistemas de drenaje efectivos.**

Los drenes deben funcionar efectivamente para filtrar toda el agua que se filtra y reduzca los riesgos de deformación. También se aplican elementos impermeables para evitar el aumento del nivel freático.

- **Mejora en la estructura de los muros.**

Si ya existe una deformación inicial, se puede optar por reforzar los muros usando bermas en el pie de los mismos.

Aceleraciones sísmicas:

Son fuerzas que se generan con la actividad sísmica y pueden afectar la estabilidad de los depósitos de relave.

Es debido a esto que se pueden producir esfuerzos adicionales en el depósito generándose la falla. El instrumento que mide esta variable son los acelerógrafos. (Niño, 2023)

Los problemas relacionados a esta variable son (Cerdeira, 2022):

- **Licuación de los materiales.**

Dado que la actividad sísmica genera ondas, estas pueden causar que los materiales saturados pierdan su rigidez volviéndose un fluido el cual puede dañar seriamente a la estructura del depósito.

- **Deslizamiento de taludes.**

Debido a que son ondas expansivas, pueden generar movimientos en los taludes, provocando grietas o fallas por deslizamiento afectando la integridad del depósito.

- **Sistema de drenaje alterados.**

Es posible que, si el sismo es de elevada magnitud, puede dañar los drenes y los materiales impermeables, permitiendo que no se pueda controlar el nivel freático el cual puede aumentar la presión en los poros del suelo.

Para reducir estos problemas, las medidas de control son:

- **Consideración de los sismos en el diseño.**

Dentro de los estudios geotécnicos, se debe considerar las cargas sísmicas en el diseño de los taludes y el muro de contención.

- **Compactación del relave.**

Antes de depositar el relave, se debe compactar para evitar la formación del fenómeno licuación.

- **Sistema de drenaje eficiente.**

Como se vio anteriormente, es muy importante manejar adecuadamente el sistema de drenaje para reducir la saturación del material y a su vez, contar con materiales impermeables.

- **Control de actividades mineras.**

Dado que también es posible hacer ondas expansivas por extracción de las minas, es necesario limitar el uso de explosivos y monitorear si el acelerógrafo marca la actividad como un sismo inducido.

2.1.8 Métodos usados en el monitoreo de las variables geotécnicas

Catripán (2024) destaca que “La instrumentación usada en el monitoreo geotécnico es fundamental pues garantizan la seguridad y sostenibilidad de los depósitos”.

Catripán enfatiza que estas actividades permiten:

- **Evaluar el rendimiento del depósito.**

Dado que, al tener los datos recopilados, podemos hacer comparaciones desde el inicio del diseño, de manera que podamos ver si su comportamiento va de acorde a lo planeado.

- **Determinar el comportamiento de la estructura.**

También proporciona información sobre las dinámicas del depósito, como deformaciones, presiones, desplazamientos, lo cual nos permite dar mantenimiento preventivo y mejora del mismo.

- **Realizar estudio del beneficio ambiental.**

Dado que se cuenta con data continua y actualizada, es posible realizar mediciones que evalúen el impacto de la actividad minera en el lugar, lo cual se ajuste a las normativas ambientales.

- **Proporciona alertas tempranas.**

Al detectar indicios raros que comprometan la integridad del depósito, es posible crear un plan preventivo que salvaguarde a las comunidades cercanas como a los trabajadores del depósito, reduciendo el riesgo de pérdidas.

Los instrumentos usados en la medición de variables geotécnicas pueden clasificarse en tres tipos, métodos invasivos, semi invasivos y no invasivos. A continuación, se detalla cada una.

Métodos invasivos:

Cerda (2022) asegura que estos instrumentos necesitan que se instalen directamente o requieran estar dentro del depósito. Dado que proporcionan datos precisos, el hecho de estar en contacto directo, su instalación puede alterar su vida útil.

Estos instrumentos pueden ser:

- **Piezómetros.**

Estos instrumentos miden la presión del agua en los poros dentro del depósito, el cual permite evaluar la estabilidad y el riesgo de licuación por sismo.

- **Inclinómetros.**

Estos instrumentos detectan el movimiento de los taludes del depósito, el cual permite identificar zonas de deslizamiento.

- **Celdas de presión.**

Estos instrumentos miden las tensiones en puntos específicos dependiendo su ubicación, el cual nos muestra la distribución de cargas dentro del depósito.

- **Tensiómetros.**

Estos instrumentos miden la presión de succión en suelos saturados, el cual nos muestra la variación de humedad del material.

Métodos Semi-Invasivos:

De acuerdo con Cerda, estos instrumentos son útiles cuando se requiere un equilibrio entre precisión de medida y minimización del impacto de la estructura.

- **Sensores de asentamiento.**

Monitorean la compactación del terreno del depósito y permiten identificar posibles asentamientos diferenciales del mismo y su influencia en la estabilidad del depósito.

- **Sistemas de medición de deformaciones superficiales.**

Estos instrumentos miden la variación de la forma del depósito, el cual nos permite evaluar la estabilidad global del mismo.

- **Inclinómetros en perforaciones.**

Estos instrumentos permiten medir los movimientos o desplazamientos laterales a largo plazo en un eje específico dentro del depósito o en los taludes.

Métodos no invasivos:

Empleando las ideas de Cerda, estos instrumentos no necesitan estar dentro del depósito, así que no alteran su estructura. Se usan al inicio del monitoreo o en áreas despejadas y sensibles a la medición que requiera.

- **Radar de monitoreo remoto.**

Estos instrumentos emiten ondas electromagnéticas que permiten detectar movimiento superficial y deformaciones del terreno.

- **Drones con sensores geotécnicos.**

Estos instrumentos permiten capturar imágenes con alta resolución, así como datos de topografía para determinar los cambios que tiene el depósito en su superficie.

- **Sensores sísmicos.**

Estos instrumentos detectan vibraciones producidos por sismo o por actividades humanas cercanas al depósito.

- **Escáneres laser y LiDAR.**

Estos instrumentos generan modelos tridimensionales del depósito con una buena precisión, permitiendo evaluar deformaciones y realizar comparaciones con el estado inicial.

Figura 6

Instrumentos invasivos en mecanismos de falla

	Licuaación sísmica	Inestabilidad de taludes	Rebalse	Erosión interna	Capacidad de soporte
Nivel freático	• Piezómetro	• Piezómetro	• Piezómetro	• Piezómetro	• Piezómetros
Presiones de poros	• Piezómetro	• Piezómetro		• Piezómetro	• Piezómetro
Filtraciones	• Piezómetro • Aforador de caudal	• Piezómetro • Aforador de caudal		• Piezómetro • Aforador de caudal	• Piezómetro • Aforador de caudal
Deformaciones	• Inclínometro • Extensómetro • Clinoextensómetro • Inst. de medición topográfica • GPS/GNSS	• Inclínometro • Extensómetro • Clinoextensómetro • Inst. de medición topográfica	• Inst. de medición topográfica • GPS/GNSS	• Inclínometro • Extensómetro • Clinoextensómetro • Inst. de medición topográfica • GPS/GNSS	• Celdas de asentamientos • Inst. de medición topográfica • GPS/GNSS
Aceleraciones sísmicas	• Acelerómetro	• Acelerómetro	• Acelerómetro	• Acelerómetro	• Acelerómetro
Esfuerzos totales		• Celda de presión			• Celda de presión
Revancha			• Limnómetro		
Caudal	• Aforador de caudal	• Aforador de caudal		• Aforador de caudal	• Aforador de caudal

Fuente: (Cerde, 2022)

Como se muestra en la figura 6, la imagen muestra los instrumentos invasivos utilizados para investigar y monitorear los diversos mecanismos de falla en depósitos de relave. Estos instrumentos requieren penetrar en la estructura para medir de forma directa el comportamiento del suelo o las estructuras, como el caso de la instalación de piezómetros, celdas de presión y entre otros instrumentos.

Figura 7

Instrumentos semi-invasivos en mecanismos de falla

	Licuación sísmica	Inestabilidad de taludes	Rebalse	Erosión interna	Capacidad de soporte
Filtraciones	• Tomografía de resistencia eléctrica	• Tomografía de resistencia eléctrica		• Tomografía de resistencia eléctrica	• Tomografía de resistencia eléctrica
Deformaciones	• Escáner láser • Radar de estabilidad de taludes (SSR)	• Escáner láser • Radar de estabilidad de taludes (SSR)	• Estación total automática	• Estación total automática	• Estación total automática
Condiciones climáticas	• Estación meteorológica automática	• Estación meteorológica automática	• Estación meteorológica automática	• Estación meteorológica automática	• Estación meteorológica automática
Volumen de agua en la laguna	• Bote tripulado • Bote no tripulado	• Bote tripulado • Bote no tripulado	• Bote tripulado • Bote no tripulado	• Bote tripulado • Bote no tripulado	• Bote tripulado • Bote no tripulado

Fuente: (Cerde, 2022)

Como se muestra la figura 7, la imagen muestra los instrumentos semi invasivos usados en el monitoreo de depósitos de relave y otras estructuras geotécnicas. A diferencia de los otros tipos de instrumentos, estos combinan ambas características de manera que se obtienen mediciones sin necesidad de realizar una intervención completa en la estructura.

Figura 8

Instrumentos no invasivos en mecanismos de falla

	Licuación sísmica	Inestabilidad de taludes	Rebalse	Erosión interna	Capacidad de soporte
Deformaciones	• LiDAR • InSAR • Fotogrametría	• LiDAR • InSAR • Fotogrametría	• LiDAR • InSAR • Fotogrametría	• LiDAR • InSAR • Fotogrametría	• LiDAR • InSAR • Fotogrametría
Temperatura		• Imágenes térmicas			

Fuente: (Cerde, 2022)

Como se muestra en la figura 8, la imagen muestra los instrumentos no invasivos empleados en el monitoreo de mecanismos de falla en depósitos de relave o también es

posible en estructuras geotécnicas. Estos instrumentos permiten detectar la anomalía sin alterar la integridad de la estructura.

2.1.9 Manejo de la data recopilada

La gestión eficiente de la información recopilada de los instrumentos geotécnicos es crucial para desempeñar un buen monitoreo en el depósito de relave. Estos sistemas necesitan almacenar grandes cantidades de datos y a su vez, permitir el rápido manejo de los mismos para realizar la toma de decisiones.

Clarkson (2021) afirma que la calidad del manejo de la data recopilada debe abordar los siguientes elementos:

- **Interfaz de usuario.**

Es el componente visible y amigable con los ingenieros geotécnicos y usuarios a cargo del monitoreo. Debe permitir que el manejo se data de instrumentos individuales o múltiples instalados en el depósito y sea lo más eficiente de manera que permita su utilización y distribución para la toma de decisiones.

- **Criterios de alarma automatizados.**

Debe estar vinculado a un sistema de alerta que permita identificar cualquier anomalía mostrando dónde y el nivel de alarma que se ha activado que comprometa la integridad del depósito. Esto permite tomar medidas preventivas y prioriza además las actividades correctivas.

- **Aplicaciones online.**

El sistema debe permitir que múltiples usuarios pueden acceder a su base de datos el cual permita colaborar y analizar en tiempo real.

- **Base de datos robusto.**

Como se explicó con anterioridad, el sistema debe ser robusto para soportar un volumen elevado de data, a su vez incluyendo medidas de seguridad elevados para su protección, el cual nos permita garantizar la confidencialidad de la información.

Un sistema de información eficiente que facilite el manejo de los análisis de la data obtenida ayuda en estos aspectos:

- **Mejora la toma de decisiones.**

Proporciona data eficiente con una visualización clara permitiendo respaldar las decisiones elegidas.

- **Reduce riesgos.**

Identifica los patrones anómalos y alerta sobre problemas antes que aumenten de intensidad.

- **Mejora la eficiencia operativa.**

La automatización de funciones, como el caso de la generación de reportes sobre el estado actual de los instrumentos, así como su respectivo mantenimiento, informar alertas en el depósito, son tareas que el mismo sistema puede realizar de manera que se reduzca la carga de trabajo manual.

2.1.10 Importancia del monitoreo continuo

La implementación de instrumentación en el monitoreo permite a las empresas mineras cumplir con las normativas además de proteger la integridad del depósito de relave. El monitoreo continuo permite:

- **Minimizar riesgos.**

Detecta problemas en etapas iniciales, lo cual permite prevenir haciendo que se reduzca la posibilidad de fallas catastróficas.

- **Optimizar los recursos.**

Permite realizar el mantenimiento correctivo y preventivo del depósito, el cual ayuda a evitar costos elevados en reparaciones, multas o cese de la empresa por daños al medio ambiente.

- **Mejora las relaciones con la comunidad.**

Realizar esta actividad permite mejorar la imagen de la minería, pues muestra su responsabilidad ante el manejo de residuos tóxicos.

2.1.11 Construcción, operación y monitoreo en el Perú

Catripán (2024) indica que, en el Perú, la construcción y operación de los depósitos de relaves es de sumo cuidado debido a los riesgos ambientales, sociales y geotécnicos

que están asociados a ello. De acuerdo con el Decreto supremo N° 040-2014-EM, se encuentra prohibido la construcción de un depósito de relave aguas arriba. Además, el plan de cierre de una mina debe incluir medidas de manera que el área afectada sea rehabilitada de manera que se garantice la estabilidad física y química. Esto implica que se deben realizar acciones que permita la restauración del equilibrio ambiental del lugar con el fin de dar la protección del ecosistema aledaño.

También contempla la normativa que señala que, antes de la construcción de los depósitos de relave, se debe realizar los estudios geotécnicos e hidrológicos del lugar. Con estos datos se puede mapear las condiciones hidráulicas y del suelo, considerando que el Perú está caracterizado por su actividad sísmica.

Catipán destaca que también existe normativa aparte del Decreto Supremo N° 040-2014-EM, el cual se detalla a continuación:

- **Ley N° 28611-2005:**

Es la ley general del medio ambiente, el cual regula parte ambiental de todos los sectores económicos del Perú.

- **Decreto Supremo N° 016-1993-EM:**

Esta normativa establece acciones preventivas y de control que estén relacionadas con los depósitos de relave y las diversas instalaciones mineras.

- **Ley N° 28090-2003:**

Esta normativa regula el proceso de cese de las minas, el cual tiene como fin garantizar que las operaciones mineras cierren de forma responsable.

- **Decreto Supremo N°078-2009:**

Esta normativa regula las medidas a tomar con respecto a rehabilitación del ecosistema afectado por las actividades de extracción minera.

- **Ley N° 28271-2004:**

Esta normativa regula los egresos pasivos ambientales de la actividad minera, el cual responsabiliza a las empresas mineras a remediar los sitios impactados.

- **Decreto Supremo N°033-2005:**

Esta normativa regula los aspectos técnicos cuando se da el cierre de la mina, asegurando que su cese minimice el impacto ambiental del lugar.

2.2 Marco Conceptual

- **Monitoreo:**

Es la recopilación, análisis y evaluación de la data, con el objetivo de controlar el estado de un sistema.

- **Automatización:**

Hace referencia a la aplicación de equipos y sistemas tecnológicos para realizar procesos sin la intervención del ser humano.

- **Piezómetro:**

Es un instrumento geotécnico aplicado en la medición de la presión de fluidos en el subsuelo del depósito o las estructuras del depósito de relave.

- **Relavera:**

Es el conjunto de instalaciones donde se almacenan los relaves producto de la extracción de minerales.

- **Relaves:**

Son los desechos que se producen luego de la separación de la maleza con el mineral o roca, pueden ser líquidos o sólidos y son altamente contaminantes.

- **Erosión:**

Es el desgaste de las superficies de una estructura debido a la acción de agua, viento u otros, afectando la forma y estabilidad de la estructura.

- **Geomembranas:**

Son materiales sintéticos aplicados en la prevención de la filtración de líquidos en las estructuras como muros o suelos.

- **Drenes:**

Son las construcciones que permiten recolectar el agua subterránea redirigiéndolo evitando la saturación de las superficies.

- **Talud:**

Es la superficie de los muros del depósito, usualmente son inclinadas para reducir los deslizamientos y mejorando la estabilidad del depósito.

- **Presión:**

Es una magnitud física definida como la fuerza que ejerce un cuerpo o fluido sobre una determinada área

- **Resistencia:**

Es la capacidad de una estructura para resistir esfuerzos que produzcan deslizamiento o deformación.

- **Saturación:**

Es el estado en que el material del depósito como el relave ha absorbido demasiada agua que ya no pueda retener más en los espacios vacíos.

- **Sensores:**

Son los dispositivos que producen señales luego de medir una magnitud y transmitirlo hacia un sistema que lo recibe y decodifica.

- **Algoritmos:**

Es el conjunto de reglas definidas que se usan para poder controlar un sistema o un proceso.

- **Estabilidad:**

Es la capacidad del depósito para mantener su integridad estructural y evitar fallos.

- **Geotecnia:**

Es la rama de la ingeniería civil encargada de estudiar las propiedades y el comportamiento mecánico de los materiales del suelo y rocas.

- **Fallo:**

Es el colapso o pérdida de la estabilidad de una estructura debido a fuerzas internas o externas que superan la resistencia de la estructura.

- **Factibilidad:**

Hace referencia a determinar si un proyecto es viable o no, considerando si es realizable en las condiciones existentes.

- **Riegos:**

Es la probabilidad que ocurra un evento que pueda generar un impacto negativo en un proceso o actividad.

- **Instrumentación:**

Es el conjunto de instrumentos y herramientas que se emplean para medir, monitorear y controlar parámetros en un sistema.

- **Mantenimiento:**

Es el conjunto de acciones y procedimientos que se realizan sobre componentes o instalaciones con el fin de preservar su vida útil.

- **Gestión:**

Es el proceso de planificar, organizar y controlar recursos, actividades y personas dentro de un proyecto con el fin de alcanzar los objetivos propuestos.

- **Talud:**

Es la pendiente formada por la inclinación de un terreno, puede estar compuesto por suelo, roca o ambos.

- **Cuenca:**

Es el área definida por una red de drenaje de manera que las masas de agua en la superficie fluyen hacia un punto fijo como río, lago o mar.

- **Sedimentación:**

Es el proceso por el cual las partículas sólidas como arena, arcilla o materia orgánica se depositan en un medio generalmente agua por la gravedad.

- **Poros:**

Es un espacio vacío o cavidad dentro de un material como una roca o suelos donde se pueden almacenar líquido.

- **Gradiente:**

Es un concepto que describe la variación de una magnitud física en relación a otra, siendo la más usada en función a la distancia.

- **Humedad:**

Es la cantidad de vapor de agua que se encuentra en el aire, suelo o en un material que puede retener líquido o gas.

- **Molienda:**

Es el proceso que consiste en la reducción del volumen de partículas de una materia sólida por aplicación de fricción o impacto.

- **Sismo:**

Es un movimiento repentino de la corteza terrestre producido por la liberación de energía acumulada en las rocas del interior de la Tierra.

- **Licuación:**

Es el fenómeno en el cual los materiales granulares o el suelo pierde su rigidez y se comporta como un líquido debido a una vibración o movimiento.

- **Limos:**

Son partículas muy finas que tiene un volumen entre la arcilla y la arena, siendo muy comunes en sedimentos de ríos, lagos y océanos.

- **Aditivos:**

Son compuestos que se añaden a un material para modificar o mejorar sus propiedades sin alteran su composición inicial.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Metodología de la investigación

3.1.1 *Unidad de análisis*

Esta investigación se centra en la relavera Quiulacocha, que está ubicada en el distrito Simón Bolívar, Pasco, Perú. Esta relavera ha estado en funcionamiento por muchas décadas, siendo de importancia para estudios de gestión de residuos, pues ofrece desafíos como el clima extremo y la actividad sísmica.

Además, dado la proximidad de esta relavera con la comunidad, es de suma importancia la reducción de contaminación por parte de la extracción minera.

3.1.2 *Fuentes de información*

Las fuentes tomadas de este trabajo de investigación se dividen en primarias y secundarias tomando en cuenta su origen, naturaleza e importancia en el diseño metodológico.

Fuentes primarias.

Estos tipos de fuentes son la información tomada in situ para esta investigación. Estos datos se obtuvieron de los instrumentos que miden continuamente junto al personal que opera estos equipos y realiza el monitoreo.

- **Monitoreo geotécnico:**

Se muestra la información recolectada de los instrumentos de la relavera Quiulacocha. Estos datos nos permiten determinar y predecir el comportamiento de la relavera, sobre todo en el manejo de las variables geotécnicas que pueden producir fallas.

- **Estabilidad estructural:**

Existen evaluaciones realizadas in situ que ya nos muestra la capacidad del depósito para soportar cargas dinámicas y estáticas.

- **Inspecciones visuales:**

La observación del equipo de trabajo in situ es importante, pues permite identificar fallas en la estructura o deficiencia en el sistema de drenaje.

- **Entrevistas con los operarios:**

Las reuniones con los trabajadores incluyendo ingenieros, supervisores y los mismos operarios in situ. Estas interacciones proporcionan información actualizada con respecto a su rutina de trabajo.

Fuentes secundarias.

Estos tipos de fuentes son información que ya existe y fue producida por terceros, el cual incluye antecedentes, normativas, bibliografía técnica, así como información de las entidades reguladoras de las minas. Estas serían:

- **Documentación de la relavera:**

Son los archivos que la relavera Quiulacocha tiene en el cual se muestran informes técnicos, memorias descriptivas y los estudios geotécnicos del depósito.

- **Normativa reguladora:**

Son las normas que regulan las operaciones y cierre de las minas, lo cual muestra parámetros de diseño de construcción, estrategias y cierre.

- **Información de las entidades reguladoras:**

Tanto como OSINERGMIN y el MINEM, emiten informes relacionados con los datos históricos e inspecciones de esta relavera.

- **Información geográfica:**

Los mapas y planos, así como estudios de suelos y masas de agua, nos muestra los riesgos del lugar.

3.2 Tipo y nivel de investigación

3.2.1 Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, pues busca solucionar los problemas de operación y monitoreo de la relavera Quiulacocha. Además, aplica conocimientos teóricos,

técnicos y prácticos al análisis y el diseño del sistema automatizado que controle los niveles de agua de los piezómetros, garantizando la estabilidad estructural.

3.2.2 Nivel de investigación

El nivel de la investigación es descriptivo-explicativo. Es descriptivo pues se detalla las características geotécnicas de la relavera Quiulacocha, describiendo las variables geotécnicas, además, se muestra el estado actual del depósito, las técnicas de monitoreo y las medidas de control que se hacen en la relavera. Es explicativo pues analiza las relaciones de causa efecto entre las fallas detalladas con la estabilidad del depósito, explicando cómo afectan en la seguridad y funcionalidad de la relavera. Además, se determinan factores que mejoran la efectividad del sistema propuesto.

3.3 Diseño de la Investigación

El diseño de la presente investigación es no experimental, de tipo transversal y con un enfoque cuantitativo-cualitativo.

Es no experimental pues las variables de estudio no se manipulan, de manera que la data tomada se obtiene de la instrumentación geotécnica de la relavera. Es transversal pues la investigación se realiza en un momento específico de tiempo analizando las características solo en este intervalo de tiempo en que se desarrolla esta investigación.

Es cuantitativo pues se usarán medidas de los instrumentos geotécnicos para realizar el sistema automatizado. Es cualitativo pues también se usará material bibliográfico como documentación histórica, normativas vigentes, informes técnicos y las entrevistas con expertos.

Este diseño permite juntar el análisis técnico y el contexto actual de la relavera, asegurando que con este enfoque pueda facilitarse su implementación de la mano con la normativa vigente.

3.4 Diseño del sistema automatizado en la relavera Quiulacocha

3.4.1 Estado actual de la relavera

La relavera Quiulacocha es un pasivo ambiental minero, que en épocas de lluvia acumula agua acida con un PH de 3.2 ocasionando la pérdida del borde libre de hasta 1

metro. En época de grandes avenidas, especialmente en los meses de febrero del 2019 y enero del 2021 se llegó a un nivel externo de embalsamiento de agua en la relavera, llegando a tener un borde libre de 50cm, considerado como un peligro muy alto en la zona.

En la temporada de diciembre a abril, la planta de tratamiento de Quiulacocha funciona a su máxima capacidad, sin embargo, es insuficiente cubrir la demanda aun contratando los servicios de bombeo y tratamiento de aguas por la Empresa Administradora Cerro S.A.C.

En este contexto, para evitar desastres y emergencias ambientales por el desborde de la relavera Quiulacocha se propone mejorar la capacidad de la planta de neutralización de 180m³/h a 450m³/h, mantener el borde libre y obtención de agua de calidad que será vertido al río Ragra, además de implementar adicionalmente sistemas de tratamiento complementario para la capacidad de tratamiento de 450m³/h, el cual será usado para evacuar las aguas de la relavera durante la ejecución del cierre de la relavera Quiulacocha.

El 27 de febrero del 2021, mediante el DS N° 037-2021-PCM se declaró en Estado de emergencia en el distrito de Simón Bolívar de la provincia de Pasco por peligro de desembalse de la relavera Quiulacocha.

Con la finalidad de llevar un mejor control de los niveles piezométricos, ACTIVOS MINEROS SAC y ARSOVA SAC, celebraron un contrato para la automatización de los registros de niveles de agua en los piezómetros de la relavera Quiulacocha, Pasco.

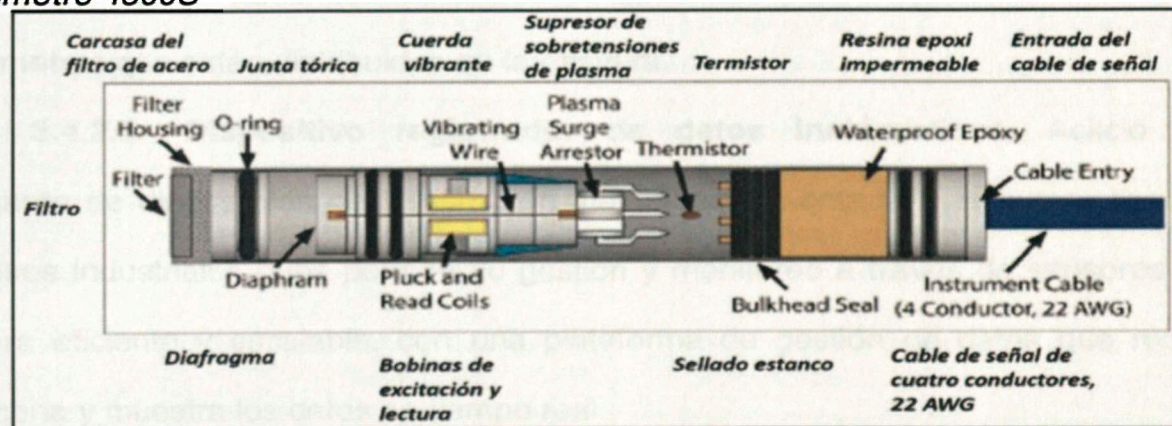
3.4.2 Descripción de equipos instalados

3.4.2.1 Transductor de presión. Conocido también como piezómetro, el cual es del modelo 4500S de la marca Geokon con un rango de medida es de 1 MPa. Los piezómetros incorporan un termistor para la medida de temperatura y un supresor de sobretensión que da protección frente a picos elevados de voltaje.

El cable de señal estándar usado en los piezómetros es el modelo 02-250V6 con cubierta de PVC de color azul y compuesto por dos pares de conductores de calibre 22AWG y un conductor de drenaje desnudo de 24AWG. Uno de los pares se emplea para la lectura del piezómetro y el otro par para medir la temperatura.

Figura 9

Piezómetro 4500S



Fuente: Empresa Geokon

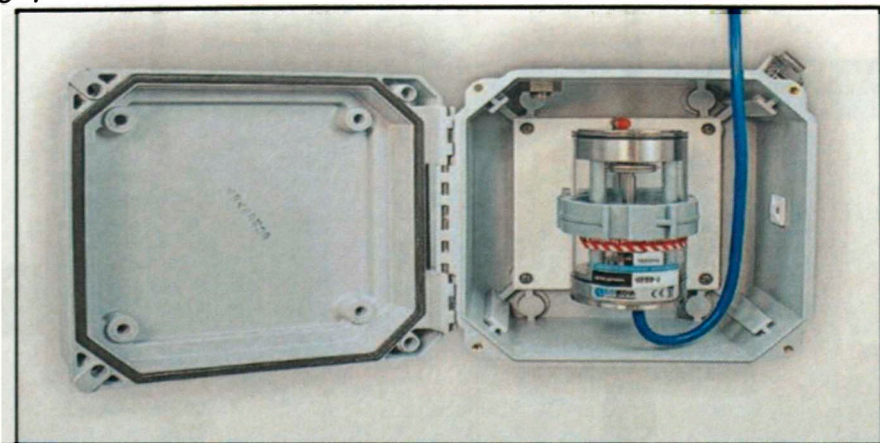
Como se muestra en la figura 9, el piezómetro 4500S es un dispositivo usado en la medición de presión de agua subterránea. Este instrumento es aplicado en el monitoreo de niveles de agua en relaveras que permite determinar la estabilidad del depósito de relave evitando fallas estructurales.

3.4.2.2 Sensor de compensación barométrica. Conocido como barómetro, el cual es del modelo 4580-1 de la marca Geokon y tiene como función corregir los cambios de presión barométrica en los piezómetros de alambre vibrante no ventilados que están cercanos, los cuales responden a cambios de presión atmosférica y agua. Este instrumento está calibrado para realizar lecturas en milibares.

Su instalación se realiza usualmente en un recinto ventilado con el sensor en posición vertical.

Figura 10

Barómetro 4580-1



Fuente: Empresa Geokon

Como muestra la figura 10, el barómetro 4580-1 es empleado en la medición de la presión atmosférica, lo que resulta útil su aplicación para mejorar la medición de los piezómetros que están distribuidos en la relavera.

3.4.2.3 Dispositivo registrador de datos inalámbricos. Ackcio es un fabricante de dispositivos de transmisión inalámbrica orientada a la automatización de procesos industriales pues permite su gestión y monitoreo a través de sensores IoT de manera eficiente y escalable, con una plataforma de gestión de datos que recolecta, almacena y muestra los datos en tiempo real.

Esta plataforma recopila datos de los piezómetros y barómetros de la relavera los cuales se conectan a estos dispositivos inalámbricos denominados nodos. Estos nodos transmiten los datos de campo hacia el Gateway.

El Gateway es la puerta de enlace donde se concentran todos los datos enviados por los nodos. Usa Ethernet o comunicación celular para transmitir la información registrada a la plataforma de monitoreo remota. Su suministro de energía es con paneles solares para evitar ser dependiente de la red eléctrica.

Los nodos de cuerda vibrante Ackcio monitorean todo tipo de sensores que tienen salidas de cuerda vibrante.

El modelo BEAM-VW-S1 admite 1 sensor.

Figura 11

Nodo Ackcio BEAM-VW-S1



Fuente: Empresa Ackcio

Como muestra la imagen 11, este dispositivo está diseñado para la transmisión remota de datos provenientes de sensores de cuerda vibrante como son los piezómetros de Geokon instalados. Este nodo es clave para realizar la automatización del monitoreo de niveles de agua en los piezómetros, pues permite registrar y mostrar la data en tiempo actual para mejorar el control de la estabilidad de relaveras.

3.4.2.4 Dispositivo de transmisión de datos. El dispositivo Ackcio Gateway es el dispositivo principal que se encarga de recibir toda la data de los nodos Ackcio Beam.

Este instrumento recibe datos de los sensores para posteriormente enviarlos a la plataforma de software externa que elija para su análisis y almacenamiento.

Además, este dispositivo funciona en ambas direcciones, permite recibir información y también realizar actualizaciones de frecuencia de muestreo a los nodos.

Posee 16 GB de memoria para almacenar datos recibidos de los sensores para su recuperación manual si se requiere. También posee un sistema de batería de respaldo en caso que la energía solar sea insuficiente para cubrir su alimentación.

Figura 12

Nodo Gateway Ackcio

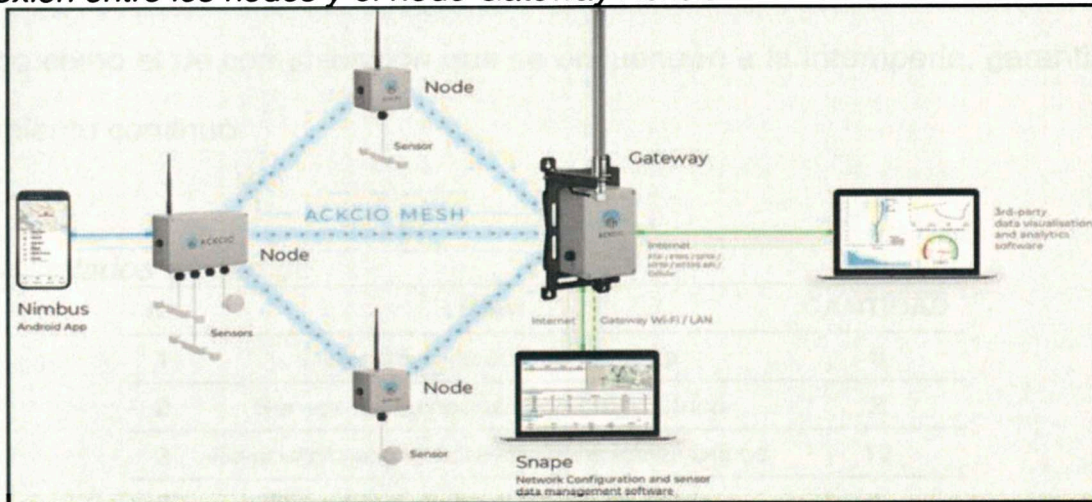


Fuente: Empresa Ackcio

La figura 12 muestra los componentes principales del Nodo Gateway Ackcio, el cual es el dispositivo encargado de gestionar la data recibida de los nodos inalámbricos. Aquí se centraliza la información recibida de los piezómetros y la envía a la plataforma de análisis, permitiendo que el seguimiento sea continuo.

Figura 13

Interconexión entre los nodos y el nodo Gateway Ackcio



Fuente: Empresa Ackcio

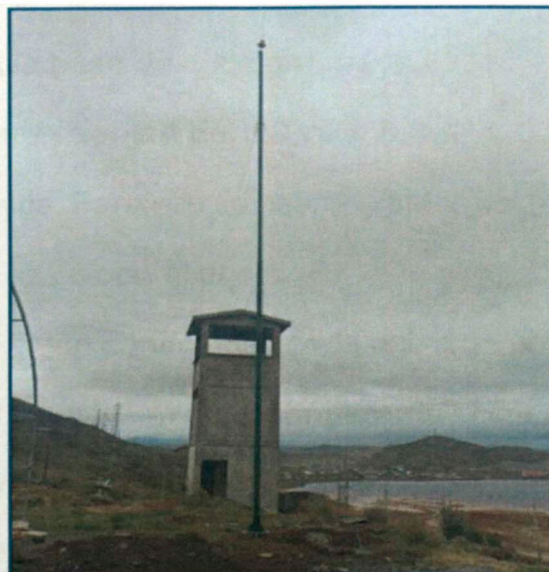
La figura 13 muestra el conexionado de comunicación entre los nodos de sensores y el nodo Gateway, mostrando el flujo de datos dentro del sistema automatizado de monitoreo en la relavera.

En este esquema los nodos de sensores envían información hacia el nodo Gateway, y este envía la data a la plataforma de análisis para su análisis en tiempo real.

3.4.2.5 Pararrayos en poste. Este equipo tiene como fin la protección de equipos electrónicos contra los rayos directos y reducir el riesgo de falla de los equipos por este evento. Este equipo tiene un radio de protección de 80 m.

Figura 14

Pararrayo



Fuente: Elaboración propia

La figura 14 muestra un pararrayos, un equipo esencial para la protección de equipos sensibles a descargas atmosféricas. El pararrayos protege tanto el equipo electrónico como el de comunicación que se encuentren a la intemperie, garantizando su funcionamiento continuo.

Tabla 3

Equipos instalados en campo

N°	ÍTEM	CANTIDAD
1	Dispositivo de cuerda vibrante	8
2	Sensor de compensación barométrica	2
3	Dispositivo registrador de datos inalámbricos	10
4	Dispositivo de transmisión de datos	1
5	Pararrayos en postes	2

Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Ejecución de actividades

En esta sección se detallan las actividades necesarias para implementar el sistema automatizado en los piezómetros de la relavera Quiulacocha. Cada actividad ha sido planificada con el objetivo de garantizar una correcta instalación, desde los sensores y nodos de comunicación hasta la puesta en marcha del sistema. A continuación, se detalla cada uno de ellos.

3.4.3.1 Instalación de pararrayos. Con las medidas aprobadas por la empresa AMSAC, se construyó el poste de 12 metros de altura que tiene una base de platina, ambos elaborados en un taller metalmecánico en Pasco. Posteriormente se realizó una zanja de 0.5 m x 0.5 m x 1.2 m para la base de cada pararrayo.

Además, se realizaron zanjas de 0.3 m x 0.3 m x 0.8 m para los anclajes que mantendrán fijos al pararrayos. Para ello se usaron cables de 1/8" de acero para los vientos del poste. Posteriormente, se colocó el poste.

Los dos pararrayos están conectados cada uno a un pozo a tierra de tipo horizontal de dimensiones 0.5 m x 3 m x 1.8 m para canalizar la corriente eléctrica hacia la tierra. Junto a las varillas de cobre se agregó cemento conductivo, tierra negra y el aditivo Thor gel conductivo.

Figura 15

Conexión entre poste pararrayo y pozo a tierra



Fuente: Elaboración propia

La figura 15 muestra la construcción del pozo a tierra del pararrayos, el cual es un elemento fundamental para la canalización de descargas eléctricas, evitando dañar los equipos electrónicos y de comunicación. La correcta instalación permite garantizar la seguridad y la operación continua del sistema de la relavera.

Figura 16

Poste pararrayo instalado



Fuente: Elaboración propia

La figura 16 muestra el poste pararrayo terminado, listo para proteger los equipos electrónicos y de comunicación que permiten automatizar el monitoreo continuo de la relavera Quiulacocha.

3.4.3.2 Instalación de dispositivos de cuerda vibrante. Se instalaron 8 piezómetros de cuerda vibrante en el interior de los piezómetros de tubo abierto ubicados en la relavera Quiulacocha para automatizar la medida de los niveles piezométricos en su interior. Adicionalmente, se instalaron 2 barómetros, también de cuerda vibrante, para la compensación barométrica de las medidas de los piezómetros

Como se comentó anteriormente, los piezómetros son de la empresa Geokon y cuenta cada uno con su respectiva hoja de calibración y también con su certificado de calidad.

Figura 17

Instalación del piezómetro

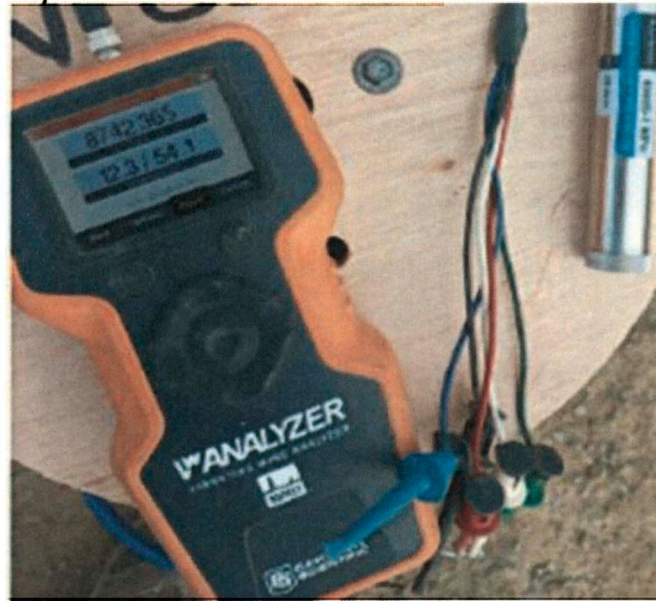


Fuente: Elaboración propia

La figura 17 muestra la instalación del piezómetro, el cual, según su manual del fabricante, debe saturarse en un balde con agua por un lapso de 15 a 20 minutos. Posterior a este tiempo se saca el piezómetro del agua y se deja estabilizar en superficie por un lapso de 15 minutos.

Figura 18

Primeras mediciones del piezómetro



Fuente: Elaboración propia

La figura 18 muestra las primeras mediciones del piezómetro luego de ser sumergido bajo el agua por 20 minutos. Estas mediciones son importantes pues servirán como mediciones de referencia.

Figura 19

Instalación del piezómetro



Fuente: Elaboración propia

La figura 19 muestra la instalación y fijación del piezómetro al nodo. El cable del piezómetro se sujeta al tubo con precintos de seguridad para que pueda tener una

conexión estable con el nodo Gateway. Este procedimiento se realizó para cada piezómetro cumpliendo siempre con las indicaciones proporcionadas por el fabricante.

3.4.3.3 Instalación de sensores de compensación barométrica. Como se ha mencionado, adicionalmente, se instalaron 2 sensores barométricos en 2 nodos para realizar las correcciones de las medidas de los piezómetros eliminando el efecto de la presión atmosférica. Esto permite que la toma de datos sea más confiable para el monitoreo de relaveras.

Figura 20

Conexión del sensor barométrico



Fuente: Elaboración propia

La figura 20 muestra las conexiones del sensor barométrico, el cual es un dispositivo usado para medir la presión atmosférica y compensar la variación de presión en la medición de los piezómetros. Esto permite una lectura más precisa garantizando la fiabilidad de los datos registrados.

Figura 21

Instalación del sensor barométrico con su nodo



Fuente: Elaboración propia

La figura 21 muestra la instalación final del sensor barométrico con su nodo. Este sensor es fundamental para compensar barométricamente las lecturas de los piezómetros en tiempo real.

3.4.3.4 Instalación de Gateway. Se realizó la zanja para el poste de soporte del Gateway y su pozo a tierra. En este poste están posicionados el panel fotovoltaico, la caja del regulador de voltaje de la batería, la propia batería y los accesorios del Gateway. Posteriormente se realizan las conexiones entre el panel fotovoltaico, regulador y batería que será su suministro principal.

Por último, se enciende el Gateway para configurar los nodos implementados anteriormente.

Figura 22

Prueba de suministro de energía del Gateway

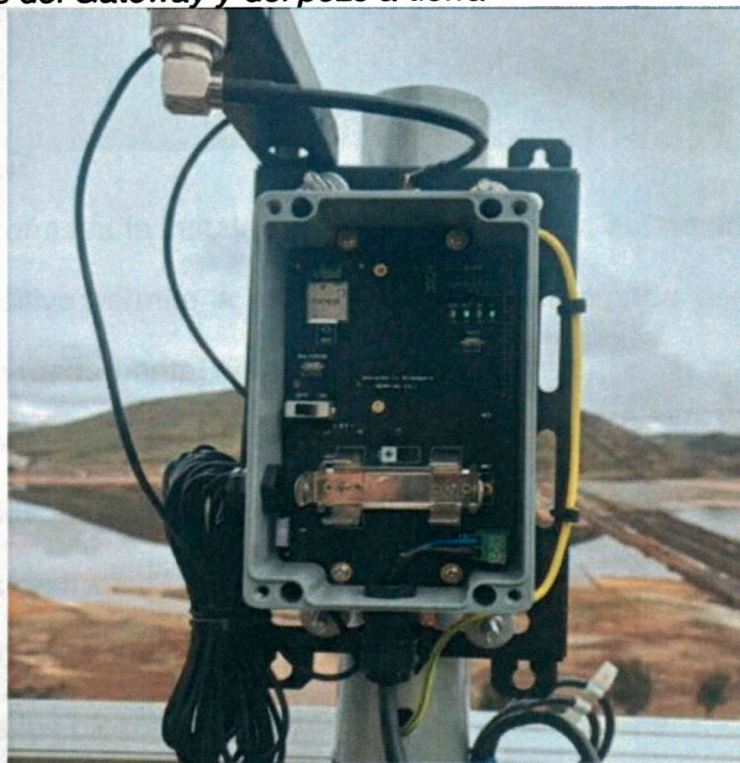


Fuente: Elaboración propia

La figura 22 muestra la prueba de suministro de energía del Gateway, el cual es un paso muy esencial para verificar que reciba la alimentación adecuada y tenga un correcto funcionamiento antes de su puesta en marcha.

Figura 23

Conexiones internas del Gateway y del pozo a tierra



Fuente: Elaboración propia

La figura 23 muestra las conexiones internas de Gateway y su unión con el pozo a tierra, asegurando que esté protegido ante descargas eléctricas y variaciones de voltaje permitiendo asegurar su seguridad y confiabilidad en el monitoreo.

Figura 24

Instalación del Gateway



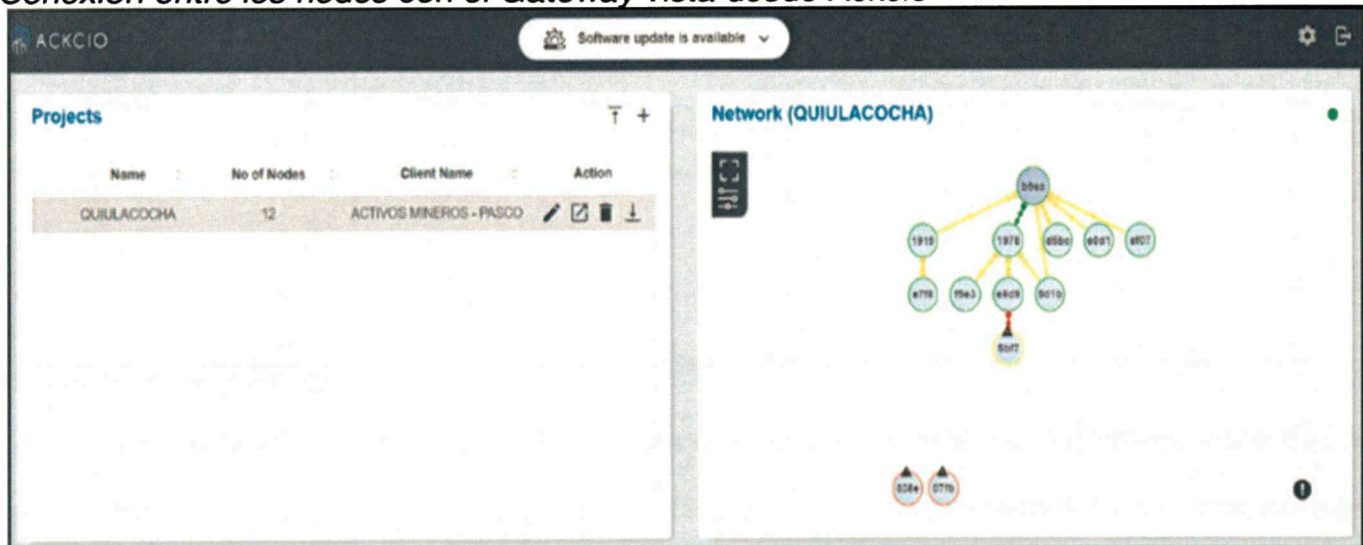
Fuente: Elaboración propia

La figura 24 muestra la instalación final del Gateway, así como el pozo a tierra a su derecha. Este dispositivo permite la recepción de la data tomada por los piezómetros, de manera que es parte fundamental en el monitoreo continuo.

3.4.3.5 Conexión de telemetría. Terminado de implementar todos los dispositivos como piezómetros, sensores barométricos y el nodo Gateway, se procede a configurar los nodos de transmisión, los cuales envían datos al Gateway que actúa como intermediario. Este último envía la información a la plataforma Ackcio para el análisis y monitoreo remoto de los piezómetros de la relavera Quiulocochoa.

Figura 25

Conexión entre los nodos con el Gateway vista desde Ackcio

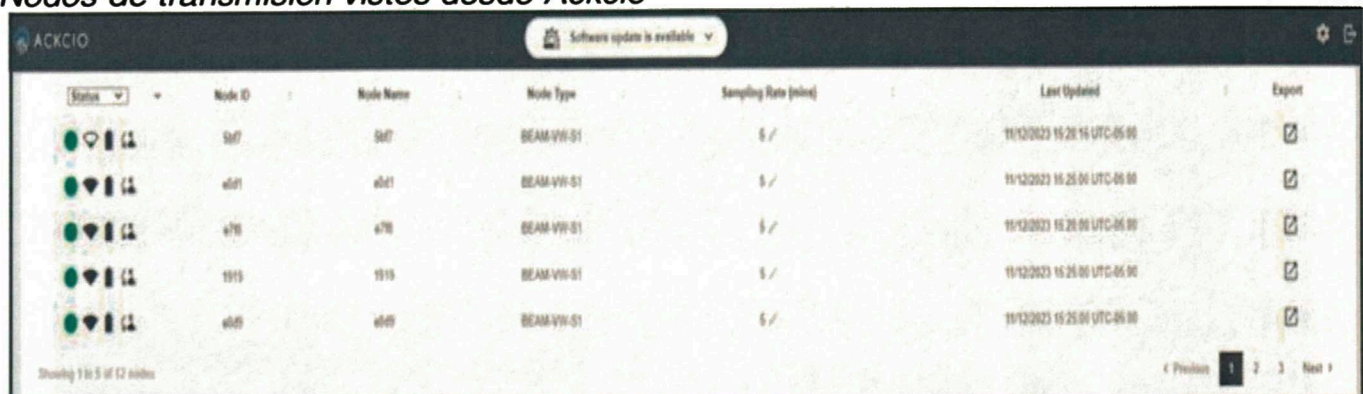


Fuente: Elaboración propia

La figura 25 muestra la visualización entre los sensores ubicados en los nodos y el Gateway a través de la plataforma Ackcio. Este esquema permite monitorear y procesar la data recopilada por los piezómetros en tiempo real. La correcta integración entre los nodos y el Gateway permite que el monitoreo sea continuo.

Figura 26

Nodos de transmisión vistos desde Ackcio



Fuente: Elaboración propia

La figura 26 muestra el interfaz de la plataforma de Ackcio, en el cual se muestran los nodos de monitoreo, como el ID y el tipo de nodo, la frecuencia de muestreo, la última actualización del nodo y la opción de exportar datos para visualizar. Esto facilita la gestión y análisis de la información recopilada en el sistema de monitoreo de los piezómetros.

Figura 27

Sensores visualizados desde la plataforma Ackcio

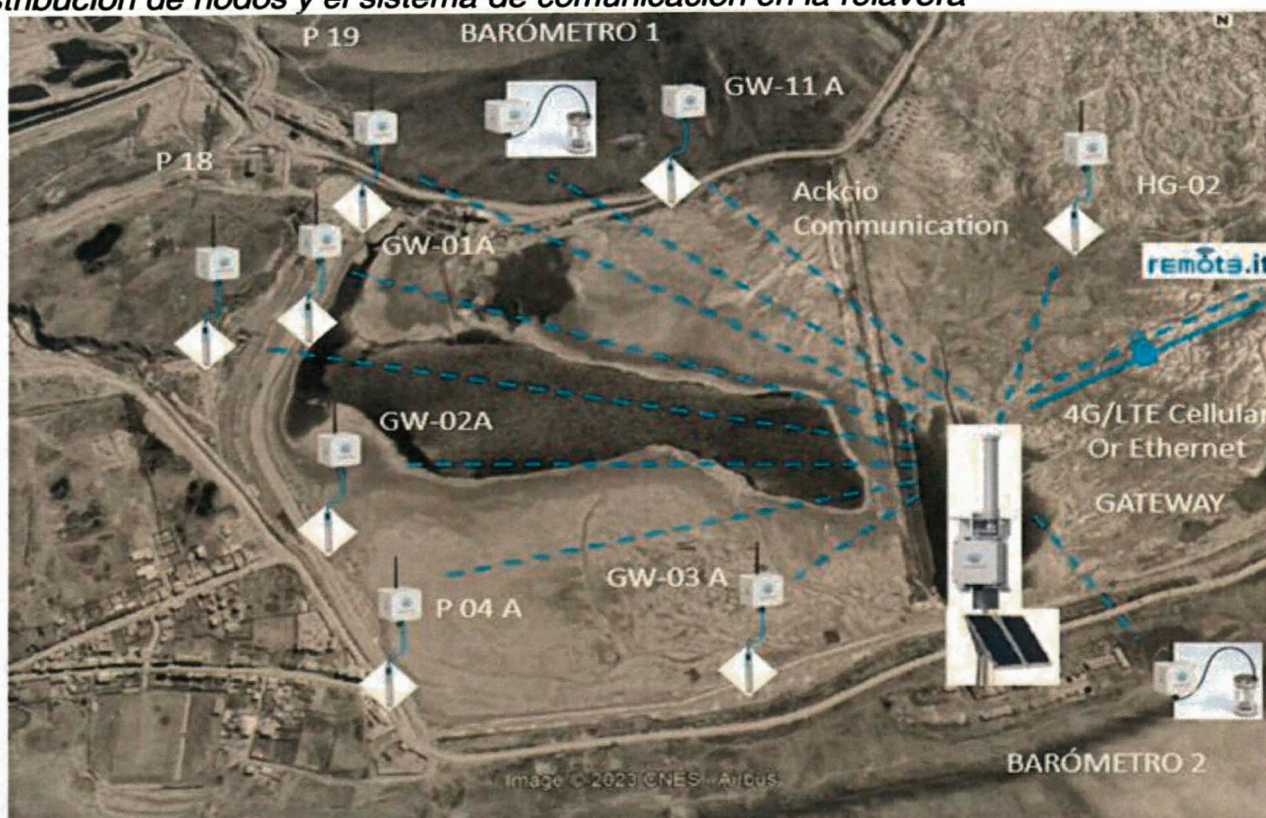
Sensor Group	Sensor Code	Sensor Type	Node Name	Channel Type	Last Reading	Recent Readings	Export
	Sensor3	Vibrating Wire	w071	Frequency Temperature Signal Quality	800.14 Hz 1679 C 14 %	[Graph]	[Export]
	Sensor6	Vibrating Wire	w16	Frequency Temperature Signal Quality	2706.9 Hz 5741 C 98 %	[Graph]	[Export]
	Sensor1	Vibrating Wire	1978	Frequency Temperature Signal Quality	2575.96 Hz 4933 C 99 %	[Graph]	[Export]
	Sensor10	Vibrating Wire	1915	Frequency Temperature Signal Quality	2515.18 Hz 4306 C 98 %	[Graph]	[Export]
	Sensor2	Vibrating Wire	w07	Frequency Temperature Signal Quality	2844.1 Hz 4848 C 99 %	[Graph]	[Export]

Fuente: Elaboración propia

La figura 27 muestra los sensores conectados al sistema de monitoreo vista desde la plataforma de Ackcio. Se visualiza el estado actual y su funcionamiento de cada sensor, asegurando la correcta recopilación de datos que posteriormente es enviada al Gateway.

Figura 28

Distribución de nodos y el sistema de comunicación en la relavera



Fuente: Elaboración propia

La figura 30 muestra la distribución de nodos de sensores y del sistema de comunicación en la relavera Quiulacocha. Este esquema muestra como están organizados los nodos de monitoreo para garantizar una cobertura eficiente y precisa en toda el área

de la relavera. Cabe resaltar que cada nodo está ubicado estratégicamente para captar las mediciones de los piezómetros y transmitir los datos hacia el Gateway, centralizando los datos recopilados.

3.4.3.6 Pruebas del sistema de automatización.

Figura 29

Configuración del proyecto en Ackcio

The screenshot shows the 'Ackcio' project configuration window in 'Vista Data Vision'. The window has a title bar with search, notification, settings, user, and bookmark icons. On the left is a sidebar with navigation icons. The main content area is titled 'Ackcio' and contains the following fields:

- Project Name:** A text input field containing 'Prism' and 'vera Quiulacocha'.
- Project:** A dropdown menu with 'Activos Mineros' selected.
- Site Time Zone:** A dropdown menu with '(UTC-05:00) Bogota, Lima, Quito, Rio Branco' selected.
- Alarms:** A section with a checked checkbox labeled 'Active'.
- Input:** A section with a small icon.

At the bottom right of the form are two buttons: 'Cancel' and 'Update'.

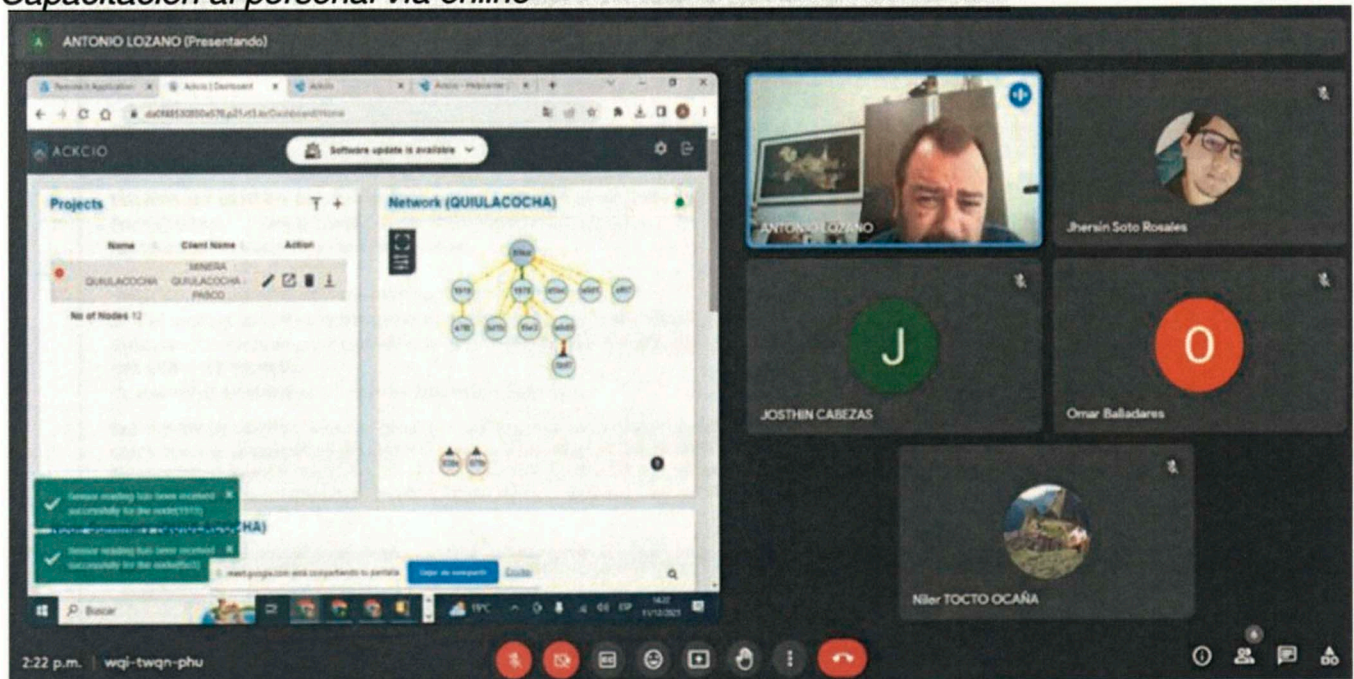
Fuente: Elaboración propia

La figura 28 muestra la configuración final del proyecto en Ackcio, en el cual se registran los datos generales de monitoreo como el nombre del proyecto, la entidad responsable y la zona horaria para la sincronización de la data tomada. Se verifica que la conexión al sistema del software es correcta.

3.4.3.7 Capacitación del manejo del software. La capacitación al personal que operará el software es de suma importancia para que se recopile y procese la data de forma adecuada.

Figura 30

Capacitación al personal vía online



Fuente: Elaboración propia

La figura 29 muestra una sesión de capacitación online realizada mediante Google Meet, en la que se brindó información sobre la operación de la interfaz de Ackcio para la relavera Quiulacocha. Durante la capacitación se abordó el aspecto técnico y de mantenimiento con referencia a los sensores, nodos y el Gateway para su monitoreo continuo.

3.4.4 Control de la calidad

El control de calidad es un aspecto fundamental para asegurar una correcta implementación del sistema automatizado de monitoreo de niveles de agua en relavera.

Se verificó su certificación de calidad y se revisaron las hojas de calibración de cada componente instalado, las cuales fueron proporcionadas por el fabricante con el fin de cumplir las especificaciones técnicas antes de su instalación. Se realizaron también inspecciones y pruebas en cada nodo de transmisión, en el Gateway y en el suministro de energía, con el fin de corroborar que todo el sistema tenga un correcto funcionamiento minimizando errores por instalación.

La garantía que ofrece el sistema automatizado es de 1 año.

Figura 31

Certificado de calidad de los piezómetros, barómetros y los cables

GEOKON.

GEOKON
48 Spencer Street
Lebanon, New Hampshire
03766 · USA

www.geokon.com
p: +1-603-448-1562
f: +1-603-448-3216

CERTIFICATE OF QUALITY, CONFORMITY & CALIBRATION

WE HEREBY CERTIFY that the manufactured materials listed below (SCHEDULE A)
Furnished to: Geoengineering Services & Consulting E.I.R.L.
Reference Geokon Job No.: 20090444

order no.: Email 9/11 AM, contract no.: N/A in all aspects
In the amount specified in Schedule A, identified by our label "GEOKON"
Complies/Conforms to, or exceeds the requirements and specifications of your purchase order no: contract no: N/A in all aspects.
Country(s) of Origin: United States of America

WE FURTHER CERTIFY that the product supplied has been inspected, tested and calibrated as applicable, in conformance to the relevant specifications and drawings of the GEOKON registered ISO 9001:2015 Quality Management System, Revision 19. Calibration and testing standards are calibrated by ISO 17025 Accredited Laboratories, are maintained per ANSI/NCSL Z540-1 and are traceable to the N.I.S.T.

SCHEDULE A

MODEL NO.	QUANTITY	TYPE OF INSTRUMENT	SERIAL NO.
4580-1	2	VW Barometer, 200 mbar (2.5 psi) range Specify elevation at which sensor will be used.	2317985~2317986
02-250V6-M	3m	Blue PVC Cable, 0.250", 2 twisted pairs	N/A
4580-1-ENCL	2	Standard Enclosure for Barometer Includes mounting plate, clamp, and breather vent	N/A
4500S-1MPA	8	VW Piezometer, unvented, 1 MPa (145 psi)	2316850~2316857
02-250V6-M	378m	Blue PVC Cable, 0.250", 2 twisted pairs	N/A
GK-604D-S	1	Digital Inclinator Cable Reel w/case For cables up to 50m/150 ft.	2319667
6001-2ND-50	1	Digital Inclinator Cable, 8mm Ø 50 meter length	2316145

Signed by:

Yvonne Findley
Quality Assurance Manager

Date: November 02, 2023

OFFICIAL CORPORATE SEAL
GEOKON
48 SPENCER ST
LEBANON, NH
USA

ARSOVA S.A.C.

Inés A. Nieves Vilchez
Ingeniero Supervisor
CIR: 234129

ARSOVA

Jhersin N. Soto Robales
GERENTE GENERAL
DNI: 71898037

Ref: 20090444

TRUSTED MEASUREMENTS™

Fuente: Empresa GEOKON

La figura 31 muestra el certificado de calidad por el fabricante en referencia a los equipos usados en el monitoreo de niveles de agua en la relavera. Este documento garantiza que los equipos empleados como los sensores cumplen con los estándares de fabricación y fiabilidad.

Figura 32

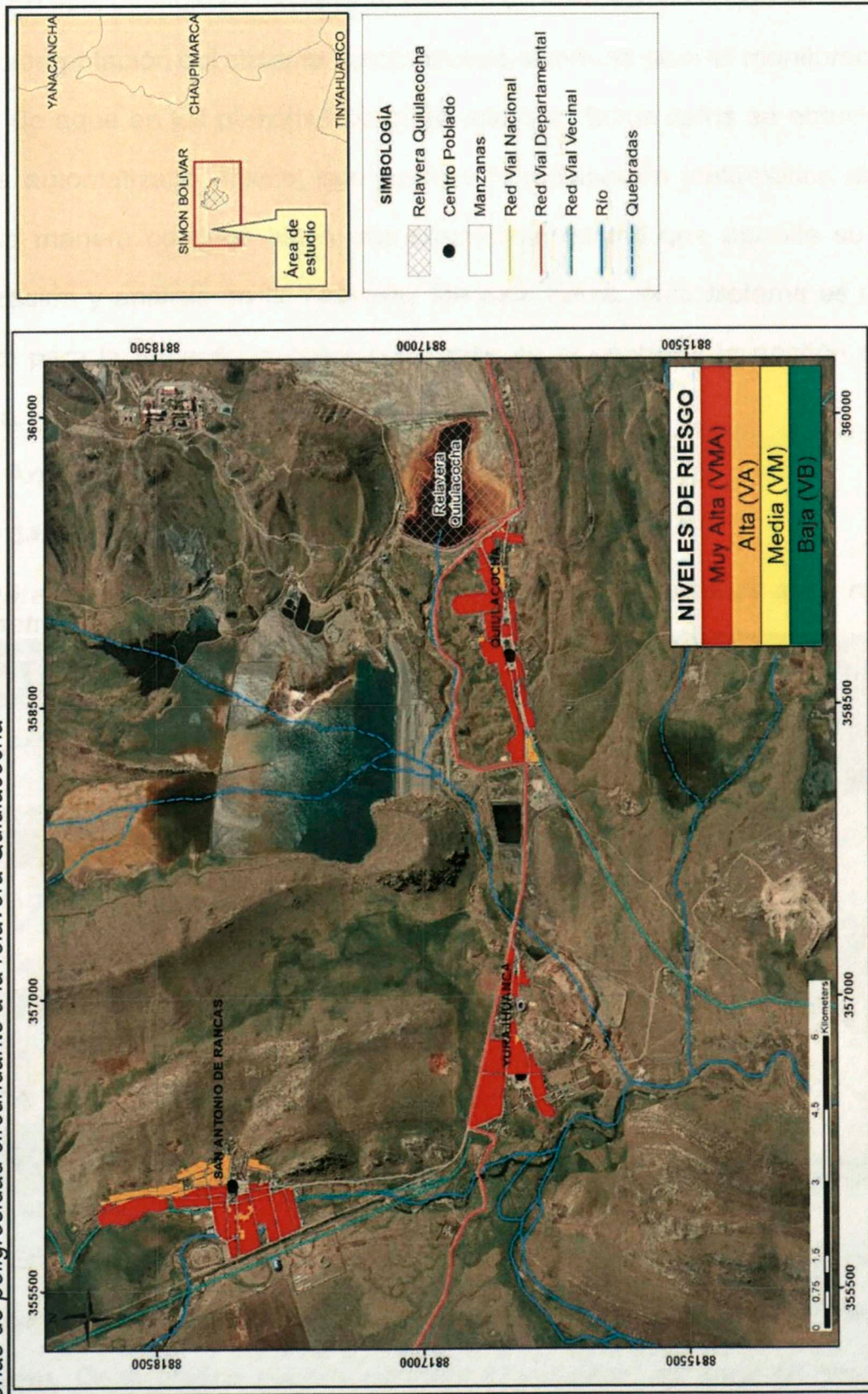
Ubicación geográfica y elementos circundantes



Fuente: Google Earth – Elaboración propia

Figura 33

Mapa de zonas de peligrosidad circundante a la relavera Quiulacocho



Fuente: Google Earth – Elaboración propia.

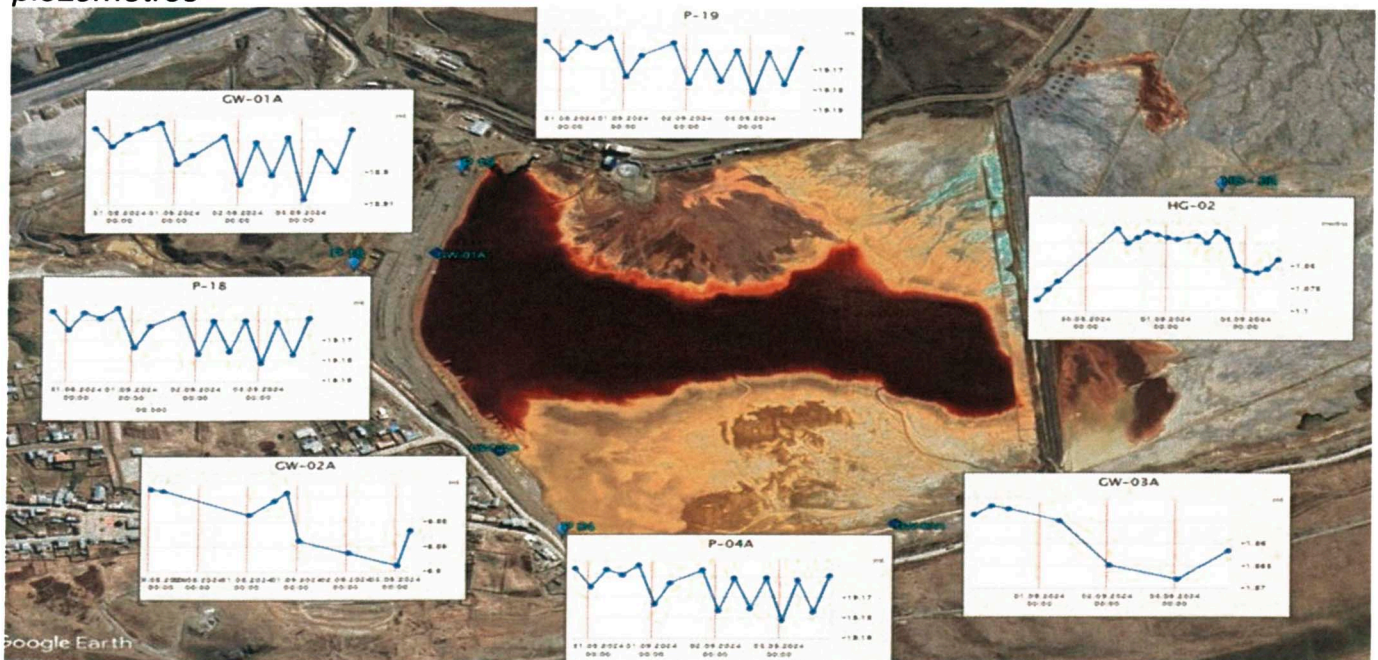
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

En este capítulo se muestra el análisis de los resultados que se obtuvieron posterior a la implementación del sistema automatizado diseñado para el monitoreo y control de los niveles de agua en los piezómetros de la relavera. Estos datos se obtuvieron a partir del sistema automatizado Ackcio, que permite la recolección inalámbrica de los niveles de agua de manera continua hacia una plataforma central que permite su procesamiento, visualización y análisis en tiempo real. De esta forma, este sistema es una herramienta muy útil para la toma de decisiones rápidas en el control y la gestión de riesgos de la relavera.

4.1 Análisis gráfico de resultados

Figura 34

Vista aérea de la relavera Quiulacocha, mostrando los niveles de agua registrados en los piezómetros



Fuente: Elaboración propia

En la figura 32 se presenta una vista aérea desde la plataforma Google Earth, en la cual se han georreferenciado los gráficos de monitoreo de los piezómetros instalados en la relavera. Cada gráfico permite conocer la variación del nivel de agua medido desde enero a setiembre del 2024.

En la figura se observan los piezómetros que fueron etiquetados como P-18, P-19, P-04A, HG-02, CW-01A, CW-02A y CW-03A. Estos piezómetros muestran un comportamiento estable en la medida de los niveles de agua a lo largo del tiempo.

P-18

Este piezómetro se encuentra ubicado en la parte occidental de la relavera. De acorde al gráfico 32, las variaciones en el nivel freático se dan entre -17.5 m y -16.8 m. Se evidencia que el aumento del nivel de agua durante los meses de marzo y abril se correlaciona con las precipitaciones asociadas a la temporada de lluvias.

P-19

Este piezómetro se encuentra ubicado en la parte norte de la relavera, en una zona elevada. De acorde al gráfico 32, las variaciones en el nivel freático muestran una tendencia descendente progresiva entre los -17.0 m y -17.7 m. Esta disminución se correlaciona con una disipación de presiones intersticiales en los poros favorecida por la propia constitución del relave.

P-04A

Este piezómetro se encuentra ubicado en la parte sur de la relavera. De acuerdo al gráfico 32, la variación del nivel freático presenta variación descendente entre -14.7 m a -15.5 m. De forma similar al piezómetro P-19, en esta zona existe una correcta disipación de las presiones de poro.

Es importante destacar que en situaciones así, se debe corroborar si estas lecturas del piezómetro son debidas a las condiciones del relave o por acciones antrópicas como obras de drenaje.

HG-02

Este piezómetro se encuentra ubicado en la parte noreste de la relavera, cerca de una vía de acceso a ella. De acorde al gráfico 32, registra un incremento constante hasta el mes de abril, y, posteriormente, hay una estabilización en los siguientes meses.

El nivel de agua promedio es de -2.7m aproximadamente. Esta zona debe considerarse como prioridad, pues presenta un nivel de agua elevado que puede incidir en la estabilidad del talud.

GW-01A

Este piezómetro se encuentra ubicado en la parte noroeste de la relavera. De acuerdo al gráfico 32, el nivel freático muestra oscilaciones del nivel de agua con ascensos y descensos del nivel entre -16.5 m y -15.7 m que se podría correlacionar con los eventos de lluvias y filtraciones.

GW-02A

Este piezómetro se encuentra ubicado al suroeste de la relavera, el cual está cerca de las zonas pobladas. De acorde al gráfico 32, la tendencia general de este piezómetro es estable.

GW-03A

Este piezómetro se encuentra instalado en el extremo sur de la relavera. De acorde al gráfico 32, el nivel freático muestra fluctuaciones relativamente irregulares que se encuentran dentro de los rangos aceptables.

El nivel freático varía entre los -15.3 m y los 14.8 m. Estas variaciones se podrían correlacionar con el drenaje interno de la relavera.

El monitoreo de estos niveles piezométricos permite conocer su evolución en el tiempo. Para un efectivo control de la estabilidad de la relavera es necesario realizar un análisis de riesgo basado en factores de seguridad o probabilidad de falla que permita establecer unos umbrales de riesgo basados en la variación de los niveles de agua y el correspondiente plan de contingencia en caso se supere el umbral de alarma.

La información relativa a las mediciones de los niveles de agua registrados en los piezómetros se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4*Medición de los piezómetros*

PIEZÓMETRO	UBICACIÓN	RANGO DE NIVELES	TENDENCIA GENERAL	OBSERVACIONES
P-18	Oeste	[-17.5; -16.8]	Estable	Fluctuaciones asociadas a precipitaciones.
P-19	Norte	[-17.7; -17.0]	Descendente	Buen drenaje, descenso de nivel
P-04A	Sureste	[-15.5; -14.7]	Descendente	Buen drenaje, descenso de nivel
HG-02	Noreste	-2.7 aprox.	Estable	Nivel superficial, se recomienda mayor frecuencia de monitoreo
GW-01A	Noroeste	[-16.5; -15.7]	Variable	Respuesta rápida a eventos de lluvia.
GW-02A	Suroeste	-16.0 aprox.	Estable	Fluctuaciones menores.
GW-03A	Sur	[-15.3; -14.8]	Variable	Comportamiento hidrogeológico complejo.

Fuente: Elaboración propia

Siendo uno de los objetivos de la presente investigación la evaluación del sistema automatizado frente al método tradicional en el monitoreo de niveles de agua. Dicha comparación se evidenció posterior a la implementación del sistema automatizado, mostrando que la plataforma Akcio, así como todo el sistema automatizado logra dar beneficios operativos, seguros y sostenibles frente al método tradicional. A continuación, se muestra una tabla de comparación que sintetiza lo explicado.

Figura 35

Ubicación de piezómetros en la relavera Quiulacocho



Fuente: Elaboración propia – Google Earth

Tabla 5*Comparativa entre el método tradicional y el sistema automatizado*

CRITERIO	MÉTODO TRADICIONAL	SISTEMA AUTOMATIZADO
Intervalo de medición	Cada cierto tiempo fijado (semanal o mensual)	Continua, en tiempo real
Disponibilidad de la data	Necesita de una personal in situ	Acceso remoto desde la plataforma Akcio
Seguridad del personal	Debe exponerse a riesgos en diversas zonas de la relavera	No necesita personal, solo para realizar mantenimiento
Precisión de la data	Limitada, depende del personal en la lectura.	Precisión muy elevada, los registros y lecturas son automáticos.
Tiempo de respuesta ante fallas o anomalías	Retardado, se detecta luego del registro manual de datos	Inmediato, permite identificar anomalías ante variaciones considerables.
Costo operativo a largo plazo	Alto (Personal, equipos de campo y movilidad en forma periódica)	Medio (Coste inicial elevado, sin embargo, luego ya no se requiere de nuevos costos)
Adaptabilidad geográfica	Depende del personal si puede acceder a dicho lugar	Basta con instalar el equipo para poder realizar medición
Sostenibilidad y modernización	Es una forma muy desfasada de realizar mediciones	Compatible con la transición hacia la modernización digital de la minería

Fuente: Elaboración propia

4.2 Formulación de las hipótesis**4.2.1 Hipótesis alternativa (H_A)**

El diseño de un sistema automatizado permitirá el monitoreo continuo y eficiente de los niveles de agua en los piezómetros de las relaveras.

4.2.2 Hipótesis nula (H_0)

El diseño de un sistema automatizado no permitirá el monitoreo continuo y eficiente de los niveles de agua en los piezómetros de las relaveras.

4.3 Análisis estadístico comparativo entre el monitoreo tradicional a mano y el sistema automatizado**Tabla 6***Comparativas numéricas entre los dos métodos de monitoreo*

INDICADORES TÉCNICOS	MÉTODO TRADICIONAL	SISTEMA AUTOMATIZADO	% DE MEJORA
Intervalo de medición	3 horas	Menor a 5 minutos	Aprox 97%
Frecuencia de medición	1 vez por semana	Medición continua 24/7	-
Personal requerido para medición en campo	2 técnicos	0	100%
Error estimado de medición	5%	Menor a 0.5% (especificaciones técnicas de Akcio)	90%
Disponibilidad de la data obtenida	5%	96%	1900%

Fuente: Elaboración propia

La tabla 6 muestra una evaluación cuantitativa de los 5 indicadores presentados en él. Los datos mostrados se obtuvieron a partir de mediciones reales en campo, complementados con información técnica de los dispositivos automatizados y entrevistas a los operarios de monitoreo manual. Esta comparativa muestra una base objetiva para la toma de decisiones en la modernización de los sistemas de monitoreo en relaveras.

De acorde a los registros anteriores del monitoreo manual realizado en la relavera Quiulacocho, la comparativa durante 15 días de monitoreo se muestra a continuación:

Tabla 7

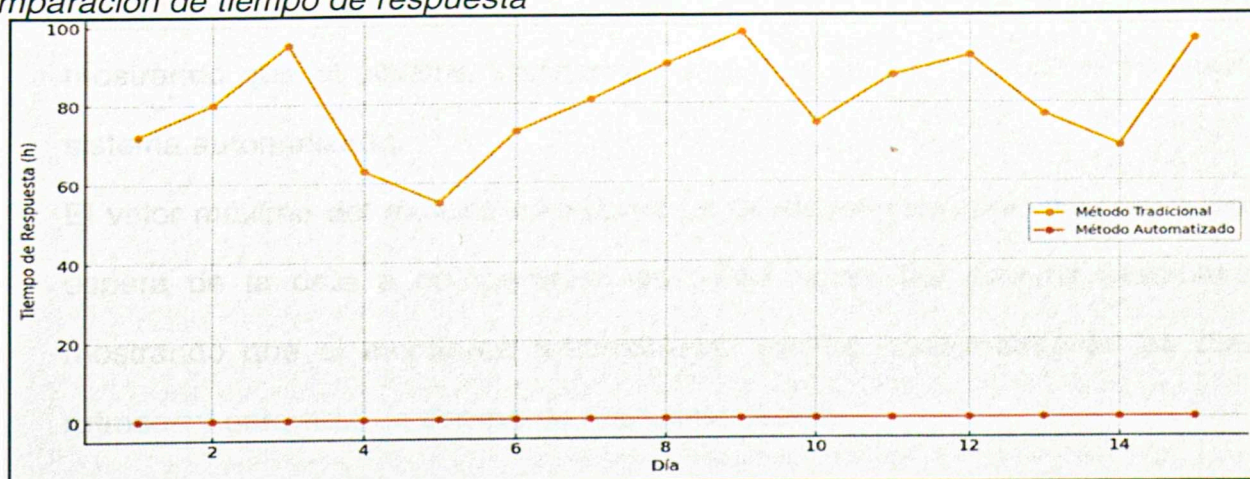
Tiempo de respuesta estimado realista en horas

Día	Método tradicional X_i	Método automatizado Y_i	Variación $d_i=X_i - Y_i$	Rango
1	72h	0.083h = 5 minutos	+71.917h	4
2	80	0.083	+79.917h	8
3	95	0.083	+94.917h	13
4	63	0.083	+62.917h	2
5	55	0.083	+54.917h	1
6	73	0.083	+72.917h	5
7	81	0.083	+80.917h	9
8	90	0.083	+89.917h	11
9	98	0.083	+97.917h	15
10	75	0.083	+74.917h	6
11	87	0.083	+86.917h	10
12	92	0.083	+91.917h	12
13	77	0.083	+76.917h	7
14	69	0.083	+68.917h	3
15	96	0.083	+95.917h	14

Fuente: Elaboración propia

Figura 36

Comparación de tiempo de respuesta



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8*Estadística obtenida de 15 monitoreos en la relavera Quiulacocha*

INDICADOR	MÉTODO TRADICIONAL	MÉTODO AUTOMATIZADO
Promedio (h)	80.20 h	0.083 (5 min)
Desviación estándar (h)	12.76 h	0 h (es constante)
Mínimo (h)	55 h	0.083
Máximo (h)	98 h	0.083

Fuente: Elaboración propia

De acorde a la tabla 8 podemos obtener los siguientes resultados:

- El promedio del método tradicional es de 80,20 h, significando que tarda más de 3 días en responder a comparación del monitoreo automatizado, que lo logra en 5 minutos, mostrando que dicho método es casi 1000 veces más rápido permitiendo una toma de decisiones inmediata.
- La desviación estándar del método tradicional es de 12.76 h, significando que existe una alta dispersión de la data obtenida y es justificado pues algunos días demoró 55 horas y en otros casos 98 horas a comparación del monitoreo automatizado que siempre tarda 5 minutos o menos sin importar el día ni la ubicación del piezómetro, mostrando que el sistema automatizado es completamente fiable y constante a diferencia del método tradicional que es impredecible, lo cual aumenta el riesgo en la relavera.
- El valor mínimo del método tradicional es de 55 horas siendo más de 2 días de espera a comparación de 0.083 horas (5 minutos) del sistema automatizado, mostrando que el sistema tradicional aún en su mejor registro no se acerca al sistema automatizado.
- El valor máximo del método tradicional es de 98 horas siendo más de 4 días en espera de la data a comparación de 0.083 horas del sistema automatizado, mostrando que el monitoreo automatizado elimina completamente los días de retrasos y garantiza un tiempo de respuesta rápido.

4.4 Contrastación de las hipótesis

Luego de la formulación de las hipótesis nula y alternativa, procedemos a determinar cuál se acepta y cual se rechaza.

Dado que se realizó una mejora en el monitoreo de la relavera Quiulacocha, se analizará la variable "Tiempo de respuesta estimado realista en horas", ya se cuenta con data registrada antes y después de dicha mejora gracias a los registros anteriores con el método tradicional, y actuales con el método automático.

Para comparar ambas muestras, se usará la prueba de Wilcoxon para rangos con signo del tipo unilateral con un nivel de significancia del 5% debido a que la hipótesis alternativa es direccional (El tiempo de respuesta que tiene el sistema automático es menor que el sistema tradicional). Esta prueba busca evaluar si existe una diferencia significativa en los tiempos de respuesta obtenido por ambos métodos.

Con estos datos obtenidos de la tabla 7, procedemos a calcular el estadístico de Wilcoxon:

$$T^+ = \sum \text{Rangos con signo "+"} = 1+2+3+\dots+ 14+15 = 120$$

$$T^- = \sum \text{Rangos con signo "-"} = 0$$

Por convención, el estadístico de Wilcoxon es $W = \min(T^+, T^-)$

$$W = \min(120, 0) = 0$$

Ahora, se calcula con el "p-valor":

Con $n=15$ pares, cada par contado puede tener un signo positivo o negativo, es por ello que existen 2^n combinaciones, o sea 2^{15} .

Se calcula el total de formas de obtener $W \leq 0$: 1 forma, pues solo existe un caso donde $W=0$ y en los demás casos es positivo.

Con estos datos obtenemos el p-valor:

$$p - \text{valor} = \frac{1}{2^{15}} = 0.00003052$$

Dado que $p < 0.05$ (5% de significancia), se confirma la significancia estadística. Además, como $W=0$ se encuentra en la zona de rechazo, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a).

Interpretación:

El análisis estadístico demuestra que el sistema automatizado permite un tiempo de respuesta más rápido y eficiente de los niveles de agua en comparación con el método tradicional, validando la hipótesis de esta investigación.

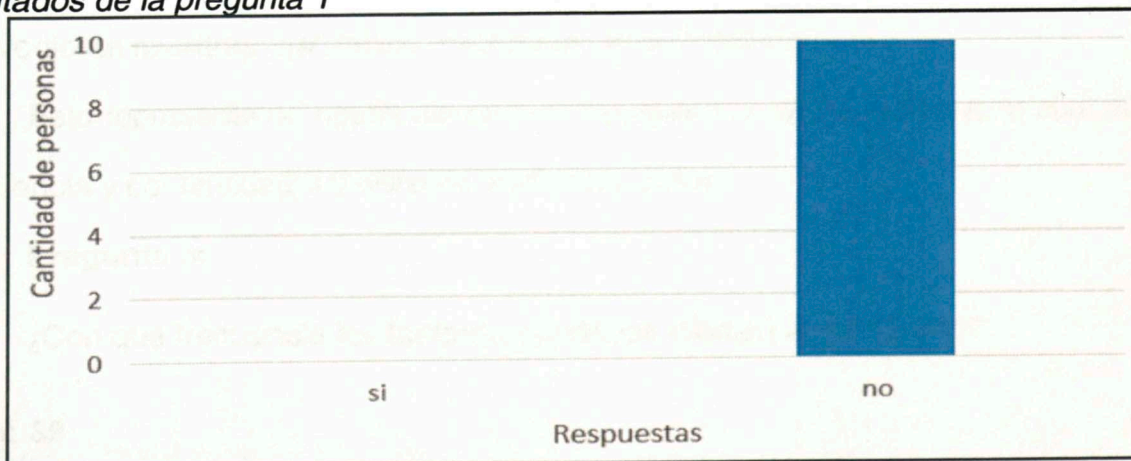
Resultados de la encuesta (Anexo 7) realizada en la relavera Quiulacocha evidenciando la percepción de los trabajadores sobre ambos métodos de monitoreo

Pregunta 1:

¿Considera que el sistema tradicional permite tomar decisiones rápidas en emergencias?

Figura 37

Resultados de la pregunta 1



Fuente: Elaboración propia

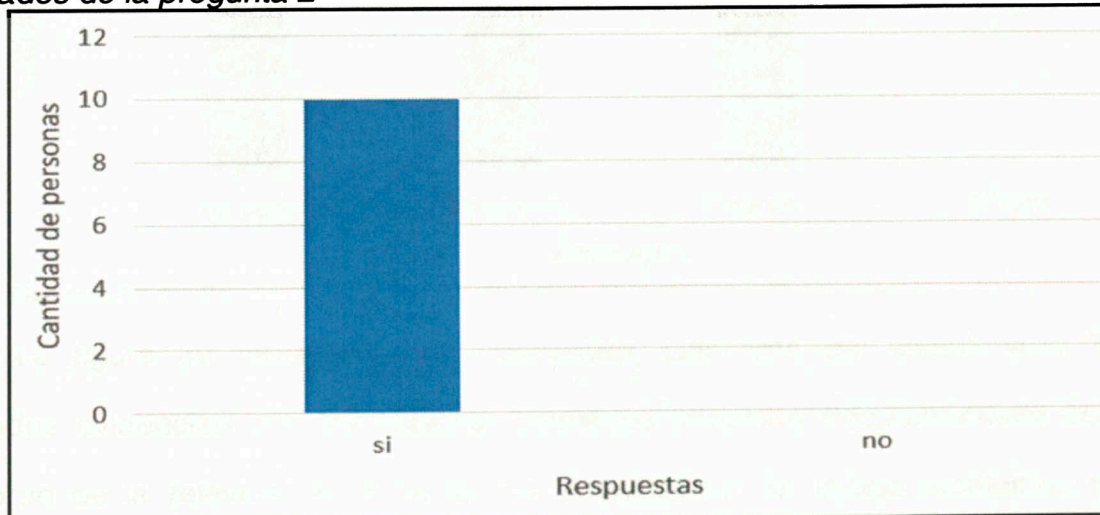
La figura 37 muestra que el 100% de los participantes respondió “No”, mientras que el 0% respondió “Si”. Este resultado evidencia que todos los participantes de la relavera tenían disconformidad con el sistema tradicional debido a sus limitaciones en el tiempo de actuar frente a la toma de decisiones.

Pregunta 2:

¿Ha experimentado retrasos en la recolección de datos por factores climáticos o de acceso?

Figura 38

Resultados de la pregunta 2



Fuente: Elaboración propia

La figura 38 muestra que el 100% de los participantes respondió "Si", mientras que el 0% respondió "No". Este resultado muestra que todos los participantes tuvieron algún inconveniente mientras realizaban mediciones en la relavera.

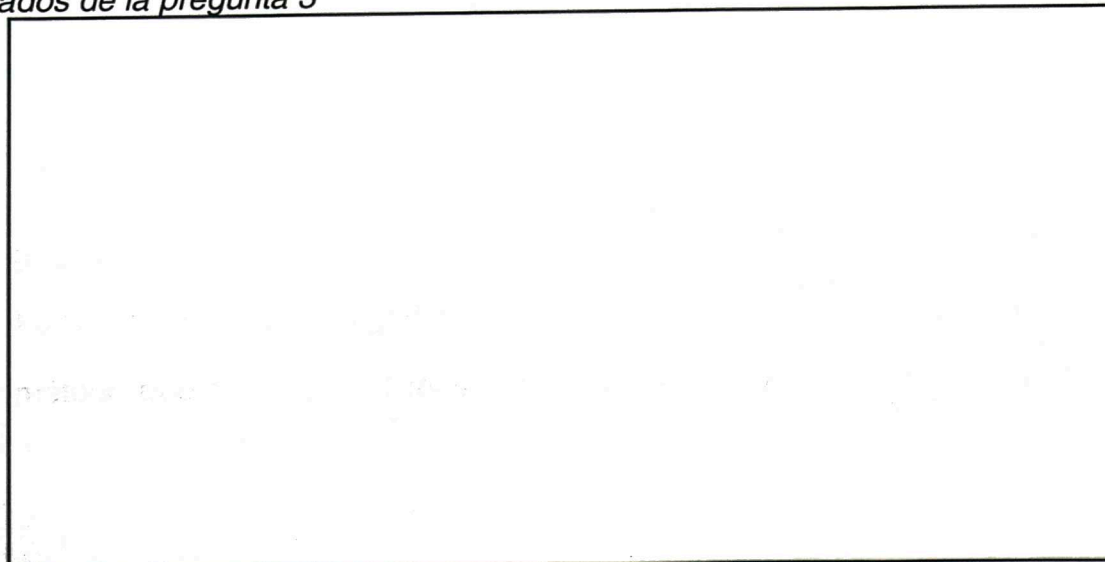
Esto representa un obstáculo para el monitoreo en dicha relavera, lo cual afectaría la eficiencia y continuidad del sistema tradicional actual.

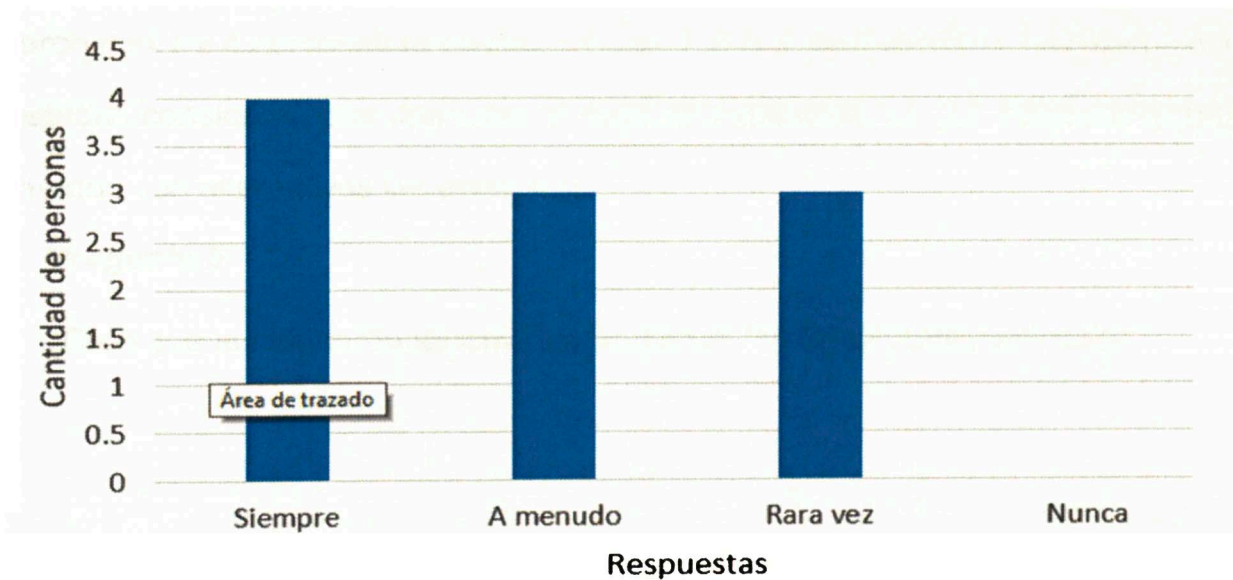
Pregunta 3:

¿Con qué frecuencia los factores climáticos afectan el monitoreo?

Figura 39

Resultados de la pregunta 3





Fuente: Elaboración propia

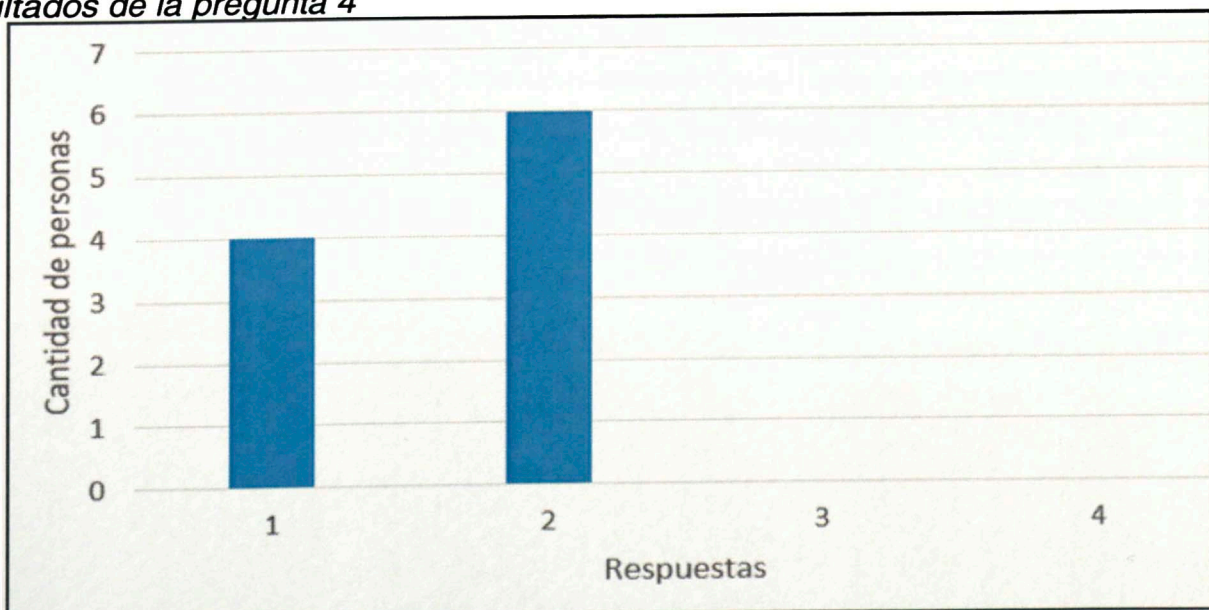
La figura 39 representa las respuestas obtenidas del cuestionario 3. Estos resultados evidencian que los factores climáticos impactan frecuentemente durante el monitoreo de la relavera. El 60% de los encuestados ha tenido problemas tomando mediciones y sorprende que el 0% de encuestados nunca hayan tenido problemas.

Pregunta 4:

En la escala del 1 al 5, ¿Cuán confiable considera el método tradicional?

Figura 40

Resultados de la pregunta 4



Fuente: Elaboración propia

La figura 40 muestra un gráfico de barras siendo 1 el nivel más bajo en confiabilidad con el método tradicional y 5 el más alto. Los resultados muestran que 6 personas lo

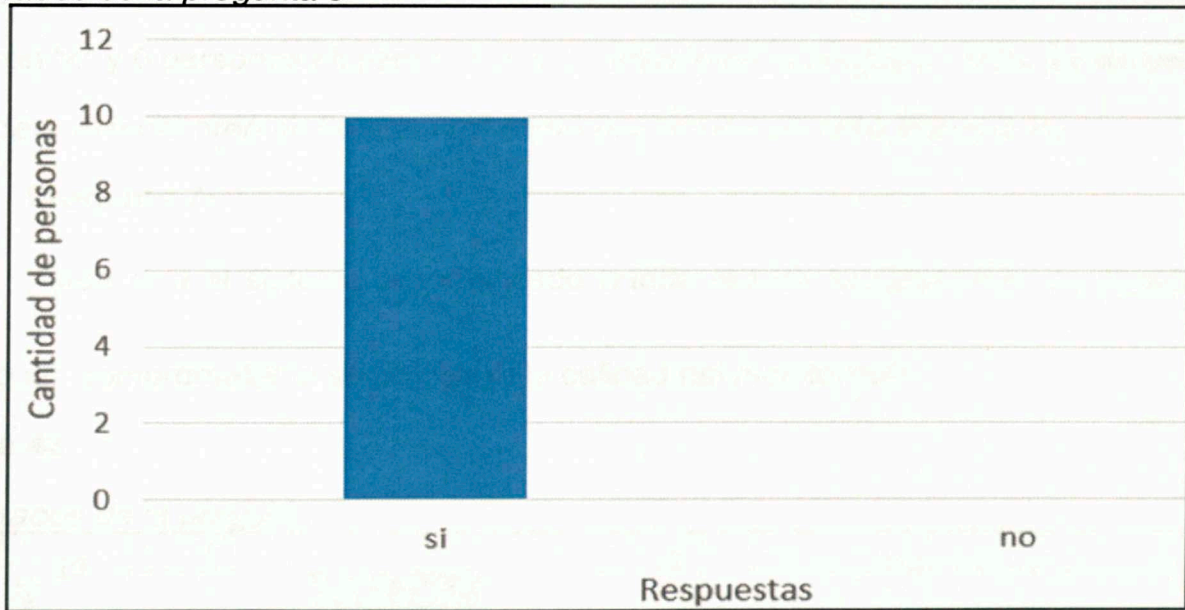
calificaron con 1 y 4 personas lo calificaron con 2. Estos resultados arrojan que el total de encuestados considera poco confiable el método tradicional, lo que motiva a reemplazar este método con alternativas las eficientes.

Pregunta 5:

¿Cree que el monitoreo automatizado mejora la confiabilidad del dato?

Figura 41

Resultados de la pregunta 5



Fuente: Elaboración propia

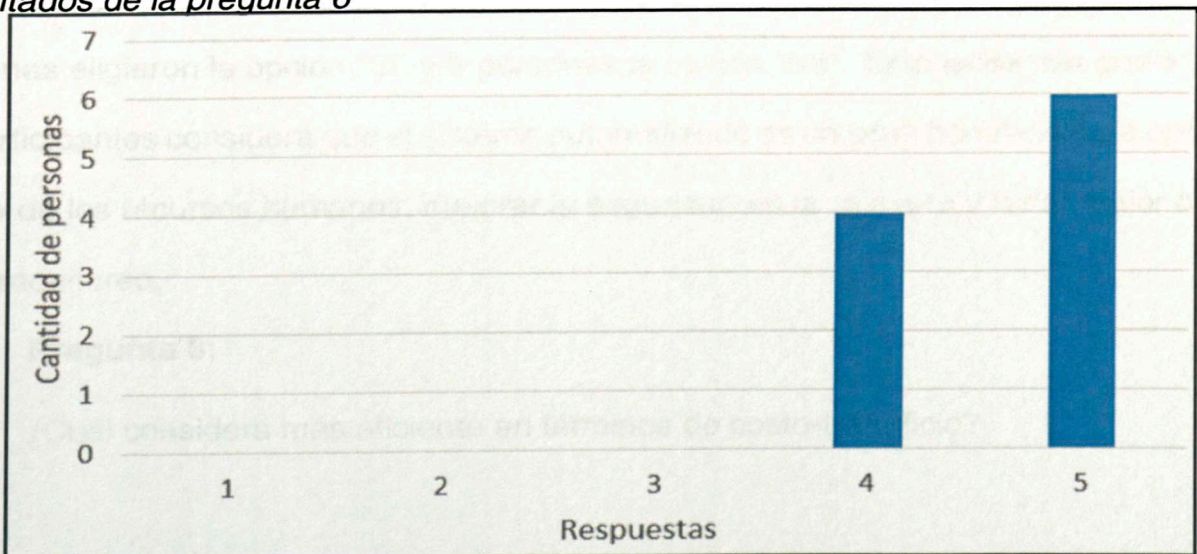
La figura 41 muestra que los resultados de la pregunta 5, en el cual el 100% de los encuestados respondió “sí” y 0 personas respondió “no”. Este resultado evidencia que el total de trabajadores cree que el sistema automatizado mejora la confiabilidad de la data obtenida a comparación del método tradicional.

Pregunta 6:

En la escala del 1 al 5, ¿Qué tan útil considera el monitoreo en tiempo real?

Figura 42

Resultados de la pregunta 6



Fuente: Elaboración propia

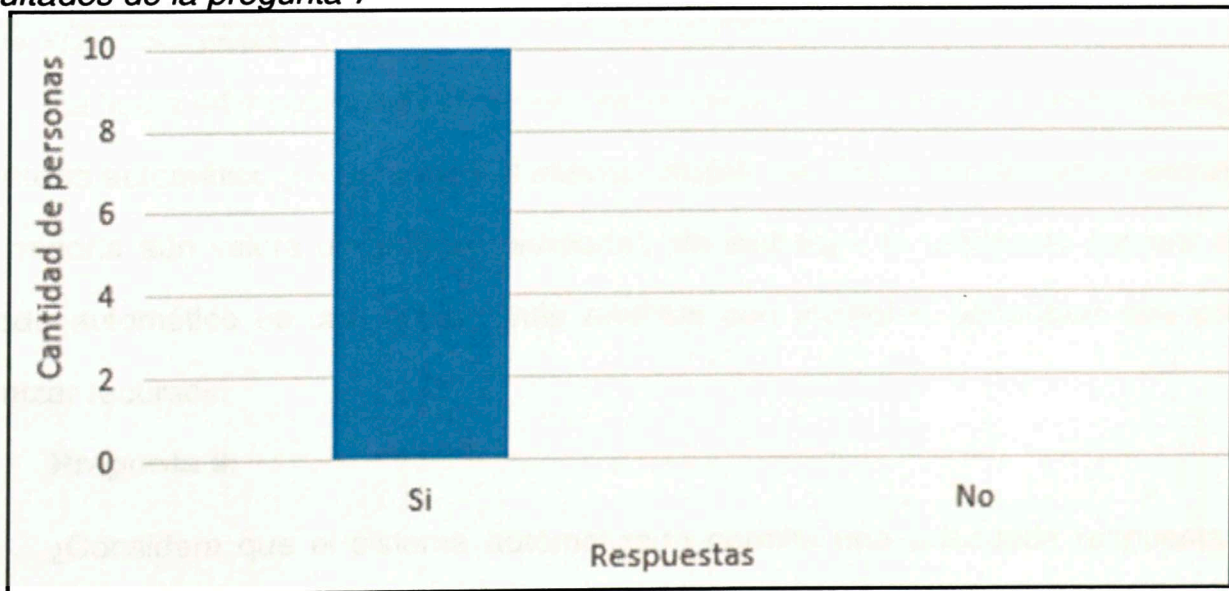
La figura 42 muestra las respuestas de la pregunta 6, donde 1 representa el menor nivel y 5 el mayor. Los resultados mostraron que 6 personas eligieron “5”, 4 personas eligieron “4” y 0 personas eligieron “1,2, y 3”. Esto evidencia que el 100% de las personas considera el monitoreo en tiempo real como una acción de gran importancia.

Pregunta 7:

¿Cree que el sistema automatizado puede reducir la necesidad de personal en campo sin comprometer la seguridad ni la calidad del monitoreo?

Figura 43

Resultados de la pregunta 7



Fuente: Elaboración propia

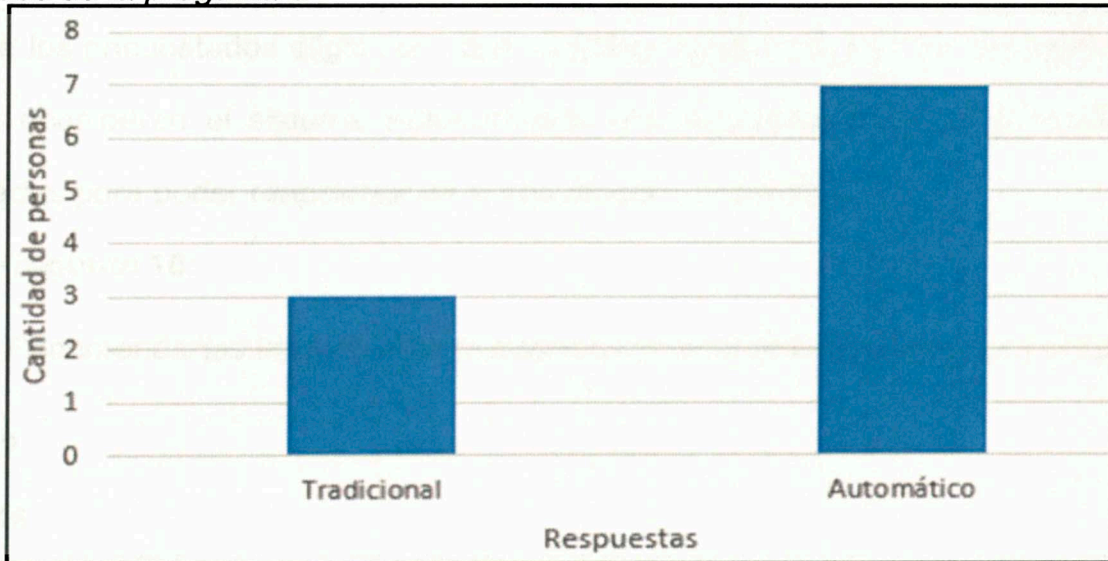
La figura 43 muestra las respuestas de la pregunta 7 del cuestionario, en el cual 10 personas eligieron la opción “Si” y 0 personas la opción “No”. Esto evidencia que el 100% de participantes considera que el sistema automatizado es un gran beneficio para optimizar el uso de los recursos humanos, mejorar la seguridad en la relavera y tener mejor calidad en el monitoreo.

Pregunta 8:

¿Cuál considera más eficiente en términos de costo-beneficio?

Figura 44

Resultados de la pregunta 8



Fuente: Elaboración propia.

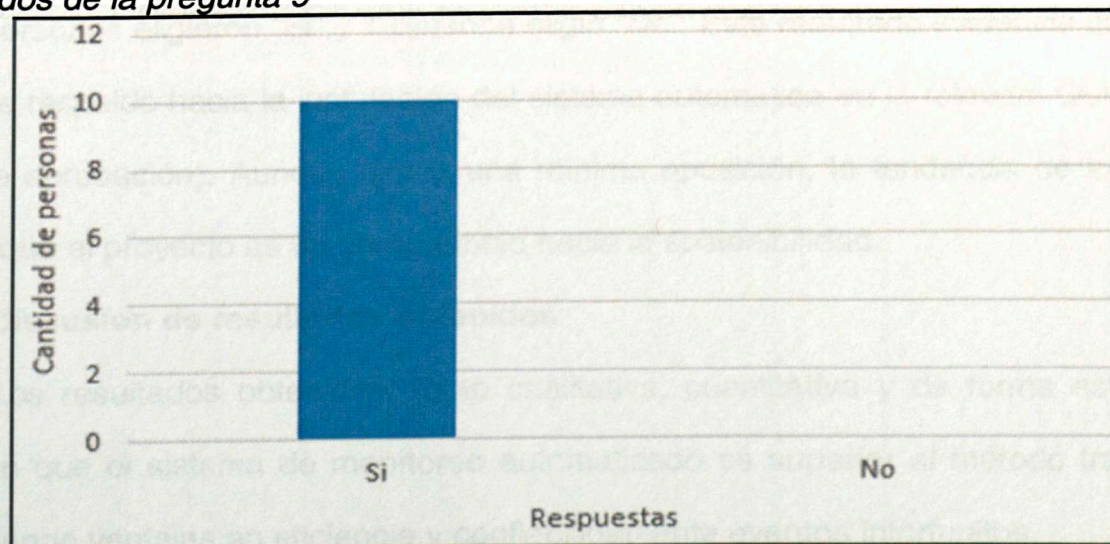
La figura 44 muestra las respuestas de la pregunta 7, en el cual 7 personas eligieron el método automático y 3 personas el método tradicional. Estos resultados muestran que una minoría aún valora el método tradicional, sin embargo, la tendencia sugiere que el método automático es una opción más rentable con múltiples beneficios que permita optimizar recursos.

Pregunta 9:

¿Considera que el sistema automatizado permite una adecuada respuesta ante eventos imprevistos?

Figura 45

Resultados de la pregunta 9



Fuente: Elaboración propia

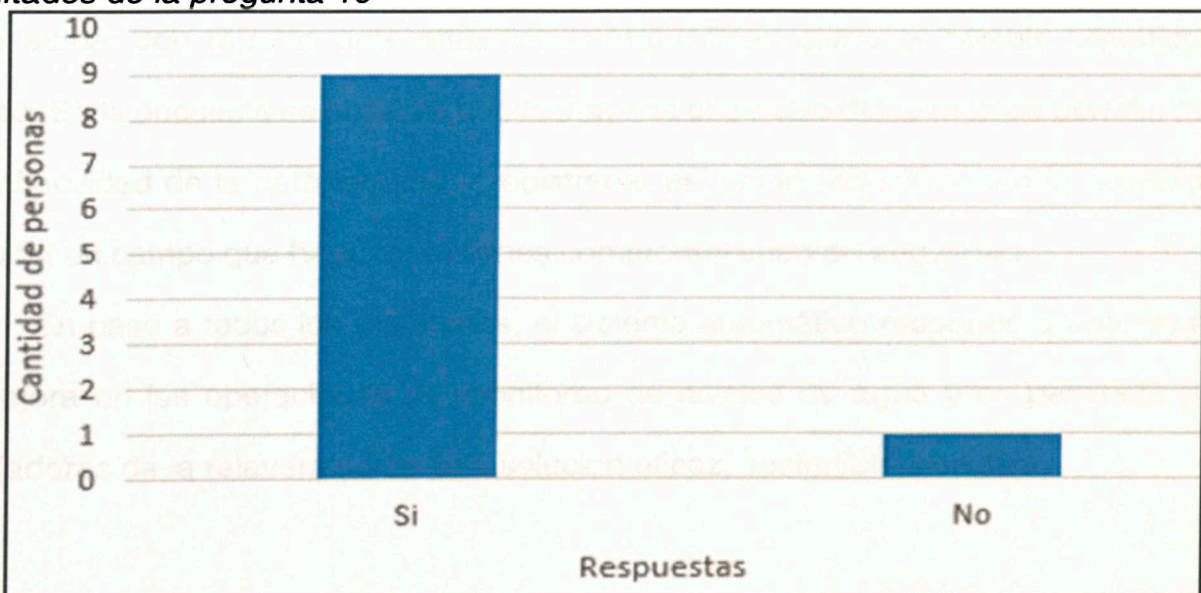
La figura 45 muestra las respuestas de la pregunta 9 del cuestionario, en el cual el 100% de los encuestados eligió "si". Este resultado evidencia que los trabajadores de la relavera consideran el sistema automatizado una herramienta eficaz ante situaciones inesperadas para poder reaccionar de forma rápida y confiable.

Pregunta 10:

¿Recomendarías implementar el sistema automatizado de forma permanente en la relavera?

Figura 46

Resultados de la pregunta 10



Fuente: Elaboración propia

La figura 46 muestra la respuesta obtenida de la pregunta 10 de la encuesta, en el cual 9 personas eligieron "Si" y 1 persona eligió "No". Este resultado evidencia que refleja un fuerte respaldo hacia la instalación del sistema automático en la relavera Quiulacochoa (90% de aprobación). Aunque exista una mínima oposición, la tendencia de los demás sugiere que el proyecto es un gran cambio hacia la sostenibilidad.

4.5 Discusión de resultados obtenidos

Los resultados obtenidos, tanto cualitativa, cuantitativa y de forma estadística, muestran que el sistema de monitoreo automatizado es superior al método tradicional, evidenciando ventajas en eficiencia y confiabilidad ante eventos infortunitos.

Desde el punto de vista de la data registrada, se realizó comparativas entre los dos métodos, siendo superior el monitoreo automático.

Desde el punto de vista estadístico, la prueba de Wilcoxon al 95% de confianza evidenció que el sistema automático posee un tiempo de respuesta mucho menor que el sistema tradicional. El estadístico $W=0$ demuestra que, en todos los casos analizados, el sistema automático es superior al sistema tradicional. Con esto se demuestra que se debe aceptar la hipótesis alterna, la cual dice que el diseño de un sistema automatizado permite un monitoreo continuo y eficiente.

Desde el punto de vista de la encuesta realizada a los 10 únicos trabajadores de la relavera, se observó que la gran mayoría respalda al sistema automático por sus ventajas como actuar con rapidez ante situaciones imprevistas como el cambio climático o de acceso. En la encuesta se observa que la mayoría eligió que dicho método permite mejorar la confiabilidad de la data tomada y registrada, así como reducir a cero la necesidad de personal en campo que haga mediciones comprometiendo su seguridad.

En base a todos los resultados, el sistema automático responde a una necesidad de mejora en las operaciones de monitoreo de niveles de agua y es percibida por los trabajadores de la relavera como una solución eficaz, sostenible y segura.

Conclusiones

De acuerdo al estudio realizado en este trabajo de investigación, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Se determinó el diseño de un sistema automatizado que mejora las mediciones de los niveles de agua de los piezómetros instalados en la relavera Quiulacocha. La implementación del sistema automatizado permite obtener, procesar y transmitir los datos tomados en tiempo real, permitiendo la toma de decisiones que favorezcan la seguridad de la relavera.

Se seleccionaron equipos de monitoreo de acorde a las condiciones geográficas en zonas estratégicas de la relavera, priorizando los sensores de alta precisión, dispositivos de comunicación inalámbrica (Ackcio) y un sistema fotovoltaico de alimentación autónoma para garantizar el funcionamiento aun en situaciones de corte de energía. Estas características permiten garantizar un monitoreo sostenible que está preparado para cualquier zona geográfica que tenga difícil acceso.

Se estableció una red de transmisión inalámbrica que permite realizar la medición automática, la transmisión de los datos y su manejo en plataformas informáticas de monitoreo ambiental. Esto ha permitido que se pueda alcanzar un nivel de confiabilidad y disponibilidad de información elevado, reduciendo la dependencia de mediciones manuales que afecten directamente a las estructuras de la relavera.

La comparación con los métodos tradicionales evidenció que, aunque la inversión inicial es considerablemente mayor, el sistema automatizado resulta más eficiente y muestra mayor viabilidad a un largo plazo. Entre sus principales ventajas, permite reducir los costos de operación, los tiempos de respuesta ante fallas y aumenta la seguridad de las operaciones en la relavera. Asimismo, este sistema reduce los riesgos de fallas geotécnicas, protegiendo la integridad de la relavera y asegurando la seguridad de las comunidades aledañas a ella. En este contexto, la prevención de accidentes mediante la aplicación de tecnologías de vanguardia debe considerarse prioritaria, pues el costo de no

aplicarlas puede ser mucho mayor en términos económicos y de prevención de accidentes fatales a las personas, al medio ambiente.

Recomendaciones

De acuerdo al estudio realizado en este trabajo de investigación, se obtuvieron las siguientes recomendaciones:

Hacer un análisis de riesgo basado en factores de seguridad o probabilidad de falla que permita establecer unos umbrales de riesgo y el correspondiente plan de contingencia.

Es necesario ampliar la red de piezómetros automáticos en la relavera Quiulacocha, especialmente en zonas críticas, con el fin de cubrir mayor zona y tener mediciones más sólidas de los niveles de agua de la relavera en mención.

Integrar alertas tempranas en la plataforma usada de manera que permita detectar variaciones anómalas del nivel de agua y activar los protocolos de respuesta inmediata además de un plan de contingencia.

Realizar capacitaciones constantes al personal técnico que realiza la operación, mantenimiento y manejo de los datos de los sistemas automatizados, con el fin de mejorar su funcionalidad.

Realizar un plan de mantenimiento preventivo de los sensores y del sistema de comunicación para asegurar la continuidad de la toma de datos.

Integrar otros instrumentos de monitoreo que midan otros parámetros significativos para el control de la estabilidad de la relavera.

Fomentar la utilización de procesos de monitoreos automatizados en otras relaveras a nivel nacional, tomando como referencia la experiencia positiva que se obtuvo en el presente estudio, de manera que permita mejorar la gestión de riesgos en la minería junto a la sostenibilidad.

Referencias bibliográficas

- Álvarez, R. M., Ordoñez Ante, C. A., & Parra Toro, J. C. (2023). *Estado de arte de la instrumentación geotécnica en presas*. 139-162. UNIMAR. doi:<https://doi.org/10.31948/editorialunimar.208.c357>
- Cabrera Boñón, R. I. (2018). *Análisis del sistema de monitoreo para el control de estabilidad de la presa de relaves, U.M. Yauricocha. Cajamarca, Perú*: Repositorio Universidad Nacional de Cajamarca.
- Carvajal Arroyo, M. I. (2018). *Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves. Santiago de Chile, Chile*: Repositorio institucional Universidad de Chile.
- Catripán Quijada, C. I. (2024). *Estrategia para establecer instrumentación mínima para el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves. Santiago de Chile, Chile*: Repositorio Universidad de Chile.
- Cerda Salazar, V. (2022). *Propuesta de monitoreo geotécnico avanzado para depósitos de relaves. Santiago de Chile, Chile*: Repositorio Universidad de Chile.
- Clarkson, L. (2021). *Comprehensive Monitoring Strategy for Tailings Dams. Brisbane, Australia*: Repositorio University of Queensland.
- Concepción, A. (2020). *Mecánica de flujos de relaves mineros en canales abiertos. Lima, Perú*: Repositorio Universidad Nacional de Ingeniería.
- Niño Vega, P. M. (2023). *Evaluación de deformaciones en depósitos de relaves inactivos y abandonados en base a interferometría satelital. Santiago de Chile, Chile*: Repositorio Universidad de Chile.
- Olguín, S., Araya, V., Suazo, G., & Villavicencio, G. (2022). *Aplicación de herramientas de monitoreo DinSAR de deformaciones para el estudio de fallas en depósitos de relaves*. 31, 85-94. Obras y Proyectos.

- Rodríguez Candia, N. R. (2023). *Remediación del medio ambiente producido por el desmoronamiento del relave en la CIA Minera Shuntur S.A.C. Ayacucho, Perú*: Repositorio Institucional Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga.
- Salinas, C. (2020). *Evaluación del factor de seguridad de una presa de almacenamiento de relaves utilizando un sistema de filtro extendido. Lima, Perú*: Repositorio Universidad Nacional de Ingeniería.
- Trevisan, D. (2022). *Definición de un índice de estabilidad física para depósitos de relaves en Brasil. Santiago de Chile, Chile*: Repositorio institucional Universidad de Chile.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Matriz de consistencia	1
Anexo 2: EPPs del personal involucrado para ejecutar el proyecto.....	2
Anexo 3: Especificaciones técnicas del piezómetro	3
Anexo 4: Especificaciones técnicas del barómetro	4
Anexo 5: Especificaciones técnicas del dispositivo registrador de datos inalámbricos	5
Anexo 6: Especificaciones técnicas del pararrayos.....	6
Anexo 7: Encuesta realizada a los operarios de la relavera Quiulacocha	7

Anexo 1: Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	ÍNDICADOR	METODOLOGÍA
<p>Problema General</p> <p>¿En qué medida la aplicación del sistema tradicional de monitoreo afecta la confiabilidad y eficiencia de los datos piezométricos en una relavera?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Diseñar un sistema automatizado que permita el monitoreo continuo y eficiente de los niveles de agua en los piezómetros de las relaveras.</p>	<p>Hipótesis General</p> <p>El diseño de un sistema automatizado permitirá el monitoreo continuo y eficiente de los niveles de agua en los piezómetros de las relaveras.</p>	<p>Variable Independiente</p> <p>Sistema de automatización</p>	<p>1. Tecnología de sensores</p> <p>2. Algoritmos de control automático</p>	<p>Error promedio de las lecturas</p> <p>Tiempo de respuesta del sistema en segundos.</p>	<p>MÉTODO</p> <p>Cuantitativo- cualitativo</p> <p>DISEÑO</p> <p>Descriptivo- correlacional</p>
<p>Problemas específicos</p> <p>¿En qué medida la deficiente selección de los equipos de automatización afecta la confiabilidad en las mediciones de los piezómetros ubicados en zonas geográficas diversas de las relaveras?</p> <p>¿En qué medida las limitaciones del sistema de transmisión de datos y las condiciones ambientales del entorno afectan negativamente la confiabilidad y disponibilidad de la data tomada en tiempo real por los piezómetros?</p> <p>¿En qué medida el uso del monitoreo manual en los piezómetros de relavera impacta negativamente en los costos operativos y eficiencia del control de niveles de agua, en comparación de usar sistemas automatizados?</p>	<p>Objetivos específicos</p> <p>Determinar las especificaciones técnicas de los equipos de automatización que permita una medición continua de los niveles de agua y se adapte a las características geográficas diversas de las relaveras.</p> <p>Implementar una metodología que permita recopilar los datos de los piezómetros garantizando su confiabilidad y disponibilidad en tiempo real.</p> <p>Comparar los costos y beneficios de los sistemas automatizados frente a los métodos manuales tradicionales en el contexto de control y monitoreo de niveles de agua.</p>	<p>Hipótesis específicas</p> <p>La determinación de las especificaciones técnicas de los equipos de automatización permitirá garantizar una medición continua de los niveles de agua asegurando su adaptabilidad a las características geográficas de las relaveras</p> <p>La implementación de una metodología para la recopilación de la data de los piezómetros permitirá mejorar su confiabilidad y disponibilidad de información en tiempo real.</p> <p>Los sistemas automatizados en el monitoreo y control de niveles de agua serán más rentables que los métodos manuales tradicionales, al minimizar errores y optimizar tiempos de respuesta.</p>	<p>Variable Dependiente</p> <p>Precisión del monitoreo de niveles de agua</p>	<p>3. Sistema de comunicación de datos</p> <p>1. Eficiencia del control</p> <p>2. Fiabilidad de los datos del monitoreo</p> <p>3. Rapidez en la detección y corrección</p>	<p>Porcentaje de disponibilidad del sistema automatizado.</p> <p>Porcentaje de data válida transmitida.</p> <p>Porcentaje de tiempo en rango ideal.</p> <p>Tiempo promedio entre la detección y la acción correctiva en segundos.</p>	<p>NIVEL</p> <p>Descriptivo- Explicativo</p> <p>TIPO</p> <p>Aplicada</p> <p>POBLACIÓN</p> <p>Los piezómetros de la relavera Quiulocochoa</p> <p>MUESTRA</p> <p>Los piezómetros en las áreas representativas de la relavera Quiulocochoa</p>

Anexo 2: EPPs del personal involucrado para ejecutar el proyecto



228

INFORME

AUTOMATIZACIÓN DE LOS REGISTROS DE NIVELES DE AGUA EN LOS PIEZÓMETROS DE LA RELAVERA QUIULACOCCHA, PASCO

Versión : A
Página : 11 de 111

2.2. EPPs DEL PERSONAL INVOLUCRADO

N°	DESCRIPCIÓN	MEDIDA	CANTIDAD
1	Casco	Und.	4
2	Barbiquejo	Und.	4
3	Lentes de seguridad	Und.	4
4	Tapón auditivo	Und.	4
5	Mascarilla	Und.	4
6	Camisa drill con cinta reflectiva	Und.	4
7	Chaleco de seguridad	Und.	4
8	Pantalón drill con cinta reflectiva	Und.	4
9	Zapatos de seguridad	Par	3
10	Zapatos de seguridad dielectricos	Par	1
11	Guantes de vadana	Par	4



EPPs del personal involucrado

ARSOVA S.A.C.

Ines N. Nieves Vilchez
Ingeniero Supervisor
CIP. 234129

ARSOVA
RUC: 20004371916

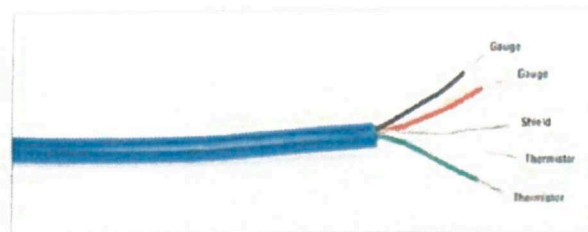
Jherstin N. SOTO ROSALES
GERENTE GENERAL
DNI: 71898037

	
INFORME	
AUTOMATIZACIÓN DE LOS REGISTROS DE NIVELES DE AGUA EN LOS PIEZÓMETROS DE LA RELAVERA QUIULACOCCHA, PASCO	Versión : A Página : 14 de 111

b) Especificaciones Técnicas

Especificaciones Técnicas	
Aplicación	Monitoreo de nivel freático, niveles de agua en piezómetros casagrande, tuberías, barrenos, diques, oleoductos y tanques de presión.
Tecnología	Transductor de presión piezo-resistivo de cuerda vibrante.
Marca	GEOKON
Modelo	4500S
Rango	De 350 kPa hasta 700 KPa
Sobrepresión	1.5 por encima del rango
Sensibilidad	0.025 % ec (escala completa)
Linealidad	<0.5% ec (+/-0.1% ec. Opcional)
Precisión total	+/- 0.1% ec
Señal de salida	4 – 20 mA
Fuente de alimentación	12 – 24 v
Cambio térmico cero	< 0.05% ec/°C
Aislamiento eléctrico	6 Kv
Rango de temperatura de trabajo	-20°C hasta +80°C
Diámetro externo	22.1 mm.
Longitud total	133 mm.
Capacidad de memoria	Este instrumento no cuenta con memoria, su función solo es emitir señales sinusoidales de frecuencia de vibración del componente de cuerda vibrante; el cual será transmitido por el cable de señal. El data loggers o nodos (Ackcio) tienen memoria de almacenamiento.
Vida útil de batería	Este instrumento no cuenta con batería. El data loggers o nodos (Ackcio) y Gateway llevan batería.
Material	Acero inoxidable, resistente a la corrosión
Tamaño de poro	40 µm
Peso	0.12 Kg.
Desplazamiento del diafragma	<0.001 cm ³ a ec

Este instrumento lleva un cable de señal color azul, que viene soldado desde la fábrica y sus especificaciones técnicas son la siguiente:



Marca	GEOKON
Modelo	02-250V6
Conductores	4-conductor, 2 pares trenzados, 22 AWG 7/30
Aislamiento de conductores	Polipropileno de alta densidad, 10 mil HDPP

ARSOVA S.A.C.

Mes
 Meses Vilchez
 Supervisor
 C.I. 234128

ARSOVA
 RUC: 2006478916

Jhermin N. SOTO ROSALES
 GERENTE GENERAL
 DNI: 73698037



INFORME

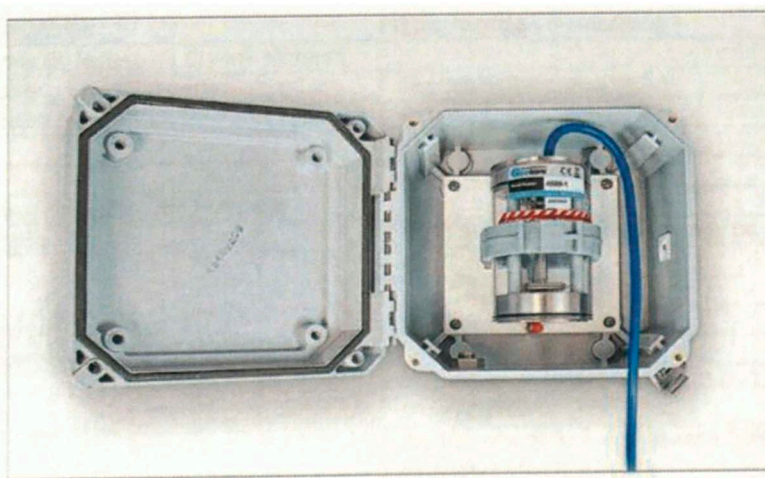
AUTOMATIZACIÓN DE LOS REGISTROS DE NIVELES DE AGUA EN LOS PIEZÓMETROS DE LA RELAVERA QUIULACOCHA, PASCO

Versión : A

cercanos, que responden no solo a los cambios de presión de agua sino también a los cambios en la presión atmosférica.

Los barómetros de alambre vibratorio están calibrados en GEOKON y referenciados a una lectura barométrica absoluta en milibares. La instalación se lleva a cabo típicamente en un recinto ventilado con el sensor en posición vertical.

Se suministraron dos (02) barómetros de cuerda vibrante modelo 4580-1 de Geokon, de rango de medida de 200 mbar, calibrados para tener en cuenta la cota de altitud de 4280 m.s.n.m. de la Relavera Quiulacocha.



INES A. NIEVES VILCHEZ
INGENIERO SUPERVISOR
ARSOVA SAC

Barómetro de cuerda vibrante Modelo 4580-1

b) Especificaciones Técnicas

Marca	GEOKON
Modelo	4580-1
Rangos Estándar	200 mbar
Fuera de Rango	1,5 x presión nominal
Resolución	0,025 % escala completa
Exactitud	±0,1 % escala completa
Linealidad	<0,5% FS (±0,1% FS opcional)
Rango de Temperatura	20°C a +80°C
Longitud x Diámetro	110 x 63,5 milímetros
Capacidad de memoria	Este instrumento no cuenta con memoria, su función solo es emitir señales sinusoidales de frecuencia de vibración del componente de cuerda vibrante; el cual será transmitido por el cable de señal. El data loggers o nodos (Ackcio) tienen memoria de almacenamiento.
Vida útil de batería	Este instrumento no cuenta con batería. El data loggers o nodos (Ackcio) y Gateway llevan batería.
Material	Acero inoxidable, resistente a la corrosión



220

INFORME

AUTOMATIZACIÓN DE LOS REGISTROS DE NIVELES DE AGUA EN LOS PIEZÓMETROS DE LA RELAVERA QUIULACOCCHA, PASCO

Versión : A
Página : 18 de 111

Dimensiones	100 mm x 100 mm x 80 mm
Peso	0.7 Kg
Material	Aluminio fundido a presión
Capacidad de almacenamiento	Desde 65 000 a 180 000 lecturas
Mediciones de Cuerda Vibrante	
Módulo de cuerda vibrante	Convertidor analógico a digital diferencial de 12 bits
Tasa de medición	Adquisición de datos de 5 muestras por segundo con filtro de promedio móvil de tamaño variable después del bloqueo de frecuencia resonante
Duración de la medición	5 seg. por ciclo de medición
Especificaciones de lectura de Cuerda vibrante	
Onda de excitación	Barrido de pico a pico de 8 V
Rango de medición	450 - 6000 Hz
Resolución	0.01 Hz
Exactitud	± 0.04% ec (escala completa)
Especificaciones de lectura del Termistor	
Rango de medición	-20°C hasta +80°C para termistor 3K
Resolución	0.1° C
Exactitud	± 0.2°C
Entrada sostenida de voltaje sin daños	3.6 V DC máx.
Resistencia del sensor	50 Ohms
Soporte	Abrazadera de jaula a presión (0,2 - 1,5 mm ² / 24 - 16 AWG)
Antena	Antena corta de ¼ λ con conector SMA integrada para 4G y Lo Ra.
Puerto de dispositivo usb	USB 2.0 de velocidad completa (conector Micro B) 5 V, máx. 500 mA para OTG móvil
Banda de radio	Banda ISM 863 - 870MHz, 902 - 928MHz
Velocidad de datos de enlace	Tasa de bits de 50 kbps
Seguridad de datos	Datos cifrados AES128 de extremo a extremo
Tensión de alimentación	2.7V a 4V
Batería interno no recargable (pila)	1 unid. tipo D-Cell LI-SOCI2 3.6V voltaje nominal. Capacidad recomendada 19Ah
Temperatura de funcionamiento	-40°C hasta +80°C
Protección del circuito	Protección contra sobretensiones. Voltaje de ruptura de CC 60 V (± 20 % a 100 V/μs). Voltaje de ruptura de impulso 500V (@5kV/μs) típico. Protección contra cortocircuito en salidas de potencia. Protección de suministro inverso.
Rango de transmisión de datos	Línea de visión: De 5 km a 10 km Urbano: Hasta 1 km Bajo tierra: Hasta 500 m
Sistema operativo móvil	Android





ARSOVA S.A.C.

Mrs. A. Nieves Vilchez
Ingeniero Supervisor
CIP. 234129



Therán N. SOTO ROSALES
GERENTE GENERAL
UNI: 1898037

Anexo 6: Especificaciones técnicas del pararrayos

	
INFORME	
AUTOMATIZACIÓN DE LOS REGISTROS DE NIVELES DE AGUA EN LOS PIEZÓMETROS DE LA RELAVERA QUIULACOCHA, PASCO	Versión : A


2.4.6. EQUIPOS PARA PARARRAYO

El propósito del suministro del pararrayos es proteger el sistema contra los rayos directos y reducir el riesgo de accidentes y daños ocasionados por rayos.

- ✓ Estará ubicado en las coordenadas detalladas en el siguiente cuadro.
- ✓ Pararrayo ionizante con un radio de protección de 80 m
- ✓ Base de poste de 12m con concreto 175kg/cm² de 0.50m x 0.50m x 0.70m
- ✓ Base bisagra
- ✓ Cable Cu desnudo blando 70 mm²
- ✓ Caja de registro de polipropileno con tapa amarilla
- ✓ Cemento Conductivo
- ✓ Estructura: tubo galvanizado 4" x 2mm de 12 m divididos en 2 cuerpos de 6m cada uno (1er cuerpo de Ø 4", 2do cuerpo de Ø 3")
- ✓ El máximo valor de la puesta a tierra será de 10 ohmios.

UBICACIÓN DE LOS PARARRAYOS

ITEM	IDENTIFICACION	COORDENADAS UTM (WGS 84) – Zona 18 L		ALTURA m.s.n.m
		NORTE	ESTE	4280
01	PARARRAYO 01	8 816 494	359 970	
02	PARARRAYO 02	8 817 209	359 937	


INES A. NIEVES VILCHEZ
INGENIERO SUPERVISOR
ARSOVA SAC

La ubicación del pararrayos responde a la necesidad de proteger al Gateway por ser el equipo principal de recopilación de datos (PARARRAYO 01).

Por otra parte, también se decidió proteger a los Piezómetros GW-11A y HG-02 los cuales se encuentran en el radio de protección del pararrayo a instalar que es de 12m de altura. (PARARRAYO 02).

Anexo 7: Encuesta realizada a los operarios de la relavera Quiulacochoa

ENCUESTA

EVALUACIÓN DEL MONITOREO DE NIVELES DE AGUA EN PIEZÓMETROS DE LA RELAVERA QUIULACOCHA

La siguiente encuesta está dirigida al personal técnico y operativo encargado del monitoreo de niveles de agua en piezómetros de una relavera. El objetivo es conocer la percepción sobre el desempeño del método tradicional y el sistema automatizado de monitoreo. La información será utilizada con fines académicos en el desarrollo de una tesis.

Datos generales:

- Cargo del encuestado: _____
- Tiempo de experiencia en monitoreo de piezómetros: _____ años
- Nivel educativo alcanzado: _____

1. ¿Considera que el sistema tradicional permite tomar decisiones rápidas en emergencias?

() Sí () No

2. ¿Ha experimentado retrasos en la recolección de datos por factores climáticos o de acceso?

() Sí () No

3. ¿Con qué frecuencia los factores climáticos afectan el monitoreo?

() Siempre () A menudo () Rara vez () Nunca

4. En una escala del 1 al 5, ¿cuán confiable considera al método tradicional?

() 1 () 2 () 3 () 4 () 5

5. ¿Cree que el monitoreo automatizado mejora la confiabilidad del dato?

() Sí () No

6. En una escala del 1 al 5, ¿qué tan útil considera el monitoreo en tiempo real?

() 1 () 2 () 3 () 4 () 5

7. ¿Cree que el sistema automatizado puede reducir la necesidad de personal en campo sin comprometer la seguridad ni la calidad del monitoreo?

() Sí () No

8. ¿Cuál considera más eficiente en términos de costo-beneficio?

() Tradicional () Automatizado

9. ¿Considera que el sistema automatizado permite una adecuada respuesta ante eventos imprevistos?

() Sí () No

10. ¿Recomendaría implementar el sistema automatizado de forma permanente en la relavera?

() Sí () No