



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**Automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica
en la gestión de la seguridad minera**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Industrial**

AUTORES:

Begazo Caceda, Renzo Javier (orcid.org/0000-0002-6315-0036)

Lujan Carranza, Aldo Wilson (orcid.org/0000-0001-9654-3787)

ASESOR:

Mg. Malca Hernandez, Alexander David (orcid.org/0000-0001-9843-7582)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Sistemas de Gestión de la Seguridad y Calidad

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo económico, empleo y emprendimiento

TRUJILLO — PERÚ

2023

DEDICATORIA

A nuestros queridos padres, por su amor y apoyo incondicional; han sabido llevarnos por el buen camino del éxito, donde cada esfuerzo y dedicación trajo consigo el logro actual de nuestras metas; hoy en día definen el destino de nuestra vida personal y profesional. A nuestras familias, por su cariño y apoyo moral en esta ardua carrera que hoy inicia.

¡Son los mejores!

AGRADECIMIENTO

A Dios porque gracias a Él estamos aquí, permitiéndonos llegar hasta este momento.

A los docentes de la escuela profesional de Ingeniería industrial de nuestra alma mater, la Universidad César Vallejo, por acogernos en sus aulas, brindándonos las mejores enseñanzas, los consejos más certeros y las herramientas ineludibles para desenvolvernos profesionalmente.

Así mismo un reconocimiento especial al Mg. Alexander Malca Hernández por sus acertadas sugerencias, hicieron posible la culminación de la presente tesis.



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, MALCA HERNANDEZ ALEXANDER DAVID, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA INDUSTRIAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Tesis titulada: "Automatización del Proceso de Monitoreo de la Actividad Sísmica en la Gestión de la Seguridad Minera", cuyos autores son LUJAN CARRANZA ALDO WILSON, BEGAZO CACEDA RENZO JAVIER, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 14.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TRUJILLO, 28 de Diciembre del 2023

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
MALCA HERNANDEZ ALEXANDER DAVID DNI: 09678936 ORCID: 0000-0001-9843-7582	Firmado electrónicamente por: AMALCAH el 11-01- 2024 09:28:58

Código documento Trilce: TRI - 0711886





UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, BEGAZO CACEDA RENZO JAVIER, LUJAN CARRANZA ALDO WILSON estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA INDUSTRIAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Automatización del Proceso de Monitoreo de la Actividad Sísmica en la Gestión de la Seguridad Minera", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
LUJAN CARRANZA ALDO WILSON DNI: 18206149 ORCID: 0000-0001-9654-3787	Firmado electrónicamente por: AWLUJANC el 30-12-2023 12:08:45
BEGAZO CACEDA RENZO JAVIER DNI: 30962765 ORCID: 0000-0002-6315-0036	Firmado electrónicamente por: RBEGAZOC el 30-12-2023 11:26:16

Código documento Trilce: INV - 1435771



ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD DEL ASESOR	iv
DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD DE LOS AUTORES.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	5
III. METODOLOGÍA	20
3.1. Tipo y diseño de investigación	20
3.2. Variables y Operacionalización	20
3.3. Población, muestra y muestreo	23
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	23
3.5. Procedimiento	25
3.6. Método de análisis de datos.....	26
3.7. Aspectos éticos	26
IV. RESULTADOS	27
V. DISCUSIÓN	58
VI. CONCLUSIONES	62
VII. RECOMENDACIONES	63
REFERENCIAS	64
ANEXOS	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Grado de correlación	19
Tabla 2: Resultados Dimensión 1: Efectividad del sistema de alerta temprano	27
Tabla 3: Análisis estadístico descriptivo Dimensión 1: EAT	29
Tabla 4: Ocurrencia de eventos sísmicos (01 al 07 de agosto – 2023).....	31
Tabla 5: Efectividad de alarma semanal (01 al 07 de agosto – 2023).....	36
Tabla 6: Detalle de la Efectividad del sistema de alarma (marzo a noviembre – 2023)	38
Tabla 7: Resultados Dimensión 2: Eficiencia de monitoreo de eventos sísmicos por mes	39
Tabla 8: Análisis estadístico descriptivo Dimensión 2: EMS	41
Tabla 9: Resultados Dimensión 1: Índice de accidentabilidad	42
Tabla 10: Análisis estadístico descriptivo Dimensión 1: Índice de accidentabilidad	44
Tabla 11: Resultados Dimensión 2: Índice de incidentes con primeros auxilios....	45
Tabla 12: Análisis estadístico descriptivo Dimensión 2: Índice de incidentes con primeros auxilios	46
Tabla 13: Prueba de Normalidad de la hipótesis general.....	48
Tabla 14: Estadístico de muestras relacionadas de la hipótesis general	49
Tabla 15: Pruebas de muestras relacionadas de la hipótesis general)	50
Tabla 16: Prueba de Normalidad de la hipótesis específica 1.....	51
Tabla 17: Estadístico de muestras relacionadas de la hipótesis específica 1	51
Tabla 18: Pruebas de muestras relacionadas de la hipótesis específica 1	52
Tabla 19: Prueba de Normalidad de la hipótesis específica 2	53
Tabla 20: Estadístico de muestras relacionadas de la hipótesis específica 2	54
Tabla 21: Pruebas de muestras relacionadas de la hipótesis específica 2	55

Tabla 22: Monitoreo de los índices de seguridad (marzo a noviembre – 2023)	55
Tabla 23: Detalle del índice de incidentes con primeros auxilios (marzo a noviembre – 2023)	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Accidente incapacitante por relajamiento de roca en mina de la localidad de Pataz	2
Figura 2: Sismógrafo con monitoreo micromate Instantel	3
Figura 3: Tipos de ondas sísmicas	10
Figura 4: Escala de intensidad (gravedad) de un sismo	11
Figura 5: Geófono triaxial	12
Figura 6: Geófono uniaxial	12
Figura 7: Cableado del sistema de monitoreo	13
Figura 8: Equipo de adquisición	13
Figura 9: Criterios para activación de sistema de alerta de un sismo	17
Figura 10: Tiempo de respuesta en modelo de sistema de alerta temprano	17
Figura 11: Ubicación de estaciones sísmicas	24
Figura 12: Modelo de Velocidad final de onda	25
Figura 13: Evolución de la efectividad del sistema de alerta temprano (marzo – noviembre 2023)	28
Figura 14: Análisis estadístico descriptivo Dimensión 1: EAT con SPPS	30
Figura 15: Niveles de alerta y sus escalas de intensidad según SCADA	30
Figura 16: Escala de niveles de velocidad VPP	32
Figura 17: Escala de niveles VPP de eventos fuertes muy fuertes.	33
Figura 18: Imagen Tomográfica de la mina Estrella	33
Figura 19: Ubicación geográfica de los eventos fuertes y muy fuertes	34
Figura 20: Elevación m.s.n.m. de eventos fuertes y muy fuertes	35
Figura 21: Evolución de EMS (marzo – noviembre 2023)	40
Figura 22: Análisis estadístico descriptivo Dimensión 2: EMS con SPPS	42

Figura 23: Evolución de Índice de accidentabilidad (marzo – noviembre 2023)....	43
Figura 24: Análisis estadístico descriptivo Variable IA según SPPS	45
Figura 25: Evolución del Índice de incidentes con primeros auxilios (marzo – noviembre 2023)	46
Figura 26: Análisis estadístico descriptivo Dimensión 2: índice de Incidentes con Primeros auxilios según SPPS	47
Figura 27: Índice de frecuencia acumulada (marzo – noviembre 2023).....	56
Figura 28: Índice de severidad acumulada (marzo – noviembre 2023).....	57

RESUMEN

La presente tesis tuvo como objetivo mejorar la gestión de seguridad minera a partir de la automatización del proceso tradicional del monitoreo de la actividad sísmica, y se desarrolló dentro y fuera de la misma mediante la aplicación de telemetría con estaciones instaladas en zonas de recurrente presencia sísmica.

La metodología empleada fue de investigación aplicada, de diseño experimental tipo pre-experimental de pre-prueba y post-prueba.

Entre los resultados, se determinó que, la automatización del proceso de monitoreo sísmico mejoró la efectividad del sistema de alerta temprano de 25.45 a 100.67%; la eficiencia del monitoreo de eventos sísmicos por mes se incrementó de 18.82 a 96.69%; por otro lado, el índice de accidentabilidad se redujo de 0.69 a 0.35; mientras que el índice de incidentes con primeros auxilios, de 0.037 a 0.023.

El sistema de alerta automatizado fue más efectivo que el manual ante la detección temprana de eventos sísmicos; mejorando el tiempo de evacuación. El monitoreo automatizado fue más eficiente que el tradicional, ya que monitoreó todos los días dentro de las 24 horas. El monitoreo automatizado mejoró la gestión de seguridad con la reducción de los índices de accidentabilidad y los incidentes con primeros auxilios.

Palabras clave: Automatización, monitoreo, gestión de seguridad.

ABSTRACT

The objective of this thesis was to improve mining safety management by automating the traditional process of monitoring seismic activity, and was developed inside and outside of it through the application of telemetry with stations installed in areas of recurring seismic presence.

The methodology used was applied research, with a pre-experimental, pre-test and post-test experimental design.

Among the results, it was determined that the automation of the seismic monitoring process improved the effectiveness of the early warning system from 25.45 to 100.67%; the efficiency of monitoring seismic events per month increased from 18.82 to 96.69%; On the other hand, the accident rate was reduced from 0.69 to 0.35; while the rate of incidents with first aid, from 0.037 to 0.023.

The automated warning system was more effective than the manual one in the early detection of seismic events; improving evacuation time. Automated monitoring was more efficient than traditional monitoring as it monitored every day within 24 hours. Automated monitoring improved safety management by reducing accident rates and first aid incidents.

Keywords: Automation, monitoring, security management.

I. INTRODUCCIÓN

Esta investigación se realizó tomando en consideración todos los parámetros técnicos y de seguridad necesarios para la consecución de los resultados esperados, donde el sistema fue capaz de recopilar todos los datos precisos para analizar en tiempo real la criticidad de los mismos, con el objetivo de reducir los accidentes por desprendimiento de rocas producidos por los diferentes movimientos sísmicos presentes en las operaciones.

Dentro de las excavaciones subterráneas de minas ubicadas en la localidad de Pataz – La Libertad; se han reportado con mucha frecuencia, eventos de relajamiento rocoso; debido a la inestabilidad circundante de estos espacios abiertos, profundidades y efectos de la voladura programada y no programada (personal ajeno).

En vista de ello, como parte del plan preventivo dentro de la gestión de seguridad en algunas minas de la localidad, se llevaron a cabo monitoreos sísmicos, con el fin de identificar zonas críticas y lograr alertar oportunamente al personal que habita en dichos sectores; evitando lesiones, accidentes y hasta el deceso. En el año 2021 en otra unidad minera de la zona (Minera Aurífera Retamas S.A.), se reportó trágicamente el deceso de 02 trabajadores y 06 heridos como resultados de los estallidos de rocas (Meregildo, 2021). En el presente año en otra unidad minera cercana, también se suscitó un accidente incapacitante por desprendimiento de rocas por efecto del estallido, lo cual muchas veces no se prevé dentro de la operación y la resultantes es de consideración ya que esta viene a ser la magnitud más alta en cuanto a eventos de relajamiento, que según Berrocal (2020) lo define como una liberación de energía súbita y violenta; cuya proyección es capaz de dañar la integridad y vida de los hombres, pudiendo causar incluso hasta la muerte y muchas veces su ocurrencia tiene como resultante la incapacidad permanente de cualquier colaborador que se encuentre expuesto a dicho estallido.



Figura 1. Accidente incapacitante por relajamiento de roca en mina de la localidad de Pataz (Alerta de seguridad, 2023)

Este evento de relajamiento se desarrolló en una cortada (CRSW 1) del NV 2670 en una mina en la localidad de Pataz; cuyo bloque de roca desprendido bordea la tonelada en peso, la que cae a 3.70m de altura.

Con respecto a la automatización, Uriarte et al. (2021) hacen mención que: “Asimismo, aquellas que, si están instrumentadas, no necesariamente cuentan con registros automatizados debido a que no están conectadas vía WAN/LAN a una central de procesamiento” (párr. 2). Este fue el mismo caso del proceso de monitoreo actual de la mina materia de estudio; debido a la infraestructura limitada de su conectividad, ya que el cableado de sus sensores no superaba el kilómetro de distancia, y considerando el avance en extensión a medida que pasan los meses, la mina deja atrás los sensores. Esta mina tiene una distancia de bocamina a las zonas monitoreadas de 0.5 a más de 2.5 km; por lo cual, la información es recopilada in situ desde puntos estratégicos por personal geofísico, convirtiéndose en una tarea convencional, constante y peligrosa, fracasando como alerta inmediata, propensa a cometer errores y generando retrasos en la detección y respuesta ante estos eventos, lo que podría aumentar el riesgo a la exposición al personal que convive diariamente en estas instalaciones.



Figura 2. Sismógrafo con monitoreo micromate Instantel

En la figura 2, se evidencia el uso del sismógrafo Instantel Micromate, con el cual se detectan y registran la velocidad VPP (velocidad pico partícula) con la cual viajan las vibraciones de diferente índole, para su posterior interpretación.

El sistema Instantel, de fácil instalación y configuración, puede trabajar con sensores con una longitud de cableado de hasta 3,250 pies (990.6 m); para casos de monitoreo fuera del túnel (Undermin, s.f.).

Con respecto a la formulación del problema general: ¿En qué medida la automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica mejoró la gestión de la seguridad minera? Este contiene los siguientes problemas específicos: ¿Cómo la automatización del proceso de la actividad sísmica mejoró la efectividad del sistema de alerta temprano?, ¿Cómo la automatización del proceso de la actividad sísmica mejoró la eficiencia de monitoreo sísmico mensual?, ¿Cómo la automatización del proceso de la actividad sísmica redujo el Índice de accidentabilidad?; y, por último ¿Cómo la automatización del proceso de la actividad sísmica minimizó los incidentes con primeros auxilios?

Esta investigación es la respuesta a la imperiosa necesidad de conocer cómo la variable **automatización del proceso de monitoreo sísmico** influyó de manera significativa en la variable **gestión de seguridad minera**; por ende,

conocer la relación que guardan entre ambas, cuyo fin fue contribuir con la mejora de la gestión de seguridad, cuidando y alertando oportunamente al personal de todo peligro sísmico en su entorno laboral.

Con respecto al objetivo general: Determinar cómo la automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica mejoró la gestión de seguridad minera. Cuyos objetivos específicos son: Determinar cómo la automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica mejoró la efectividad del sistema de alerta temprano (EAT), comprobar cómo la automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica mejoró la eficiencia de monitoreo sísmico mensual, demostrar cómo la automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica redujo el índice de accidentabilidad (IA) y determinar cómo la automatización minimizó los incidentes con primeros auxilios (IPA)

La hipótesis general es: La automatización del proceso de monitoreo mejora significativamente la gestión de seguridad minera. Las hipótesis específicas son: La automatización del proceso de monitoreo mejora la efectividad del sistema de alerta temprana, la automatización del proceso de monitoreo aumenta la eficiencia de monitoreo sísmico mensual, la automatización del proceso de monitoreo reduce significativamente el índice de accidentabilidad y finalmente, la automatización del proceso de monitoreo minimiza los incidentes con primeros auxilios.

II. MARCO TEÓRICO

A lo largo del estudio de las variables de investigación, se recopiló información de trabajos de investigación de índole nacional e internacional que fundamentaron teóricamente el desarrollo de la presente investigación.

En Chile, Romero (2012), en su análisis de sismicidad inducida en mina subterránea perteneciente a Codelco división Andina; señaló que, el monitoreo de la actividad sísmica permitió cuantificar e identificar cambios, perturbaciones y desequilibrios en el macizo rocoso sometido a diferentes tensiones, que fueron capaces de interrumpir el normal desarrollo diario de las operaciones mineras, de tal modo de salvaguardar vidas humanas, infraestructura y maquinarias. Este monitoreo dependió de una correcta ubicación e interacción de sensores, el dimensionamiento de la zona de interés en función a la ubicación espacial estratégica de estos sensores (coordenadas y elevaciones) en redes de cables que transmitieron información en diferentes frecuencias de muestreo hasta un ordenador central de procesamiento y análisis en superficie; prestando la mayor atención a las zonas consideradas como muy graves.

En Bogotá – Colombia, Bernal (2013) en su informe final “Automatización del Equipo de Simulación Sísmica Uniaxial del Laboratorio de Estructuras” hizo referencia de que es difícil predecir un sismo; pero, si es posible minimizar sus efectos nocivos en personas e infraestructuras dentro de cualquier programa de prevención, identificando con qué frecuencia (periodos) se presenta estos, cuál es su intensidad y modos de vibración.

Ahora bien, al noreste de Bogotá (Norte de Santander), Pérez y Alvear (2022); consideraron que la automatización del monitoreo continuo de gases inflamables en minas subterráneas de carbón, minimizaba la exposición del personal ante una posible explosión; con la implementación de sensores distribuidos estratégicamente, activaban alertas tempranas ante altas concentraciones de gas metano (5-15%); sin necesidad de que el personal ingrese a monitorear de manera manual con el clásico detector portátil con luces y sonido.

En Ecuador, Falla (2012) con el fin de mejorar el modelo de gestión de seguridad y salud ocupacional para empresas mineras en la provincia de Zamora Chinchipe; señaló que, en zonas donde se presentan continuamente situaciones anormales reiterativas (sub-estándares), era inminente la materialización del peligro y por ende la inmediatez del accidente; por tal, determinó que, era de suma importancia identificar, reportar, localizar y cuantificar el nivel de riesgo al que uno estaba expuesto, localizando geográficamente estos sectores y analizando su recurrencia; teniendo en cuenta estos criterios al momento de priorizar dentro de los planes preventivos y correctivos, manteniendo un sistema de monitoreo y control como medidas de solución durante la gestión.

En México, Chairez y Muñoz (2015) en su artículo de investigación: Plataforma de monitoreo de recursos basada en gestión de conocimiento dentro de la industria minera, describieron una plataforma automatizada a base de sensores, antenas, semáforos de señalización e interface de comunicación vía ZigBee (transmisión por redes inalámbricas) y/o fibra óptica; capaz de analizar en tiempo real cada escenario laboral, detectando la lista del personal presente en las zonas afectadas y brindando rutas de escape; también detectaron el paso peatonal, vehicular y de equipos pesados; cuyos monitoreos fueron almacenados en memorias no volátiles, registrando siempre la hora de grabación. Cuando el sensor detectaba alguna anomalía como por ejemplo niveles de contaminación, límites máximos permisibles; este emitía una alarma, la misma que era inmediatamente recepcionada por el supervisor, para su póstuma difusión. La creación de esta plataforma nació por la imperiosa necesidad de minimizar la exposición de riesgos presentes en las operaciones, generando un ambiente seguro para trabajar.

En el Perú, Uriarte et al. (2021) en uno de sus artículos: Automatización del sistema de monitoreo sísmico de estructuras importantes en proyectos del Perú, dieron a referir que el monitoreo sísmico previene eventos no deseados en personas, medio ambiente y propiedad; y son de vital importancia en nuestro país por su alta sismicidad (IGP, 2022); a pesar de ello, son pocas las empresas que cuentan con el monitoreo automatizado. Los acelerógrafos a gran escala registraron las aceleraciones de indicio sísmico que fueron monitoreados desde

afuera. Existen plataformas que monitorean en tiempo real, procesan registros, verifican las condiciones de los equipos, realizan tomografías sísmicas, envían resultados, brindan reportes preliminares y alertan la ocurrencia de sismos por medio de mensajes y correos electrónicos.

Asimismo, en Cerro de Pasco – Perú, Zanabria (2021), en su investigación Análisis del monitoreo microsísmico y su influencia en el comportamiento del macizo rocoso en la Unidad Minera Americana Alpayana S. A. – 2021; con respecto al análisis del monitoreo sísmico automatizado, concluyó que: “Permite implementar un sistema de alerta temprana que se acomode a las características y necesidades de la mina, para el reconocimiento de las zonas vulnerables y así poder tomar medidas preventivas correspondientes” (p.73).

Mientras que en Pataz – Perú, Porras (2010); afirma que, por medio de la automatización del proceso de trituración en Minera Aurífera Retamas; se garantiza la continuidad de la producción, gracias a las plataformas SCADA y PLC, que cuentan con consolas donde ante cualquier anomalía, detectan, informan y hasta pueden interrumpir automáticamente el proceso en tiempo real. Estas plataformas diseñan matrices de datos que contienen cada evento ocurrido en la trituración para su posterior interpretación.

Según González de Mendoza (2015), en su obra denominada Ingeniería Geológica; señala que, dentro de la gestión de riesgos para evaluar la peligrosidad de eventos frecuentes tales como sismos, es necesario recurrir a datos y series históricas, así como instrumentales que nos proporcionan pautas temporales a partir de los periodos de retorno de las ondas; en el que se tiene en cuenta dónde y cuándo ocurrieron en el pasado, la intensidad y magnitud que se experimentó, las zonas vulnerables a futuro y la misma frecuencia de ocurrencia.

En la investigación realizada por Torres (2020), “Sistema de Teledetección para Optimizar Registros de Deslizamientos en Taludes Durante Movilidad Social en Minera Gold Field, Región Cajamarca”, el estudio propuso objetivos como buscar innovación, resolver interrogantes de investigación utilizando métodos científicos para lograr resultados (p. 125). Para este estudio se planeó trabajar con el modelo

representado; Por lo tanto, fue empleado también un tipo de investigación que utilizó un proyecto no práctico. Se utilizó un método de investigación cualitativo para recopilar información; y métodos recogida de información como la observación y el estudio de documentos, para ello se empleó el programa Beometry para procesar y analizar los datos recolectados (Castellano y Maque, 2023).

Según Liu et al. (2021), afirman que una mina completamente automatizada compone 03 aprestos tecnológicos de constante interacción: Una, compuesto por equipos de extracción se utilizan componentes electrónicos, como sensores sofisticados. Las perforadoras, las palas cargadoras y los dámperes son ejemplos de estos equipos. El segundo es un sistema de comunicación, y el tercero es un sistema inteligente. Este modelo es muy utilizado en aplicaciones industriales donde es necesario controlar y monitorear constantemente variables; Los medios dirigidos (pares de hilos, cable coaxial, fibra óptica) se utilizan a menudo para establecer la comunicación, aunque en muchos casos, debido a la gran distancia y las condiciones globales, requiere de elementos para contrarrestar impases (Smith, 2023).

El significado de la vigilancia telúrica

Fernández (2014); informó que “En áreas con alta concentración de tensiones inducidas por la minería, ocurría un conjunto complejo de mecanismos, donde el almacenamiento de energía es particularmente importante, causado por las excavaciones durante la minería. Además de la presencia de fenómenos geológicos, como fallas y características de las rocas, la masa fuera está destinada a ser una fuente de energía sísmica que puede crear canteras de roca. Según el consultor de la Cámara Peruana de Minas, las peculiaridades del proceso de extracción exigen un esfuerzo del paisaje. Una de ellas, la mayor densidad de las excavaciones y sus complicadas interrelaciones geográficas. Desarrollo de la exploración sin una planificación suficiente de las estrategias y secuencias de extracción. La no consideración de procedimientos de restablecimiento del equilibrio para contribuir a la estabilidad regional. La remoción completa, en algunos casos, de los pilares de protección de galerías a nivel (puentes), sin reemplazo por

estructuras equivalentes; y finalmente, la falta de aplicación de sistemas de sostenimiento en áreas que lo requieren, sin tomar en cuenta la duración de servicios de una obra; haciendo permanentes las consideradas temporales.

Localización de eventos sísmicos

Según Arroyo y Linkimer (2021), la metodología más eficiente y empleada para localizar eventos sísmicos considerando la ubicación espacial tridimensional, brindando calidad de información y constante monitoreo de velocidades de ondas sísmicas es la Tomografía de sismos locales. Para tener una mejor comprensión del alcance de la investigación, se puntualizan estos términos:

La Tomografía sísmica permite la reconstrucción de cambios en las velocidades sísmicas relacionadas con las variaciones de las propiedades de las rocas y se logra mediante la inversión (ajuste automatizado de valores) de los tiempos de tránsito de los flameos sísmicos, parametrizando el modelo en un volumen de bloque cuadrículado. Estos pasos antes mencionados son necesarios para producir una imagen tomográfica (Arroyo y Linkimer, 2021).

La red local, es un sistema instalado para obtener información microsísmica en un área específica de pequeñas dimensiones; por lo cual consta de estaciones sísmicas capaces de transmitir información continua al centro de monitoreo por línea de redes o telemetría, este último recaba datos en tiempo real y por ende el procesamiento rápido de sismos sensibles (Cutipa, 2006).

La velocidad de onda sísmica, vector que determina la velocidad con la que viajan las vibraciones en un material rocoso y que dependen de sus propiedades elásticas para definir su resistencia y deformación o grado de alteración (Alzate et al., 2020).

Existen varios tipos de ondas sísmicas que son catalogadas según la zona y clase de movimiento que describen en el macizo rocoso (Peralta y Mojica, 2014), están son las ondas internas (P y S) y externas (L); las ondas P, longitudinales, principales o de compresión) se propagan en la misma dirección (Cereceda, 2015). Las ondas S, de corte, transversales o secundarias, se transmiten en forma transversal a la orientación de la transmisión (Ruiz y Suárez, 2021). Las ondas L, de Love, se programa con un movimiento elíptico en un plano horizontal sin presentar componente vertical (Peralta y Mojica, 2014).

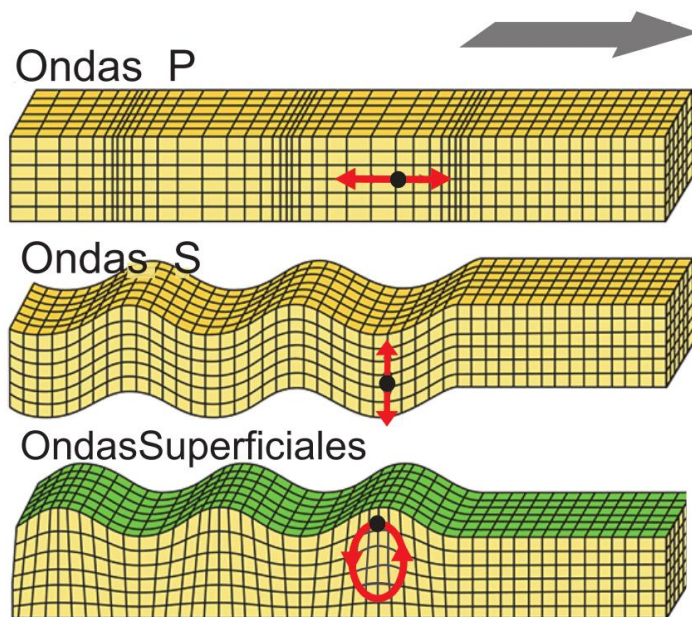


Figura 3. Tipos de ondas sísmicas. Fue extraído de “Los grandes terremotos de México” y elaborado por Gonzáles-Huizar (2019) (https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Representacion-del-movimiento-que-causan-los-tres-tipos-de-ondas-sismicas-La_fig9_336409467)

En la figura 3, se representa todos los movimientos que adoptan las ondas elásticas, donde las flechas rojas representan la dirección de la vibración.

Tras la salida de la onda P, se irradia la onda S con una velocidad inferior a la P, donde ondas de corte V_s se programan aproximadamente dos tercios de las longitudinales V_p (González de Mendoza, 2015)

Los valores de las velocidades de onda varían según el tipo de roca, en caso de rocas sanas a partir de 1,000 m/s (1.0 km/s); para rocas alteradas y

meteorizadas, valores menores a 900m/s; y con descomposición avanzada, por debajo de 700 – 800 m/s (Alzate et al., 2020).

En este campo existen dos términos muy diferentes, se trata de la velocidad de transferencia de una onda y la velocidad de partícula, ésta se define como: “Aquella relativa a las oscilaciones que experimenta la partícula, excitada por el paso de la onda de energía vibratoria” (Orihuela y Dapello, 2009, p. 9). El máximo valor de la velocidad de partícula se denomina VPP (velocidad pico partícula).

La intensidad y magnitud de sismo, no es lo mismo; magnitud mide el tamaño de este en función a la energía liberada como por ejemplo la Magnitud de Momento (Mw); mientras que la intensidad mide la severidad del daño resultante en personas y edificaciones (González-Huizar, 2019); y existe una escala para la intensidad:

Escala Sísmica Modificada de Mercalli	
I. Imperceptible	Microsismo, detectado por instrumentos
II. Muy Leve	Sentido por algunas personas (generalmente en reposo)
III. Leve	Sentido por algunas personas dentro de edificios
IV. Moderado	Sentido por algunas personas fuera de edificios
V. Poco Fuerte	Sentido por casi todos
VI. Fuerte	Sentido por todos
VII. Muy Fuerte	Las construcciones sufren daño moderado
VIII. Destructivo	Daños considerables en estructuras
IX. Muy Destructivo	Daños graves y pánico general.
X. Desastroso	Destrucción en edificios bien contruidos
XI. Muy Desastroso	Casi nada queda en pie
XII. Catastrófico	Destrucción total

Figura 4. Escala de intensidad (gravedad) de un sismo. Fue extraído de “Los grandes terremotos de México” y elaborado por González-Huizar (2019) (https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Representacion-del-movimiento-que-causan-los-tres-tipos-de-ondas-sismicas-La_fig9_336409467)

En la figura 4, se muestra una escala donde indica la intensidad sísmica de un temblor, basada en la jerarquía de intensidad de Mercalli – Giuseppe (1902).

Para lograr el monitoreo de las ondas sísmicas, se requiere que este sea eficiente, que cuente con sensores o transductores (geófonos o acelerómetros), redes de cableado para transportar la señal desde los sensores hacia los tableros centrales encargados de guardar la información y desde luego una computadora la

que cuenta con el programa para su trasfiere y posterior interpretación de la información (Ruiz y Suárez, 2021).

En la figura 5, se aprecia uno de los sensores empleados en el monitoreo en la mina materia de estudio.



Figura 5. Geófono triaxial



Figura 6. Geófono uniaxial



Figura 7. Cableado del sistema de monitoreo

En la figura 8, se aprecia la instalación de un equipo de adquisición por parte del personal de COMM COMMUNICATIONS, especialistas en automatización y control.



Figura 8. Equipo de adquisición

Tipos de transmisión de datos

Ahora bien, existen diferentes tipos de transmisión de datos desde convencionales como el cableado Ethernet, internet, teléfono y radio, hasta el sofisticado como la telemetría o satelital; en fin, estos están sujetos a las condiciones impuestas por la instalación, es el caso del cable Ethernet, que presentan interferencias (De Luz, 2022); en vista de ello, es importante contar con estabilidad de señal para distancias largas, por ello no es recomendable este tipo de cableado; la mejor opción sería la fibra óptica para transferir enormes cantidades de datos en tiempo real (Samyn, 2023), la desventaja es que es costosa. Otra condición se da en los sensores sísmicos (geófonos), accesorios del cableado, los que deben estar instalados en terrenos duros y compactos para minimizar los niveles de ruido (Cutipa, 2006).

El sismógrafo digital, equipo electromagnético capaz de registrar con exactitud el movimiento sísmico de un terreno, en función al movimiento producido en una bobina que recibe corriente inducida; donde el voltaje es proporcional a su velocidad (Cutipa, 2006).

Los movimientos sísmicos vienen a ser componentes horizontales y verticales en términos de aceleración, velocidad, desplazamiento, periodo predominante y duración (Bernal, 2013, p.6).

Modo de operación local

Manual: Durante esta etapa Local-Manual, la sección de la trituradora arranca con total independencia del PLC; se monitorizan las indicaciones del área y se presentan en el SCADA; sin ninguna influencia del desarrollo. Se realiza utilizando un control eléctrico que opera en paralelo con el control del PLC; este método se considera que el PLC falle. El operario o jefe del departamento (ingeniero de guardia) será responsable de seguir los procedimientos prescritos durante el proceso o secuencia de arranque (Porrás, 2010).

En los póstumos tiempos, el avance de la tecnología desde el uso de una computadora de escritorio hasta un teléfono inteligente a veces supera las

capacidades de una computadora, lo que hace que la tecnología acapare a pasos agigantados. Hasta la última década, las máquinas sólo podían aprender de acuerdo de las instrucciones de los humanos, lo que significaba agregar algoritmos, que es una forma muy práctica de hacerlo, pero significaba que las máquinas siempre necesitarían humanos en lugar de ser autónomas. (Bermúdez, 2020).

La automatización de los procesos productivos integra 03 factores claves: identificar información sobre el funcionamiento de máquinas y equipos, procesar esta información y ejercer medidas de control. En el caso de los sistemas automatizados, las operaciones mineras deben controlarse a intervalos cortos para asegurar su progreso eficiente. En esta posición, los trabajadores pueden estar expuestos a una variedad de peligros, incluida la proximidad a equipos energizados, exposición a presión hidráulica y eléctrica, caída de rocas e inhalación a polvo y vapores explosivos. Las organizaciones de extracción saben que estos peligros aparte de transgredir la seguridad de sus integrantes, también reducen la velocidad de producción. Si bien la creación de las operaciones automatizadas comenzó en los 60, los resultados de ese trabajo no se hicieron realidad hasta el siglo XXI. (Ralstonetal, 2014).

Interface de monitoreo y control

Los PLC (Controladores Lógicos Programables) y las RTU (Unidades Terminales Remotas) son las partes más empleadas en este componente de un sistema.

Un PLC es un sistema electrónico digital diseñado para su uso en aplicaciones industriales que utilizan lógica. SCADA es la encargada de recibir las señales y enviar los ajustes de configuración al centro de control según el programa realizado en las mismas.

Son sistemas que hacen uso de una memoria programable la misma que es una opción para guardar datos. Así mismo, realizan actividades especializadas como lógica, secuenciación, temporización, conteo para los módulos de entrada/salida analógicos o digitales que se utilizan para gestionar diversos equipos o procesos.

La automatización es importante porque aumenta la eficiencia y reduce los errores en las tareas repetitivas. Esto aumenta la productividad y la calidad del trabajo, y libera oportunidad para que las personas se centren en las faenas más esenciales o de mayor importancia (Ríos, 2016). Además, la automatización ayuda a reducir los costos laborales y aumenta la competitividad de las empresas. También es beneficioso en casos en los que la comunicación dificulta encontrar trabajadores humanos, como en lugares remotos o en trabajos peligrosos. En general, la automatización puede traer muchos beneficios en diferentes áreas, pero también es importante considerar cómo afecta a los trabajadores y de qué garantiza un uso seguro.

El supervisor SCADA puede elegir los equipos a ser operados en esta modalidad de Remoto-Automático, y el sistema arrancará automáticamente.

Pronóstico de eventos Sísmicos

El pronóstico de eventos sísmicos es muy difícil de llevarse a cabo debido a un sin fin de factores que en su mayoría fluctúan, son difíciles de medir y hasta son súbitos de presentarse (Bernal, 2013). En la estadística descriptiva desarrollada en Excel, por medio de las funciones PRONOSTICO y ESTIMACIÓN LINEAL; se logran estimaciones en base a valores; pero que si son medibles y que describen una tendencia. Ahora bien; para calcular qué tan asertivo es este pronóstico, se puede recurrir a la medición basada en porcentajes, fundamentadas en bases relativas (Pronóstico Experto, 2010).

Sistema de Alerta temprano

Para determinar el sistema de alerta temprano, existen criterios tales que por ejemplo la intensidad o magnitud de un sismo, así como también el tiempo de respuesta para evacuar, como sucede con los tsunamis que acompañan a los sismos (Servicio Integrado de Seguridad ECU 911, 2016). Por ejemplo, para estos casos se emplea los siguientes criterios:

Parámetro Sísmico		Posibilidad de tsunami	Tiempo esperado de arribo
Magnitud Mw	Profundidad km		
Mayor a 7.5	<70	SI	Menor a 15 minutos
Mayor a 7.5	>70	SI	Menor a 15 minutos
De 6.9 a 7.4	<70	SI	Menor a 15 minutos
De 6.9 a 7.4	>70	Ninguna o muy poca	No se aplica
De 6.0 a 6.8	>70		No se aplica
De 6.0 a 6.8	<70		No se aplica
Menor a 6.0	<70	Ninguna	No se aplica
Menor a 6.0	>70		No se aplica

Figura 9. Criterios para activación de sistema de alerta de un sismo. Fue extraído de “Sistema de alerta temprana para eventos de tsunami y control de represas” y elaborado por el Servicio Integrado de Seguridad ECU 911 (2016) (<https://www.ecu911.gob.ec/wp-content/uploads/2018/04/Informe-Fase-1-Proyecto-SAT.pdf>)

En la figura 9, el tiempo de respuesta o de arribo siempre es un reto, donde se considera el tiempo estimado de impacto por medio de base de eventos históricos. El tiempo de respuesta está en función al tipo de evento y su tiempo de impacto (Servicio Integrado de Seguridad ECU 911, 2016).

Tipo de tsunami	Tiempo de impacto típico	Tiempo de respuesta del Centro de alerta de tsunamis
Local	0 - 1 hr.	2 - 5 min
Regional	1 - 3 hr.	5 - 10 min
Lejano	> 3 hr.	10 -20 min

Figura 10. Tiempo de respuesta en modelo de sistema de alerta temprano. Fue extraído de “Sistema de alerta temprana para eventos de tsunami y control de represas” y elaborado por el Servicio Integrado de Seguridad ECU 911 (2016) (<https://www.ecu911.gob.ec/wp-content/uploads/2018/04/Informe-Fase-1-Proyecto-SAT.pdf>)

En la figura 10, el tiempo de respuesta en los centros de monitoreo son pre-establecidos y son actualizados por la data en tiempo real, manteniendo o cambiando el nivel del evento (Servicio Integrado de Seguridad ECU 911, 2016).

La escala de intensidad de un evento sísmico es pre-establecida por la plataforma digital con la que se realiza el monitoreo. Por ejemplo, según la plataforma AUDAS.

Esta escala considera que sismos con magnitud menor a 4.5 (color verde) suelen causar daños menores, sismos entre 4.5 y 6 (color amarillo) son sismos que ocasionan daños ligeros y sismos mayores a 6 (color rojo) suelen ocasionar daños severos a graves. (Uriarte, 2021, párr. 4).

Coefficiente de Pearson

La prueba estadística que analiza la interacción entre 02 variables de estudio en un nivel por intervalos o de razón (Hernández et al, 2014). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$r = \frac{cov(x, y)}{S_x S_y}$$

Donde:

r: Coeficiente de correlación de Pearson

x, y: variables bidimensionales

cov(x, y): Covarianza entre X e Y (covarianza es el total de pares X, Y)

S_x: Desviación estándar de X

S_y: Desviación estándar de Y

En la interpretación del coeficiente de Pearson (r), el valor del coeficiente varía de -1 a 1. Existen 04 casos:

- Cuando el valor es "0", no existe relación (nula)
- Cuando el valor más se acerca a +-1, mayor correlación (fuerte)
- Cuando el valor es r= 1, r= -1.
- Cuando el valor se aproxima al nulo, menor correlación (débil)

Para definir el grado de significancia que existe en la correlación es necesario tener en cuenta parámetros o límites para una mejor interpretación (Hernández et al, 2014).

r	Interpretación
-1.00	La correlación es negativa perfecta e inversa
-0.90	La correlación es negativa muy fuerte e inversa
-0.75	La correlación es negativa considerable (alta) e inversa
-0.50	La correlación es negativa media (normal) e inversa
-0.25	La correlación es negativa débil (baja) e inversa
-0.10	La correlación es negativa muy débil
0.00	No hay correlación (nula)
+0.10	La correlación es positiva muy baja
+0.25	La correlación es positiva débil (baja) y directa
+0.50	La correlación es positiva media (normal) y directa
+0.75	La correlación es positiva considerable (alta) y directa
+0.90	La correlación es positiva muy fuerte y directa
+1.00	La correlación es positiva perfecta y directa

Tabla 1. Grado de correlación. Fue extraído de “Metodología de la investigación” y elaborado por Hernández, Fernández y Baptista (2014) (<https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>)

En la tabla 1, el coeficiente “r” está acompañado de un signo que indica la dirección de la correlación, si es negativa es inversa o si es positiva es directamente proporcional entre los tópicos (Hernández, Fernández y Baptista, 2014).

III. METODOLOGÍA

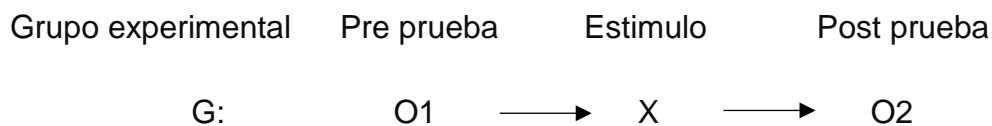
3.1. Tipo y diseño de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

Del tipo aplicada, en vista a que el objetivo fue mejorar la gestión de seguridad minera tras la práctica del monitoreo automatizado en la actividad sísmica. Así, se estableció un estudio de enfoque cuantitativo, por la recolección y análisis de cifras procedentes del monitoreo diario.

3.1.2. Diseño de investigación

Diseño experimental tipo pre-experimental de pre y post-prueba, donde previo a la recopilación de información, se administró un estímulo, con el fin de gestionar el tratamiento, para luego, aplicar otra prueba posterior, para luego interpretar los cambios gracias a la automatización del monitoreo de la actividad sísmica. Cada grado de manipulación comprende un grupo en el experimento (Hernández et al, 2014). Su diagrama es el siguiente:



Donde:

G: Monitoreo sísmico mensual

O1: Gestión de seguridad minera (IA, IPA)

X: Automatización del proceso

O2: Gestión de seguridad minera después de la automatización

3.2. Variables y Operacionalización

Variable independiente: Automatización del proceso de monitoreo sísmico

Según la definición conceptual, la automatización efectiva en los procesos productivos requiere de la integración de tres componentes esenciales: detección de información sobre el funcionamiento de la maquinaria y equipo, procesamiento de dicha información y control (Bermúdez, 2020).

Según la definición operacional, la automatización en minas, engloba 03 aprestos tecnológicos, este modelo es ampliamente usado en procesos industriales, supervisión con un monitoreo constante, establecer la comunicación con la central (Zhang et al., 2020).

Dimensión 1: Efectividad del sistema de alerta temprano (EAT)

Esta dimensión mide la efectividad con la cual el sistema de alerta logra alertar oportunamente y, por ende, evacuar al personal expuesto a una zona segura, donde el tiempo de evacuación estimado es de 15 minutos. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$EAT = \frac{\text{Tiempo de evacuación estimada}}{\text{Tiempo de evacuación real}}$$

Dimensión 2: Eficiencia del monitoreo de eventos sísmicos (EMS)

La EMS, llamado eficiencia de vigilancia sísmica, viene a ser la eficiencia con que se logra monitorear las labores día a día en el transcurso de un mes. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$EMS = \frac{\text{Cantidad de días de monitoreo de eventos sísmicos}}{\text{Cantidad de días por mes}}$$

Variable dependiente: Gestión de la seguridad minera

Según la definición conceptual, la gestión de la seguridad minera dentro de las organizaciones es el conjunto de medidas que toda empresa debería tomar por el bienestar de los colaboradores (Pérez, 2017)

Según la definición operacional, la gestión de la seguridad minera, es el sumario de planificar, implementar y supervisar actividades para proteger los activos, mitigar riesgos y garantizar la integridad, implementar controles apropiadas para prevenir, detectar y responder a incidentes.

Dimensión 1: Índice de accidentabilidad (IA)

El índice de accidentabilidad, considerado como uno de los índices de seguridad de mayor relevancia en cuanto a la medición de la gestión de seguridad; este fusiona el índice de frecuencia de accidentes (IF) y el índice de severidad con pérdida de tiempo (IS) (Ministerio de Energía y Minas, 2017). Se calcula con la siguiente fórmula:

$$IA = \frac{IF \times IS}{1000}$$

Para determinar este índice, es necesario definir y calcular los índices de frecuencia (IF) y severidad (IS).

El índice de frecuencia (IF), es el número de eventos mortales e incapacitantes por cada millón de horas hombre trabajadas (Ministerio de Energía y Minas, 2017). Se expresa de la siguiente manera:

$$IF = \frac{N^{\circ} \text{ accidentes} \times 1'000,000}{\text{Horas hombre trabajadas}}$$

(N° accidentes = Incapacitantes + mortales)

El índice de severidad (IS), es el número de días perdidos cargados por cada millón de horas – hombre trabajadas (Ministerio de Energía y Minas, 2017). Calculado con la siguiente expresión:

$$IS = \frac{N^{\circ} \text{ de días perdidos} \times 1'000,000}{\text{Horas hombre trabajadas}}$$

Los índices de seguridad son valores medibles que permiten evaluar mensualmente el avance y desarrollo del sistema de gestión de prevención de riesgos laborales (Atencia y García, 2019).

Dimensión 2: índice de Incidentes con primeros auxilios (IPA)

El índice de incidentes con primeros auxilios (IPA), es un indicador de gestión de seguridad y viene a ser el número de lesiones con prestaciones de

primeros auxilios ocurridas por el promedio de trabajadores y se calcula mensualmente. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$IPA = \frac{N^{\circ} \text{ incidentes de primeros auxilios}}{\text{Número total de trabajadores}}$$

3.3. Población, muestra y muestreo

La población es el conjunto de personas u objetos del cual se anhela estar al tanto para investigar. Puede estar constituido por personas, registros, accidentes entre otros (López, 2004)

La población abarca a la totalidad de la organización en estudio, es decir a todos los integrantes de esta, por ende, el muestreo fue no probabilístico por conveniencia.

El muestreo no probabilístico por conveniencia consiste en seleccionar los registros que se encuentren disponibles y faciliten la información necesaria para el investigador (López, 2004), por ende; se registraron todos los eventos sísmicos ocurridos diariamente con su respectiva fecha, hora, escala o nivel de severidad y tiempo de respuesta (evacuación); para determinar la efectividad del sistema de alerta temprano y cálculo de la eficiencia del monitoreo sísmico al mes. Para determinar la mejora de la gestión de la seguridad minera, se tomaron como muestras todos los registros de accidentes leves e incapacitantes en el presente año, desde marzo hasta junio para definir el índice de accidentabilidad y primeros auxilios pre-test; y para el pos-test, la data recopilada desde agosto hasta el presente mes; también se trabajó con el registro de horas hombre trabajadas obtenidas por cada día trabajado.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se llevó a cabo el análisis documental de información procesada por otros autores o por medio de registros históricos de eventos sísmicos disponibles para enriquecer la base de datos, y la otra técnica fue la observación sistemática indirecta, donde se analizó y estudió la información procedente de los monitoreos

sísmicos detectados por personal calificado, también fue factible contar con encuestas para conocer las posiciones por parte del personal expuesto.

Como instrumentos de recolección, tuvimos dispositivos tales como la plataforma digital SCADA, a base de sismógrafos y acelerógrafos, ambos equipos fueron piezas clave para registrar y transmitir información sobre eventos sísmicos detectados en áreas de interés desde las estaciones sísmicas. Esto incluyó la instalación de una red de sensores sísmicos cableados y distribuidos en puntos estratégicos dentro y fuera de la mina.

La base de datos conseguida por los instrumentos, aparte de registrar la existencia de eventos; también detectaron la ubicación de los focos de origen y para ello fue necesario la distribución estratégica de estaciones sísmicas. Según Caniupan (2021), para determinar la ubicación de focos, es esencial determinar valores que describan su ubicación tales como latitud, longitud y profundidad (elevación), así como lo hicieron en las estaciones.

Estaciones			
Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación [msnm]
ANMA	-53.05	-70.38	1.0
BQON	-53.45	-70.24	262.0
DGER	-52.72	-69.58	26.0
LAVG	-52.36	-70.49	131.0
LOSC	-53.35	-69.45	23.0
MJTA	-53.12	-69.39	55.0
RGND	-52.85	-69.87	28.0
TROP	-52.55	-70.29	217.0

Figura 11. Ubicación de estaciones sísmicas. Extraído de “Estudio de sismicidad local en la región de Magallanes, utilizando la red sismológica de ENAP” y elaborado por Caniupan (2021) (https://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2021/10/Tesis_NadiaCaniupan.pdf)

En la figura 11, se presenta un modelo de tabla donde se indica las localizaciones geográficas y elevaciones de las estaciones de red sismológica empleada en Magallanes, Chile.

En este análisis, también fue importante incidir en el detalle de las velocidades de ondas presentes en el área de estudio.

Profundidad(km)	Vp(km/s)	Vs(km/s)
-5	3.48	1.74
0	5.24	1.84
3	5.74	2.94
6	5.75	3.04
15	5.75	3.72
20	6.87	3.88
25	6.95	3.88
30	7.10	4.22
35	7.33	4.22
40	7.37	4.22
50	7.62	4.32
60	7.85	4.32

Figura 12. Modelo de Velocidad final de ondas. Extraído de “Estudio de sismicidad local en la región de Magallanes, utilizando la red sismológica de ENAP” y elaborado por Caniupan (2021) (https://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2021/10/Tesis_NadiaCaniupan.pdf)

En la figura 12, en la tabla se detalla las velocidades de corte (Vs), así como longitudinales (Vp) en relación a la profundidad de los focos detectados.

3.5. Procedimiento

El procedimiento para la implementación del sistema automatizado de monitoreo sísmico implicó varias etapas. En primer lugar, se realizó un relevamiento geotécnico de la mina para identificar las ubicaciones óptimas para la instalación de los sensores sísmicos, considerando diversos factores presentes en la estructura de la roca y zonas mineralizadas. Luego, se procedió a la instalación y configuración de los sensores, asegurando su correcto funcionamiento y calibración. A continuación, se recopilaban datos sísmicos en tiempo real utilizando los sensores instalados. La información fue almacenada en una base de datos centralizada, que permitió su análisis y procesamiento posterior.

Una vez recopilados los datos sísmicos, se realizó un examen exhaustivo de los mismos. Se aplicaron técnicas estadísticas para identificar patrones y tendencias en la actividad sísmica, así como para determinar parámetros relevantes, como las frecuencias sísmicas. También se utilizaron técnicas de procesamiento de señales para filtrar y procesar los datos, mejorar la calidad y precisión de información.

La activación de alertas tempranas permitió anticipar situaciones de riesgo y tomar medidas preventivas para garantizar la seguridad de los trabajadores y de la infraestructura minera. La información generada a través del sistema automatizado de monitoreo sísmico se comparó con los resultados obtenidos mediante métodos tradicionales de monitoreo. Se evaluó la efectividad del sistema automatizado en términos de detección temprana y capacidad de respuesta en situaciones de emergencia.

3.6. Método de análisis de datos

Examen de los documentos sísmicos recopilados, empleando las medidas de tendencias central y desviación sub-estándar, frecuencias, porcentajes, gracias a la estadística descriptiva y también la estadística inferencial, para determinar la asociación entre las variables por medio de la correlación. Esto pudo incluir enfoques de registros específicos o conclusiones. Se trabajó con la información brindada por la plataforma SCADA como herramienta de software especializada para facilitar la información de datos y la interpretación de la información.

3.7. Aspectos éticos

El diseño de análisis, consideró los aspectos éticos relacionados con la recolección y el uso de datos sísmicos. Se obtuvo la información de los participantes y se protegió la privacidad y confidencialidad de los datos. Se cumplieron las normativas y regulaciones pertinentes en cuanto a la seguridad de los trabajadores y el uso responsable de los datos recolectados.

IV. RESULTADOS

4.1. Análisis de estadística descriptiva

Se realizó una contrastación entre la data conseguida del Pre-Test y del Post-Test de los indicadores: Efectividad del sistema de alerta temprano (EAT), eficiencia de monitoreo sísmico mensual (EMS), índice de accidentabilidad (IA) e incidentes con primeros auxilios (IPA). Esto nos valió para comparar el antes y después de la implementación:

Incidencia	2023	Tiempo de evacuación estimado	Tiempo de evacuación real	EAT	Promedio
Pre	marzo	00:15:00	00:47:00	31.91%	25.45%
	abril	00:15:00	00:49:30	30.30%	
	mayo	00:15:00	01:20:00	18.75%	
	junio	00:15:00	01:12:00	20.83%	
Automatización	Julio	Monitoreo sísmico automatizado			
Pos	agosto	00:15:00	00:16:26	91.24%	100.67%
	setiembre	00:15:00	00:13:49	108.59%	
	octubre	00:15:00	00:15:19	97.89%	
	noviembre	00:15:00	00:14:17	104.96%	

Tabla 2. Resultados Dimensión 1: Efectividad del sistema de alerta temprano

En la tabla 2, se aprecia que, después de automatizar el monitoreo sísmico (pos-test), la eficiencia del sistema de alerta temprana ha mejorado considerablemente de 25.45 hasta superar ligeramente el 100%, donde setiembre fue el mes con mayor efectividad (108.59%); mientras que, en menor magnitud, resultó ser el mes de agosto con 91.24%, valor que supera a todas las eficiencias obtenidas antes de la automatización (pre-test).

Por otro lado, la efectividad del sistema de alerta fue el resultado de que el tiempo de evacuación real fue el más próximo al estimado, en este caso 15 minutos; las demoras en la evacuación en las pruebas pre-test se debieron a que existen retrasos por ser un monitoreo puntual y manual. Desde el mes de julio se empezó con la implementación de la automatización; a pesar de ello, el tiempo de evacuación real aún no mostraba mejoras (por debajo de los 15 minutos), debido a que aún no se contaba con toda la telemetría hasta bocamina para enviar la información vía cableado.

A lo largo del estudio, la efectividad del sistema fue pasando por diversas fluctuaciones; según se muestra en la figura 13, existió una gran brecha entre marzo a julio (pre-test) y agosto al presente (pos-test), como respuesta a la automatización del proceso de monitoreo; estas alarmas al ser en tiempo real mejoraron la comunicación y facilitaron el seguimiento oportunamente. Con estos resultados quedó demostrado que la automatización del monitoreo fue el mejor camino ante la detección temprana de eventos sísmicos con menores tiempos de evacuación en comparación con el método tradicional.

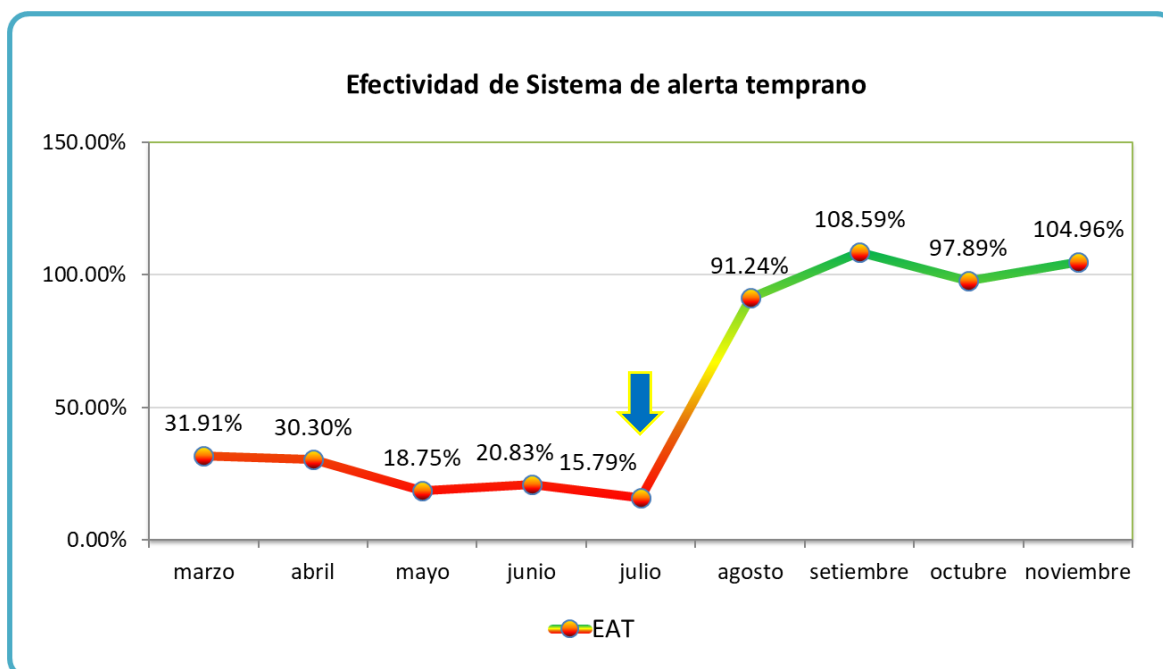


Figura 13. Evolución de la efectividad del sistema de alerta temprano (marzo – noviembre 2023)

		EAT_Pre	EAT_Pos
N	Válido	4	4
	Perdidos	0	0
Media		0.25	1.01
Mediana		0.26	1.01
Moda			
Desviación estándar		0.0662	0.0770
Varianza		0.0033	0.0044
Mínimo		0.19	0.91
Máximo		0.32	1.09
Suma		1.02	4.03

Tabla 3. Análisis estadístico descriptivo Dimensión 1: EAT

En la tabla 3, se muestra la información estadística descriptiva de uno de los indicadores de la variable independiente “Automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica”, se trata de la efectividad del Sistema de alerta temprana (EAT), donde se aprecia que la media del pre-test fue de 0.25 y tras la automatización del monitoreo, se obtuvo una media de 1.01, esto confirma la mejora del pos-test al 101% de efectividad, lo mismo sucede con los valores de la tendencia central mediana; por otro lado, en ambos caso, no existe moda estadística en vista de que los valores no presentan una misma frecuencia (repetitiva); con respecto a la desviación estándar dentro de la data del pos-test es superior al pre-test, eso quiere decir que en el pos-test los valores están más alejados de su media que los valores de data pre-test con respecto a su media; por otro lado, la varianza del pos-test (0.0044) al ser un valor mayor a 0.0033 (pre-test), esto implica que los datos del pos-test son ligeramente menos representativos porque sus datos están muy dispersos de su media. La siguiente data se obtuvo con funciones de Excel, que al igual que el Programa SPSS, determinan la data para el análisis estadístico descriptivo.

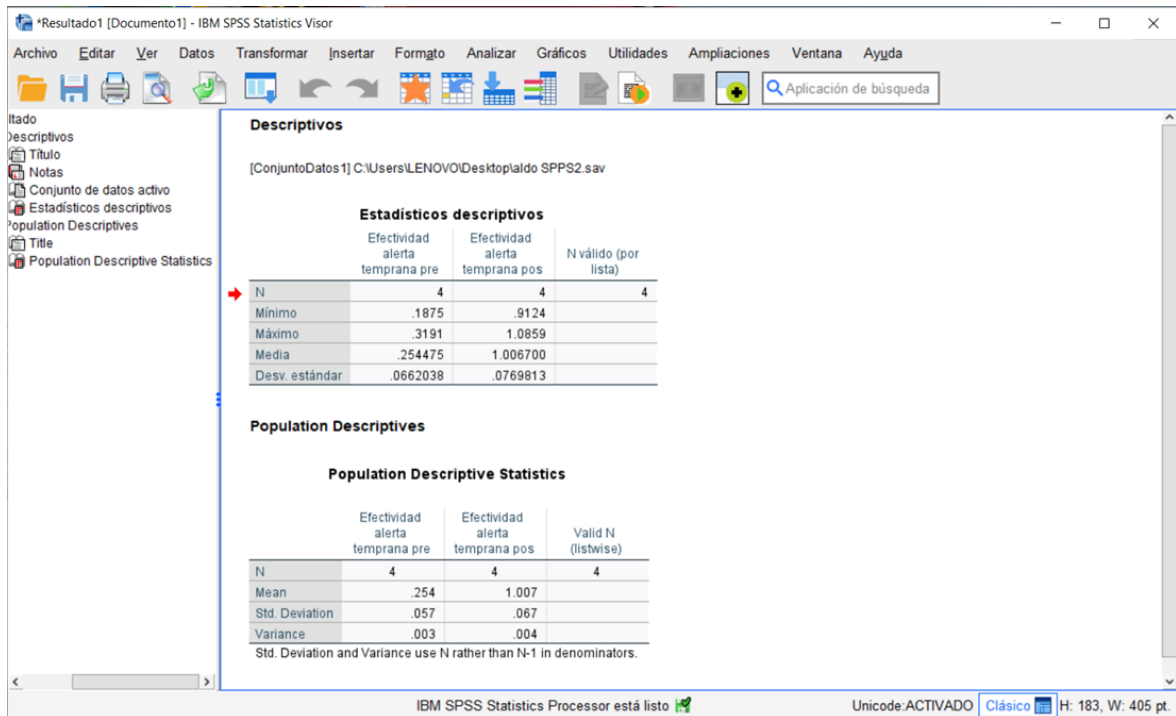


Figura 14. Análisis estadístico descriptivo Dimensión 1: EAT con SPSS

Efectividad del sistema de alerta temprana (EAT) durante el monitoreo sísmico automatizado

Por medio de la plataforma SCADA, se recopilaban registros de eventos sísmicos con diferentes niveles de alerta que van de leves a muy fuertes; donde los eventos de nivel FUERTE y MUY FUERTE lograron activar el sistema de alarma; al sobrepasar los valores máximos establecidos por el Software dentro de las velocidades pico partícula (VPP). Estos niveles se aprecian en la figura 15:

Nivel de alerta	Escala de intensidad
Leve	Imperceptible, $VPP < 0.72$ Km/h
Moderado	Perceptible, $0.72 \leq VPP < 4$ Km/h
Fuerte	Fuerte perceptible, $4 \leq VPP < 5$ Km/h
Muy fuerte	Severo, $VPP \geq 5$ Km/h

Figura 15. Niveles de alerta y sus escalas de intensidad según SCADA

Al realizar el monitoreo de la primera semana de agosto, El registro de ocurrencia de eventos de cualquier nivel de alerta (intensidad) proporcionó información para su interpretación que fue diaria, semana o mensual.

Nivel de alerta	Total	% Ocurrencia
Leve	177	60.8%
Moderado	111	38.1%
Fuerte	1	0.3%
Muy fuerte	2	0.7%
Total general	291	100.0%

Tabla 4. Ocurrencia de eventos sísmicos (01 al 07 de agosto – 2023)

En la tabla 4, se aprecian todos los eventos sísmicos ocurridos en la primera semana de agosto del 2023, se registraron 291 eventos sísmicos, de los cuales el 60.8% fueron leves casi o nada perceptibles, 01 evento fuerte y 02 muy fuertes. Ahora bien, los datos antes mencionados fueron extraídos de la gráfica semanal emitida por la plataforma digital SCADA, que registró los eventos por medio de gráficos de columnas.

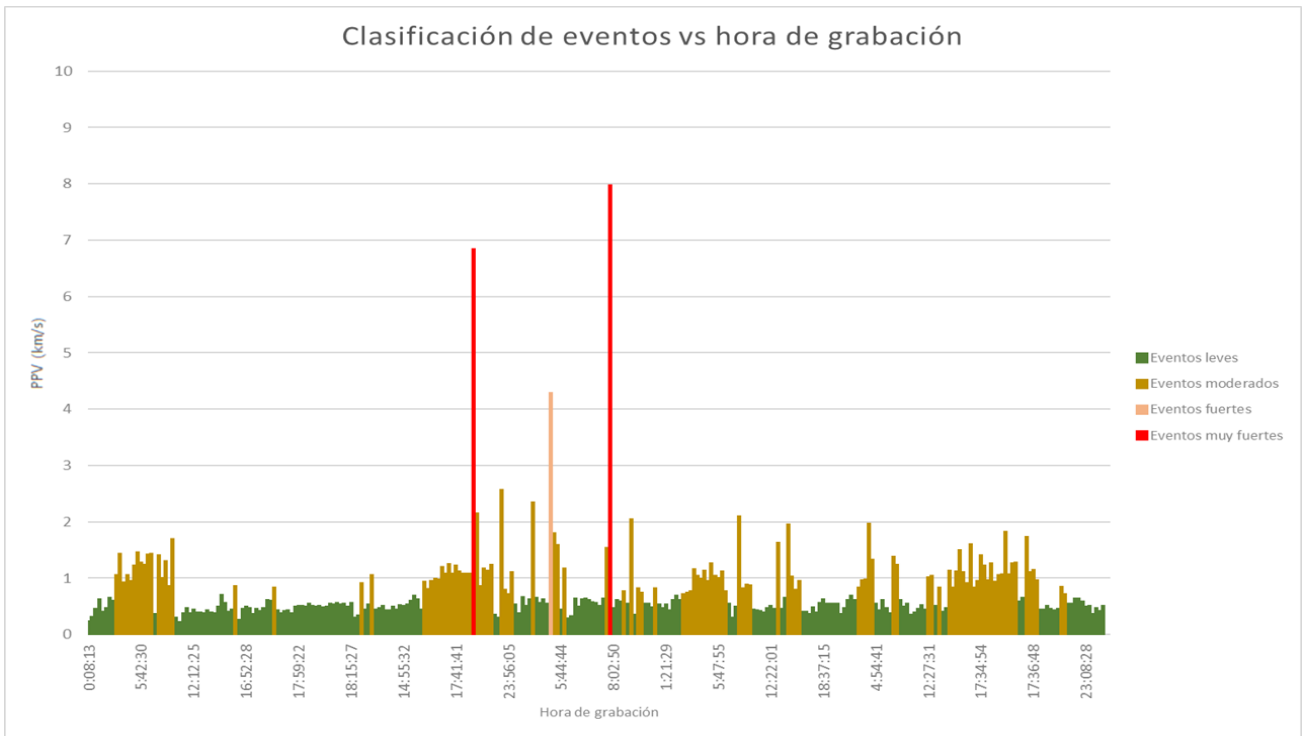


Figura 16. Escala de niveles de velocidad VPP. Extraído de “Evaluación VPP SSM Estrella” y elaborado por Velásquez (2023).

En la figura 16, gráfico de doble entrada: horas de grabación versus los valores de la velocidad VPP expresado en km/s, se determinó la clasificación de los eventos con barras de colores: verde para los eventos leves, marrón para los eventos moderados, melón para los eventos fuertes y rojo para los muy fuertes.

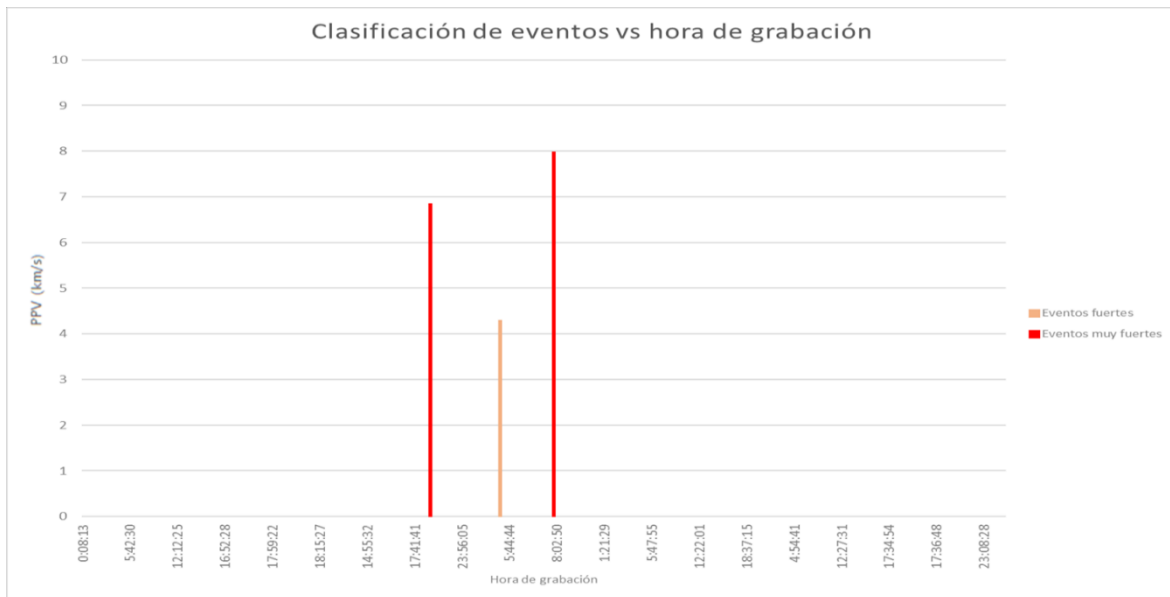


Figura 17. Escala de niveles VPP de eventos fuertes muy fuertes. Extraído de “Evaluación VPP SSM Estrella” y elaborado por Velásquez (2023).

En la figura 17, se aprecia solo a los tipos eventos sísmicos causantes de activar el sistema de alerta temprana.

Gracias al software proporcionado por COMM COMMUNICATIONS es que logró brindar una imagen Tomográfica de la zona de estudio y se proporcionó la ubicación geográfica y elevación del foco del sismo, para facilitar el aviso de alerta al personal que se encontraba trabajando en esas zonas:

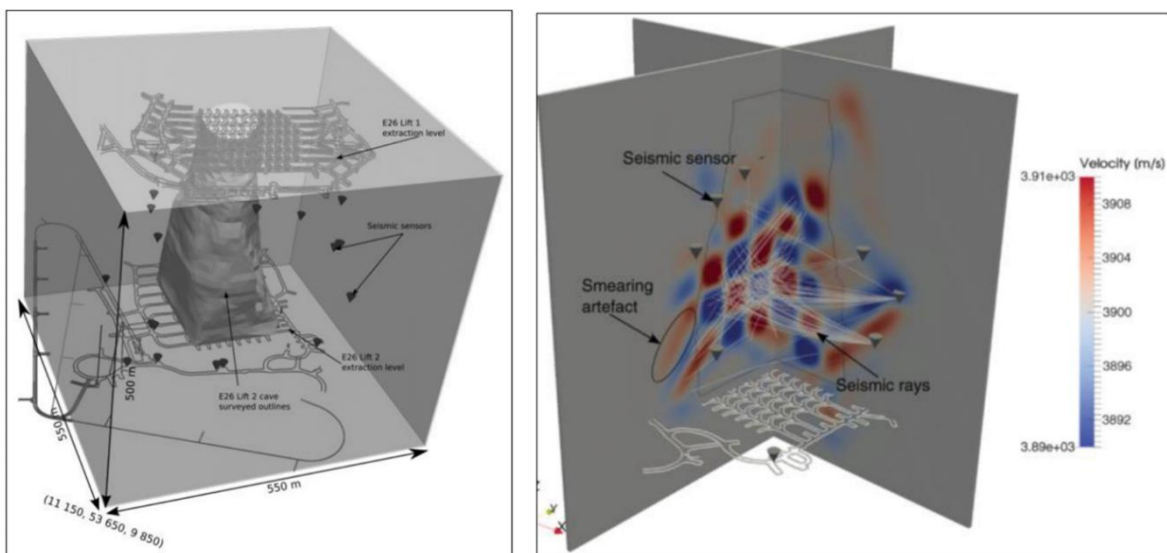


Figura 18. Imagen Tomográfica de la mina Estrella. Extraído de “Evaluación VPP SSM Estrella” y elaborado por Velásquez (2023).

En la figura 18, se aprecia la distribución de sensores sísmicos en un bloque dimensionado de 550x550x550m, la imagen de la derecha representa las velocidades PPV detectadas por estos.

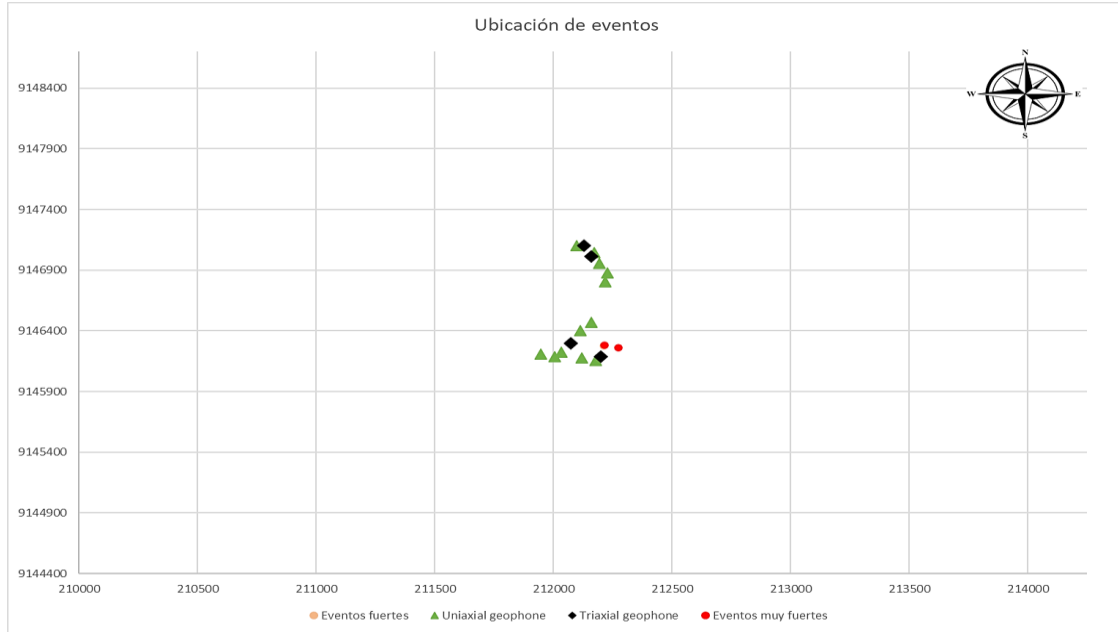


Figura 19. Ubicación geográfica de los eventos fuertes y muy fuertes. Extraído de “Evaluación VPP SSM Estrella” y elaborado por Velásquez (2023).

En la figura 19, se aprecia solo la ubicación de los sensores capaces de detectar eventos fuertes y muy fuertes, ya que estos niveles de alerta son los únicos que activan el sistema de alerta temprana. Con la ubicación de estos eventos críticos, se pudo ubicar la zona de interés. Esta información junto con la cota de elevación, se determinó qué contrata está trabajando en la zona con eventos críticos para su posterior evacuación.

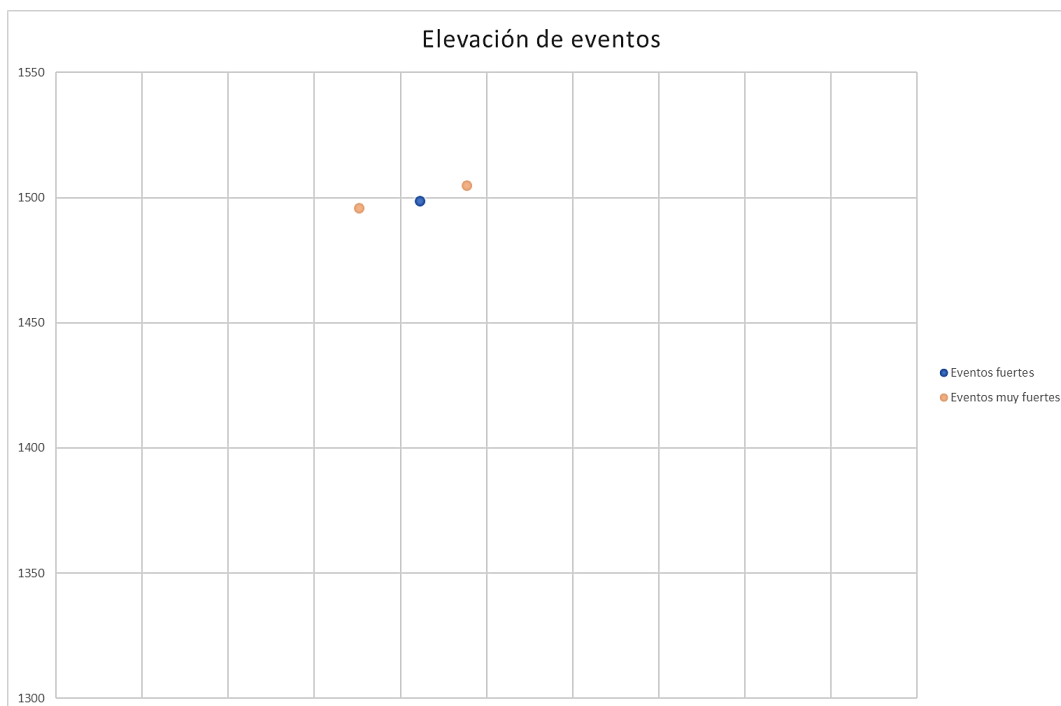


Figura 20. Elevación m.s.n.m. de eventos fuertes y muy fuertes. Extraído de “Evaluación VPP SSM Estrella” y elaborado por Velásquez (2023).

En la figura 20, se aprecia la cota de altura donde fueron detectados los eventos sísmicos considerados como fuertes y muy fuertes que activaron la alarma en la primera semana del mes de agosto del 2023. La elevación fue expresada en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)

Por medio de los gráficos antes señalados, se llegó a la siguiente Interpretación para la primera semana de agosto.

Interpretación general (01 al 07 de agosto):

- Se registraron un total de 291 eventos entre el 01 de julio al 07 de agosto del 2023. El día 07 de agosto no se obtuvieron datos debido a corte de energía en interior mina.
- Se registraron un 60.8% de eventos leves, 38.1% de eventos moderados, **0.3%** de eventos **fuertes** y **0.7%** de eventos **muy fuertes** de acuerdo a la escala VPP.

- El valor mínimo de VPP correspondió a 0.24 km/s y el mayor valor correspondió a **7.97 km/s**.
- Las elevaciones de los eventos fuertes y muy fuertes registrados correspondieron a cotas entre los niveles 1400 a 1500, aledaños a las labores cercanas a la **RA Estrella TJ 6250-1**, seguido en una menor cantidad en zonas cercanas al **NV 1467 CR SE** (eventos leves y moderados).
- El día 02 y 03 de agosto se registraron 02 eventos en la RA Estrella TJ 6250-1 NV1400-1450, con valores de energía bastante elevados; así mismo, valores de magnitud momento catalogados como muy fuerte, se activó alerta de acuerdo a protocolo por lo cual, por un tema de precaución, se procedió a retirar al personal hasta la siguiente guardia entrante. Debido a estos eventos se pidió al personal estar atento ante cualquier actividad inusual y tomar las acciones pertinentes.

Con los resultados obtenidos por medio de las gráficas de barra, se logró calcular la efectividad del sistema de alerta temprana de la primera semana de agosto 2023. Este mismo procedimiento se realiza para todos los días de cada mes.

Fecha	VPP (Km/s)	Nivel de alerta	Hora de grabación	Tiempo de respuesta	Efectividad	Nivel_labores	Contrata
2/08/2023	6.34	Muy fuerte	20:43:11	00:19:09	78.3%	Nv.1500 - RA Estrella	NEWHOR1
3/08/2023	4.28	Fuerte	05:21:17	00:21:07	71.0%	Nv.1500 - RA Estrella	NEWHOR1
	7.97	Muy fuerte	07:56:27	00:22:15	67.4%	Nv.1500 - TJ 6250-1	NEWHOR1
Promedio					72.3%		

Tabla 5. Efectividad de alarma semanal (01 al 07 de agosto – 2023)

En la tabla 5, se muestran los resultados de la efectividad de la alerta para un tiempo máximo de respuesta de 15 minutos para evacuar al personal y reubicar a buen resguardo; por medio de la comunicación radial de superficie e interior mina.

Mes	Fecha	VPP (Km/s)	Nivel de alerta	Hora de grabación	Tiempo de respuesta	EMS	Nivel labores
marzo 23	6/03/2023	5.80	MUY FUERTE	15:05:56	00:56:00	26.8%	Nv.1500 - RA Estrella
marzo 23	21/03/2023	4.05	FUERTE	08:51:03	00:38:00	39.5%	Nv.1500 - RA Estrella
marzo 23	21/03/2023	4.88	FUERTE	15:23:40	00:47:00	31.9%	Nv.1500 - TJ 6250-1
abril 23	11/04/2023	4.60	FUERTE	18:07:29	00:41:00	36.6%	Nv.1500 - TJ 6250-1
abril 23	24/04/2023	7.11	MUY FUERTE	14:54:05	00:58:00	25.9%	Nv.1500 - RA Estrella
mayo 23	9/05/2023	5.99	MUY FUERTE	17:45:42	01:20:00	18.8%	Nv.1500 - TJ 6250-1
junio 23	13/06/2023	4.80	FUERTE	16:09:55	00:48:00	31.3%	Nv.1500 - TJ 6250-1
junio 23	30/06/2023	5.81	MUY FUERTE	11:44:51	01:36:00	15.6%	Nv.1500 - TJ 6250-1
julio 23	24/07/2023	4.94	FUERTE	10:03:16	01:35:00	15.8%	Nv.1500 - RA Estrella
agosto 23	2/08/2023	6.34	MUY FUERTE	20:43:11	00:19:09	78.3%	Nv.1500 - RA Estrella
agosto 23	3/08/2023	4.28	FUERTE	05:21:17	00:21:07	71.0%	Nv.1500 - RA Estrella
agosto 23	3/08/2023	7.97	MUY FUERTE	07:56:27	00:22:15	67.4%	Nv.1500 - TJ 6250-1
agosto 23	10/08/2023	6.71	MUY FUERTE	14:21:34	00:12:32	119.7%	Nv.1500 - RA Estrella
agosto 23	10/08/2023	4.31	FUERTE	15:09:27	00:17:19	86.6%	Nv.1500 - TJ 6250-1
agosto 23	18/08/2023	4.22	FUERTE	18:44:14	00:14:23	104.3%	Nv.1500 - RA Estrella
agosto 23	18/08/2023	5.98	MUY FUERTE	21:33:20	00:19:57	75.2%	Nv.1500 - TJ 6250-1
agosto 23	19/08/2023	4.45	FUERTE	03:29:32	00:13:36	110.3%	Nv.1500 - RA Estrella
agosto 23	25/08/2023	4.23	FUERTE	09:44:23	00:13:55	107.8%	Nv.1500 - RA Estrella
agosto 23	28/08/2023	5.42	MUY FUERTE	20:55:08	00:10:11	147.3%	Nv.1500 - TJ 6250-1
setiembre 23	9/09/2023	4.64	FUERTE	03:02:00	00:19:44	76.0%	Nv.1500 - TJ 6250-1
setiembre 23	9/09/2023	6.24	MUY FUERTE	22:15:59	00:13:16	113.1%	Nv.1500 - RA Estrella
setiembre 23	11/09/2023	4.96	FUERTE	04:49:17	00:14:41	102.2%	Nv.1500 - RA Estrella
setiembre 23	16/09/2023	5.21	MUY FUERTE	10:14:22	00:12:17	122.1%	Nv.1500 - RA Estrella
setiembre 23	23/09/2023	6.31	MUY FUERTE	13:02:43	00:08:34	175.1%	Nv.1500 - RA Estrella
setiembre 23	30/09/2023	4.50	FUERTE	02:36:38	00:14:21	104.5%	Nv.1500 - RA Estrella
octubre 23	2/10/2023	4.25	FUERTE	06:16:34	00:17:32	85.6%	Nv.1500 - RA Estrella
octubre 23	5/10/2023	4.58	FUERTE	19:46:40	00:11:19	132.5%	Nv.1500 - RA Estrella
octubre 23	11/10/2023	5.72	MUY FUERTE	05:32:27	00:10:56	137.2%	Nv.1500 - RA Estrella
octubre 23	14/10/2023	4.16	FUERTE	07:42:35	00:20:27	73.3%	Nv.1500 - TJ 6250-1
octubre 23	24/10/2023	5.58	MUY FUERTE	13:49:22	00:16:23	91.6%	Nv.1500 - TJ 6250-1

Mes	Fecha	VPP (Km/s)	Nivel de alerta	Hora de grabación	Tiempo de respuesta	EMS	Nivel_labores
noviembre 23	4/11/2023	5.20	MUY FUERTE	13:16:24	00:11:51	126.6%	Nv.1500 - RA Estrella
noviembre 23	5/11/2023	4.96	FUERTE	03:15:01	00:22:17	67.3%	Nv.1500 - TJ 6250-1
noviembre 23	8/11/2023	5.76	MUY FUERTE	07:09:57	00:16:13	92.5%	Nv.1500 - RA Estrella
noviembre 23	8/11/2023	4.79	FUERTE	19:04:16	00:10:51	138.2%	Nv.1500 - TJ 6250-1
noviembre 23	11/11/2023	4.35	FUERTE	13:14:19	00:12:48	117.2%	Nv.1500 - RA Estrella
noviembre 23	12/11/2023	6.12	MUY FUERTE	19:34:56	00:13:55	107.8%	Nv.1500 - TJ 6250-1
noviembre 23	20/11/2023	6.24	MUY FUERTE	08:27:56	00:12:18	122.0%	Nv.1500 - RA Estrella
noviembre 23	22/11/2023	4.42	FUERTE	13:22:51	00:16:03	93.5%	Nv.1500 - RA Estrella
noviembre 23	25/11/2023	4.05	FUERTE	11:24:29	00:12:21	121.5%	Nv.1500 - RA Estrella

Tabla 6. Detalle de la Efectividad del Sistema de alerta temprano (marzo a noviembre – 2023)

En la tabla 6, se muestran todas las lecturas de los eventos sísmicos fuertes y muy fuertes ocurridos entre los meses de marzo a noviembre en el presente año; también se aprecian las fechas de ocurrencia, velocidades VPP, hora de grabación, tiempo de respuesta, porcentajes de efectividad para cada ocurrencia crítica; gracias a estos datos el Software logró identificar tanto niveles como labores de trabajo directamente expuestas.

El monitoreo continuó llevado a cabo tras la automatización (agosto al presente mes), logró registrar un total de 30 eventos críticos, de los cuales 14 fueron muy fuertes, donde el mayor máximo del VPP fue de 7.97 km/s reportado la fecha 03 de agosto del 2023, a las 07 horas con 56 minutos; con una eficiencia de 67.4%, ya que el tiempo de respuesta fue de 22 minutos.

Por otro lado, existieron 06 fechas donde se registraron 02 eventos por día, fue el caso de las fechas: 21/03/2023, 03/08/23, 10/08/23, 18/08/23, 09/09/23 y 08/11/23, donde la mayor efectividad fue de 138.2% con un tiempo de respuesta de 10 minutos con 51 segundos; en vista que, la alerta se activó a las 19 horas 4 minutos justo cuando el personal del turno día estaba concluyendo su jornada.

Incidencia	2023	Días de monitoreo	Días al mes	Eficiencia de monitoreo	Promedio
Pre	marzo	7	31	22.58%	18.82%
	abril	6	30	20.00%	
	mayo	6	31	19.35%	
	junio	4	30	13.33%	
Automatización	Julio	Monitoreo sísmico automatizado			
Pos	agosto	30	31	96.77%	96.69%
	setiembre	30	30	100.00%	
	octubre	31	31	100.00%	
	noviembre	27	30	90.00%	

Tabla 7. Resultados Dimensión 2: Eficiencia de monitoreo de eventos sísmicos por mes

En la tabla 7, al comparar la eficiencia del monitoreo sísmico resultante entre el pre-test y pos-test, se determinó que, el monitoreo ahora es más eficiente tras la automatización del proceso, de 18.82 a 96.69%, esto representó cuatro veces más eficiente que lo acostumbrado (pre-test), debido al constante monitoreo de zonas de estudio durante las 24 horas del día por mes con el menor recurso humano disponible; ya que el monitoreo se realizó desde afuera de mina, prescindiendo de personal monitor dentro de ella; en cambio el monitoreo manual se realizaba en interior mina en promedio 06 veces por mes como se aprecia en la tabla 6. En la fecha 07 del mes de agosto no se realizó monitoreo sísmico automatizado debido a que hubo un corte de energía en interior mina; por tal, de los 31 días, solo se monitoreo 30 días. En el anexo 3, se detallan la cantidad de días monitoreados por fechas al mes.

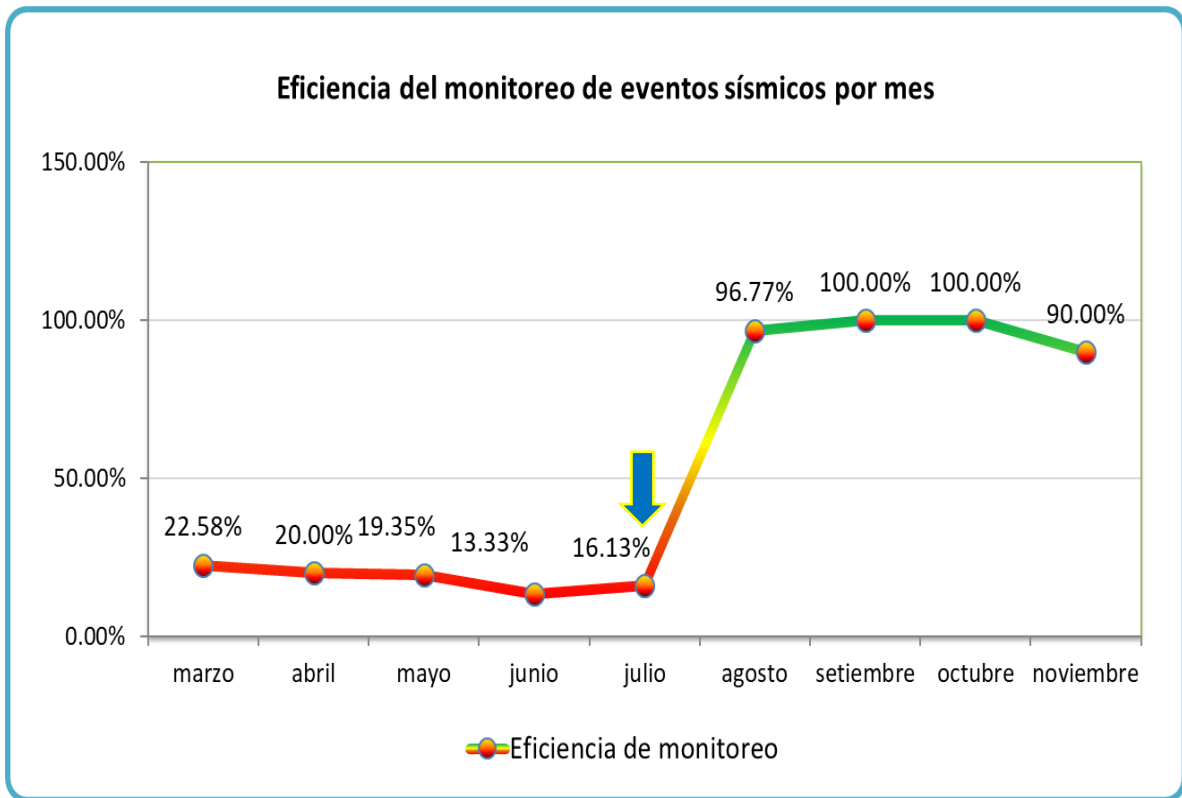


Figura 21. Evolución de EMS (marzo – noviembre 2023)

En la figura 21, se puede apreciar la evolución con tendencia positiva de la eficiencia del monitoreo de eventos sísmicos a partir de agosto del 2023 al presente mes, como producto de la automatización implementada, durante el mes de julio se dio inicio a la automatización, pero la eficiencia no creció debido a que aún se estaba desarrollando la prolongación de la telemetría hacia bocamina; por lo cual el personal aún seguía realizando el monitoreo acostumbrado de forma manual. Los valores obtenidos desde agosto a la fecha fueron constantes y se mantuvieron por encima del 90%, donde en agosto no se completó el total de monitoreos por la falta de energía eléctrica; mientras que, en noviembre, el monitoreo contempla hasta el 27 de noviembre. Cuando no se realiza los monitoreos de manera constante, se pierde información valiosa y es más vulnerable caer en el error al momento de la toma de decisiones como medidas preventivas.

		EMS_Pre	EMS_Pos
N	Válido	4	4
	Perdidos	0	0
Media		0.19	0.97
Mediana		0.20	0.98
Moda			
Desviación estándar		0.0391	0.0471
Varianza		0.0011	0.0017
Mínimo		0.13	0.90
Máximo		0.23	1.00
Suma		0.75	3.87

Tabla 8. Análisis estadístico descriptivo Dimensión 2: EMS

En la tabla 8, se muestra la información estadística descriptiva de uno de los indicadores de la variable independiente “Automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica”, se trata de la eficiencia del monitoreo de eventos sísmicos por mes (EMS), donde se aprecia que la media del pre-test fue de 0.19 y tras la automatización del monitoreo, se obtuvo una media de 0.97, esto confirma la mejora con el pos-test al 97% de eficiencia, lo mismo sucede con los valores de la tendencia central mediana; por otro lado, en ambos casos, no existió moda estadística en vista de que los promedios no presentaron una misma frecuencia. Si comparamos la desviación estándar entre el pre y pos-test, los valores de eficiencia de este último, se encontraron ligeramente más alejados de su media que en el pre-test; de igual manera, la varianza del pos-test (0.0017) al ser un valor mayor a 0.0011 (pre-test), esto implicó que los datos del pos-test fueran menos representativos ya que sus datos estuvieron muy dispersos de su media.

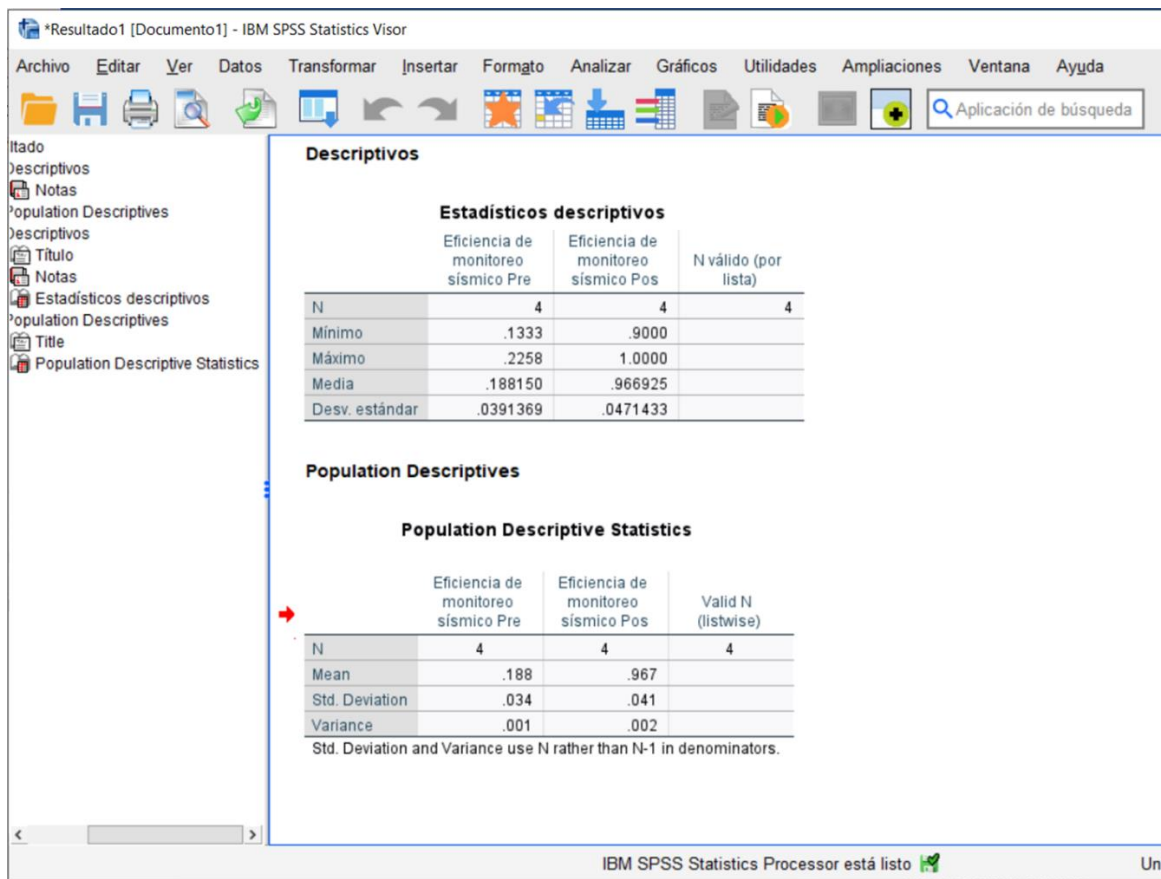


Figura 22. Análisis estadístico descriptivo Dimensión 2: EMS según SPSS

Incidencia	2023				Promedio
		IF	IS	IA	
Pre	marzo	0.00	0.00		0.69
	abril	0.00	0.00		
	mayo	4.71	113.13	0.53	
	junio	3.95	213.04	0.84	
Automatización	Julio	Monitoreo sísmico automatizado			
Pos	agosto	2.96	159.60	0.47	0.35
	setiembre	2.61	140.90	0.37	
	octubre	2.35	126.99	0.30	
	noviembre	2.13	126.99	0.27	

Tabla 9. Resultados Dimensión 1: índice de accidentabilidad

Con respecto a la tabla 9, en los valores del índice de accidentabilidad del pre-test, cabe precisar que en los meses de marzo y abril no hubieron accidentes incapacitantes por tal, el índice de accidentabilidad, para ambos es cero, pero al calcular el promedio con 04 valores de los cuales dos, son ceros; esto al calcularlo se obtiene 0.34 en promedio (pre-test); mientras que para el promedio del pos-test es 0.35, esto implica que, debe excluirse los valores cero ya que generan sesgos en el cálculo del promedio (Frolov, 2023); por tal, se excluyen ambos ceros (50% de los resultados) y el promedio de calcula en función a 0.53 y 0.84, obteniéndose 0.69 como promedio del pre-test.

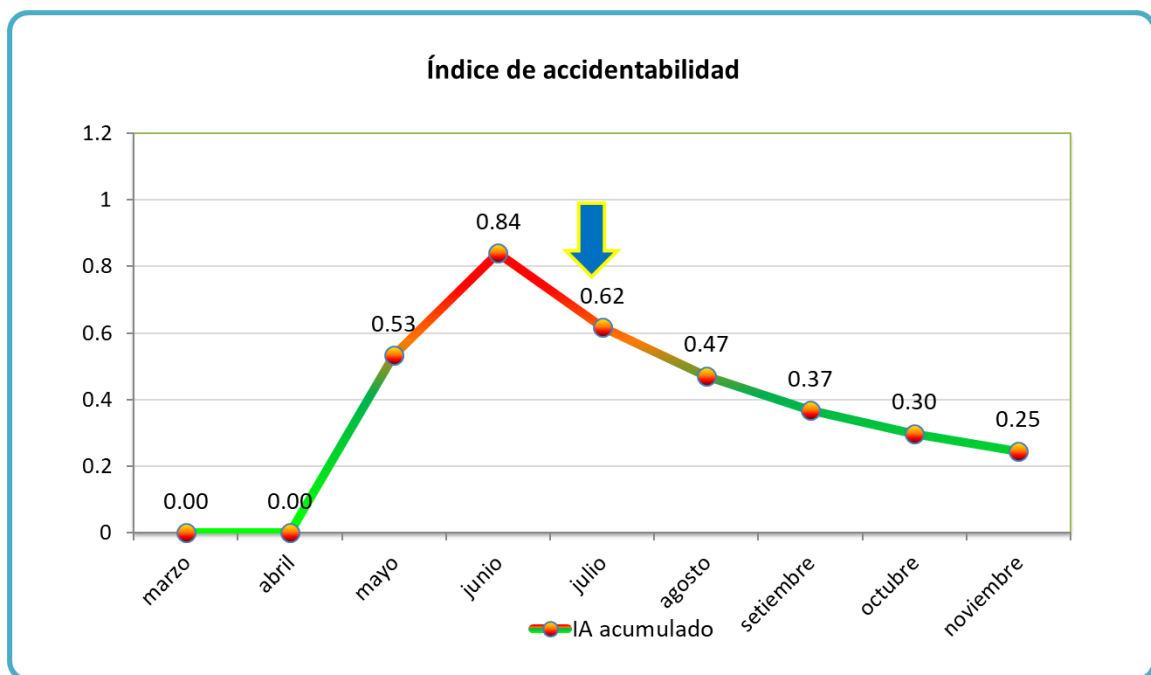


Figura 23. Evolución de Índice de accidentabilidad (marzo – noviembre 2023)

		Accidentabilidad_Pre	Accidentabilidad_Pos
N	Válido	2	4
	Perdidos	2	0
Media		0.69	0.35
Mediana		0.69	0.33
Moda			
Desviación estándar		0.2172	0.0977
Varianza		0.0236	0.0072
Mínimo		0.53	0.25
Máximo		0.84	0.47
Suma		1.37	1.38

Tabla 10. Análisis estadístico descriptivo Dimensión 1: índice de accidentabilidad

En la tabla 10, se muestra la información estadística descriptiva de uno de los indicadores de la variable dependiente “Gestión de seguridad minera”, se trata del índice de accidentabilidad, donde se aprecia que la media del pre-test fue de 0.69 y tras la automatización del monitoreo, se obtuvo una media de 0.35, esto confirmó la reducción del índice de accidentabilidad final; lo mismo sucedió con los valores de la tendencia central mediana; por otro lado, en ambos caso, no existió moda estadística en vista de que los promedios no presentaron una misma frecuencia. Si comparamos la desviación estándar entre el pre y pos-test, el valor del pre-test es mayor a su sucesor (pos-test), esto quiere decir que los valores que definen al pre-test se encuentran más alejados de su media que en el pos-test; de igual manera, la varianza del pre-test (0.0236) al ser un valor mayor a 0.0072 (pos-test), esto implica que los datos del pre-test son menos representativos ya que sus datos estuvieron muy dispersos de su media.

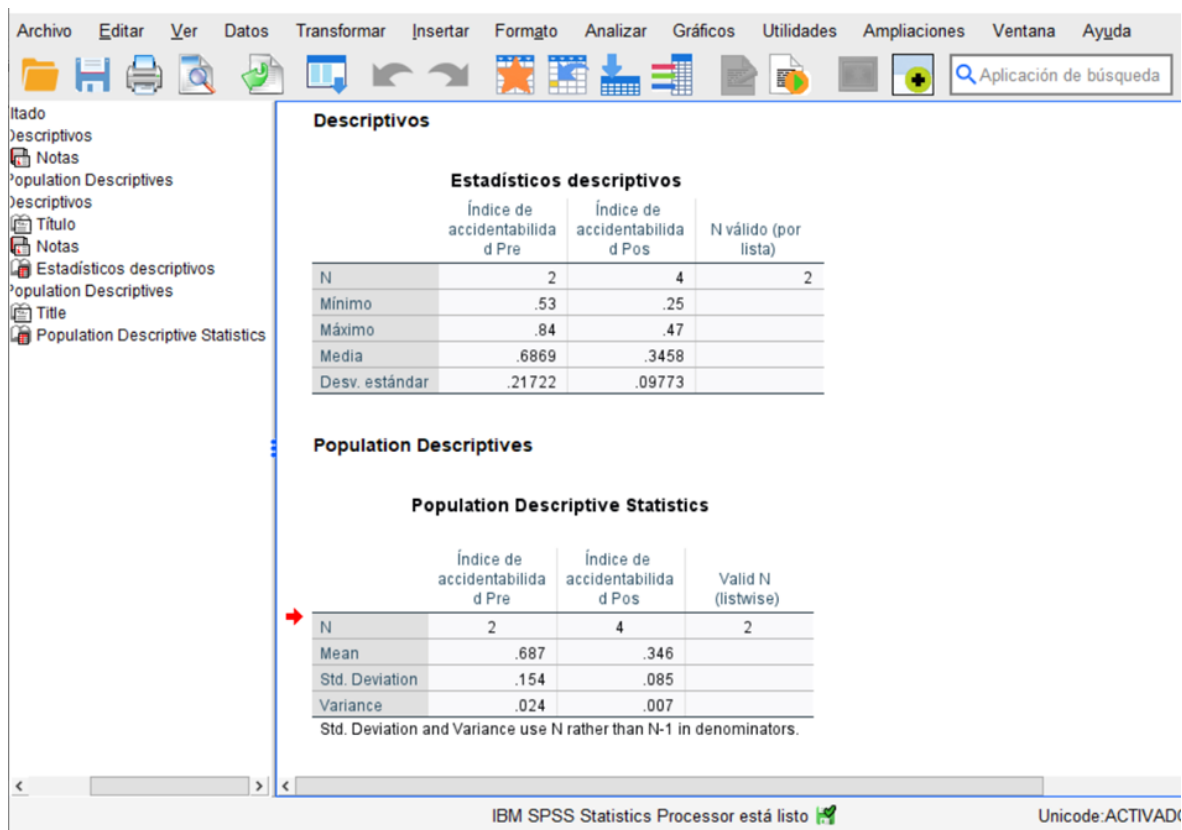


Figura 24. Análisis estadístico descriptivo Variable IA según SPSS

Incidencia	2023	IPA	Promedio
Pre	marzo	0.029	0.036
	abril	0.034	
	mayo	0.039	
	junio	0.043	
Automatización	Julio	Monitoreo sísmico automatizado	
Pos	agosto	0.037	0.023
	setiembre	0.018	
	octubre	0.023	
	noviembre	0.014	

Tabla 11. Resultados Dimensión 2: Índice de incidentes con primeros auxilios

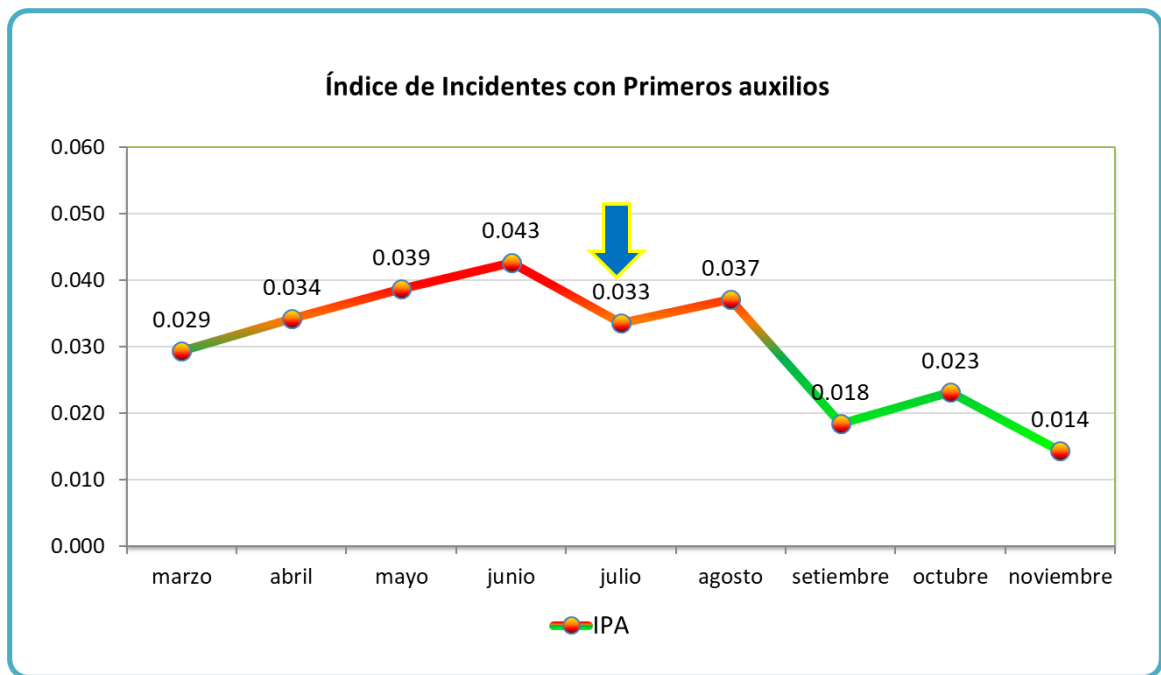


Figura 25. Evolución del índice de incidentes con primeros auxilios (marzo – noviembre 2023)

	IPA_Pre	IPA_Pos
N	Válido 4	4
	Perdidos 0	0
Media	0.036	0.023
Mediana	0.036	0.021
Moda		
Desviación estándar	0.0058	0.0099
Varianza	0.00002	0.00007
Mínimo	0.0293	0.0144
Máximo	0.043	0.037
Suma	0.145	0.093

Tabla 12. Análisis estadístico descriptivo Dimensión 2: Índice de Incidentes con Primeros auxilios

En la tabla 12, se muestra la información estadística descriptiva de uno de los indicadores de la variable dependiente “Gestión de la seguridad minera”, se trata de los incidentes con primeros auxilios (IPA), donde se aprecia que la media del

pre-test fue de 0.036 y tras la automatización del monitoreo, se obtuvo una media de 0.023, esto confirmó la reducción de los índices de incidentes con primeros auxilios, lo mismo sucedió con los valores de la tendencia central mediana; por otro lado, en ambos caso, no existió moda estadística en vista de que los promedios no presentaron una misma frecuencia. Si comparamos la desviación estándar entre el pre y pos-test, el valor de este último fue mayor al pre-test; por lo tanto, los valores que representan al pos-test se encuentran más alejados de su media que en el pre-test; de igual manera, la varianza del pos (0.00007) al ser un valor mayor al pre-test (0.00002), esto implicó que los datos del pos-test fueron ligeramente menos representativos ya que sus datos estuvieron muy dispersos de su media.

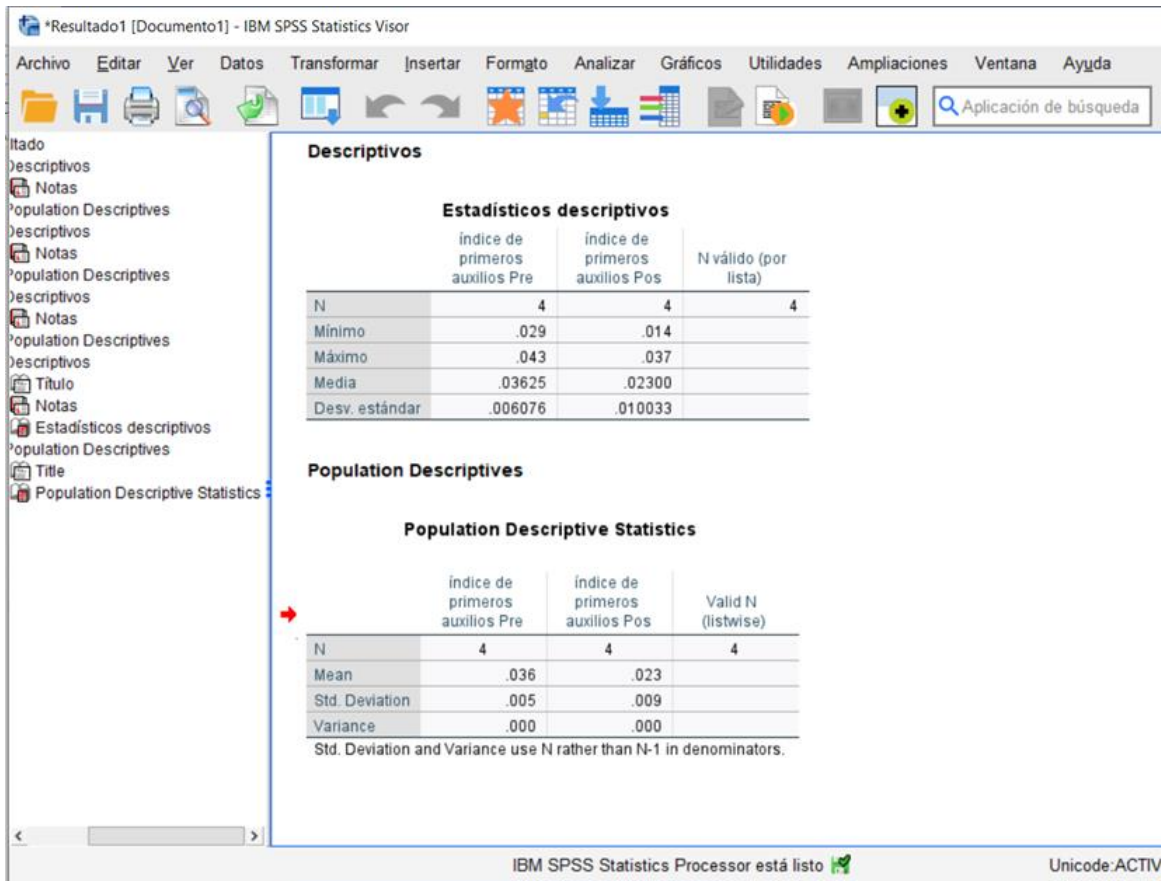


Figura 26. Análisis estadístico descriptivo Dimensión 2: índice de Incidentes con Primeros auxilios según SPSS

4.2. Análisis de estadística Inferencial

El análisis de la estadística inferencial entre el antes y después de las pruebas, tienen la finalidad de comprobar la hipótesis general y específicas planteadas. Para el análisis se empleó el software SPSS.

A. Análisis de la Hipótesis General

a. Prueba de Normalidad de la hipótesis general

Con respecto a la hipótesis general: La automatización del proceso de monitoreo mejora significativamente la gestión de seguridad minera, para contraste de esta, es necesario definir el tipo de prueba de normalidad a emplear para definir la distribución normal de datos según la cantidad de tamaño de muestras, si es menor e igual a 50; se emplea la prueba de Shapiro – Wilks, como en el presente caso.

Ha: La automatización del proceso de monitoreo mejora la gestión de seguridad minera.

Donde la gestión de seguridad se expresa en función al índice de accidentabilidad en un 80%; mientras que el índice de primeros auxilios representa un 20%.

Para determinar si los datos presentan un comportamiento paramétrico o no paramétrico, cumpliendo esta condición:

- Si el valor $p \leq 0.05$, es no paramétrico.
- Si el valor $p > 0.05$, es paramétrico.

Donde:

gl: Grado de libertad

sig: grado de significancia (valor p)

Estadístico: valor t

	Shapiro -Wilk		
	Estadístico	gl	p
Gestión de seguridad (pre-test)	0.862	4	0.268
Gestión de seguridad (pos-test)	0.975	4	0.872

Tabla 13. Prueba de Normalidad de la hipótesis general

De la tabla 13, se define que los valores de significancia p, tanto para la pre-prueba como la pos-prueba, son mayores al valor p de 0.05; se trata de un comportamiento paramétrico.

b. Contrastación de la hipótesis general

En vista de que se trata de un comportamiento paramétrico se aplica T-Student para definir las diferencias entre 02 muestras y contrastar la veracidad de la hipótesis general, esta es:

Ho: La implementación La automatización del proceso de monitoreo no mejora la gestión de seguridad minera.

Ha: La implementación La automatización del proceso de monitoreo mejora la gestión de seguridad minera.

Para aceptar o descartar la hipótesis nula o alternativa, se cumple esta condición:

- Ho: La μ pre-test \leq la μ post-test.
- Ha: La μ pre-test $>$ la μ post-test.

	Media	N	Desviación típ.	Error típ. De la media
Gestión de seguridad (pre-test)	0.29450	4	0.319996	0.159998
Gestión de seguridad (pos-test)	0.28150	4	0.079994	0.039997

Tabla 14. Estadístico de muestras relacionadas de la hipótesis general

En la tabla 14, se aprecia que la media de la pre-prueba es de 0.29450 mientras que la pos-prueba es de 0,28150; es decir que la pre-prueba es mayor a la pos-prueba y por ende se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

c. Análisis del p valor de la hipótesis general

Para confirmar la veracidad del análisis anterior, se procedió a analizar el p valor de la prueba de T-Student para muestras relacionadas. Se cumple esta decisión:

- Si el p valor ≤ 0.05 se descarta la hipótesis nula.
- Si el p valor > 0.05 se acepta la hipótesis nula.

	Media	Desviación típ.	Error típ. De la media	95% Intervalo de confianza para la diferencia		t	gl	sig
				Inferior	Superior			
Gestión de seguridad (pre-test y pos-test)	0.013000	0.393353	0.196677	-0.612913	0.638913	0.066	3	0.047

Tabla 15. Pruebas de muestras relacionadas de la hipótesis general

Según la tabla 15, el nivel de significancia p es menor a 0.05; con ello queda rechazado la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

B. Análisis de la hipótesis específica 1

a. Prueba de Normalidad de la hipótesis específica 1

Se emplea la prueba de Shapiro – Wilks, por contener menos de 50 valores.

Ha: La automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica reduce el índice de accidentabilidad

Para determinar si los datos presentan un comportamiento paramétrico o no Paramétrico, según esta condición el comportamiento es:

- Si el valor $p \leq 0.05$ es no paramétrico.
- Si el valor $p > 0.05$ es paramétrico.

Donde:

gl: Grado de libertad

sig: grado de significancia (valor p)

Estadístico: valor t

	Shapiro -Wilk		
	Estadístico	gl	p
Índice de accidentabilidad (pre-test)	0.856	4	0.245
Índice de accidentabilidad (pos-test)	0.974	4	0.867

Tabla 16. Prueba de Normalidad de la hipótesis específica 1

De la tabla 16, se define que los valores de significancia p, tanto para la pre-prueba como la pos-prueba, son mayores al valor p de 0.05; se trata de un comportamiento paramétrico.

b. Contrastación de la hipótesis específica 1

En vista de que se trata de un comportamiento paramétrico se aplica T-Student para definir las diferencias entre 02 muestras y contrastar la veracidad de la hipótesis específica 1, esta es:

Ho: La automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica no reduce el índice de accidentabilidad

Ha: La automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica no reduce el índice de accidentabilidad.

Para aceptar o descartar la hipótesis nula o alternativa, se cumple esta condición:

- Ho: La μ pre-test \leq la μ post-test.
- Ha: La μ pre-test $>$ la μ post-test.

	Media	N	Desviación típ.	Error típ. De la media
Índice de accidentabilidad (pre-test)	0.6869	2	0.21722	0.15360
Índice de accidentabilidad (pos-test)	0.2719	4	0.03769	0.02665

Tabla 17. Estadístico de muestras relacionadas de la hipótesis específica 1

En la tabla 17, se aprecia que la media de la pre-prueba es de 0.6869 mientras que la pos-prueba es de 0,2719; es decir que la pre-prueba es mayor a la pos-prueba y por ende se rechaza la hipótesis nula.

c. Análisis del p valor de la hipótesis específica 1

Para confirmar la veracidad del análisis anterior, se procedió a analizar el p valor de la prueba de T-Student para muestras relacionadas, se cumple esta condición:

- Si el p valor ≤ 0.05 se descarta la hipótesis nula.
- Si el p valor > 0.05 se aprueba la hipótesis nula.

	Media	Desviación típ.	Error típ. De la media	95% Intervalo de confianza para la diferencia		t	gl	sig
				Inferior	Superior			
Índice de accidentabilidad (pre-test y pos-test)	0.41495	0.25491	0.18025	-0.180	2.705	2.302	3	0.013

Tabla 18. Pruebas de muestras relacionadas de la hipótesis específica 1

Según la tabla 18, el nivel de significancia p es menor a 0.05; con ello queda rechazado la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

C. Análisis de la hipótesis específica 2

a. Prueba de Normalidad de la hipótesis específica 2

Se emplea la prueba de Shapiro – Wilks, por contener menos de 50 valores.

Ha: La automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica reduce el índice de incidentes con primeros auxilios.

Para determinar si los datos presentan un comportamiento paramétrico o no paramétrico, se cumple que el comportamiento es:

- Si el valor $p \leq 0.05$, es no paramétrico.
- Si el valor $p > 0.05$, es paramétrico.

Donde:

gl: Grado de libertad

sig: grado de significancia (valor p)

Estadístico: valor t

	Shapiro -Wilk		
	Estadístico	gl	p
Índice de incidentes con primeros auxilios (pre-test)	0.987	4	0.940
Índice de incidentes con primeros auxilios (pos-test)	0.914	4	0.519

Tabla 19. Prueba de Normalidad de la hipótesis específica 2

De la tabla 19, se define que los valores de significancia p, tanto para la pre-prueba como la pos-prueba, son mayores al valor p de 0.05; se trata de un comportamiento paramétrico.

b. Contrastación de la hipótesis específica 2

En vista de que se trata de un comportamiento paramétrico se aplica T-Student para definir las diferencias entre 02 muestras y contrastar la veracidad de la hipótesis específica 2, esta es:

Ho: La automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica no reduce el índice de incidentes con primeros auxilios

Ha: La automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica no reduce el índice de incidentes con primeros auxilios

Para aceptar o descartar la hipótesis nula o alternativa, se cumple esta condición:

- Ho: La μ pre-test \leq la μ post-test.
- Ha: La μ pre-test $>$ la μ post-test.

	Media	N	Desviación típ.	Error típ. De la media
Índice de incidentes con primeros auxilios (pre-test)	0.03625	4	0.006076	0.003038
Índice de incidentes con primeros auxilios (pos-test)	0.02300	4	0.010033	0.005017

Tabla 20. Estadístico de muestras relacionadas de la hipótesis específica 2

En la tabla 20, se aprecia que la media de la pre-prueba es de 0.03625 mientras que la pos-prueba es de 0,02300; es decir que la pre-prueba es mayor a la pos-prueba y por ende se rechaza la hipótesis nula.

c. Análisis del p valor de la hipótesis específica 2

Para confirmar la veracidad del análisis anterior, se procedió a analizar el p valor de la prueba de T-Student para muestras relacionadas y se planteó la siguiente condición:

- Si el p valor \leq 0.05 se rechaza la hipótesis nula.
- Si el p valor $>$ 0.05 se acepta la hipótesis nula.

	Media	Desviación típ.	Error típ. De la media	95% Intervalo de confianza para la diferencia		t	gl	sig
				Inferior	Superior			
Índice de primeros auxilios (pre-test y pos-test)	0.013250	0.015435	0.007718	-0.011311	0.037811	1.717	3	0.092

Tabla 21. Pruebas de muestras relacionadas de la hipótesis específica 2

Según la tabla 21, el nivel de significancia p es menor a 0.05; con ello queda rechazado la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

4.3. Monitoreo del índice de Accidentabilidad

El monitoreo consistió en registrar todos los accidentes incapacitantes y mortales que se presentaron en el transcurso de los días, mediante una tabla de Excel (tabla 22), manteniendo las estadísticas por cada mes; que actualizaron gráficos de curva para cada índice de seguridad acumulado para ver el comportamiento de este y sus rezagos que se arrastraron de un mes a otro.

Descripción	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov
Número de trabajadores	196	211	205	205	207	211	209	216	218	216	209
Accidentes Incapacitantes	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Accidentes mortales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Accidentes leves	1	3	3	0	0	1	1	1	0	0	0
Total accidentes Incap + mortal	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Acumulado accid. Incap + mortal	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Días Perdidos											
Ac.Incapacitante	0	0	0	0	24	30	0	0	0	0	0
Ac.mortal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total, de días Perdidos	0	0	0	0	24	30	0	0	0	0	0
Total de días Perdidos Acumulado	0	0	0	0	24	54	54	54	54	54	54
Horas Hombre Trabajadas	41,988	42,088	43,380	42,520	42,172	41,328	42,448	42,416	44,920	41,980	43,931
Acumulado H. H Trabajadas	41,988	84,076	127,456	169,976	212,148	253,476	295,924	338,340	383,260	425,240	469,171
Frecuencia (I.F.)	0.0	0.0	0.0	0.0	23.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Índice de Frecuencia Acumulado	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	3.9	3.4	3.0	2.6	2.4	2.1
Severidad (I.S.)	0.0	0.0	0.0	0.0	569.1	725.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Índice de Severidad Acumulado	0.0	0.0	0.0	0.0	113.1	213.0	182.5	159.6	140.9	127.0	115.1
Accidentabilidad (I.A.)	0.00	0.00	0.00	0.00	13.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Índice de Accid. Acumulado	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.84	0.62	0.47	0.37	0.30	0.25

Tabla 22. Monitoreo de los índices de seguridad (marzo a noviembre – 2023)

En la tabla 22, se aprecian todos los índices de seguridad: Frecuencia, severidad y accidentabilidad; donde tanto el índice de frecuencia como severidad trabajaron en función a los días y cantidad de accidentes incapacitantes y mortales.

Según la tabla antes señalada, no se habían suscitado accidentes severos por efectos sísmicos ya que el personal es advertido de estos por medio del sistema de alerta temprana. El último evento no deseado por la sismicidad se dio en mayo del presente mes.

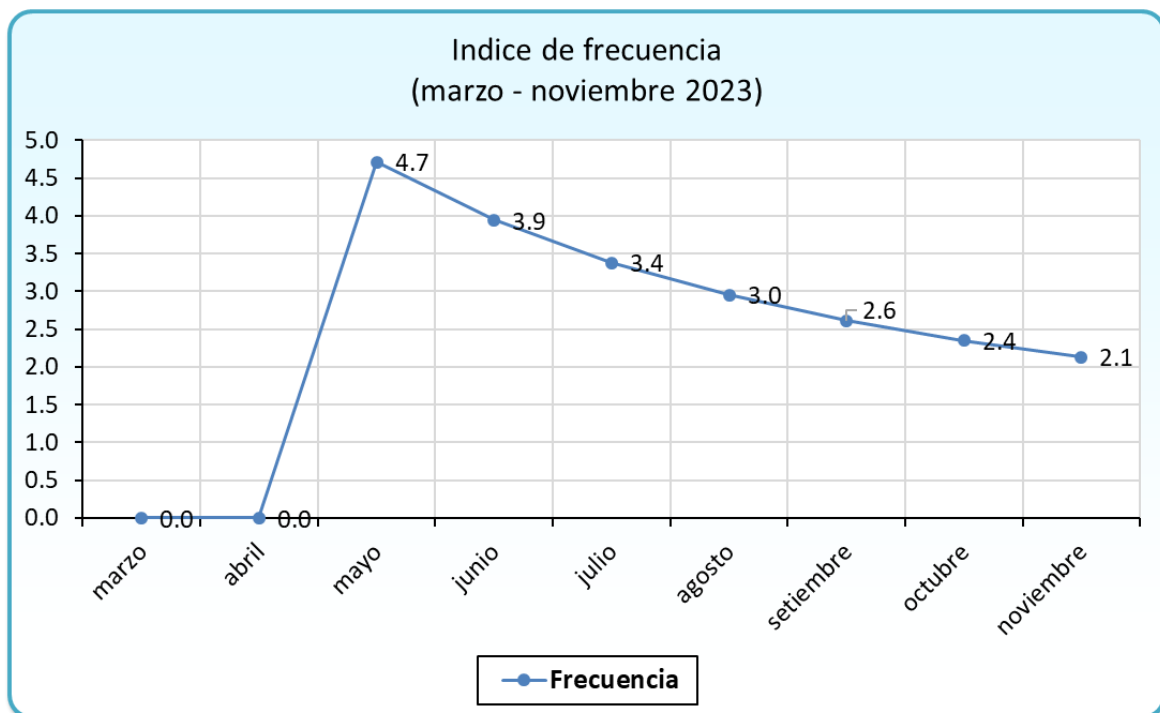


Figura 27. Índice de frecuencia acumulado (marzo – noviembre 2003)

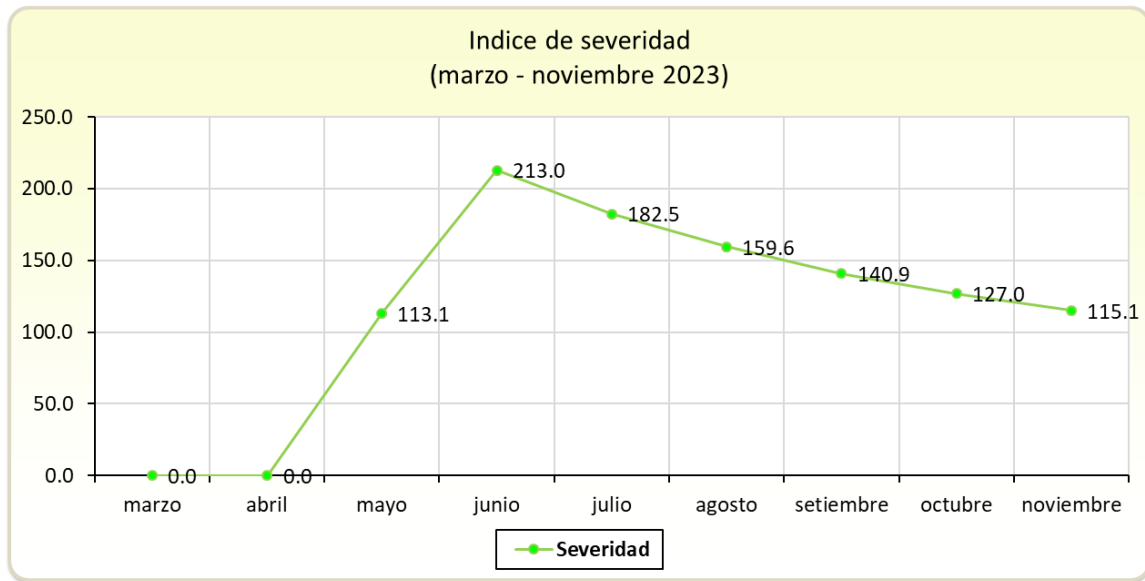


Figura 28. Índice de severidad acumulado (marzo – noviembre 2003)

Descripción	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov
Número de trabajadores	205	205	207	211	209	216	218	216	209
Incidente con primeros auxilios Nv. 1400	2	2	2	3	2	2	1	1	0
Incidente con primeros auxilios Nv. 1450	2	3	2	3	3	3	1	2	1
Incidente con primeros auxilios Nv. 1467	2	2	4	3	2	3	2	2	2
Total IPA's	6	7	8	9	7	8	4	5	3
IPA	0.029	0.034	0.039	0.043	0.033	0.037	0.018	0.023	0.014

Tabla 23. Detalle del índice de incidentes con primeros auxilios (marzo– noviembre 2003)

V. DISCUSIÓN

5.1. Con respecto a la efectividad del sistema de alerta temprano, este estuvo relacionado al tiempo estimado con el cual uno es evacuado a una zona segura; por tal, fue de gran importancia definir el tiempo de evacuación. Para el presente estudio se estimaron 15 minutos como tiempo máximo de evacuación hasta buen resguardo al salir a superficie. Este tiempo fue establecido, mediante simulaciones por el área de geofísica donde el trabajador transita en 15 minutos, un radio de un kilómetro de distancia. Este dato histórico sirvió para definir un valor pre-establecido; al igual que la entidad de Servicio Integrado de Seguridad ECU 911 (2016), que se valió de su información histórica para determinar el tiempo esperado de arribo menor a 15 minutos para niveles elevados de alerta en función a la magnitud del evento y tiempo de impacto en casos de tsunamis con sismos. Cuando el monitoreo era manual (marzo a junio), el tiempo de evacuación sobrepasaba los 45 minutos, debido a retrasos en el recabado y envío de información para su visto bueno en la central y proceder con el aviso vía radial. Una vez automatizado el proceso (agosto a noviembre), las mejoras se reflejaron en el tiempo de evacuación, logrando alcanzar el 100% en promedio. Todos los softwares empleados para detectar eventos sísmicos cuentan con registros de horas de grabación para materializar el tiempo en que los eventos sísmicos se presentaron con fines de determinar el tiempo en que demoran ser comunicados y poner en alerta al personal durante la evacuación.

Los valores para cada nivel de alerta los determinó el software a emplear; por ejemplo, Uriarte et al (2021, párr.4), sostiene que el valor mínimo que activa la alarma del software AUDAS parte desde 6.0; en cambio el software SCADA, empleado en la presente investigación, marcha a partir de 4.0 considerado como un nivel fuerte. Lo mismo sucedió con los valores de las escalas de intensidad con nivel moderado, para el software AUDAS adoptó valores de entre 4.5 y menor a 6.0; mientras que para la plataforma digital SCADA, el valor considerado como nivel moderado estuvo entre 0.72 y menor a 4.0. Esto quiso decir que es leve o casi imperceptible para SCADA cuando los valores están por debajo de 0.72 km/h: para la plataforma

AUDAS se consideraron menores a 4.5 con daños menores, adoptando semáforos de color verde para fines de estadística de eventos totales. La metodología de emplear alertas por medio de colores de semáforos también lo menciona Chairez y Muñoz (2015) en su artículo de investigación basado en una plataforma de monitoreo netamente personalizado donde se puede hasta realizar el seguimiento del personal con sus propios nombres.

En el mercado existen otros programas de monitoreo sísmico, es el caso de SeismoSuit, al igual de casi todos los programas, logran escanear la mina generando tomografías. SeismoSuit puede hasta detectar daños en tuberías como consecuencia del evento sísmico (Eppers, 2020), este programa cuenta con estaciones de registros de datos por medio de un digitalizador sísmico con alta capacidad de almacenaje y transmisión asegurada de información gracias a su registrador transitorio K-UTEC GeoLog que transfiere toda la data en tiempo real al servidor de procesamiento. Este servidor genera de manera automática las alertas que, en el mejor de los casos de efectividad, pueden estar paralelamente conectadas a sistemas de alerta dentro de mina

- 5.2. Con respecto a la automatización del proceso de monitoreo sísmico, este fue directamente eficiente a medida que se realizaban más monitoreos, eso quiere decir que mientras mayor fue la asistencia a la vigilancia sísmica, mayor fue también la eficiencia del monitoreo por día y mes. La manera de manejar esta vigilancia fue por medio de la telemetría; como lo señaló Uriarte et al (2021, párr. 2), pueden existir instrumentos de monitoreo instalados, pero si estos no están conectados hacia superficie, no se llevaría a cabo registros netamente automatizados sino solo de manera puntual. Los resultados obtenidos antes de la automatización, no proporcionan mayor información ante la detección de eventos sísmicos ya que el monitoreo es puntual y no constante; perdiéndose información valiosa en el tiempo, como es la existencia de eventos ocurridos de nivel grave y muy grave, generando una falta sensación de seguridad cuando no resulta en daño; pero si logrando exponer al personal cuando el monitoreo no se lleva a cabo justamente el día que se suscita el evento. La apuesta por la tecnología de

la telemetría en la eficacia de la comunicación tras pasa barrera, es el caso de la comunicación vía ZigBee mediante redes inalámbricas y uso de la fibra óptica como la mejor elección para una comunicación sin interferencias como lo plantea Chairez y Muñoz (2015) durante el monitoreo de recursos en una industria minera.

Según sea necesario las intenciones de estudio, el monitoreo puede ser de manera permanente o temporal; en el presente caso su fin es ser permanente; según Eppers (2022), el monitoreo es temporal para casos particulares como por ejemplo acondicionar o controlar una actividad determinada como es la producción por horas a la semana; en cambio el monitoreo de eventos sísmicos, toma un tratamiento más exhaustivo y delicado, ya que los resultados de este van a depender vidas humanas por tal debe ser constante la vigilancia telúrica.

- 5.3. Por otro lado, por medio de la automatización del proceso de monitoreo de actividades sísmicas se logró evitar accidentes con lesiones incapacitantes que hubieran incrementado el índice de accidentabilidad, según Pérez y Alvear (2022), la exposición de personal ante el peligro se minimiza incluido la presencia del personal monitor, ya que no necesita realizar la tarea de monitoreo dentro de la zona crítica. Según Zanabria (2021, p. 73), al identificar zonas vulnerables a partir de un monitoreo automatizado de eventos sísmicos por medio de sensores que activan una alerta, facilitan la evacuación del personal y por ende se toman medidas preventivas inmediatas, evitando la ocurrencia de accidentes que interrumpen o dañan la integridad del trabajador.

La estadística de accidentes, resultante de eventos sísmicos como por ejemplo el estallido de rocas con desprendimiento de roca, a pesar de ser un escenario fortuito en el desarrollo habitual de las actividades en interior mina, este concluye en por lo menos accidentes incapacitantes; que elevan el índice de accidentabilidad; según en la Revista Horizonte Minero, Eppers (2020, párr. 1) señala que: “Según las estadísticas de accidentes mortales reportados entre los años 2015 y 2019, un promedio de 37% de los

accidentes fatales en la mediana y gran minería ocurrieron por desprendimiento de rocas y derrumbes o deslizamientos”.

- 5.4. Los umbrales reportados como niveles leves y moderados, permitieron detectar eventos desencadenantes que pudieron lastimar al trabajador al momento de realizar su trabajo incrementando los incidentes con primeros auxilios, por ende aumentando el índice IPA; por lo que fue necesario contar con controles en el comportamiento del macizo rocoso para aislar al personal y evitar así incidencias, según lo señala Zanabria (2022, p. 73) en su intento por definir la influencia del monitoreo sísmico en el comportamiento del macizo rocoso en una mina donde son frecuentes los eventos sísmicos en áreas frágiles en túneles y pilares de minas subterráneas. Para evitar estas exposiciones del personal, fue de vital importancia además contar con planes de activación para evitar los niveles de riesgo.

Por medio de la detección de eventos y la evaluación de los incidentes de seguridad, se lograron mejores planificaciones de emergencias como parte de la gestión de riesgos, como lo asevera el Servicio integrado de seguridad ECU 911 (2016, p. 67), entidad que implementó puestos de atención bien equipados con teléfonos, auriculares y terminales de PC (Servicio integrado de seguridad ECU 911, 2016, p. 86).

VI. CONCLUSIONES

- 6.1. El nuevo sistema de alerta temprana fue más efectivo que el manual, ya que mejoró su efectividad tras la automatización, de 25.45% hasta el 100% ante la detección temprana de eventos sísmicos; por haber reducido el tiempo de evacuación de una hora en promedio a 15 minutos, por el envío de reportes en tiempo real y por ende una respuesta más oportuna frente a la evacuación del personal.
- 6.2. La automatización del proceso de monitoreo sísmico, mejoró la eficiencia del monitoreo tradicional de eventos sísmico a 96.69% en promedio, esto representó 05 veces la eficiencia obtenida con el método tradicional (18.82%) dentro de un mes, prescindiendo del recurso humano en campo; ya que el monitoreo se realizó fuera de mina.
- 6.3. La automatización del proceso de monitoreo de actividades sísmicas mejoró la gestión de seguridad con la reducción del índice de accidentabilidad en promedio de 0.69 a 0.35, ya que no se había suscitado accidente alguno como consecuencia de un evento sísmico.
- 6.4. De igual manera, se minimizó el índice IPA de incidentes con primeros auxilios (IPA) de 0.037 a 0.023; con la reducción de incidentes con prestaciones de primeros auxilios en los diferentes niveles de trabajo:1400, 1450 y 1467; siendo estos dos últimos niveles donde se habían producido la mayor cantidad de eventos sísmicos.

VII. RECOMENDACIONES

- Es importante que los trabajadores estén capacitados en dar respuesta a sistemas de alerta temprana por medio de simulaciones en interior mina para garantizar su efectividad. La efectividad del sistema de alerta temprano puede aún mejorarse y es mediante un sistema de alerta instalado dentro de mina, que es activado automáticamente y en paralelo una vez que el servidor de procesamiento de datos, emite la alerta.
- También se recomienda continuar con la prolongación del cableado a medida que la mina se profundiza, para garantizar la eficiencia del monitoreo sísmico. Es de gran importancia contar con el suministro de energía eléctrica en interior mina para avalar el continuo funcionamiento de los equipos de monitoreos instalados estratégicamente.
- Se recomienda la implementación de sistemas de monitoreo sísmico automatizados en todas las operaciones mineras para mejorar la seguridad del personal y la eficiencia en las operaciones mineras. Adicionalmente, para mejorar las prestaciones de comunicación fuera de mina, se recomienda contar con la operatividad de radios portátiles, auriculares, conexión de internet estable para garantizar la comunicación desde superficie.
- Se sugiere la investigación y desarrollo de soluciones similares para otras industrias que enfrentan riesgos sísmicos, como la construcción y la energía.

REFERENCIAS

ALZATE BUITRAGO, Alejandro, BERMÚDEZ GARCÍA, Laura, CEBALLOS OSORIO, Sergio; NARANJO GORDO, Edward y RENDÓN MUÑOZ, Valentina. *Evaluación de las propiedades mecánicas de macizos rocosos que afloran en el Municipio de Pereira*. Director: Alejandro Alzate Buitrago, Alejandro [tesis de postgrado]. Universidad Libre de Colombia, 2020, [Fecha de consulta: 29 de mayo 2023]. Disponible en <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/22510>

ARROYO HIDALGO, Ivonne y LINKIMER ABARCA, Lepolt. Modelo unidimensional de velocidades sísmicas y características tomográficas tridimensionales del Caribe Sur de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. [Artículo], Universidad de Costa Rica, 26 de febrero de 2021, [Fecha de consulta: 08 de junio 2023]. Disponible en <https://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/83440>

ATENCIA ROSAS-RETUERTO, Nadia y GARCÍA CARHUAS, Celia. *Indicadores de gestión de seguridad y salud para mejorar el desempeño del trabajo, lima metropolitana, año-2019*. Director: Enrique Torres Pérez, [tesis de pregrado], Universidad Ricardo Palma, 2019. [Fecha de consulta: 14 de marzo 2023]. Disponible en <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/2581>

BERNAL RUIZ, Néstor. *Automatización del equipo de simulación sísmica uniaxial del laboratorio de estructuras*. Director: Julián Carrillo L, Co-director: Jorge Aponte R. [tesis de pregrado]. Universidad Militar Nueva Granada, 2013, [Fecha de consulta: 21 de mayo 2023]. Disponible en <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/10964>

BERROCAL, Miguel. Mitigación del estallido de roca en excavaciones subterráneas. *Seguridad Minera*, Seguridad Minera, 11 de junio de 2020, [en línea]. [Fecha de consulta: 14 de julio 2023]. Disponible en <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/mitigacion-del-estallido-de-roca-en-excavaciones-subterraneas/>

CASTELLANO SANCHEZ, Carlos y MAQUE VILCA, Artemio. *Proyecto de ampliación de operaciones para incrementar la capacidad de producción de una*

pequeña mina subterránea [tesis de pregrado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2023, [Fecha de consulta: 21 de mayo 2023]. Disponible en <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/593570>

CANIUPAN, Nadia. *Estudio de sismicidad local en la región de Magallanes, utilizando la red sísmológica de ENAP* [tesis de pregrado]. Universidad de Concepción, 2021, [Fecha de consulta: 28 de abril 2023]. Disponible en https://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2021/10/Tesis_NadiaCaniupan.pdf

CERECEDA, E. *Análisis de vibración y cálculo del modelo de atenuación para la optimización de perforación y voladura en la unidad minera de Uchucchacua* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2015, [Fecha de consulta: 21 de mayo 2023]. Disponible en <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/9295adc8-39e4-4736-9fd2-5e4f535d46fc/content>

CUTIPA, G. *Análisis de los niveles de ruido sísmico en estaciones sísmicas de banda ancha de la red sísmica Nacional del Perú* [tesis de pregrado], Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2006, [Fecha de consulta: 29 de mayo 2023]. Disponible en <https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/1305/tesisCutipa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CHAIREZ, M. Y MUÑOZ, E. Plataforma de monitoreo de recursos basada en gestión de conocimiento dentro de la industria minera. *Recibe*, 1 de febrero de 2015, [Fecha de consulta: 21 de mayo 2023]. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/5122/512251501007.pdf>

CHEN, J., WANG, J. Y LI, Y. Una revisión de la automatización del monitoreo sísmico para la seguridad de la minería subterránea. *Revista de vibraciones y choques*, 2020, [Fecha de consulta: 28 de abril 2023]. Disponible en <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/9313>

DE LUZ, S. Cable Ethernet vs fibra óptica plástica: cuándo es mejor usar cada uno, *RZ*, 18 de agosto de 2022, [Fecha de consulta: 16 de mayo 2023]. Disponible en <https://www.redeszone.net/noticias/redes/cable-ethernet-vs-fibra-optica-plastica-usar/>

EPPERS, Oswaldo. Monitoreo microsísmico, *Horizonte Minero*, 15 de diciembre de 2020, [en línea]. [Fecha de consulta: 10 de junio 2023]. Disponible en <https://www.horizonteminero.com/monitoreo-microsismico/>

FALLA, N. *Riesgos laborales en minería a gran escala en etapas de prospección - exploración de metales y minerales en la región sur este del Ecuador y propuesta del modelo de gestión de seguridad y salud ocupacional para empresas mineras en la provincia de Zamora Chinchipe* [tesis de postgrado]. Universidad Central del Ecuador, 2012, [Fecha de consulta: 15 de mayo 2023]. Disponible en <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/861>

FERNÁNDEZ, F. "Sistema de monitoreo sísmico para reducir los estallidos de rocas", Cámara Minera del Perú, 2014, [Fecha de consulta: 30 de junio 2023]. Disponible en <https://camaraminera.com.pe/la-camara-minera-del-peru-impulsa-laimplantacion-de-los-sistemas-de-monitoreo-sismico-para-reducir-losestallidos-de-rocas/>

GONZÁLES DE MENDOZA, L. *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall, 2015, [Fecha de consulta: 21 de mayo 2023]. Disponible en https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%2002.pdf

GONZÁLES–HUIZAR, Héctor. *Los grandes terremotos de México* [Discurso principal]. La Olimpiada XXIV de Ciencias de la Tierra, Baja California, México, 2019, [Fecha de consulta: 30 de abril 2023]. Disponible en https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Representacion-del-movimiento-que-causan-los-tres-tipos-de-ondas-sismicas-La_fig9_336409467

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A., 6ta ed., 2014, [Fecha de consulta: 16 de mayo 2023]. Disponible en <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. IGP informa: Perú: país altamente sísmico, 03 de junio de 2022. [Fecha de consulta: 22 de junio del 2023], [Fecha de consulta: 08 de mayo 2023]. Disponible en <https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/615872-igp-informa-peru-pais-altamente-sismico>

FROLOV, Alexander. Excel Average function to find arithmetic mean. 31 de enero de 2023. Disponible en <https://www.ablebits.com/office-addins-blog/excel-average-function/>

K-UTEC AG SALT TECHNOLOGIES (2018), Seismic Monitoring for Geothermal Plants, 2018, [on line]. [Fecha de consulta: 23 de mayo 2023]. Disponible en <https://bit.ly/3ekVxlx>

LIU, Y., ZHANG, Y. Y LI, J. Un novedoso sistema de monitoreo sísmico y alerta temprana para la seguridad en minería subterránea. *Ciencias de la seguridad*, 134, 104844, [Fecha de consulta: 21 de mayo 2023]. [https://www.thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045\(20\)30673-2/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045(20)30673-2/fulltext)

LÓPEZ, P. (2004). Población muestra y muestreo. *Punto Cero*, 2004, [Fecha de consulta: 27 de mayo 2023]. Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012

MEREGILDO, J. (04 de junio de 2021). La Libertad: dos mineros mueren y seis quedan heridos en derrumbe. *La República*, 04 de junio de 2021, [Fecha de

consulta: 12 de junio 2023]. Disponible en <https://larepublica.pe/sociedad/2021/06/04/la-libertad-dos-mineros-mueren-y-seis-quedan-heridos-en-derrumbe-lrnd>

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, Ministerio de Energía y Minas, 2017, [Fecha de consulta: 23 de mayo 2023]. Disponible en https://minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/LEGISLACION/2016/RSSO_2017.pdf

PERALTA, G. Y MOJICA, R. (2014). *Características y control de las vibraciones producidas por acción de las voladuras en minas a cielo abierto*, [Tesis de pregrado]. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2014, [Fecha de consulta: 19 de marzo 2023]. Disponible en https://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_sogamoso/pregrado/minas/documentos/CARATERISTICAS_Y_CONTROL_DE_LAS_VIBRACIONES_PRODUCIDAS_POR_ACCION_DE_LAS_VOLADURAS_EN_MINAS_A_CIELO_ABIERTO.do.pdf

PÉREZ, A. Y ALVEAR, R. *Implementación de un prototipo de Sistema de Monitoreo Distribuido de Concentración de Gases en la Industria Minera Subterránea de Carbón* [Tesis de pregrado]. Universidad Libre de Colombia, 2022, [Fecha de consulta: 08 de junio 2023]. Disponible en <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/23795>

PIMIENTA, J. *Metodología del análisis de correlación y regresión lineal simple aplicados al caso acción de Ecopetrol y los precios internacionales del petróleo* [Tesis de pregrado]. Universidad de Cartagena, 2016, [Fecha de consulta: 23 de mayo 2023]. Disponible en <https://repositorio.unicartagena.edu.co/handle/11227/5843>

PRONÓSTICO EXPERTO. Introducción a las métricas para la medición de la asertividad y errores de pronósticos. *Pronóstico Experto*, 2010, [Fecha de consulta:

21 de mayo 2023]. Disponible en <https://www.pronosticoexperto.com/cptometricas-medicion-asertividad>

PORRAS, R. *Automatización con PLC y SCADA del proceso de chancado en la minera Aurífera Retamas SA*. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Centro de Perú, 2010, [Fecha de consulta: 21 de mayo 2023]. Disponible en <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3603>

RÍOS, D. Implementación del sistema integrado de gestión para mejorar la productividad en la empresa Extreme Services SAC - CIA Minera Antamina [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, 2016, [Fecha de consulta: 23 de mayo 2023]. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1849>

ROMERO, D. *Análisis de sismicidad inducida en mina subterránea Rio Blanco sector Norte III panel áreas 15, 16 y 17 nivel 16 hundimiento Codelco división Andina* [Tesis de pregrado]. Universidad de Concepción, 2012, [Fecha de consulta: 12 de marzo 2023]. Disponible en https://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2013/07/romero_diego_tesis.pdf

RUIZ, A. Y SUÁREZ, F. *Diseño del modelo predictivo de vibraciones por voladura en una mina de oro a tajo abierto en Cajamarca, 2021* [Tesis de pregrado]. Universidad Privada del Norte, 2021, [Fecha de consulta: 27 de marzo 2023]. Disponible en <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/28248/Ruiz%20Altamirano%2C%20Alexis%20Armando%20-%20Suarez%20Arrivasplata%2C%20Fresia%20Marina.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SAMYN, L. La fibra óptica: una pieza clave en la automatización industrial. *Diario TI*, 6 de enero de 2023, [Fecha de consulta: 19 de abril 2023]. Disponible en <https://diarioti.com/la-fibra-optica-una-pieza-clave-en-la-automatizacion-industrial/121387>

SERVICIO INTEGRADO DE SEGURIDAD ECU 911. Sistema de alerta temprana para eventos de tsunami y control de represas, agosto de 2016, [Fecha de consulta: 08 de junio 2023]. Disponible en <https://www.ecu911.gob.ec/wp-content/uploads/2018/04/Informe-Fase-1-Proyecto-SAT.pdf>

SMITH, J. La automatización del proceso de monitoreo de la actividad sísmica en la gestión de la seguridad minera: una revisión. Nueva York, NY: Springer. *Rumbo Minero*, 2023, [Fecha de consulta: 16 de mayo 2023]. Disponible en <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/actualidadempresarial/automatizacion-del-sistema-de-monitoreo-sismico-deestructuras-importantes-en-proyectos-del-peru/>

TORRES, Y. (2020). Sistema de Monitoreo Remoto para la Optimización del Registro de Deslizamiento de Taludes en Tiempos de Inmovilidad Social en Minera Gold Fields, Región Cajamarca, Universidad Cesar Vallejo, 2020, [Fecha de consulta: 21 de marzo 2023]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/88246/Torre_DYM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

URIARTE, R., CASAS, D. Y PARRA, D. Automatización del sistema de monitoreo sísmico de estructuras importantes en proyectos del Perú. *Rumbo Minero*, 25 de junio de 2021, [Fecha de consulta: 08 de abril 2023]. Disponible en <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/actualidadempresarial/automatizacion-del-sistema-de-monitoreo-sismico-de-estructuras-importantes-en-proyectos-del-peru/>

UNDERMIN. Monitoreo con sismógrafo Instantel para túneles y metros, (sin fecha), [en línea], [Fecha de consulta: 17 de abril 2023]. <https://undermin.com/monitoreo-con-sismografo-instantel-para-tuneles-y-metros/>

VELÁSQUEZ, J. Evaluación PPV SSM Estrella, 2023, [Diapositiva PowerPoint] 2023, [Fecha de consulta: 24 de julio 2023].

ZANABRIA MEJÍA, Davis Jamis. *Análisis del monitoreo microsísmico y su influencia en el comportamiento del macizo rocoso en la Unidad Minera Americana Alpayana S. A. – 2021*. Director: Tantavilca Martínez Nélica [Tesis de pregrado]. Universidad Continental, Huancayo, 2021, [Fecha de consulta: 21 de marzo 2023]. Disponible en <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10815>

ZHANG, W., PAN, L., & WANG, X. Automation of seismic monitoring and early warning for underground mining safety: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(4), 703-714, [Fecha de consulta: 16 de junio 2023]. Disponible en <https://www.hindawi.com/journals/sv/2019/5803184/>

ZHANG, Y., LIU, Y., & LI, J. Automation of seismic monitoring and early warning system for underground mining safety: A state-of-the-art review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, [Fecha de consulta: 15 de mayo 2023]. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Miao-Yu50/publication/341402946_Geosciences_in_Central_South_University_A_state-of-the-art_reviewzhongnandaxuedeqiukexuejinzhanyuqianyan/links/5edef230a6fdcc476890a25d/Geosciences-in-Central-South-University-A-state-of-the-artreviewzhongnandaxuedeqiukexuejinzhanyuqianyan.pdf

ZHANG, Y., LI, J., & WANG, Y. A novel approach for automation of seismic monitoring and early warning system in underground mining. *Safety Science*, 2020, 123, 104778, [Fecha de consulta: 21 de abril 2023]. <https://www.mdpi.com/20763417/10/8/291>

Anexo 1. Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicador	Fórmula	Escala
Automatización del proceso de monitoreo sísmico	La automatización efectiva en los procesos productivos requiere de la integración de tres componentes esenciales: detección de información sobre el funcionamiento de la maquinaria y equipo, procesamiento de dicha información y control (Bermúdez, 2020)	La automatización en minas, integra tres capas tecnológicas que interactúan, este modelo es ampliamente usado en procesos industriales, supervisión con un monitoreo constante, establecer la comunicación con la central (Zhang et al., 2020)	Efectividad del sistema de alerta temprano	E.A.T.	$\frac{\text{Tiempo de evacuación estimada}}{\text{Tiempo de evacuación real}}$	Razón
			Eficiencia del monitoreo de eventos sísmicos	E.M.S.	$\frac{\text{Cantidad de días de monitoreo sísmico}}{\text{Cantidad de días por mes}}$	Razón
Gestión de la seguridad minera	La seguridad dentro de las organizaciones es el conjunto de medidas que toda empresa debería tomar por el bienestar de los colaboradores (Pérez, 2017)	Proceso de planificar, implementar y supervisar actividades para proteger los activos, mitigar riesgos y garantizar la integridad, implementar controles apropiados para prevenir, detectar y responder a incidentes.	Índice de accidentabilidad	I.A. (IF: Índice de frecuencia, IS: Índice de severidad)	$(IF*IS)/1000$	Razón
			Incidentes con primeros auxilios	I.P.A.	$\frac{\text{Número de incidentes con primeros auxilios}}{\text{Número total de trabajadores}}$	Razón

Anexo 2. Evaluación por juicio de expertos



CERTIFICADO DE VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO QUE MIDE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MONITOREO DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA GESTIÓN DE LA SEGURIDAD MINERA

VARIABLE / DIMENSIÓN	Pertinencia (1)		Relevancia (2)		Claridad (3)		Sugerencias
	Si	No	Si	No	Si	No	
Variable Independiente: Automatización del Proceso de Monitoreo Sísmico	Si	No	Si	No	Si	No	
Dimensión 1: Efectividad del sistema de alerta temprano	X		X		X		
Dimensión 2: Eficiencia del monitoreo de eventos sísmicos	X		X		X		
Variable Dependiente: Gestión de la Seguridad Minera	Si	No	Si	No	Si	No	Sugerencias
Dimensión 1: Índice de accidentabilidad	X		X		X		
Dimensión 2: Incidentes con primeros auxilios	X		X		X		

Observaciones (precisar si hay suficiencia): Es pertinente: Hay Suficiencia

Opinión de aplicabilidad: Aplicable [X] Aplicable después de corregir [] No aplicable []

Apellidos y Nombres del Juez Validador: Ing. Rony E. Huarcaya Martínez DNI: 41149161

Especialidad del Validador: Ingeniero de Minas

23 de Noviembre del 2023



 Ing. Rony E. Huarcaya Martínez
 GERENTE DE OPERACIONES
 Firma de Experto Validante
 CIP. 148653

1 Pertinencia: El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

2 Relevancia: El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo.

3 Claridad: Se entiende, sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo.

Nota: Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes.

**CERTIFICADO DE VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO QUE MIDE
AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MONITOREO DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA
EN LA GESTIÓN DE LA SEGURIDAD MINERA**

VARIABLE / DIMENSIÓN	Pertinencia (1)		Relevancia (2)		Claridad (3)		Sugerencias
	Si	No	Si	No	Si	No	
Variable Independiente: Automatización del Proceso de Monitoreo Sísmico	Si	No	Si	No	Si	No	
Dimensión 1: Efectividad del sistema de alerta temprano	X		X		X		
Dimensión 2: Eficiencia del monitoreo de eventos sísmicos	X		X		X		
Variable Dependiente: Gestión de la Seguridad Minera	Si	No	Si	No	Si	No	Sugerencias
Dimensión 1: Índice de accidentabilidad	X		X		X		
Dimensión 2: Incidentes con primeros auxilios	X		X		X		

Observaciones (precisar si hay suficiencia): Es pertinente: Hay Suficiencia

Opinión de aplicabilidad: Aplicable [X] Aplicable después de corregir [] No aplicable []

Apellidos y Nombres del Juez Validador: Ing. Jose. J. Pareja Bautista DNI: 71742965

Especialidad del Validador: Ingeniero Industrial

23 de Noviembre del 2023



JOSE JOSIMAR
PAREJA BAUTISTA
Ingeniero Industrial
CIP N° 263933

Firma del Experto Informante

1 Pertinencia: El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

2 Relevancia: El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo.

3 Claridad: Se entiende, sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo.

Nota: Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes.

**CERTIFICADO DE VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO QUE MIDE
AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MONITOREO DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA
EN LA GESTIÓN DE LA SEGURIDAD MINERA**

VARIABLE / DIMENSIÓN	Pertinencia (1)		Relevancia (2)		Claridad (3)		Sugerencias
	Si	No	Si	No	Si	No	
Variable Independiente: Automatización del Proceso de Monitoreo Sísmico	Si	No	Si	No	Si	No	
Dimensión 1: Efectividad del sistema de alerta temprano	X		X		X		
Dimensión 2: Eficiencia del monitoreo de eventos sísmicos	X		X		X		
Variable Dependiente: Gestión de la Seguridad Minera	Si	No	Si	No	Si	No	Sugerencias
Dimensión 1: Índice de accidentabilidad	X		X		X		
Dimensión 2: Incidentes con primeros auxilios	X		X		X		

Observaciones (precisar si hay suficiencia): Es pertinente: Hay Suficiencia

Opinión de aplicabilidad: Aplicable [X] Aplicable después de corregir [] No aplicable []

Apellidos y Nombres del Juez Validador: Ing. Eddy D. Honorio Torres DNI: 43559275

Especialidad del Validador: Ingeniero de Minas

23 de Noviembre del 2023



Firma del Experto Informante

1 Pertinencia: El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

2 Relevancia: El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo.

3 Claridad: Se entiende, sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo.

Nota: Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes.

Anexo 3. PETS de instalación de sensores sísmicos y lechada de taladros

PETS: INSTALACIÓN DE SENSORES SÍSMICOS Y LECHADA DE TALADROS		U.P. MARAÑÓN CMPSA
Área: Servicios Mina	Versión: 01	
Código: SERV-PETS-01	Página 1 de 3	

1. PERSONAL

Este procedimiento es de aplicación de todo trabajador que realiza la instalación de sensores sísmicos, Supervisores de Operación, Jefes de Turno, Ingeniero Residente de obra, Ingeniero de Seguridad y Asistente de Seguridad. Es de conocimiento del Gerente General de la empresa.

2. EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

Casco con portalámparas y barbiquejo, correa porta lámpara, lámpara a batería, ropa de trabajo con cintas reflectivas, respiradores contra polvo, botas de jebe con punta de acero, guantes de protección (tipo Kevlar y cuero), tapones de oído y lentes de seguridad de malla y acrílicos (claros y oscuros).

3. EQUIPO/HERRAMIENTAS/MATERIALES

Equipos

- 3.1 Bomba inyectora (Lechadora) de cemento
- 3.2 Máquina perforadora Jackleg
- 3.3 Plataforma de perforación
- 3.4 Radio portátil
- 3.5 Cámara fotográfica.
- 3.6 Detector multigases MSA Altair

Herramientas

- 3.7 Alicata universal de punta
- 3.8 Alicata de corte
- 3.9 Destornillador plano y estrella

- 3.10 Llaves Allen
- 3.11 Llave inglesa, Stilson
- 3.12 Martillo de carpintero
- 3.13 Navaja
- 3.14 Tubo PVC de ¾" de 3.0m
- 3.15 Vara metálica cuadrada de 2m
- 3.16 Cucharilla
- 3.17 Saca barreno y brocas
- 3.18 Comba de 6 lb
- 3.19 Disco de jebe
- 3.20 Flexómetro

Materiales:

- 3.21 Cemento
- 3.22 Cable uniaxial, triaxial
- 3.23 Sensor Geófono 4.5 Hz
- 3.24 Brocas de botones: 36, 51, 61 y 72mm
- 3.25 Barra cónica de 2, 4, 6 y 8'
- 3.26 Pintura spray
- 3.27 Aceite torcula grado 100
- 3.28 Mangueras de jebe de 1" (aire) y ½ "(agua)
- 3.29 Llaves de control de agua y aire (bushing)

4. PROCEDIMIENTO

ANTES:

- 4.1 El trabajador debe verificar sus EPP's antes de ingresar al turno de trabajo.
- 4.2 Inspeccionar el área de trabajo y registrar en el formato de IPERC continuo.
- 4.3 El área de trabajo debe estar ventilada, ordenada, desatada y sostenida.
- 4.4 En la zona de interés; el departamento de Geomecánica designa los puntos de monitoreo y escribe con pintura spray leyendas que especifica el tipo de geófono a instalar, ángulo de inclinación y longitud del taladro y diámetro de broca.

- 4.5 Marcar los taladros para su perforación en hastiales o frente. El marcado será por encima de la gradiente hasta 1.20m del piso.
- 4.6 Verificar el nivel de aceite en la lubricadora, en caso lo requiera, abastecer.
- 4.7 Sujetar manguera y abrir las válvulas respectivas para sopletear.
- 4.8 Empatar mangueras de aire y agua a las máquinas perforadoras, verificar que las válvulas de agua y aire estén cerradas, y usar los bushing en ambas conexiones (agua y aire).
- 4.9 Probar máquina perforadora en vacío con rotación lenta, coordinando entre perforista y ayudante.
- 4.10 Armar la plataforma de perforación.
- 4.11 Instalar la máquina perforadora y ubica el pie de la barra de avance sobre la plataforma de trabajo.
- 4.12 Abrir la válvula de bloqueo de aire comprimido ubicada en el codo de ingreso de aire de la máquina Jackleg.
- 4.13 Colocar la barra de perforación de 2 o 4 y luego de 6 pies a la máquina perforadora con su respectivo disco protector de jebe y broca descartable.
- 4.14 La inclinación de los taladros es negativa a 45°
- 4.15 Los taladros deben direccionarse perpendicular a la superficie donde se marca.

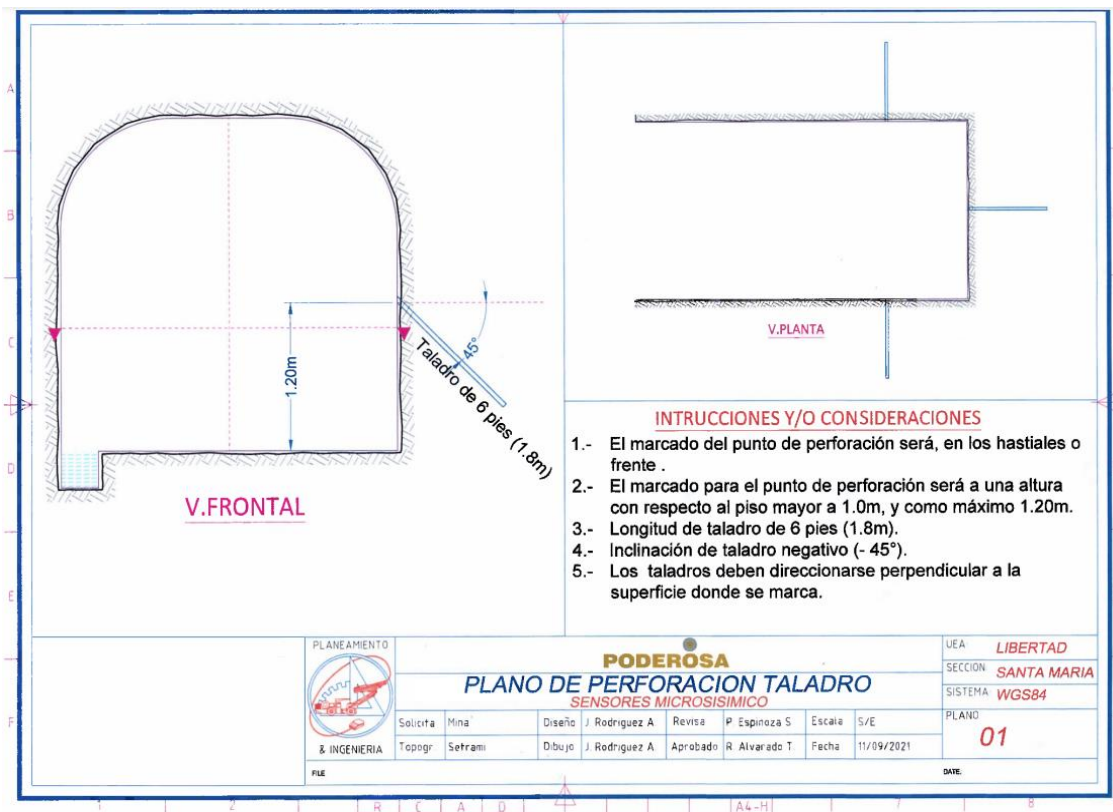


Figura 1. Plano de perforación del taladro para sensores sísmicos

Nota. Los taladros se realizan con una inclinación negativa en los hastiales y frentes de la labor, facilitando el inyectado de lechada de cemento. Obtenido del Área de Planeamiento & Ingeniería / Departamento de Geomecánica – CMPSA

4.16 Iniciar el emboquillado de los taladros con rotación lenta, donde el ayudante sujeta la barra de perforación detrás del disco de jebe, hasta pasar la barra de 6pies; luego cambiar de broca por 51, 61 o 72mm (dependiendo del tipo de geófono) y repetir el paso hasta perforar toda la longitud total (6pies).

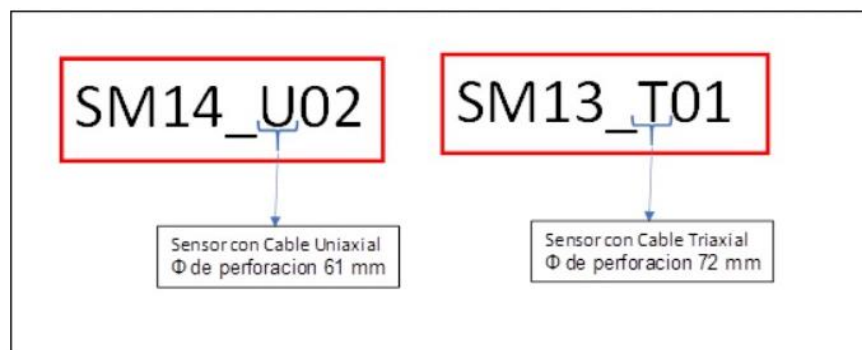


Figura 2. Codificación de taladros de sensores sísmicos

La codificación de sensores es determinada por el Departamento de Geomecánica – CMPSA, donde se especifica el diámetro de la broca según el tipo de sensor. Estos detalles los hace alcanzar por correo al contratista asignado, quién preparará un Gantt teniendo un plazo aproximado de 15 a 20 días para realizarlo.

4.17 Cerrar válvulas de agua y aire, retirar máquina Jackleg

4.18 Desempatar y enrollar mangueras.

DURANTE:

4.19 Introducir el sensor deslizando lentamente por el taladro inclinado hasta lograr la ubicación final del sensor; el kit de instalación cuenta con una vara metálica acoplable para casos de giro y longitudes mayores a 2.0m.



Figura 3. Ingreso de geófono triaxial en un taladro

El geófono triaxial de alta resistencia a las intemperies propias de la mina, es alojado manualmente. Existen otros modelos que cuentan con aletas de anclaje.

4.20 Girar el sensor dentro del taladro con apoyo de la vara metálica, en caso de alinearlos con el Norte geográfico.



Figura 4. Alineación del sensor según el Norte geográfico. Extraído de “Análisis de sismicidad inducida en mina subterránea Río Blanco Sector Norte III Panel áreas 15, 16 y 17 Nivel 16 hundimiento Codelco división Andina” y elaborado por Romero (2012) (https://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2013/07/romero_diego_tesis.pdf)

La vara metálica extensible cuenta con coplas, pernos de ajuste y un mango para fijar la posición final del sensor.

- 4.21 Retirar y desacoplar las varas metálicas.
- 4.22 Habilitar la bomba inyectora de cemento
- 4.23 Preparar una bandeja para el preparado de la mezcla de la lechada, con una proporción de agua/cemento (15 l. de agua por bolsa de cemento).
- 4.24 Mantener cerrada la válvula de aire, llenar la bomba con la lechada y cerrar la tapa con su seguro.
- 4.25 Inyectar la lechada:
 - Introducir el tubo de PVC al taladro
 - Abrir la válvula de alimentación de aire a la bomba para impulsar la descarga de la lechada de cemento por el tubo de PVC. A medida que se va llenando el taladro, se va retirando lentamente el tubo.
 - Cuando el tubo de descarga este cerca de la boca del taladro: Se debe cerrar la válvula de alimentación de aire comprimido y a la vez abrir la válvula de descarga de aire comprimido de la bomba.



Figura 5. Pares principales de bomba inyectora de cemento. Extraído de “Análisis de sismicidad inducida en mina subterránea Río Blanco Sector Norte III Panel áreas 15, 16 y 17 Nivel 16 hundimiento Codelco división Andina” y elaborado por Romero (2012) (https://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2013/07/romero_diego_tesis.pdf)

El accionamiento neumático permite a la bomba inyectar lechada en taladros de hasta 40m de longitud. El fraguado del cemento empieza luego de las 24 horas de ser inyectado y logra su fraguado final dentro de las 48 horas cumplidas.

RESTRICCIONES

- 4.26 Si hay presencia de gas en la labor, el trabajador debe salir inmediatamente de la labor y ventilar.
- 4.27 En el caso de chispeo de roca, alejarse de la zona y evaluar las condiciones del área de trabajo para eliminar la condición sub estándar.
- 4.28 Si hay eventos de relajamiento de roca, el trabajador debe retirarse a un lugar seguro y comunicar al supervisor.
- 4.29 Jamás opere la bomba neumática bajo la influencia de drogas o alcohol.
- 4.30 Antes de iniciar a operar la llave de impacto neumática, se debe comprobar el buen funcionamiento de este, verificar las conexiones y empalmes, debe estar completamente seguros; de no ser así, no se opera el equipo.
- 4.31 El operador de la llave de impacto debe estar autorizado y capacitado; de no ser así, no se opera el equipo.
- 4.32 Cemento con presencia de gruñas (pasado), no debe utilizarse.

- 4.33 Contar con la hoja de seguridad (MSDS) de los materiales que se utilizan.
- 4.34 Jamás apunte ni descargue el tubo o las mangueras contra sí mismo o contra los demás.
- 4.35 Desconecte la manguera de aire de la llave de impacto cuando el equipo no se encuentre en uso, y guárdela en un lugar seguro.
- 4.36 De haber fallas con la bomba inyectora, paralizar la actividad y comunicar al supervisor; las reparaciones deben ser efectuadas únicamente por el mecánico autorizado.

Anexo 4. Número de días monitoreados por mes

Número de eventos sísmicos por fechas

Cuenta de Fecha		
Mes	Fecha	Total
marzo 23	2/03/2023	24
	6/03/2023	29
	10/03/2023	24
	13/03/2023	21
	17/03/2023	17
	21/03/2023	38
	31/03/2023	29
Total marzo 23		182
Total general		182
Días de monitoreo		7

Número de eventos sísmicos por fechas

Cuenta de Fecha		
Mes	Fecha	Total
abril 23	3/04/2023	19
	11/04/2023	37
	14/04/2023	16
	17/04/2023	26
	24/04/2023	42
	30/04/2023	23
Total abril 23		163
Total general		163
Días de monitoreo		6

Número de eventos sísmicos por fechas

Cuenta de Fecha		
Mes	Fecha	Total
mayo 23	3/05/2023	28
	9/05/2023	24
	12/05/2023	38
	15/05/2023	34
	24/05/2023	27
	29/05/2023	20
Total mayo 23		171
Total general		171
Días de monitoreo		6

Número de eventos sísmicos por fechas

Cuenta de Fecha		
Mes	Fecha	Total
junio 23	5/06/2023	36
	13/06/2023	41
	19/06/2023	29
	30/06/2023	36
Total junio 23		142
Total general		142
Días de monitoreo		4

Número de eventos sísmicos por fechas

Cuenta de Fecha		
Mes	Fecha	Total
julio 23	4/07/2023	27
	10/07/2023	29
	19/07/2023	24
	24/07/2023	33
	31/07/2023	35
Total julio 23		148
Total general		148
Días de monitoreo		5

Número de eventos sísmicos por fechas

Cuenta de Fecha		
Mes	Fecha	Total
agosto 23	1/08/2023	84
	2/08/2023	37
	3/08/2023	37
	4/08/2023	60
	5/08/2023	45
	6/08/2023	28
	8/08/2023	64
	9/08/2023	58
	10/08/2023	47
	11/08/2023	56
	12/08/2023	32
	13/08/2023	21
	14/08/2023	47
	15/08/2023	54
	16/08/2023	68
	17/08/2023	30
	18/08/2023	35
	19/08/2023	78
	20/08/2023	40
	21/08/2023	34
	22/08/2023	54
	23/08/2023	38
	24/08/2023	43
	25/08/2023	12
	26/08/2023	55
	27/08/2023	41
	28/08/2023	52
	29/08/2023	53
	30/08/2023	35
	31/08/2023	64
	Total agosto 23	
Total general		1402
Días de monitoreo	30	

Número de eventos sísmicos por fechas

Cuenta de Fecha		
Mes	Fecha	Total
setiembre 23	1/09/2023	53
	2/09/2023	48
	3/09/2023	66
	4/09/2023	39
	5/09/2023	32
	6/09/2023	37
	7/09/2023	59
	8/09/2023	38
	9/09/2023	39
	10/09/2023	33
	11/09/2023	52
	12/09/2023	42
	13/09/2023	29
	14/09/2023	69
	15/09/2023	48
	16/09/2023	37
	17/09/2023	41
	18/09/2023	27
	19/09/2023	54
	20/09/2023	115
	21/09/2023	21
	22/09/2023	19
	23/09/2023	55
	24/09/2023	59
	25/09/2023	27
	26/09/2023	24
	27/09/2023	35
	28/09/2023	56
	29/09/2023	25
	30/09/2023	39
	Total setiembre 23	
Total general		1318
Días de monitoreo	30	

Número de eventos sísmicos por fechas

Cuenta de Fecha		
Mes	Fecha	Total
octubre 23	1/10/2023	42
	2/10/2023	19
	3/10/2023	45
	4/10/2023	27
	5/10/2023	67
	6/10/2023	42
	7/10/2023	40
	8/10/2023	34
	9/10/2023	64
	10/10/2023	35
	11/10/2023	44
	12/10/2023	71
	13/10/2023	30
	14/10/2023	23
	15/10/2023	96
	16/10/2023	34
	17/10/2023	22
	18/10/2023	26
	19/10/2023	36
	20/10/2023	36
	21/10/2023	48
	22/10/2023	21
	23/10/2023	33
	24/10/2023	25
	25/10/2023	38
	26/10/2023	29
	27/10/2023	50
	28/10/2023	27
	29/10/2023	41
	30/10/2023	40
	31/10/2023	24
Total octubre 23		1209
Total general		1209
Días de monitoreo	31	

Número de eventos sísmicos por fechas

Cuenta de Fecha		
Mes	Fecha	Total
noviembre 23	1/11/2023	29
	2/11/2023	24
	3/11/2023	54
	4/11/2023	67
	5/11/2023	26
	6/11/2023	46
	7/11/2023	54
	8/11/2023	65
	9/11/2023	84
	10/11/2023	33
	11/11/2023	61
	12/11/2023	50
	13/11/2023	64
	14/11/2023	42
	15/11/2023	95
	16/11/2023	57
	17/11/2023	67
	18/11/2023	52
	19/11/2023	48
	20/11/2023	64
	21/11/2023	65
	22/11/2023	72
	23/11/2023	63
	24/11/2023	73
	25/11/2023	66
	26/11/2023	62
	27/11/2023	82
Total noviembre 23		1565
Total general		1565
Días de monitoreo	27	

Anexo 5. Base de datos de eventos fuertes y muy fuertes

Fecha	Mes	Hora de grabación	PPV (Km/s)	Nivel de alerta	Confirmación evacuación	Tiempo de respuesta	Efectividad
6/03/2023	marzo 23	15:05:56	5.80	MUY FUERTE	1	00:56:00	26.79%
21/03/2023	marzo 23	08:51:03	4.05	FUERTE	1	00:38:00	39.47%
21/03/2023	marzo 23	15:23:40	4.88	FUERTE	1	00:47:00	31.91%
11/04/2023	abril 23	18:07:29	4.60	FUERTE	1	00:41:00	36.59%
24/04/2023	abril 23	14:54:05	7.11	MUY FUERTE	1	00:58:00	25.86%
9/05/2023	mayo 23	17:45:42	5.99	MUY FUERTE	1	01:20:00	18.75%
13/06/2023	junio 23	16:09:55	4.80	FUERTE	1	00:48:00	31.25%
30/06/2023	junio 23	11:44:51	5.81	MUY FUERTE	1	01:36:00	15.63%
24/07/2023	julio 23	10:03:16	4.94	FUERTE	1	01:35:00	15.79%
2/08/2023	agosto 23	20:43:11	6.34	MUY FUERTE	1	00:19:09	78.33%
3/08/2023	agosto 23	05:21:17	4.28	FUERTE	1	00:21:07	71.03%
3/08/2023	agosto 23	07:56:27	7.97	MUY FUERTE	1	00:22:15	67.42%
10/08/2023	agosto 23	14:21:34	6.71	MUY FUERTE	1	00:12:32	119.68%
10/08/2023	agosto 23	15:09:27	4.31	FUERTE	1	00:17:19	86.62%
18/08/2023	agosto 23	18:44:14	4.22	FUERTE	1	00:14:23	104.29%
18/08/2023	agosto 23	21:33:20	5.98	MUY FUERTE	1	00:19:57	75.19%
19/08/2023	agosto 23	03:29:32	4.45	FUERTE	1	00:13:36	110.29%
25/08/2023	agosto 23	09:44:23	4.23	FUERTE	1	00:13:55	107.78%
28/08/2023	agosto 23	20:55:08	5.42	MUY FUERTE	1	00:10:11	147.30%
9/09/2023	setiembre 23	03:02:00	4.64	FUERTE	1	00:19:44	76.01%
9/09/2023	setiembre 23	22:15:59	6.24	MUY FUERTE	1	00:13:16	113.07%
11/09/2023	setiembre 23	04:49:17	4.96	FUERTE	1	00:14:41	102.16%
16/09/2023	setiembre 23	10:14:22	5.21	MUY FUERTE	1	00:12:17	122.12%
23/09/2023	setiembre 23	13:02:43	6.31	MUY FUERTE	1	00:08:34	175.10%
30/09/2023	setiembre 23	02:36:38	4.50	FUERTE	1	00:14:21	104.53%
2/10/2023	octubre 23	06:16:34	4.25	FUERTE	1	00:17:32	85.55%
5/10/2023	octubre 23	19:46:40	4.58	FUERTE	1	00:11:19	132.55%
11/10/2023	octubre 23	05:32:27	5.72	MUY FUERTE	1	00:10:56	137.20%
14/10/2023	octubre 23	07:42:35	4.16	FUERTE	1	00:20:27	73.35%
24/10/2023	octubre 23	13:49:22	5.58	MUY FUERTE	1	00:16:23	91.56%
4/11/2023	noviembre 23	13:16:24	5.20	MUY FUERTE	1	00:11:51	126.58%
5/11/2023	noviembre 23	03:15:01	4.96	FUERTE	1	00:22:17	67.31%
8/11/2023	noviembre 23	07:09:57	5.76	MUY FUERTE	1	00:16:13	92.50%
8/11/2023	noviembre 23	19:04:16	4.79	FUERTE	1	00:10:51	138.25%
11/11/2023	noviembre 23	13:14:19	4.35	FUERTE	1	00:12:48	117.19%
12/11/2023	noviembre 23	19:34:56	6.12	MUY FUERTE	1	00:13:55	107.78%
20/11/2023	noviembre 23	08:27:56	6.24	MUY FUERTE	1	00:12:18	121.95%
22/11/2023	noviembre 23	13:22:51	4.42	FUERTE	1	00:16:03	93.46%
25/11/2023	noviembre 23	11:24:29	4.05	FUERTE	1	00:12:21	121.46%