

Prevention of Accidents by Rockfall Applying the Deming Cycle Methodology in an Iron Oxide Copper Gold Deposit

Estrella Marianela Cuya-Acuña¹; Margot Brenda Villanueva-Salazar ²; Luis Alberto Arauzo-Gallardo³; Carlos Raymundo-Ibañez⁴

^{1,2,3,4}Ingeniería de Gestión Minera, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Perú, u202019104@upc.edu.pe; u202018373@upc.edu.pe; pccilara@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

Abstract—Incidents in underground mining, especially those related to rockfall, represent a critical problem affecting both worker safety and operational continuity. In Iron Oxide Copper Gold (IOCG) deposits, where geological and structural characteristics can increase the risk of rock detachment, having a solid risk management strategy is crucial. The Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle methodology serves as an effective tool to identify, assess, and mitigate these risks. This research aims to reduce the frequency of accidents caused by rockfall in IOCG deposits by implementing an Occupational Health and Safety Management System (OHSMS) based on the PDCA cycle. To achieve this, a comprehensive analysis of incidents over the past five years in critical areas will be conducted, classifying them by risk level using the Hazard Identification, Risk Assessment, and Control (HIRAC) system. Based on these results, specific control measures will be proposed to improve safety conditions and prevent accidents, ensuring a safer and more efficient working environment.

Keywords-- Risk Management, Rockfall, Underground Mining, PDCA Methodology, IOCG Deposit

Prevención de Accidentes por Caída de Rocas Aplicando la Metodología del Ciclo de Deming en un Yacimiento de Óxido de Hierro, Cobre y Oro

Estrella Marianela Cuya-Acuña¹; Margot Brenda Villanueva-Salazar²; Luis Alberto Arauzo-Gallardo³; Carlos Raymundo-Ibañez⁴

^{1,2,3,4}Ingeniería de Gestión Minera, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Perú, u202019104@upc.edu.pe; u202018373@upc.edu.pe; pccilara@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

Abstract—Los incidentes en la minería subterránea, especialmente aquellos relacionados con la caída de rocas, representan un problema crítico que afecta tanto la seguridad de los trabajadores como la continuidad operativa. En los yacimientos de Óxido de Hierro, Cobre y Oro (IOCG), donde las características geológicas y estructurales pueden aumentar el riesgo de desprendimiento de rocas, contar con una estrategia sólida de gestión de riesgos es fundamental. La metodología del ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA) sirve como una herramienta eficaz para identificar, evaluar y mitigar estos riesgos. Esta investigación tiene como objetivo reducir la frecuencia de accidentes causados por caída de rocas en yacimientos IOCG mediante la implementación de un Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) basado en el ciclo PHVA. Para lograrlo, se realizará un análisis exhaustivo de los incidentes ocurridos en los últimos cinco años en áreas críticas, clasificándolos según su nivel de riesgo mediante el sistema de Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y Controles (IPERC). Con base en estos resultados, se propondrán medidas de control específicas para mejorar las condiciones de seguridad y prevenir accidentes, garantizando así un entorno de trabajo más seguro y eficiente.

Palabras clave -- Gestión de Riesgos, Caída de Rocas, Minería Subterránea, Metodología PHVA, Yacimiento IOCG (Óxido de Hierro, Cobre y Oro).

I. INTRODUCTION

La industria minera, siendo un pilar fundamental para la economía global, juega un papel crucial en el desarrollo de diversas regiones. En particular, los yacimientos tipo Iron Oxide Copper Gold (IOCG) son de gran interés económico debido a su alta concentración de metales valiosos, como el cobre y el oro [14]. Sin embargo, las operaciones mineras subterráneas en estos yacimientos se enfrentan a importantes desafíos, entre los que destaca la gestión de riesgos asociados a la caída de rocas. Este tipo de accidentes no solo pone en peligro la vida y la seguridad de los trabajadores, sino que también interfiere en la continuidad de las operaciones, aumentando los costos y generando impactos negativos en la productividad.

El desprendimiento de rocas es uno de los principales peligros en las minas subterráneas, y su ocurrencia puede estar influenciada por factores geológicos, como la estructura del yacimiento y la presencia de fallas o fracturas en la roca. Según el informe de OSINERGMIN de 2019, los accidentes más comunes en minas subterráneas incluyen

desprendimientos de rocas (20%), lo que evidencia la gravedad del problema. En los yacimientos IOCG, este riesgo se ve acentuado por las características mineralógicas y tectónicas del depósito, que pueden generar condiciones inestables en las labores subterráneas [15].

Frente a este escenario, es fundamental implementar un sistema integral de gestión de riesgos que permita identificar, evaluar y mitigar los peligros asociados con la caída de rocas. En este contexto, la metodología del ciclo Planificar, Hacer, Verificar y Actuar (PHVA) se ha convertido en una herramienta clave para garantizar la seguridad en las operaciones mineras. El enfoque PHVA proporciona un marco sistemático para la gestión de riesgos, permitiendo no solo la implementación de controles preventivos, sino también la mejora continua a través de la revisión y ajuste de las medidas adoptadas.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal la reducción de la frecuencia de accidentes por caída de rocas en los yacimientos IOCG mediante la implementación de un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional (SSOMA) basado en la metodología PHVA. El ciclo PHVA, que abarca las etapas de Planificar, Hacer, Verificar y Actuar, ofrece un enfoque estructurado para la prevención de accidentes. Durante la fase de Planificación, se llevará a cabo una evaluación detallada de los peligros asociados con la geología y las condiciones estructurales del yacimiento, utilizando herramientas como el IPERC (Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y Controles) [1]. Esta etapa permitirá diseñar estrategias de control adecuadas para cada escenario de riesgo.

En la fase de Hacer, se implementarán las medidas preventivas, incluyendo el monitoreo de inestabilidades geotécnicas, y la capacitación del personal en protocolos de seguridad. La fase de Verificación implica el monitoreo continuo de las condiciones de la mina y la evaluación de la eficacia de las medidas implementadas, utilizando tanto sistemas tecnológicos como inspecciones regulares. Finalmente, la fase de Actuar se centrará en ajustar y mejorar las estrategias de control en función de los resultados obtenidos, garantizando una mejora continua en la gestión de riesgos.

La aplicación de este enfoque no solo permite reducir los riesgos relacionados con la caída de rocas, sino que también se alinea con las regulaciones y normativas vigentes en el sector

minero. En particular, el Decreto Supremo N.º 024-2016 EM - N.º 023-2017 EM establecen directrices claras para la gestión de seguridad en las operaciones mineras, las cuales serán integradas dentro del sistema PHVA propuesto.

Además de la gestión de riesgos geotécnicos, la implementación de la metodología PHVA en un yacimiento IOCG tiene beneficios adicionales. Al adoptar un enfoque preventivo y de mejora continua, se fomenta una cultura de seguridad dentro de la organización, lo que a su vez mejora el bienestar de los trabajadores y reduce el número de incidentes [10]. Este modelo de gestión también tiene el potencial de aumentar la eficiencia operativa, ya que la prevención de accidentes minimiza las interrupciones en la producción y los costos asociados a las paralizaciones.

II. ESTADO DEL ARTE

A. Introducción a la gestión de riesgos en minería subterránea

La gestión de riesgos en la minería subterránea es esencial para prevenir incidentes, especialmente aquellos relacionados con la caída de rocas, que representan uno de los peligros más comunes y letales en este entorno [9]. La implementación de sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional juega un papel crucial en la mejora de las condiciones laborales y la protección de los trabajadores. Estos sistemas deben adaptarse a las particularidades de la minería subterránea, ya que factores como la geomecánica, la estabilidad de los taludes y el entorno físico pueden variar significativamente [8]. Un enfoque eficaz requiere no solo atender los riesgos inherentes a la actividad minera, sino también desarrollar un plan de acción específico para prevenir accidentes por caída de rocas en función del contexto geológico de cada mina.

B. Factores de riesgo en minería subterránea: Interacciones y cultura de seguridad

Al enfocarnos en los riesgos asociados con la caída de rocas, se evidencia que las interacciones entre el factor humano, las condiciones geomecánicas del terreno y la interacción con maquinaria subterránea son elementos críticos [5]. El factor humano, en particular, sigue siendo un desencadenante clave de riesgos, donde la cultura de seguridad puede influir directamente en la frecuencia e impacto de los incidentes. La falta de cumplimiento de procedimientos, la falta de capacitación adecuada y la presión operativa incrementan la probabilidad de que ocurran eventos como caídas de rocas. La relación entre una cultura de seguridad deficiente y la incidencia de riesgos es evidente, lo que subraya la importancia de promover una cultura sólida de prevención y de formación continua para que el personal sea capaz de identificar señales de inestabilidad estructural [11]. Un diagnóstico preciso y temprano de los factores de riesgo geomecánicas y humanos es fundamental para implementar estrategias preventivas efectivas y reducir la posibilidad de incidentes por caída de rocas.

C. Desafíos y beneficios de la metodología PHVA en la industria minera subterránea

La metodología PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar) se presenta como una herramienta eficaz para la gestión de riesgos en la prevención de incidentes por caída de rocas en minería subterránea. La implementación de esta metodología permite establecer un ciclo continuo de mejora que no solo ayuda a identificar riesgos, sino también a tomar acciones correctivas y preventivas basadas en datos precisos y análisis geotécnicos [16]. Uno de los principales desafíos de aplicar la metodología PHVA en un contexto minero es la necesidad de adaptar los planos de acción a las condiciones geológicas dinámicas y los comportamientos impredecibles del terreno, propios de la actividad subterránea. No obstante, los beneficios son significativos: el PHVA no solo facilita una mejora continua en los procesos de seguridad, sino que también proporciona una estructura clara para la evaluación y gestión del riesgo, siendo compatible con otras herramientas de apoyo, como el monitoreo en tiempo real de la estabilidad del terreno y las inspecciones geomecánicas periódicas [13]. Además, esta metodología fomenta un enfoque proactivo en lugar de reactivo, reduciendo así la ocurrencia de incidentes y contribuyendo a una operación más segura y eficiente.



Fig. 1 Método ciclo PHVA

D. Influencia de la estructura de la masa rocosa

La influencia de los rasgos estructurales geológicos sobre la estabilidad de la masa rocosa es de particular relevancia en las operaciones mineras subterráneas diarias. Cuando se inicia una excavación, como un túnel o una mano de obra minera, se altera el campo de esfuerzos naturales en la roca, lo que genera un nuevo estado de esfuerzos en la masa rocosa circundante [4][5]. A medida que la operación avanza, los esfuerzos inducidos por la excavación pueden concentrarse en ciertos puntos, mientras que en otros pueden dispersarse [8].

Estas concentraciones de esfuerzos pueden superar la resistencia natural de la roca, generando problemas de inestabilidad que se traducen en un mayor riesgo de desprendimiento de rocas. En este sentido, la estabilidad de la masa rocosa no solo depende de las propiedades intrínsecas

del material, sino también de la forma y el diseño de las excavaciones [2]. La geometría del contorno de una excavación influye directamente en las condiciones de estabilidad: las formas con esquinas tienden a ser desfavorables, ya que inducen concentraciones de esfuerzos que pueden desestabilizar la roca [7][8]. Por otro lado, el “efecto arco”, que se da en contornos más curvos, tiende a redistribuir los esfuerzos de manera más homogénea, favoreciendo así la estabilidad.

En consecuencia, el control y monitoreo de los esfuerzos en las excavaciones es clave para la prevención de desprendimientos [16]. Es fundamental adoptar diseños y técnicas de sostenimiento que consideren tanto las propiedades geomecánicas de la roca como la redistribución de esfuerzos para garantizar condiciones seguras en la operación subterránea [4].



Fig. 2 Falla de interior Mina Condestable

III. APORTE

A. Fundamento

La propuesta de investigación propone un enfoque estructurado en cinco fases, que integran las etapas clásicas del ciclo PHVA y las adaptan a las características particulares de los yacimientos IOCG. Este enfoque no solo ayudará a futuros investigadores a analizar las causas directas de los accidentes con mayor precisión, sino que también ofrecerá un modelo de referencia para que otras minas subterráneas puedan implementar sistemas de gestión de seguridad basados en la mejora continua y adaptados a sus realidades operativas [5].

Se propone la metodología PHVA (Planear, Hacer, Verificar, Actuar) como herramienta fundamental para la gestión de riesgos asociados a la caída de rocas en yacimientos IOCG [8]. Dado que los accidentes relacionados con la caída de rocas constituyen una de las principales causas de fatalidades y lesiones en minería subterránea, este enfoque ofrece una nueva perspectiva para abordar de manera sistemática y preventiva la identificación y control de estos riesgos [15].

El objetivo central es la prevención de accidentes por caída de rocas, lo cual no solo tendrá un impacto significativo

en la reducción de incidentes en minas subterráneas, sino que también contribuirá a la mejora de las condiciones laborales en yacimientos de alta complejidad geotécnica, como los IOCG [19]. La metodología PHVA, permite un análisis detallado de los factores causales de los desprendimientos de rocas, mediante la evaluación continua de riesgos y la implementación de estrategias preventivas adaptadas a la geología y estructura del yacimiento [6].



Fig. 3 Diagrama causa-efecto

B. Vista general

En la primera fase de la investigación, se recopiló datos sobre los accidentes ocurridos en los últimos cinco años dentro de áreas críticas del yacimiento, con especial atención a las zonas con mayor propensión a desprendimientos de rocas. Estos datos se analizarán en conjunto con informes de investigación de accidentes previos, lo que permitirá realizar un diagnóstico integral del estado actual de la gestión de riesgos.[5] En el segundo paso, se establecerán los objetivos específicos del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional (SGSSO), ajustados a la prevención de accidentes por caída de rocas [17]. Esta planificación inicial contempla el uso de herramientas como el IPERC (Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y Controles), que será clave para clasificar los riesgos según su nivel de criticidad y desarrollar una respuesta acorde.

En la tercera etapa, Hacer, se llevará a cabo la implementación del SGSSO, desarrollando herramientas de gestión, realizando estudios de línea base como el llenado del formato IPERC, inspecciones, evaluación de requisitos legales, mapeo de riesgos y planificación de respuestas a emergencias. Todo esto se documenta en un informe.

En el cuarto paso, Verificar, implica un riguroso proceso de monitoreo y auditoría de las medidas implementadas.

Se realizarán auditorías internas y externas para evaluar la efectividad de los controles de riesgo, así como inspecciones regulares en las zonas críticas del yacimiento. Se utilizarán indicadores clave de desempeño (KPI) [5], para medir la reducción en la frecuencia y severidad de accidentes por caída de rocas. Los resultados de estas auditorías se documentarán en informes técnicos que serán revisados por el comité de seguridad de la mina, garantizando que se tomen decisiones informadas para mejorar continuamente el SGSSO [9].

El quinto y último paso, Actuar, se analizó los resultados obtenidos en la etapa de verificación y se ajustarán las estrategias de control según sea necesario.[4] En esta fase se consolida el ciclo de mejora continua, ya que cualquier deficiencia identificada en las auditorías se abordará mediante la modificación de los planes de acción, asegurando que el SGSSO se mantenga actualizado y adaptado a las condiciones cambiantes del yacimiento. Si los objetivos de reducción de accidentes se cumplen, se documentará el éxito del modelo y se replicó en otras áreas de la operación. En caso de que los resultados no sean satisfactorios, se reformulará el proceso y se identificarán nuevas áreas de mejora [7].

C. Componentes de la metodología

1) Estadísticas de los incidentes

Las estadísticas relacionadas con los incidentes en la mina Condestable, tomando como punto de partida los últimos cinco años (2019-2024), nos permitirán evaluar la situación actual en cuanto a los incidentes derivados de la caída de roca. A partir de estos datos, será posible determinar el índice de accidentes en relación con esta problemática.

2) Matriz IPERC

El Informe de Prevención de Riesgos en el Entorno de Trabajo Confinado (IPERC) es un documento clave en la industria minera, especialmente en operaciones subterráneas donde la caída de rocas es un riesgo constante. Este informe tiene como propósito identificar y evaluar los peligros asociados con la caída de rocas, proporcionando directrices para mitigar los riesgos. La implementación del IPERC en la mina del Centro del Perú asegurará la protección de los trabajadores y la reducción de incidentes [20]. Este documento incluirá una lista de controles recomendados, así como medidas de seguridad específicas que deben ser aplicadas en las áreas más críticas.

3) Procedimiento escrito de trabajo seguro (PETS)

Los Procedimientos Escritos de Trabajo (PETS) son manuales detallados que guían la ejecución segura y eficiente de las tareas mineras [8]. Estos procedimientos se estructuran en pasos secuenciales que comienzan con la identificación de actividades de alto riesgo relacionadas con la caída de rocas. En esta fase, se identificarán los riesgos específicos, las condiciones geológicas y los controles necesarios para prevenir incidentes. El siguiente paso consiste en redactar el procedimiento, que debe incluir los controles definidos, los requisitos de competencia del personal, limitaciones, recursos materiales, equipamiento y equipo de protección personal requeridos para realizar la tarea de manera segura [5].

Es esencial que los PETS sean revisados y aprobados por las áreas responsables, incluyendo al gerente de seguridad y salud ocupacional y al gerente de operaciones, asegurando así que sean aplicados de manera efectiva en el campo [17].

D. Vista de procesos

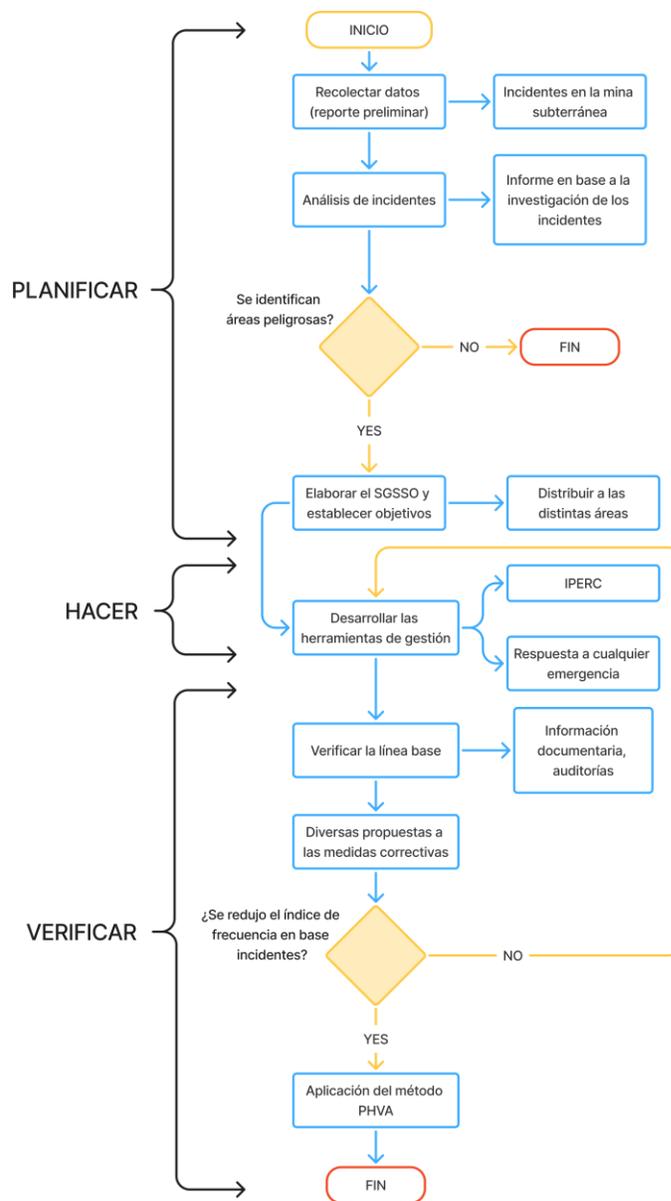


Fig. 4 Metodología aplicada

IV. VALIDACIÓN

A. Descripción del escenario

La mina de yacimiento tipo IOCG está localizada en el área conocida como Loma de Vincho, cerca de la localidad de Bujama Altos, en el distrito de Mala, provincia de Cañete, en el departamento de Lima.



Fig. 5 Ubicación de la mina Condestable

B. Cuadro estadístico de seguridad de condestable

El análisis de la seguridad operaciones en mineras requiere un monitoreo constante de los incidentes, accidentes y el tiempo de trabajo, con el fin de implementar mejoras continuas y reducir los riesgos laborales. [3] El presente cuadro estadístico de seguridad proporciona un resumen mensual de los accidentes fatales, incapacitantes y de tránsito, detallando el área o sede donde ocurrieron y permitiendo un cálculo eficiente de las horas de trabajo [8]. Esta información es fundamental para identificar patrones, evaluar el rendimiento en seguridad de cada área y diseñar estrategias correctivas que minimicen la incidencia de accidentes [11].

MES	7. SÓLO PARA ACCIDENTES INCAPACITANTES							9. N° ACCIDENTES PELIGROSOS	11. N° INCIDENTES
	N° ACCIDENTES INCAPACITANTES	ÁREA/SEDE	TOTAL HORAS HOMBRE TRABAJADAS	ÍNDICE DE FRECUENCIA	N° DÍAS PERDIDOS	ÍNDICE DE SEVERIDAD	ÍNDICE DE ACCIDENTABILIDAD		
ENERO	0	CONDESTABLE	283,944	0	0	0	0	0	5
FEBRERO	2	CONDESTABLE	269,328	7.43	10	37.13	0.28	0	5
MARZO	2	CONDESTABLE	284,272	7.04	52	182.92	1.29	0	3
ABRIL	0	CONDESTABLE	319,456	0	75	234.77	0	0	1
MAYO	1	CONDESTABLE	291,640	3.43	69	236.59	0.81	0	6
JUNIO	2	CONDESTABLE	281,088	7.12	102	362.88	2.58	0	2

Fig. 6 Registro de Accidentes 2024

C. Cálculo de Indicadores de Seguridad

Los indicadores de seguridad son herramientas esenciales para evaluar el desempeño en seguridad y salud ocupacional dentro de la operación minera.[1]. A continuación, se presentan las fórmulas utilizadas para calcular el Índice de Frecuencia, Índice de Severidad e Índice de Accidentabilidad, los cuales permiten analizar la recurrencia, el impacto y la gravedad de los accidentes, así como evaluar la efectividad de las medidas de control implementadas [20].

D. Índice de Frecuencia (IF)

El Índice de Frecuencia mide la cantidad de accidentes ocurridos por cada millón de horas trabajadas.[2] Este

indicador refleja la frecuencia con la que ocurren los accidentes en una operación, lo que permite identificar la recurrencia de eventos y tomar medidas para reducir su ocurrencia [17].

$$\text{ÍNDICE DE FRECUENCIA} = \frac{1000000 \times \text{N}^{\circ} \text{ ACCIDENTES}}{\text{HORAS HOMBRE}}$$

E. Índice de Severidad (IS)

El Índice de Severidad evalúa la gravedad de los accidentes, considerando los días perdidos debido a accidentes incapacitantes [7]. Este índice ayuda a cuantificar el impacto de los accidentes sobre la productividad de la empresa [13].

$$\text{ÍNDICE DE SEVERIDAD} = \frac{1000000 \times \text{N}^{\circ} \text{ DÍAS PERDIDOS}}{\text{HORAS HOMBRE}}$$

F. Índice de Accidentabilidad (IA)

El Índice de Accidentabilidad combina tanto la frecuencia como la severidad de los accidentes, proporcionando una medida global del impacto de los incidentes sobre la operación [4]. Este índice ofrece una visión general del estado de seguridad en una empresa y permite evaluar la efectividad de los programas de seguridad [12].

$$\text{ÍNDICE DE ACCIDENTABILIDAD} = \frac{\text{ÍNDICE DE FRECUENCIA} \times \text{ÍNDICE DE SEVERIDAD}}{1000}$$

G. Gráfico de accidente

El gráfico presentado muestra la distribución mensual de accidentes incapacitantes y fatales en la operación minera. Los valores en amarillo representan los accidentes incapacitantes, mientras que los valores en rojo indican los accidentes fatales [12]. A lo largo de los meses, se observa un patrón de recurrencia en el número de accidentes fatales y una ligera variabilidad en los accidentes incapacitantes. Esta información es clave para identificar los períodos de mayor riesgo y analizar las condiciones operativas durante esos meses, con el objetivo de implementar medidas correctivas y preventivas para mitigar la ocurrencia [2].

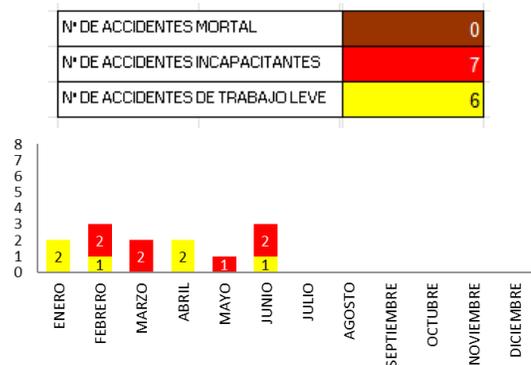


Fig. 7 Registro de Accidentes 2024

H. Identificación de peligros

Se llevarán a cabo reuniones iniciales para recopilar información sobre incidentes anteriores y las condiciones geológicas específicas de la mina, lo que proporcionará una base sólida para el análisis. Una vez identificados los peligros, se procederá a la evaluación de riesgos utilizando una matriz de evaluación. Se asignará un valor a la probabilidad y el impacto de cada peligro identificado, calculando el riesgo como el producto de ambos factores. Esta metodología permitirá priorizar los peligros en función de su severidad.

INFORMACIÓN GENERAL	
Título del Accidente: Golpe de fragmento roca con la frente de trabajador durante el regado de la labor	
Fecha: 21-09-23	Hora del Incidente: 21:30 HRS
Superintendencia: Mina	
Localización: Rp 3797_6 Nv-400	Operación/Proyecto: Compañía Minera Condestable S.A.
Riesgo crítico asociado: Desprendimiento de roca	
Involucrados: <input checked="" type="checkbox"/> Titular <input type="checkbox"/> Contratista/Subcontratista	Empresa: CMC
¿Incidente repetido? <input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	Consecuencia Real (patrimonial): Nivel 0
	Consecuencia Real (personal): Nivel III LTP
	Consecuencia Potencial (patrimonial): Nivel 0
	Consecuencia Potencial (personal): Nivel III
¿QUÉ OCURRIÓ?	
FOTOGRAFÍA/CROQUIS	
<p>Cuando el trabajador realizaba el regado del techo de la labor, ubicado a 6.5 m del tope, un fragmento de roca se desprende del techo de la labor (Altura 4.2 m) impactándole en el rostro a la altura del tabique nasal.</p> 	
Consecuencias (Lesión o Daño): Herida contuso cortante	
Acciones Inmediatas (Deben ser extrapoladas a todas las empresas del Grupo SPM dentro de las 72 horas):	
<ul style="list-style-type: none"> El supervisor de turno comunica a Seguridad y jefatura de mina, coordina la evacuación del accidentado a la Posta Médica. El trabajador fue atendido en la posta médica donde se descarta compromiso óseo. Se conformó el equipo investigador y recopilaron información en el lugar del accidente. 	
Aprobado por	
Nombre: Andrés Campean Gómez.	Cargo: Asistente Superintendente de Mina
N° de Celular: 987105168	E-mail: andres.campean@spm.pe

Fig. 8 Alerta inicial de incidente

I. Mapa de riesgos

- Zona de Excavación Principal:** Catalogada como un riesgo Crítico, dada su alta probabilidad de ocurrencia y su impacto potencialmente catastrófico.
- Accesos y Rampas:** Clasificados como un riesgo Muy Alto, debido a la elevada probabilidad y el alto impacto que puede tener.
- Almacenes y Depósitos de Material:** Identificados como un riesgo Alto, con una probabilidad media y un impacto muy alto.
- Frentes de Trabajo:** Considerados un riesgo Alto, con una probabilidad media y un impacto alto.
- Zona de Sostenimiento:** Catalogada como un riesgo Crítico, por su alta probabilidad de ocurrencia y su impacto potencialmente muy grave.

Impacto/Probabilidad	1 (Bajo)	2 (Medio)	3 (Alto)	4 (Muy Alto)	5 (Crítico)
1 (Bajo)					
2 (Medio)					
3 (Alto)			x (Frentes de Trabajo)		
4 (Muy Alto)			x (Almacenes y Depósitos de Material)	x (Accesos y Rampas)	x (Zona de Excavación)
5 (Crítico)				x (Zona de Sostenimiento)	

Fig. 9 Mapa de Riesgos

J. Identificación de peligro potenciales

Se identificaron 5 peligros potenciales relacionados con los incidentes por caída de roca en la mina. De estos, se identificó que la causa principal de los accidentes por caída de roca es: Impacto con bloque de roca durante el desatado manual, mientras que, el golpe de fragmento roca con la frente de trabajador durante el regado de la labor y el golpe de fragmento roca con la frente de trabajador durante el regado de la labor, fue identificada como un factor secundario, pero que es muy relevante. Los incidentes más comunes asociados a caída de roca incluyen un mal desatado, inestabilidad del terreno.

Área crítica	Peligro	Riesgo	Medidas de Control
Excavación Principal	Inestabilidad del terreno, presencia de fallas geológicas.	Muy Alto.	Monitoreo geotécnico constante, instalación de sistemas de soporte adecuados.
Acceso a Túneles	Caidas de rocas, acumulación de agua.	Alto.	Drenaje adecuado, mantenimiento regular de los caminos.
Carga y Transporte	Sobrecarga en los techos, falta de sostenimiento.	Alto.	Capacitación del personal sobre el manejo seguro de cargas, inspecciones periódicas del sistema de sostenimiento.
explotación de cámaras	Inestabilidad de las cámaras, falta de ventilación.	Muy Alto.	Revisión de los procedimientos de excavación, instalación de ventilación adecuada.
Almacenamiento de Materiales	Riesgo de explosiones, caídas de rocas.	Alto.	Almacenamiento seguro, capacitación en el manejo de materiales peligrosos.

Fig. 10 Peligros identificados

K. Procedimientos de emergencia

- 1) Identificación de zonas de refugio y vías de evacuación
- 2) Asignación de roles y responsabilidades del personal
- 3) Protocolos de comunicación y activación de la cadena de mando
- 4) Primeros auxilios y atención médica de emergencia
- 5) Investigación y reporte de incidentes

L. Planes de respuesta

- 1) Designación de brigadas de emergencia y sus responsabilidades
- 2) Equipos y recursos disponibles para atención de emergencias
- 3) Coordinación con entidades de apoyo externo (bomberos, ambulancias, etc.)
- 4) Simulacros periódicos de emergencia y mejora continua

M. Matriz básica de evaluación de riesgos

La Matriz IPERC presentada para la mina Condestable utiliza un sistema de codificación por colores para representar

los diferentes niveles de riesgo identificados. En la columna "Nivel de Riesgo", se pueden observar los siguientes colores:

- Rojo: Indica un Nivel de Riesgo Crítico (20). Estos son los riesgos más elevados, que requieren una atención y control prioritarios.
- Naranja: Representa un Nivel de Riesgo Muy Alto (12). Estos riesgos también demandan una intervención inmediata para reducir su impacto.
- Amarillo: Señala un Nivel de Riesgo Alto (8-9). Estos riesgos deben ser monitoreados y controlados de cerca para prevenir su escalada.

SEVERIDAD	Catastrófico	1	1	2	4	7	11
	Mortalidad	2	3	5	8	12	16
	Permanente	3	6	9	13	17	20
	Temporal	4	10	14	18	21	23
	Menor	5	15	19	22	24	25
		A	B	C	D	E	
		Común	Ha sucedido	Podría suceder	Raro que suceda	Prácticamente imposible que suceda	
		FRECUENCIA					

Fig. 11 Matriz

N. Implementación de la metodología PHVA

La evaluación de la metodología PHVA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar) se llevó a cabo para determinar su efectividad en la prevención de incidentes por caída de roca en la mina. Este proceso incluyó la recopilación y análisis de datos sobre incidentes antes y después de la implementación de la metodología.

Antes de la Implementación (Año 2023):

Clasificación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	2023	Caída de Roca
N° Lesiones Incapacitantes	2	2(1)	1(1)	1	1	0	2(1)	1	3(1)	2(1)	1	1(1)	17	6
N° Lesiones Leves	0	1	1	1	1	1	2(1)	1	1	0	0	2	11	1
N° Daños al patrimonio (DP)	12	4(1)	7(2)	4	7	9(1)	4(1)	1	4(2)	3(1)	7	10(3)	73	11

Fig. 12 Se registró 6 lesiones registrables asociadas a la caída de roca

Después de la Implementación (junio 2024):

Clasificación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	2024	Caída de Roca
N° Lesiones Incapacitantes	0	2	2	0	1	2	2						9	0
N° Lesiones Leves	2	1	0	2	1	0	0						2	0
N° Daños al patrimonio (DP)	5	8(2)	6(1)	2(1)	9(1)	8	3						38	5

Resultados:

- Índice antes de PHVA: 6 lesiones por caída de roca
- Índice después de PHVA: 0 lesiones por caída de roca
- Reducción en el índice de accidentabilidad: 6 - 0

O. Análisis del Diagrama PHVA

Componentes del Diagrama

- 1) *Planificar*: Identificación de peligros y evaluación de riesgos en las áreas críticas.
- 2) *Hacer*: Implementación de medidas de control y capacitación del personal.
- 3) *Verificar*: Monitoreo continuo de las condiciones de trabajo y revisión de incidentes.
- 4) *Actuar*: Ajuste de medidas y procedimientos basados en las evaluaciones realizadas.

Resultados del Diagrama

- 1) El diagrama muestra cómo cada fase del ciclo PHVA contribuyó a la reducción de incidentes y a la mejora de la seguridad.
- 2) Se pueden incluir gráficos que visualicen la disminución de incidentes a lo largo del tiempo y la correlación con la implementación de la metodología.

V. DISCUSIÓN

En primer lugar, los resultados de este estudio coinciden con los hallazgos de Liu et al. (2023), quienes resaltan la influencia del coeficiente de recuperación de colisiones en la velocidad y energía de las rocas, subrayando la importancia de los parámetros aleatorios en la dinámica del rockfall. No obstante, a diferencia del modelo bidimensional propuesto por Wu et al. (2019), el enfoque tridimensional implementado en esta investigación ofrece una visión más completa de la migración, permitiendo una comprensión detallada de las interacciones complejas entre las rocas y la superficie de trabajo.

En cuanto al diseño geométrico de los bloques, Azzoni et al. (2021) destacan su impacto en el comportamiento de las rocas. Estos hallazgos son en gran medida consistentes con nuestros resultados, aunque se observan variaciones en los coeficientes de fricción empleados. Esta discrepancia podría deberse a las diferencias en la forma y el tamaño de los bloques utilizados en los experimentos, lo que subraya la necesidad de estandarizar estos parámetros en futuras investigaciones para lograr una comparación precisa entre estudios.

Por otra parte, mientras que Chen et al. (2020) indican que el entorno geológico tiene un impacto menor de lo esperado en el comportamiento de las rocas, nuestras observaciones sugieren lo contrario: las características geológicas del terreno estudiado juegan un rol significativo en la migración de las rocas, lo que puede explicarse por las particularidades geológicas complejas de nuestra área de estudio. Esto resalta la importancia de considerar la geología específica del entorno en las simulaciones.

Asimismo, la investigación de Scavia et al. (2022) apoya nuestra conclusión sobre la necesidad de incluir la aleatoriedad en la evaluación de riesgos. Este factor refuerza

la importancia de desarrollar modelos que consideren el comportamiento aleatorio de los bloques para mejorar la precisión en la predicción de deslizamientos. Finalmente, los hallazgos de Barbero et al. (2021) sobre la predicción de deslizamientos en terrenos con características similares a las de nuestro estudio avalan nuestro enfoque, aunque identificamos diferencias en las condiciones de carga y su influencia en la migración de rocas.

En conjunto, estos estudios complementan y contrastan nuestros resultados, subrayando la complejidad de modelar el comportamiento del rockfall en condiciones geológicas variables y la importancia de un enfoque tridimensional que contemple tanto los aspectos físicos como los aleatorios en la evaluación de riesgos. Este análisis comparativo valida nuestros resultados y sugiere nuevas líneas de investigación que podrían contribuir a una comprensión más profunda de los procesos de migración de rocas en entornos similares.

VI. CONCLUSIONES

La implementación de la metodología PHVA en la mina Condestable ha demostrado ser altamente efectiva para la gestión de riesgos. En 2024, se registró una reducción significativa de incidentes respecto al 2023, pasando de 300 a solo 13 en lo que va del año. La evaluación de riesgos identificó la Zona de Excavación Principal como crítica (nivel 5), mientras que los Accesos y Rampas presentan riesgos muy altos (nivel 4), destacando la necesidad de un control exhaustivo en estas áreas. Los accidentes más frecuentes están relacionados con el golpe de fragmentos de roca y desprendimientos durante controles topográficos. Finalmente, las lesiones asociadas a caídas de roca se redujeron de seis en 2023 a cero en junio de 2024, reflejando avances significativos en la prevención de accidentes.

VII. RECOMENDACIONES

- Aplicar de forma continua la metodología PHVA, adaptándola a las necesidades específicas de cada operación y fomentando el compromiso en todos los niveles de la organización.
- Realizar capacitaciones periódicas para el personal sobre mejores prácticas de seguridad, destacando la relevancia de cada fase del ciclo PHVA, especialmente en la prevención de incidentes por caída de rocas.
- Actualizar y revisar regularmente el IPERC, asegurando su alineación con el ciclo PHVA, para anticipar y mitigar posibles riesgos, adaptándose proactivamente a cualquier cambio en las condiciones operativas.

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al ingeniero Luis Arauzo Gallardo por su invaluable dedicación y enseñanza. Su colaboración y orientación durante el

desarrollo de este informe han sido fundamentales, y su experiencia y conocimientos han sido pilares esenciales para el éxito de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Alrawad, M., Lutfi, A., Alyatama, S., Elshaer, I., & Almaiah, M. A. (2022). Perception of Occupational and Environmental Risks and Hazards among Mineworkers: A Psychometric Paradigm Approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3371. <https://doi.org/10.3390/ijerph19063371>
- [2] Akpanbayeva, A.; Issabekv, T. Assessing a natural field of rock mass stress by means of in-situ measurements within Vostochnaya Sary-Oba deposit in Kazakhstan. *Mining of mineral deposits*. 2023, 17(3):56-66. <https://doi.org/10.33271/mining17.03.056>
- [3] Caviezel, A., Demmel, S. E., Ringenbach, A., Bühler, Y., Lu, G., Christen, M., Dinneen, C. E., Eberhard, L. A., Von Rickenbach, D., & Bartelt, P. (2019). Reconstruction of four-dimensional rockfall trajectories using remote sensing and rock-based accelerometers and gyroscopes. *Earth Surface Dynamics*, 7(1), 199-210. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-199-2019>
- [4] Dang, J., Tu, M., Zhang, X. et al. Research on the bearing characteristics of brackets in thick hard roof mining sites and the effect of blasting on roof control. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Georesour.* 10, 18 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00735-3>
- [5] Ge, Y., He, X., Yuan, X., Pu, X., Meng, L., Wang, H., & Huang, Y. (2021). Analysis of Rockfall Hazards Stopping position and Energy dissipation Based on Orthogonal experiment. *E3S Web Of Conferences*, 261, 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126101004>
- [6] Guo, G.; Li, H. Finite-Discrete Element Method Prediction of Advanced Fractures in Extra-Thick Coal Seams Based on a Constitutive Model of Rock Deformation-Fragmentation Failure Process. *Processes* 2023, 11, 675. <https://doi.org/10.3390/pr11030675>
- [7] Liu, M., Chen, J., Xiao, Y., & Lv, W. (2023). Migration law for random parameters rockfall in steeply dipping coal seams. *Frontiers In Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1088188>
- [8] Macciotta, R., Gräpel, C., & Skirrow, R. (2020). Fragmented Rockfall Volume Distribution from Photogrammetry-Based Structural Mapping and Discrete Fracture Networks. *Applied Sciences*, 10(19), 6977. <https://doi.org/10.3390/app10196977>
- [9] McQuillan, A. & Bar, N. 2024. Forecasting open-pit slope runout distances. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 124, no. 6, pp. 355-360. <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2674/2024>
- [10] Pablo Zevallos, Miguel Ángel Aucapoma Juan Francisco Mori (2020). Sistema preventivo de desprendimiento de rocas basado en detección de puntos del macizo rocoso.
- [11] Reyes, P.: Sobre el potencial de mineralización de Cu, Au tipo IOCG en la costa norte del Perú paralelo 9°-12°. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Lib-122-115.pdf>
- [12] Scavia, C., Barbero, M., Castelli, M., Marchelli, M., Peila, D., Torsello, G., & Vallero, G. (2020). Evaluating rockfall risk: Some critical aspects. *Geosciences*, 10(3), 98. <https://doi.org/10.3390/geosciences10030098>
- [13] Su, G., Hu, E. Research on coal mine safety risk evolution and key hidden dangers under the perspective of complex network. *Sci Rep* 14, 20624 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71004-2>
- [14] Takhanov, D., Balpanova, M., Kenetayeva, A., Rabatuly, M., Zholdybayeva, G., & Usupayev, S. (2023). Risk assessments for rockfalls taking into account the structure of the rock mass. *E3S Web Of Conferences*, 443, 04012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344304012>
- [15] Valencia, M.; Quispe L.; León, W.; Torres V.; & Marchena, A. (2021) – Yacimiento tipo IOCG y pórfidos: Relaciones magmáticas y genéticas en el suroeste peruano Ica y Tacna. *Bloque norte. INGEMMET, Boletín Serie B: Geología Económica*, 66, 231 p., 28 mapas.

- [16]Valencia, M.; Lozada V.; León, W.; Martínez, W. & Marchena, A. (2020) - Magmatismo Jurásico - Cretáceo y su relación con los yacimientos tipo IOCG y pórfidos entre Ica y Tacna. Bloque norte. INGEMMET, Boletín Serie B: Geología Económica, 66, 231 p., 28 mapas.
- [17]Vinay, L.S., Bhattacharjee, R.M., Ghosh, N. et al. Machine learning approach for the prediction of mining-induced stress in underground mines to mitigate ground control disasters and accidents. Geomech. Geophys. Geo-energy. Geo-resour. 9, 159 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00701-5>
- [18]Vita, L. A., Horta, L. F. C., Fraga, J. P. A., & Figueiredo, R. P. de. (2023). Fall of ground study using seismic hazard assessment methods for an underground mine. REM - International Engineering Journal, 76(3), 273–280. <https://doi.org/10.1590/0370-44672021760061>
- [19]Wang, S.; Yuan, C.; Li, L.; Su, X.; Wang, C. Application of Research on Risk Assessment of Roadway Roof Falls Based on Combined Weight Matter Element Extension Model. Appl. Sci. 2024, 14, 4111. <https://doi.org/10.3390/app14104111>
- [20]Zhan, J., Yu, Z., Lv, Y., Peng, J., Song, S., & Yao, Z. (2022). Rockfall Hazard Assessment in the Taihang Grand Canyon Scenic Area Integrating RegionalScale Identification of Potential Rockfall Sources. Remote Sensing, 14(13), 3021. <https://doi.org/10.3390/rs14133021>
- [21]Zhienbayev, A.; Balpanova, M.; Asanova, Z.; Zharaspaev., M.; Nurkasyn, R.; Zhakupov, B.; Analysis of the roof span stability in terms of roomand-pillar system of ore deposit mining. Mining of mineral deposits. 2023, 17(1):129-137. <https://doi.org/10.33271/mining17.01.129>
- [22]Romero, R., Barra, F., Reich, M., Ojeda, A., Tapia, M. J., Del Real, I., & Simon, A. (2024). Contrasting magma chemistry in the Candelaria IOCG district caused by changing tectonic regimes. Scientific Reports, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61489-2>