


Protocolo de Respuesta a Emergencias por Incendios dentro de Mina subterránea en la Empresa Aurelian Ecuador


Active Fire Emergency Response Protocol for Underground Mine at Aurelian Ecuador Company

Hector Vinicio Chugchilan Quimbita ¹ 
hctomen@hotmail.com

Instituto Tecnológico Superior Universitario Oriente (ITSO)
Riobamba, Ecuador

Benjamín Gabriel Quito Cortez² 
benjaminquito@bqc.com.ec

Instituto Tecnológico Superior Universitario Oriente (ITSO)
Riobamba, Ecuador

Aurelio Iván Quito Álvarez ³ 
ivanquito@bqc.com.ec

Instituto Tecnológico Superior Universitario Oriente (ITSO)
Riobamba, Ecuador

Recepción: 06-11-2024 Aceptación: 16-06-2025 Publicación: 29-07-2025

Como citar este artículo: Chugchilan, H; Quito, B; Quito, A. (2025). **Protocolo de Respuesta a Emergencias por Incendios dentro de Mina subterránea en la Empresa Aurelian Ecuador.** *Metrópolis. Revista de Estudios Globales Universitarios*, 6 (1), pp. 535-574

¹ Tecnólogo en seguridad y salud ocupacional. Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO); Maestrante en Herramientas de Seguridad Industrial y Salud en el Trabajo. (ITSO).

² Abogado, Magister en Educación (Universidad Bicentennial de Aragua) Venezuela, Magister en Ciencias Gerenciales (Universidad internacional del caribe y América latina) Curacao, Doctor en Ciencias de la Educación PHD (UBA) Venezuela, Doctor en Ciencias Gerenciales PHD (universidad internacional del caribe y América latina) Curacao, Postdoctorado en Ciencias de la Educación (UBA) Venezuela.

³ Promotor y gestor de proyectos sociales (Capacitadora JYS), Formación técnica avanzada en participación y gobernanza comunitaria, mediación y resolución de conflictos (Capacitadora JYS), Tecnólogo en Promoción y Defensoría Social (Instituto Superior Tecnológico Jatun Yachay Wasi), Tecnólogo Superior Universitario en Seguridad y Salud Ocupacional (Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO).



Resumen

El presente artículo de investigación aborda la importancia de establecer un protocolo de respuesta a emergencias por incendios dentro de las minas subterráneas. Por ello, fue posible identificar los principales factores de riesgo, como la presencia de materiales combustibles, gases inflamables, equipos eléctricos mal mantenidos y una ventilación deficiente. Además, se destaca la propagación del fuego en espacios confinados, donde las condiciones de calor extremo, la acumulación de gases y la falta de rutas de evacuación adecuadas agravan la situación. Se profundiza además en las normativas y protocolos aplicables en Ecuador, enfatizando de esta manera la necesidad de cumplir con regulaciones de seguridad minera y salud ocupacional. Se resalta la importancia de optimizar el uso de tecnología, como sensores de detección temprana y sistemas de monitoreo en tiempo real, para mejorar la respuesta ante emergencias. También se propone la actualización de los protocolos de evacuación, adaptándolos a las condiciones específicas de cada mina subterránea y asegurando que existan refugios adecuados para la supervivencia de los trabajadores. En cuanto a la capacitación, es notable observar el hecho de que se debe mejorar los programas de formación continua para los trabajadores y brigadas de emergencia, utilizando herramientas como simuladores y realidad virtual para entrenamientos más efectivos. De esta manera mediante el presente estudio, se concluye que un enfoque integral, que combine la identificación de riesgos, el cumplimiento normativo, el uso de tecnología avanzada y la capacitación del personal, es esencial para garantizar la seguridad y protección de los trabajadores en minas subterráneas. **Palabras claves:** Incendios, Protocolo, Minas, Seguridad, Capacitación

Abstract

This research article addresses the importance of establishing an emergency response protocol for fires in underground mines. It identifies the main risk factors, such as the presence of combustible materials, flammable gases, poorly maintained electrical equipment, and inadequate ventilation. The article also highlights the spread of fire in confined spaces, where extreme heat, gas accumulation, and the lack of proper evacuation routes worsen the situation and complicate emergency responses. Furthermore, it explores the regulations and protocols applicable in Ecuador, emphasizing the need to comply with mining safety and occupational health regulations, as well as international standards to ensure better protection for workers. The importance of optimizing technology use, such as early detection sensors and real-time monitoring systems, is also emphasized to improve emergency response. The article proposes updating evacuation protocols, adapting them to the specific conditions of each underground mine, and ensuring the existence of adequate shelters for the survival of workers. Regarding training, it is noted that continuous training programs for workers and emergency brigades should be improved, using tools such as simulators and virtual reality for more effective and realistic training. The study concludes that an integrated approach combining risk identification, regulatory compliance, the use of advanced technology, and staff training is essential to ensure the safety and protection of workers in underground mines. Adopting this approach can significantly reduce the risks associated with mining fires and enhance the overall emergency response efforts, ensuring a safer working environment for all mining personnel involved in these hazardous and life-threatening activities. **Keywords:** Fires, Protocol, Mines, Safety, Training



Introducción.

En el ámbito de la minería subterránea, la seguridad de los trabajadores es una prioridad fundamental debido a los riesgos inherentes a estas actividades. Uno de los mayores desafíos es la gestión de emergencias, particularmente las que involucran incendios, que pueden desencadenar consecuencias devastadoras si no se abordan de manera eficaz. (Coral et al., 2024) En la Empresa Aurelian Ecuador, la correcta implementación de protocolos de respuesta a emergencias por incendios en minas subterráneas es crucial para minimizar los riesgos y proteger tanto a los trabajadores como a las instalaciones. Este estudio tiene como objetivo analizar la eficacia de los protocolos de respuesta a emergencias por incendios dentro de las minas subterráneas de dicha empresa, evaluando sus fortalezas y áreas de mejora. El problema de investigación se centra en la eficiencia y operatividad de los protocolos actuales, y la pregunta que guía este estudio es ¿Cómo contribuyen los protocolos de respuesta a emergencias por incendios en la mina subterránea de la Empresa Aurelian Ecuador a la prevención y manejo de situaciones de emergencia, y qué mejoras pueden implementarse para optimizar su efectividad? Este enfoque permitirá comprender la capacidad de respuesta ante incidentes, la rapidez y precisión en la toma de decisiones, y los recursos utilizados durante una emergencia. La metodología adoptada en este estudio es de carácter cualitativo, con un enfoque descriptivo y analítico. Se llevará a cabo una revisión exhaustiva de los protocolos de respuesta existentes en la Empresa Aurelian Ecuador, complementada con investigación bibliográfica clave involucrado en la gestión de emergencias y análisis de reportes de incidentes pasados. También se realizará una observación directa de los procedimientos en simulacros y situaciones controladas para



evaluar la efectividad de las respuestas ante incendios. (Galvis et al., 2021) Además, se buscará la opinión de expertos en seguridad industrial para obtener una perspectiva externa que permita identificar posibles lagunas en los protocolos. La investigación se desarrollará a lo largo de varias fases: primero, se recopilarán los documentos oficiales de la empresa relacionados con los protocolos; luego, se realizará una serie de entrevistas con los responsables de seguridad y bomberos mineros, además de realizar observaciones directas de los procedimientos de emergencia en acción. Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos, comparándolos con las mejores prácticas en la industria minera internacional, para proponer recomendaciones que fortalezcan los protocolos de respuesta a emergencias en caso de incendios. Este estudio no solo tiene el propósito de identificar deficiencias, sino también de sugerir cambios que puedan salvar vidas y reducir daños materiales en la Empresa Aurelian Ecuador.

Marco Teórico.

El protocolo de respuesta a emergencias por incendios dentro de una mina subterránea es un conjunto de procedimientos y estrategias que se deben seguir en caso de que se produzca un incendio en el interior de la mina (Amoroso y Orellana, 2019). En un entorno tan complejo y peligroso como una mina subterránea, donde las condiciones de trabajo son extremas y las fuentes de riesgo son diversas, la implementación de un protocolo adecuado de respuesta a emergencias es esencial para salvar vidas y reducir daños materiales. El protocolo debe abordar aspectos como la prevención, detección, control y mitigación de los efectos de un incendio, y debe ser conocido y practicado por todo el personal, desde los operativos hasta los responsables de la seguridad. (Kumar et al., 2020) Desde el punto



de vista conceptual, un protocolo de respuesta a emergencias por incendios en minería debe basarse en un enfoque integral que abarque todos los aspectos de la prevención, la preparación y la respuesta ante incidentes (Díaz, 2009). En primer lugar, la prevención es clave, y para ello es necesario identificar los riesgos potenciales de incendio en la mina y establecer medidas para minimizar su ocurrencia, tales como la instalación de sistemas de ventilación adecuados, la correcta gestión de los materiales inflamables y la implementación de procedimientos de trabajo seguros. La detección temprana de un incendio es otro componente crucial, lo que implica el uso de sistemas de alarma e inspección constante. La respuesta, por su parte, se basa en la capacidad del personal para reaccionar de manera inmediata y efectiva ante la situación, lo cual implica tener a disposición recursos como equipos de protección personal, extintores, sistemas de supresión de incendios y, en algunos casos, sistemas automáticos de detección y extinción. Además, es fundamental contar con procedimientos claros para evacuar a los trabajadores de forma ordenada y rápida, y para coordinar las labores de extinción y control del incendio en colaboración con equipos especializados. (Alvarado, 2021) Desde un punto de vista legal, la normativa sobre seguridad laboral y la protección de los trabajadores en las minas establece principios fundamentales que guían la creación y aplicación de protocolos de respuesta ante emergencias por incendios (Reglamento de Prevención, Mitigación y Protección Contra Incendios, 2009). En Ecuador, la Ley de Minas regula la seguridad y salud de los trabajadores en el ámbito minero, contemplando aspectos fundamentales como la prevención de riesgos y la obligación de las empresas de garantizar un entorno de trabajo seguro. Esta ley, junto con los reglamentos que la complementan, establece la responsabilidad de las



empresas en cuanto a la implementación de medidas de seguridad, la capacitación del personal y la realización de simulacros periódicos. El Ministerio de Trabajo, en coordinación con el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, también establece directrices específicas para la seguridad en las minas subterráneas, donde los riesgos asociados a los incendios son particularmente elevados. A nivel internacional, existen normativas y estándares que influyen directamente en la elaboración de los protocolos de emergencia, como las directrices de la Organización Internacional del Trabajo, (OIT), y las normas de la ISO 45001, que promueven sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo (Camacho, 2024) Estas normativas proporcionan un marco general que las empresas deben seguir para garantizar la protección de los trabajadores, lo que incluye la preparación ante incendios. Además, la Norma Internacional de Seguridad Minera, particularmente las guías sobre protección contra incendios en minas subterráneas, establece las mejores prácticas en la prevención y respuesta ante incendios, especificando las medidas de seguridad que deben ser implementadas por las empresas mineras, incluidos los protocolos de intervención ante emergencias. (Hansen, 2021) La aproximación teórica al tema de los protocolos de respuesta a emergencias por incendios en minas subterráneas también se sustenta en diversas teorías que ayudan a entender cómo se deben estructurar y gestionar las respuestas ante situaciones de crisis. La teoría de gestión de crisis es central en este tipo de estudios, ya que aborda cómo las organizaciones deben prepararse para enfrentar situaciones de emergencia mediante la planificación y la creación de estructuras de respuesta efectivas. (Ajith et al., 2021) Otra teoría relevante es la teoría del comportamiento humano en situaciones de emergencia, que se enfoca en



cómo las personas reaccionan ante situaciones de crisis. Esta teoría es crucial en el diseño de protocolos de respuesta, ya que permite anticipar las reacciones del personal ante un incendio y diseñar procedimientos que consideren aspectos psicológicos, como el manejo del estrés y el pánico (Valencia, 2019). Además, la teoría de sistemas también juega un papel importante en las emergencias por incendios, ya que considera la mina subterránea como un sistema complejo compuesto por diversas partes interconectadas. En este caso, la interacción entre los sistemas de ventilación, los equipos de protección, la comunicación y la toma de decisiones son factores críticos para una respuesta efectiva.

Estado del Arte

El estudio del protocolo de respuesta a emergencias por incendios en minas subterráneas ha sido ampliamente abordado por diversos autores e instituciones a nivel mundial, debido a la gravedad y complejidad que representan estos eventos en entornos confinados. Los incendios en minas subterráneas constituyen una de las principales amenazas tanto para la seguridad de los trabajadores como para la preservación de la infraestructura minera, ya que pueden generar condiciones extremadamente peligrosas, como la propagación rápida de humo tóxico, el colapso de estructuras y la disminución de oxígeno disponible. Diversos estudios han señalado que los incendios en minas subterráneas presentan desafíos únicos debido a las condiciones cerradas, la limitada ventilación y la presencia de materiales inflamables. Ortiz et al. (2020), destacan que la propagación del fuego en una mina subterránea puede ser rápida y difícil de controlar, lo que hace esencial contar con protocolos bien diseñados y entrenados. En su investigación sobre incendios en minas de carbón,



encontraron que la principal causa de fatalidades es la inhalación de humo tóxico antes de que los trabajadores puedan evacuar o recibir asistencia. Este hallazgo resalta la importancia de contar con sistemas de detección temprana y estrategias claras de evacuación. En esta misma línea, Kirsch et al. (2021), analizaron la eficacia de los protocolos de emergencia en minas subterráneas de Australia, concluyendo que la rapidez en la activación del protocolo es un factor determinante para minimizar pérdidas humanas. Según sus hallazgos, las minas con planes de respuesta bien estructurados, con personal capacitado y equipos de detección automatizados, presentan tasas significativamente menores de accidentes fatales. También enfatizan que la formación continua del personal y la realización de simulacros mejoran la capacidad de respuesta ante un evento real. Por su parte la, (OIT), ha establecido que un protocolo de respuesta efectivo debe incluir una identificación clara de rutas de escape, el uso de equipos de protección personal adecuados y la implementación de sistemas de ventilación para evitar la acumulación de gases tóxicos. En su informe sobre seguridad minera, se destaca que la comunicación efectiva dentro de la mina es un factor crítico para la evacuación segura. Sin un sistema de comunicación funcional, la coordinación de la respuesta a emergencias puede verse gravemente afectada, aumentando el riesgo para los trabajadores atrapados. (Díaz, 2009) Desde una perspectiva normativa, la Administración de Seguridad y Salud en Minas de los Estados Unidos (MSHA, por sus siglas en inglés) establece en su reglamento 30 CFR Part 75 que las minas subterráneas deben contar con sistemas de ventilación de emergencia, salidas de emergencia claramente señalizadas y procedimientos de evacuación estructurados. Un estudio realizado por (Melody y Johnston, 2023), evaluó la implementación de estas regulaciones



en minas de Estados Unidos y concluyó que aquellas que cumplen con estos requisitos presentan menores tasas de mortalidad en incendios. Sus hallazgos también evidencian que el uso de tecnología avanzada, como sensores de detección de monóxido de carbono y sistemas de alerta temprana, es clave para la mitigación del riesgo. En estudios realizados por Arrarás (2023), sobre minas subterráneas en Argentina muestran que la falta de actualización en los protocolos de emergencia puede ser un factor crítico que aumenta la vulnerabilidad de los trabajadores. En su análisis de incidentes en minas de cobre, identificaron que en muchos casos los protocolos no consideran adecuadamente la variabilidad de condiciones dentro de la mina, lo que genera respuestas ineficaces ante emergencias reales. Su investigación concluye que la adaptación de los protocolos a cada operación minera es fundamental para mejorar la seguridad. En Ecuador, la normativa de seguridad en minería establece regulaciones generales sobre la gestión de emergencias en minas, aunque existen oportunidades para mejorar la especificidad de los protocolos en relación con los incendios en minas subterráneas. Un análisis realizado por Amoroso y Orellana (2019), sugiere que muchas empresas en el país aún presentan deficiencias en la implementación de estas medidas. En su estudio sobre seguridad minera en Ecuador, encontraron que algunas minas subterráneas carecen de equipos de respiración autónomos adecuados y que los planes de evacuación no siempre se comunican de manera efectiva al personal. La industria minera genera grandes volúmenes de datos digitales, como las concentraciones de gases medidas por detectores personales, pero estos suelen estar infrautilizados o descartados. En Colombia, la aplicación de redes neuronales artificiales en minería podría permitir la predicción de eventos peligrosos, como



explosiones de metano. Un ejemplo es el caso de la explosión en (Molina et al., 2023), donde un modelo basado en IA demostró que, a partir de datos de sensores y herramientas de modelamiento físico, es posible generar alertas tempranas con una precisión del 97,19 %, lo que evidencia el potencial de estas tecnologías en la gestión de riesgos mineros.

Desarrollo.

Factores de riesgo en incendios subterráneos

Los incendios en minas subterráneas representan una de las amenazas más graves para la seguridad de los trabajadores, debido a las condiciones particulares de estos entornos, como el espacio confinado, la limitada ventilación y la presencia de materiales combustibles. Estas características dificultan el control del fuego y la evacuación rápida del personal, incrementando el riesgo de accidentes fatales. De acuerdo con la Organización Internacional del Trabajo (2022), los incendios en minas pueden generar atmósferas tóxicas debido a la acumulación de gases nocivos como monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, los cuales pueden provocar intoxicaciones severas e incluso la asfixia de los trabajadores si no se implementan medidas de ventilación adecuadas. Las minas subterráneas presentan múltiples materiales combustibles que pueden contribuir a la propagación de incendios. Entre ellos, el carbón, presente de manera natural en yacimientos, es altamente inflamable y puede actuar como fuente primaria de combustión. Además, los aceites y lubricantes empleados en la maquinaria minera pueden favorecer la intensificación del fuego debido a su facilidad para arder. Los sistemas eléctricos, si no cuentan con un mantenimiento adecuado, pueden generar chispas o cortocircuitos que inicien un incendio.



Asimismo, las estructuras de soporte de madera, utilizadas en algunas minas, representan un riesgo adicional al ser materiales combustibles. Un factor crítico es la acumulación de polvo de carbón, que, debido a su alta inflamabilidad, puede provocar una rápida propagación del fuego y explosiones secundarias si se dispersa en el aire en concentraciones adecuadas. (Camacho, 2024) Uno de los principales factores de riesgo en incendios dentro de una mina subterránea es la presencia de gases inflamables y tóxicos, en particular el metano y el monóxido de carbono, los cuales influyen directamente en la severidad del evento y en la estrategia de respuesta ante emergencias. El metano, aunque más común en minas de carbón, también puede encontrarse en yacimientos de oro y plata, liberándose de fracturas en la roca o de acumulaciones subterráneas de material orgánico en descomposición. Si no se disipa adecuadamente mediante un sistema de ventilación eficiente, puede alcanzar concentraciones explosivas en un rango del 5 % al 15 % en volumen, lo que obliga a los equipos de respuesta a priorizar la detección y neutralización de este gas antes de ingresar a las zonas afectadas. La activación de sistemas de ventilación de emergencia, el uso de sensores en tiempo real y la aplicación de barreras de contención son medidas fundamentales para prevenir detonaciones. (Hansen, 2021) El monóxido de carbono, por su parte, se genera como subproducto de la combustión incompleta de materiales inflamables dentro de la mina, como aceites, lubricantes y estructuras de madera utilizadas en soportes. Este gas es especialmente peligroso en minas de oro y plata debido a la posible presencia de procesos metalúrgicos que involucren altas temperaturas, como la fundición o el uso de explosivos en voladuras. La exposición al monóxido de carbono en concentraciones superiores a 400 ppm puede provocar síntomas graves de



intoxicación, mientras que niveles superiores a 1,600 ppm pueden causar asfixia y muerte en pocos minutos. Por ello, dentro del protocolo de respuesta a emergencias, es esencial el uso de equipos de respiración autónoma y la implementación de rutas de evacuación seguras con puntos de aire fresco. (Valencia, 2019) Estos gases no solo aumentan el riesgo de explosiones e incendios descontrolados, sino que también representan un peligro directo para los trabajadores y los equipos de rescate. La exposición a monóxido de carbono, metano y dióxido de azufre puede causar asfixia, intoxicaciones severas y afectar la capacidad de respuesta del personal dentro de la mina. En este contexto, es fundamental implementar estrategias efectivas para la detección y mitigación de estos riesgos. El protocolo de respuesta debe incluir medidas de monitoreo continuo con detectores multigás estratégicamente ubicados en las galerías y zonas de trabajo. Estos dispositivos deben estar conectados a un sistema centralizado que permita la detección en tiempo real de concentraciones peligrosas y active alarmas automáticas para alertar a los trabajadores y equipos de emergencia. (Figuroa, 2023) Ramírez et al. (2024), en su investigación manifiestan que los equipos eléctricos y la maquinaria pesada en minas subterráneas pueden convertirse en fuentes de ignición si no reciben un mantenimiento adecuado y continuo. La presencia de motores eléctricos, transformadores y sistemas de alimentación de alta potencia incrementa el riesgo de fallas eléctricas que pueden derivar en incendios. El sobrecalentamiento de motores eléctricos es una de las principales causas de incendios en entornos mineros subterráneos. Factores como la acumulación de polvo, la falta de ventilación y el uso prolongado de la maquinaria pueden elevar la temperatura de los componentes hasta niveles críticos, provocando la ignición de aceites lubricantes y otros materiales



inflamables cercanos. Los cortocircuitos representan otro riesgo significativo, especialmente en zonas donde el cableado eléctrico está expuesto a humedad, vibraciones constantes y daños mecánicos. Según, Figueroa (2023), las fallas en el aislamiento de los cables pueden generar arcos eléctricos y chispas, iniciando incendios que se propagan rápidamente si hay presencia de combustibles como madera en las estructuras de soporte o derrames de aceites y lubricantes. Los sistemas de baterías y generadores también constituyen un peligro latente si no cuentan con dispositivos de protección adecuados. La sobrecarga de baterías o la acumulación de gases inflamables en áreas mal ventiladas pueden provocar explosiones o incendios repentinos. Para mitigar estos riesgos, el protocolo de respuesta a emergencias debe incluir la instalación de interruptores automáticos, recubrimientos ignífugos en los cables y sistemas de detección de temperatura que permitan identificar anomalías antes de que se conviertan en incidentes graves. (Arrarás, 2023) En la investigación de Acurio (2024), se menciona que la ventilación en minas subterráneas es un factor crítico para la seguridad, ya que permite diluir gases inflamables, controlar la temperatura y mantener niveles adecuados de oxígeno para los trabajadores. Sin embargo, cuando los sistemas de ventilación presentan fallas o no están diseñados correctamente, pueden contribuir a la acumulación de gases peligrosos como metano, monóxido de carbono y dióxido de azufre, lo que incrementa significativamente el riesgo de incendios y explosiones. Calizaya (2022), manifiesta que un sistema de ventilación deficiente puede intensificar un incendio al generar focos de calor concentrado y alterar la dinámica de la combustión dentro de la mina. La falta de un flujo de aire eficiente puede provocar que las llamas se aviven en determinadas áreas y se expandan de manera



impredicible, complicando los esfuerzos de extinción y contención del fuego. Además, la acumulación de calor en espacios confinados puede desencadenar la ignición espontánea de materiales inflamables, agravando la emergencia. Otro aspecto crítico es la propagación del humo en un entorno subterráneo. Estudios recientes han demostrado que una ventilación inadecuada favorece la acumulación de humo denso, reduciendo drásticamente la visibilidad y dificultando la orientación de los trabajadores durante una evacuación. En minas de oro y plata, donde la presencia de estructuras de soporte de madera y lubricantes industriales incrementa la producción de humo tóxico, la falta de un sistema de ventilación eficiente puede agravar la emergencia. La inhalación de gases tóxicos presentes en el humo, como monóxido de carbono, cianuro de hidrógeno y dióxido de azufre, puede causar intoxicaciones graves en pocos minutos, afectando la capacidad de respuesta y desplazamiento de los trabajadores. Para mitigar estos riesgos, es fundamental implementar sistemas de ventilación con flujo controlado, que dirijan el humo lejos de las rutas de escape y mantengan un suministro de oxígeno adecuado en zonas críticas. (Castilla et al., 2024) Las minas subterráneas presentan un entorno de espacio confinado, lo que limita significativamente las rutas de evacuación en caso de incendio. La disposición de los túneles y galerías puede hacer que los trabajadores se encuentren a grandes distancias de las salidas seguras, lo que incrementa el tiempo de evacuación y el riesgo de exposición a gases tóxicos, altas temperaturas y colapsos estructurales, según Florez et al. (2022), la distancia entre los trabajadores y los puntos de evacuación puede ser considerable, lo que retrasa la respuesta de emergencia y reduce las probabilidades de un escape seguro. En



situaciones críticas, donde el fuego se propaga rápidamente, cada minuto es crucial para la supervivencia de los mineros.

Propagación del fuego en espacios confinados

La propagación del fuego en espacios confinados, como en minas subterráneas de oro y plata, presenta características únicas debido a la limitación de oxígeno, la acumulación de calor y la falta de rutas de escape seguras. Estos factores influyen directamente en la velocidad de desarrollo del incendio y en la efectividad de las estrategias de respuesta ante emergencias. Según, Ortiz et al. (2008), los incendios en entornos subterráneos pueden evolucionar de manera más agresiva y rápida en comparación con espacios abiertos. La presencia de materiales combustibles como aceites, lubricantes y estructuras de madera en los soportes, combinada con la alta temperatura generada en espacios confinados, favorece la intensificación del fuego y la propagación de llamas a través de túneles y galerías. Además, la ventilación inadecuada o defectuosa puede crear corrientes de aire que alimentan el fuego, generando cambios bruscos en la dirección de las llamas y dificultando su control. Otro factor crítico es la acumulación de calor en el interior de la mina. La radiación térmica atrapada dentro del espacio confinado puede elevar rápidamente la temperatura ambiental, lo que aumenta el riesgo de inflamación súbita de gases y materiales combustibles cercanos. En casos extremos, este fenómeno puede dar lugar a explosiones secundarias o eventos de combustión súbita generalizada, poniendo en peligro tanto a los trabajadores atrapados como a los equipos de rescate. (Herrera, 2020) Según López (2022), indica que el fuego en espacios confinados se caracteriza por una combustión incompleta debido a la reducción de



oxígeno y la acumulación de productos de combustión, como el monóxido de carbono y otros gases tóxicos. A medida que el fuego consume el oxígeno disponible, la combustión puede volverse deficiente, produciendo altas concentraciones de humo y gases inflamables que pueden generar explosiones secundarias si entran en contacto con nuevas fuentes de oxígeno. Uno de los principales peligros en incendios dentro de espacios confinados es la acumulación de humo denso, que reduce la visibilidad y complica la evacuación de los trabajadores. Según estudios de Vega et al. (2017), en condiciones de incendio subterráneo, el humo puede desplazarse rápidamente por los túneles, dificultando la orientación y aumentando el riesgo de intoxicación por gases tóxicos antes de que las llamas alcancen a los trabajadores.

Protocolos y normativas aplicables en Ecuador

La seguridad en minas subterráneas en Ecuador está regulada por un conjunto de normativas y protocolos diseñados para prevenir y mitigar riesgos asociados a incendios y otras emergencias. Estas normativas incluyen regulaciones nacionales e internacionales adoptadas por el país, con el objetivo de garantizar la seguridad de los trabajadores y minimizar el impacto de los incidentes en la industria minera (Acurio, 2024). A nivel nacional, el Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo para el Sector Minero, emitido por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, establece lineamientos específicos para la gestión de riesgos en minas subterráneas. Entre sus disposiciones se incluyen la obligatoriedad de sistemas de ventilación adecuados, el uso de equipos de protección personal y la implementación de planes de emergencia y evacuación en caso de incendios. Además, se exige la instalación de



sensores de gases inflamables y tóxicos, así como la capacitación periódica del personal en medidas de prevención y respuesta ante incendios. (Resolución Nro. ARCERNNR-013/2020, 2020) En Ecuador, la Ley de Minería establece los principios generales para la explotación minera, incluyendo aspectos relacionados con la seguridad laboral. Dentro de dicha ley, se estipula que todas las actividades mineras deben cumplir con estándares de seguridad industrial y salud ocupacional, conforme a las regulaciones emitidas por el Ministerio de Energía y Minas y otras entidades competentes. (Registro Oficial No. 517, 2009) Esta ley establece la obligación de implementar medidas preventivas para reducir los riesgos en minas subterráneas, especialmente en lo que respecta a incendios y otros incidentes de alto impacto. Dentro de estas disposiciones se encuentran la exigencia de contar con planes de emergencia, sistemas de ventilación adecuados, equipos de detección de gases inflamables y la capacitación periódica del personal en seguridad minera. El cumplimiento de la normativa es supervisado por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, (ARCERNNR), que realiza auditorías e inspecciones en las operaciones mineras. En caso de incumplimientos que representen un riesgo inminente para los trabajadores, la autoridad puede ordenar la suspensión temporal o definitiva de las actividades hasta que se corrijan las deficiencias. (Resolución Nro. ARCERNNR-013/2020, 2020) Adicionalmente, el reglamento derivado de la Ley de Minería establece que las empresas deben garantizar la disponibilidad de equipos de protección personal adecuados, como respiradores autónomos y trajes resistentes al fuego, para el personal que trabaja en zonas de alto riesgo. También se exige la instalación de sistemas de alarma y comunicación de emergencia, así como



la realización de simulacros periódicos para evaluar la efectividad de los protocolos de respuesta ante incendios y explosiones. (López, 2022) Asimismo, Acurio (2024), menciona que el Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo para el Sector Minero establece lineamientos específicos sobre la prevención y control de incendios en minas subterráneas, abarcando aspectos como el uso de equipos de protección personal, la implementación de sistemas de ventilación y la realización de simulacros de emergencia. El plan de evacuación es otro componente esencial del protocolo de respuesta a emergencias en minas subterráneas. Este plan debe incluir rutas de escape señalizadas, diseñadas estratégicamente para permitir una evacuación rápida y segura en caso de incendio u otra emergencia. La presencia de señalización luminosa y guías táctiles es fundamental para facilitar la orientación de los trabajadores en condiciones de baja visibilidad, especialmente cuando el humo denso dificulta la identificación de las salidas. (Camacho, 2024) Además, el plan debe contemplar la existencia de refugios de seguridad en puntos estratégicos dentro de la mina. Estos refugios están diseñados para brindar protección a los trabajadores que no puedan evacuar de inmediato, ya sea debido a la propagación del fuego, el colapso de túneles o la presencia de gases tóxicos. La normativa ecuatoriana establece que todas las minas subterráneas deben contar con estos espacios de emergencia, los cuales deben estar equipados con suministro de oxígeno, agua potable y sistemas de comunicación para que los trabajadores puedan mantenerse en contacto con los equipos de rescate. (Lomas, 2019) Las brigadas de emergencia desempeñan un papel fundamental en la contención del fuego y el rescate de personas atrapadas en minas subterráneas. Estas brigadas deben estar conformadas por personal seleccionado y capacitado



específicamente para actuar en condiciones extremas, donde la visibilidad reducida, la acumulación de gases tóxicos y la propagación rápida del fuego representan un alto riesgo. Para garantizar su efectividad, los integrantes de las brigadas deben recibir formación en técnicas avanzadas de extinción de incendios en espacios confinados. Esto incluye el uso de agentes extintores adecuados para diferentes tipos de combustibles presentes en la mina, como aceites, cables eléctricos y estructuras de madera. Además, deben estar entrenados en la aplicación de métodos de enfriamiento y aislamiento del fuego para evitar su propagación a otras áreas críticas de la mina. (Useda, 2020) El Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo para el Sector establece disposiciones específicas relacionadas con la seguridad en minas subterráneas, con el objetivo de reducir riesgos y garantizar la integridad de los trabajadores. Entre sus principales lineamientos se encuentra la obligatoriedad de contar con sistemas de detección de incendios, los cuales deben incluir sensores de humo y calor, alarmas tempranas y dispositivos de monitoreo continuo de gases inflamables y tóxicos, como el metano y el monóxido de carbono (Calizaya, 2022). Asimismo, el reglamento exige el mantenimiento regular de los equipos de seguridad, incluyendo extintores, mangueras contra incendios, sistemas de rociadores automáticos y equipos de respiración autónoma. La normativa establece que estos dispositivos deben ser inspeccionados periódicamente por personal capacitado, con registros documentados de cada revisión para garantizar su operatividad en caso de emergencia. Además, los sistemas eléctricos y la maquinaria utilizada en la mina deben someterse a revisiones constantes para prevenir fallos que puedan generar chispas, sobrecalentamiento o cortocircuitos, los cuales representan un alto riesgo de ignición en entornos subterráneos. (Lomas, 2019)



Propuestas de Mejora

Optimización de equipos y tecnología

Una de las estrategias esenciales en la optimización de la respuesta a incendios en minas subterráneas es la instalación de sensores de detección temprana, como detectores de humo, calor y gases inflamables (metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono). Estos dispositivos permiten identificar de manera rápida cualquier anomalía en la atmósfera de la mina, alertando a los operadores antes de que el fuego se propague y comprometa la seguridad de los trabajadores. Los detectores de humo y calor son fundamentales en la prevención de incendios, ya que pueden detectar la presencia de partículas de combustión y cambios abruptos de temperatura en zonas críticas de la mina. La integración de estos sensores con sistemas automatizados de alarmas y protocolos de evacuación mejora significativamente la capacidad de respuesta ante una emergencia. (Vega et al., 2017) En la investigación de López (2022), se considera que, la integración de sistemas automatizados de monitoreo en tiempo real representaría una mejora significativa en la capacidad de respuesta ante emergencias. Estos sistemas, conectados a una red central de supervisión, podrían generar alertas inmediatas a los operadores y brigadas de emergencia, permitiendo una acción rápida para mitigar el incendio antes de que alcance niveles críticos. Además, la combinación de sensores con software de análisis de datos facilitaría la identificación de patrones de riesgo, permitiendo medidas preventivas antes de que ocurra un evento peligroso. La implementación de estos sistemas también debe ir acompañada de protocolos de mantenimiento periódico para garantizar su correcto funcionamiento. La normativa ecuatoriana exige que los dispositivos de detección sean sometidos a pruebas regulares y



calibraciones para asegurar su precisión en la identificación de riesgos. Además, se recomienda que los datos recopilados por estos sensores sean utilizados para la mejora continua de los planes de emergencia y la capacitación del personal en la respuesta ante incendios. (Herrera, 2020) Quintanilla (2023), dice que los sensores deben estar interconectados con un sistema centralizado de control y monitoreo, que no solo detecte anomalías, sino que también genere alertas automáticas y active mecanismos de supresión de incendios de forma remota. Este sistema debe integrarse con la infraestructura de seguridad de la mina para garantizar una respuesta inmediata ante cualquier señal de riesgo. El uso de tecnología permite que estos sistemas envíen datos en tiempo real a una sala de control, donde los operadores pueden monitorear constantemente las condiciones atmosféricas y estructurales de la mina. La interconexión de sensores de humo, calor y gases inflamables con algoritmos de análisis predictivo optimiza la detección temprana de incendios, reduciendo el tiempo de reacción y minimizando el impacto de la emergencia. Además, la incorporación de dispositivos de comunicación inalámbrica con tecnología de radiofrecuencia o redes de comunicación en malla, (mesh networks), permitiría una mejor coordinación entre los equipos de rescate y los operadores de la mina. Asimismo, la integración de estos sistemas con sensores de monitoreo en tiempo real optimiza la respuesta, ya que los datos sobre temperatura, presencia de gases inflamables y visibilidad pueden ser transmitidos de inmediato a los equipos de rescate y a la sala de control de la mina. Esto facilita la toma de decisiones basada en información precisa, permitiendo una evacuación más organizada y segura. (Mahmud et al., 2016) Otro beneficio clave de estos dispositivos es la posibilidad de establecer comunicación con refugios de emergencia, donde



los trabajadores atrapados pueden informar sobre su estado y recibir instrucciones mientras esperan ser rescatados. De igual manera, estos sistemas pueden vincularse a dispositivos portátiles o variables utilizados por los mineros, como cascos con micrófonos integrados y transmisores de ubicación, lo que mejora la capacidad de rastreo y coordinación durante una emergencia. (Quintanilla, 2023) Cabe mencionar que un incendio en una mina subterránea puede generar acumulación de gases tóxicos e inflamables, aumentando el riesgo de explosiones secundarias. Se puede optimizar su estrategia de mitigación mediante la implementación de sistemas de ventilación inteligentes, que ajusten automáticamente el flujo de aire según la detección de contaminantes. La capacitación del personal es un aspecto crucial en la optimización de la respuesta a emergencias. Se puede mejorar la preparación de sus trabajadores mediante el uso de simulaciones computarizadas y realidad aumentada, que permiten entrenamientos en entornos virtuales de alto realismo sin exponer al personal a riesgos reales. Además, estas herramientas pueden integrarse con sistemas de monitoreo en tiempo real, permitiendo que los operadores y brigadas de emergencia practiquen la respuesta ante incendios basándose en datos históricos y condiciones específicas de cada mina. Esto contribuye a una capacitación más personalizada y efectiva, alineada con los riesgos particulares de cada operación minera. (Florez et al., 2022)

Revisión de protocolos de evacuación

La revisión de los protocolos de evacuación en minas subterráneas es un proceso fundamental para garantizar la seguridad de los trabajadores ante un incendio. Esta revisión debe centrarse en la evaluación de rutas de escape, la implementación de refugios de emergencia, la capacitación del



personal y la integración de tecnología avanzada para mejorar la respuesta ante emergencias. Uno de los aspectos clave es la inspección constante de las rutas de evacuación, asegurando que estén despejadas de obstáculos y correctamente señalizadas con iluminación de emergencia y señalización fotoluminiscente, lo que permite la orientación de los trabajadores en condiciones de poca visibilidad debido al humo o fallas eléctricas. (Useda, 2020) Además, en situaciones donde la evacuación inmediata no sea posible, los refugios de emergencia juegan un papel crucial. Estos deben contar con suministro de oxígeno, sistemas de filtración de aire, reservas de agua y alimentos, kits de primeros auxilios y sistemas de comunicación con el centro de control. Es vital que estos refugios sean revisados periódicamente para garantizar su operatividad y accesibilidad, además de realizar pruebas con el personal para asegurar que puedan acceder a ellos en situaciones de emergencia. (Castilla et al., 2024) Otro elemento fundamental en la revisión de los protocolos de evacuación es la realización de simulacros regulares. Estos ejercicios permiten evaluar la efectividad del plan de evacuación y corregir deficiencias antes de enfrentar una emergencia real. En las minas subterráneas, se recomienda realizar simulacros al menos cada seis meses, asegurando la participación de todos los trabajadores y adaptando los escenarios a distintas eventualidades. La evaluación del tiempo de respuesta, el uso de equipos de respiración autónoma y la capacitación específica para los líderes de evacuación son estrategias que mejoran la eficacia del proceso y reducen los riesgos. (Contreras y Nuñez, 2022) 22 Quintanilla (2023), manifiesta que la incorporación de tecnología en los protocolos de evacuación es otro punto clave. La integración de sensores de detección de incendios y gases peligrosos, sistemas de comunicación avanzados como radios intramina y



dispositivos de localización de trabajadores, puede mejorar la capacidad de respuesta. Asimismo, contar con una sala de control centralizada que monitoree en tiempo real la situación de la mina y coordine la evacuación permite tomar decisiones estratégicas basadas en datos precisos. (Acurio, 2024) Asimismo, Acurio (2024), alude a la revisión de los protocolos de evacuación debe garantizar el cumplimiento de las normativas nacionales e internacionales. En Ecuador, el Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo para el Sector Minero establece lineamientos específicos para la evacuación en minas subterráneas, mientras que normativas internacionales brindan estándares para la seguridad humana y la prevención de incendios en minas. La Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, (ARCERNNR), también supervisa las condiciones de seguridad en las operaciones mineras, por lo que es fundamental actualizar periódicamente los protocolos para cumplir con los requisitos establecidos y mejorar la seguridad de los trabajadores.

Mejoras en formación y capacitación

La mejora en la formación y capacitación del personal en minas subterráneas es un pilar fundamental para reducir el riesgo de incidentes y optimizar la respuesta ante emergencias por incendios. La capacitación adecuada permite que los trabajadores conozcan los procedimientos de evacuación, el uso de equipos de protección y las medidas de autoprotección necesarias en situaciones críticas. Según, García (2023), la educación en seguridad minera debe ser continua y adaptada a las condiciones específicas del entorno, garantizando que cada trabajador sepa cómo actuar en caso de un siniestro. Uno de los principales enfoques en la formación debe ser el entrenamiento en el uso de equipos de



respiración autónoma y dispositivos de detección de gases. En incendios subterráneos, la inhalación de humo y gases tóxicos representa una de las principales causas de fatalidades. Capacitar a los mineros en el uso adecuado de estos equipos y realizar prácticas regulares incrementa sus posibilidades de supervivencia. Estudios como los resaltan que la simulación en entornos controlados ayuda a mejorar la toma de decisiones y la reacción de los trabajadores en condiciones extremas. (López, 2022) Los simulacros periódicos también forman parte de una estrategia de capacitación efectiva. Estos ejercicios deben realizarse en diferentes condiciones y con distintos escenarios, desde incendios localizados hasta evacuaciones de gran escala. Según, (Chireca et al., 2024) la frecuencia y realismo de los simulacros influyen directamente en la rapidez y eficiencia de la respuesta ante emergencias. Las mineras subterráneas deben implementar un plan de simulacros que abarque tanto el entrenamiento de nuevos empleados como la actualización de conocimientos en el personal experimentado. López (2022), también menciona que el uso de tecnología y realidad virtual en la capacitación ha demostrado ser una herramienta eficaz en la industria minera. Dado que las minas subterráneas representan entornos de alto riesgo, es fundamental que los trabajadores cuenten con entrenamiento práctico sin exponerse a situaciones peligrosas. Es por tal motivo que, los sistemas de simulación inmersiva permiten recrear escenarios de emergencia, como incendios, derrumbes y fugas de gases tóxicos, brindando a los trabajadores la oportunidad de experimentar estos eventos en un ambiente controlado. Investigaciones como la de López (2022), indican que la formación mediante simuladores incrementa la retención de conocimientos en comparación con métodos tradicionales. Esto se debe a que la interacción con entornos virtuales mejora la



comprensión de protocolos de seguridad, permitiendo que los trabajadores practiquen respuestas ante emergencias de manera más realista y efectiva. Además, el uso de realidad virtual facilita la identificación de errores en la toma de decisiones, proporcionando retroalimentación inmediata para corregir acciones inadecuadas antes de enfrentarse a situaciones reales. Otra ventaja de estas tecnologías es su capacidad para adaptarse a las características específicas de cada mina, incluyendo su infraestructura, sistemas de ventilación y puntos de riesgo. De esta manera, el entrenamiento se vuelve más relevante y aplicable a las condiciones reales del sitio de trabajo. La integración de simulaciones inmersivas en la formación del personal no solo mejora la seguridad en las operaciones mineras, sino que también reduce los costos asociados a entrenamientos físicos y minimiza el riesgo de accidentes durante la capacitación. A largo plazo, estas herramientas tecnológicas representan una inversión estratégica para fortalecer la preparación de los trabajadores y optimizar la respuesta ante emergencias en minas subterráneas de oro y plata. (Ortega, 2023) La formación en primeros auxilios y manejo de crisis es esencial para reducir la mortalidad en incidentes dentro de minas subterráneas. La naturaleza confinada de estos entornos y la presencia de riesgos como incendios, derrumbes y exposición a gases tóxicos hacen que la respuesta inmediata por parte de los trabajadores sea crucial para la supervivencia de las víctimas. En un incendio subterráneo, la inhalación de humo y gases nocivos como monóxido de carbono y dióxido de azufre puede provocar asfixia en pocos minutos. Por ello, los mineros deben estar capacitados en el uso de equipos de respiración autónoma y en la evacuación de compañeros afectados. Además, es fundamental que sepan aplicar maniobras de reanimación cardiopulmonar, (RCP), y técnicas de



control de hemorragias, ya que los tiempos de respuesta de los equipos de rescate pueden extenderse debido a la complejidad del acceso a las galerías. (Arrarás, 2023) Según, Hansen (2021), es fundamental que los trabajadores cuenten con habilidades básicas de reanimación cardiopulmonar, (RCP), ya que la inhalación de humo o gases tóxicos como el monóxido de carbono puede provocar asfixia y pérdida de conciencia en pocos minutos. Además, la capacitación en control de hemorragias es vital, dado que las lesiones por desprendimiento de rocas o impactos durante una evacuación apresurada pueden ser graves. Técnicas como el uso de torniquetes, vendajes compresivos y la correcta movilización de heridos ayudan a minimizar el riesgo de complicaciones antes de la llegada de personal médico. Otro aspecto clave es la atención a intoxicaciones por humo o gases nocivos. La exposición prolongada a sustancias como el dióxido de carbono, el metano o el cianuro de hidrógeno en minas de oro y plata puede causar síntomas severos, incluyendo mareos, pérdida de conciencia y daño neurológico. Por ello, los trabajadores deben estar entrenados en el reconocimiento de estos síntomas y en la administración de oxígeno de emergencia en refugios mineros o puntos de seguridad. (Galvis et al., 2021) Villaseñor (2019), menciona que contar con brigadas de emergencia bien capacitadas dentro de la mina permite dar una respuesta rápida y efectiva mientras llegan los equipos de rescate especializados. Estas brigadas deben recibir formación continua y realizar simulacros periódicos para mejorar su capacidad de reacción en situaciones de alta presión, especialmente en incendios dentro de minas de oro y plata, donde la presencia de gases tóxicos y estructuras colapsables agrava la emergencia. Para garantizar una respuesta eficiente, las brigadas deben estar integradas por personal entrenado en control de incendios en



espacios confinados, evacuación de víctimas y manejo de equipos de respiración autónoma. La capacitación debe incluir el uso de trajes ignífugos, cámaras térmicas para la localización de personas en áreas de baja visibilidad y procedimientos de rescate en ambientes de calor extremo.

Discusión.

Para Camacho (2024), el protocolo de respuesta a emergencias por incendios en minas subterráneas es una de las herramientas más cruciales para garantizar la seguridad de los trabajadores en la industria minera. Las minas subterráneas, debido a sus características específicas, presentan un conjunto único de desafíos cuando se trata de la gestión de incendios y la seguridad en general. Estos incluyen condiciones de espacio confinado, la presencia de materiales inflamables y combustibles, la limitada ventilación natural y la dificultad de evacuación rápida. Por ello, desarrollar un protocolo adecuado para responder a emergencias por incendios no solo es una exigencia regulatoria, sino una necesidad vital para prevenir pérdidas humanas, daños materiales y afectaciones al medio ambiente. La minería subterránea, especialmente en el caso de la extracción de minerales preciosos, involucra una combinación de factores que incrementan el riesgo de incendios. La maquinaria pesada, el uso de explosivos, la acumulación de polvo de mineral y la presencia de gases inflamables, como el metano, constituyen una mezcla peligrosa que puede desencadenar incendios o explosiones en cualquier momento. Además, los equipos eléctricos, los sistemas de ventilación y las estructuras de soporte son vulnerables a fallos que, si no son gestionados correctamente, pueden generar condiciones propicias para la combustión. Según Useda (2020),



estos riesgos son particularmente altos en minas subterráneas, donde la presencia de combustibles como aceites y lubricantes, junto con la acumulación de polvo de carbón y otros materiales inflamables, puede hacer que los incendios se propaguen rápidamente. En un escenario de emergencia, la rapidez y efectividad de la respuesta de los equipos de rescate son fundamentales. Sin embargo, las condiciones de las minas subterráneas representan una barrera considerable para la evacuación y el rescate de los trabajadores. El espacio confinado y la disposición laberíntica de los túneles dificultan la movilidad, haciendo que las rutas de escape sean limitadas. En caso de un incendio, el colapso de los túneles debido al calor extremo puede bloquear los accesos y atrapar a los trabajadores. Esta situación es aún más compleja cuando se consideran las limitaciones de visibilidad causadas por el humo denso y los gases tóxicos generados por la combustión. Florez et al. (2022), destacan que las distancias largas entre los trabajadores y las salidas seguras, combinadas con el riesgo de obstrucción de las rutas de evacuación, son factores determinantes que retrasan la respuesta de emergencia en minas subterráneas. Es notable mencionar que el riesgo de intoxicación por humo o gases tóxicos, como el monóxido de carbono o el cianuro de hidrógeno, aumenta significativamente en ambientes subterráneos. Estos gases no solo representan una amenaza directa para la salud de los trabajadores, sino que también dificultan la evacuación, pues su inhalación puede causar pérdida de conciencia o daño irreversible en cuestión de minutos. La efectividad del protocolo de respuesta debe tener en cuenta este peligro y estar acompañada de medidas preventivas como la instalación de sistemas de monitoreo de calidad del aire, que alerten sobre la presencia de estos gases en tiempo real y permitan la activación de mecanismos de ventilación



o supresión de incendios de manera inmediata. (Vega et al., 2017) Uno de los pilares fundamentales en la prevención y manejo de emergencias en minas subterráneas es la capacitación constante del personal. Hansen (2021), enfatiza que la formación en primeros auxilios, reanimación cardiopulmonar, control de hemorragias y manejo de crisis es crucial para reducir la mortalidad en incidentes de este tipo. De acuerdo con Villaseñor (2019), contar con brigadas de emergencia capacitadas permite una respuesta más efectiva, ya que estos equipos de rescate internos son los primeros en intervenir en situaciones de crisis mientras los equipos externos se desplazan hacia el sitio. Además, realizar simulacros periódicos y entrenamientos en escenarios de alta presión fortalece la capacidad de respuesta del personal, asegurando que puedan actuar rápidamente y con eficacia bajo condiciones extremas. La implementación de nuevas tecnologías juega un papel cada vez más relevante en la optimización de los protocolos de emergencia en minas subterráneas. El uso de sensores de detección temprana, como detectores de humo, calor y gases inflamables, es esencial para identificar rápidamente cualquier anomalía en la atmósfera subterránea. Los sistemas de monitoreo en tiempo real permiten detectar fugas de gas o sobrecalentamientos de maquinaria que podrían desencadenar un incendio. La interconexión de estos sensores con un sistema centralizado de control y monitoreo ofrece la posibilidad de activar alarmas automáticas y mecanismos de supresión de incendios antes de que el fuego se propague y comprometa la seguridad de los trabajadores. (López, 2022) El protocolo de respuesta también debe integrar sistemas de comunicación inalámbrica, que permitan la coordinación entre los operadores de la mina y los equipos de rescate. Quintanilla (2023), menciona que esta tecnología facilita la transmisión continua de



información durante la emergencia, incluso en áreas con cobertura limitada. Las brigadas de emergencia, equipadas con dispositivos de comunicación avanzados y con recursos como desfibriladores automáticos y respiradores autónomos, pueden asistir a los trabajadores afectados antes de que los equipos de rescate lleguen al sitio del incidente. Es importante destacar que las normativas y regulaciones locales, como la Ley de Minería de Ecuador y el Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo para el Sector Minero, imponen requisitos estrictos sobre la seguridad laboral y las medidas de respuesta ante emergencias. Estas regulaciones no solo exigen la instalación de sistemas de detección y control de incendios, sino también la implementación de planes de evacuación y protocolos de respuesta en caso de incidentes. Cumplir con estas normativas es esencial para garantizar un entorno de trabajo seguro y minimizar los riesgos asociados a las emergencias por incendios. La falta de cumplimiento con estas disposiciones puede tener consecuencias graves, tanto en términos de seguridad como de repercusiones legales para las empresas.

Conclusiones.

Los incendios en minas subterráneas representan una amenaza significativa debido a las condiciones particulares de estos entornos, que incluyen el espacio confinado, la limitada ventilación y la presencia de materiales inflamables. La identificación y gestión de los factores de riesgo, como la acumulación de gases peligrosos, el uso de maquinaria pesada y los materiales combustibles, son fundamentales para prevenir incendios y minimizar su impacto en la seguridad de los trabajadores. Estos factores, cuando no son adecuadamente gestionados, pueden contribuir a la propagación rápida y descontrolada del fuego, agravando la situación de



emergencia. La propagación del fuego en espacios confinados, como los de las minas subterráneas, se ve influenciada por varios elementos, entre los que destacan la falta de rutas de escape y la acumulación de calor. En estos ambientes, el calor intenso y la falta de ventilación adecuada pueden incrementar el riesgo de colapsos estructurales y de exposición a gases tóxicos, lo que subraya la importancia de contar con protocolos efectivos y equipamiento adecuado para contener y mitigar los incendios rápidamente. En Ecuador, las normativas y protocolos aplicables, como la Ley de Minería y el Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo para el Sector Minero, son fundamentales para garantizar un entorno laboral seguro y minimizar los riesgos de accidentes. Sin embargo, la optimización de equipos y la integración de tecnología avanzada, como sensores de detección temprana y sistemas de monitoreo en tiempo real, son cruciales para mejorar la respuesta ante emergencias, permitiendo una actuación rápida y precisa. La revisión de los protocolos de evacuación, adaptados a las condiciones específicas de las minas subterráneas, junto con la mejora en la formación y capacitación del personal, resulta esencial para asegurar que los trabajadores estén preparados para actuar eficientemente en situaciones de crisis. La integración de simuladores de emergencia y entrenamientos periódicos puede fortalecer la capacidad de respuesta del personal y garantizar su seguridad durante una emergencia.

Recomendaciones.

Es crucial implementar sistemas avanzados de detección temprana en las minas subterráneas, como sensores de humo, calor y gases inflamables (metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono). Estos sensores deben estar conectados a un sistema centralizado que permita una



respuesta rápida ante cualquier anomalía. Además, la integración de tecnologías como el Internet de las Cosas, (IoT), permitirá el monitoreo en tiempo real, mejorando la eficiencia y reduciendo los tiempos de reacción ante posibles incendios. La capacitación regular de los trabajadores debe ser considerado como fundamental para que puedan actuar con rapidez y efectividad durante una emergencia. Se recomienda que los trabajadores reciban formación en primeros auxilios, manejo de crisis y procedimientos específicos para incendios subterráneos. Utilizar simuladores de emergencia y herramientas de realidad virtual puede incrementar la eficacia de los entrenamientos, ya que permiten crear entornos realistas sin exponer al personal a riesgos. También, se debe asegurar que los brigadistas de emergencia estén capacitados en técnicas avanzadas de rescate y extinción de incendios en espacios confinados. Un sistema de ventilación adecuado es crucial para evitar la acumulación de gases inflamables y tóxicos, además de facilitar la evacuación en caso de incendio. Las minas deben contar con sistemas de ventilación redundantes, asegurando que, en caso de fallo de uno de los sistemas, otro pueda tomar el control. Se recomienda también realizar inspecciones y mantenimientos regulares de estos sistemas para garantizar su efectividad. Los protocolos de evacuación deben ser actualizados y adaptados a las características específicas de cada mina subterránea. Las rutas de escape deben estar claramente señalizadas y ser accesibles en todo momento, incluso en condiciones extremas de visibilidad y temperatura. Asimismo, se deben establecer refugios de emergencia bien equipados con suministro de oxígeno y agua, y estos deben estar ubicados en lugares estratégicos para facilitar el acceso durante una evacuación.



Referencias

- Acurio, A. (2024). Exposición a monóxido de carbono en labores subterráneas en trabajos de remediación Zaruma. *FIGEMPA*, 17, 77–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.29166/revfig.v17i1.5719> 32
- Ajith, M. M., Ghosh, A. K., & Jansz, J. (2021). A mixed-method investigations of work, government and social factors associated with severe injuries in artisanal and small-scale mining (ASM) operations. *Safety Science*, 138. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2021.105244>
- Alvarado, L. (2021). SELECCIÓN DE AUTORRESCATADOR MINERO PARA LAS OPERACIONES DE MINERÍA SUBTERRÁNEA A GRAN ESCALA EN ECUADOR [Tesis de grado, Universidad Internacional SEK]. <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/4435/1/Traabajo%20Final%20LUIS%20DANIEL%20ALVARADO%20GONZALEZ.pdf>
- Amoroso, D., & Orellana, M. (2019). Diagnóstico del control subterráneo y plan de mejora en la mina de la Sociedad Minera Minervilla [Tesis de grado, Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9223/1/14867.pdf>
- Arrarás, A. (2023). Riesgos en La Minería Subterránea [Tesis de grado, Universidad FASTA]. http://redi.ufasta.edu.ar:8082/jspui/bitstream/123456789/851/1/Arrar%C3%A1s_HYS_2015.pdf
- Calizaya, F. (2022). Instalación de ventiladores y controles de ventilación en minas metálicas. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 7(1), 21–31.



http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S251953522022000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Camacho, O. (2024). GUÍA TÉCNICA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO MINERO CAUSADO POR ATMOSFERAS CONTAMINADAS O VICIADAS. <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/2025-02-28-guia-tecnica-gestion-riesgo-minero-v7-1a.pdf> 33

Castilla, P. X., Asesor, M., Laureano, J., & Cardozo, C. (2024). Estudio de las aplicaciones de modelos de machine learning en la seguridad minera subterránea de carbón: una revisión bibliográfica [Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD]. https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/66933/p_xcastillam.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Chireca, G., Toribio, M., Alzamora, H., Huaman, E., Blácido, F., & Alvarado, A. (2024). Reglamento Interno de Seguridad y Salud en el Trabajo. El Broncal. www.pactoporlavidacom.com

Contreras, S., & Nuñez, I. (2022). Elaboración del procedimiento de trabajo en espacios confinados bajo la resolución 0491 de 2020 para excavaciones en la construcción de caissons en la empresa Acosta y Acosta de Tauramena Casanare [Tesis de grado, Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/server/api/core/bitstreams/37c1e783-d725-4113-aa65-637e74d5935d/content>

Coral, C., Serpa, L., & Soto, Y. (2024). Mejora del sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo de una empresa contratista minera del sur guiado por la norma ISO 31000 para mitigar los riesgos laborales



y reducir el índice de incidentes y accidentes [Tesis de grado, Universidad de ESAN].
<https://repositorio.esan.edu.pe/server/api/core/bitstreams/0b414c0b5a1e-496d-9511-13ad65ebcc1c/content>

Díaz, M. (2009). Salud y Seguridad en trabajos de minería. Aulas y Andamios, 75–80.

https://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/salud_seg_mineria.pdf 34

Figueroa, C. (2023). La gestión de riesgos en minería: identificación de peligros y controles esenciales. Protección y Seguridad. [https://ccs.org.co/wp-content/uploads/2024/01/Gestion de-riesgos-en-la-mineria-PS-411.pdf](https://ccs.org.co/wp-content/uploads/2024/01/Gestion-de-riesgos-en-la-mineria-PS-411.pdf)

Florez, L., Quino, G., Villanueva, Q., & Ramos, E. (2022). Identificación de componentes y herramientas para la gestión de seguridad del título III del reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería que influyen en la mejora de la gestión de riesgos laborales de la actividad minera. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(3), 2566–2595. https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V6I3.2404

G., Galvis-Ocampo, Y. T., Oviedo-Rubiano, N. E., & Franco-Sepúlveda, G. (2021b). Emergencias y fatalidades mineras subterráneas en Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 2021(50), 77–84. <https://doi.org/10.15446/RBCT.N50.95733>

Galvis-Ocampo, Y. T., Oviedo-Rubiano, N. E., Franco-Sepúlveda, G., Galvis-Ocampo, Y. T., Oviedo-Rubiano, N. E., & Franco-Sepúlveda, G. (2021a). Emergencias y fatalidades mineras subterráneas en Colombia. *Boletín*



de Ciencias de La Tierra, 2021(50), 77-84.

<https://doi.org/10.15446/RBCT.N50.95733>

García. (2023). Prevención de riesgos laborales en la minería: industrias extractivas subterráneas [Tesis de grado, Universidad de Valladolid].

[https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/62688/TFG](https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/62688/TFGL3672.pdf;jsessionid=BFC9F66E6BB943379AF3257D10928F22?sequence=1)

[L3672.pdf;jsessionid=BFC9F66E6BB943379AF3257D10928F22?sequence=1](https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/62688/TFGL3672.pdf;jsessionid=BFC9F66E6BB943379AF3257D10928F22?sequence=1)

Hansen, R. (2021). Pre-incident planning of fires in underground hard rock mines: old and new risks. Australian Institute for Disaster Resilience.

<https://doi.org/10.47389/36.4.68-35>

Herrera, J. (2020). Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación de interior. Introducción a La Minería Subterránea.

Vol. IV: Métodos de Explotación de Interior.

<https://doi.org/10.20868/UPM.BOOK.62726>

Kirsch, P., Harris, J., Sprott, D., & Calderón, Á. (2014). RISKGATE y operaciones en minas de carbón en Australia. *Medicina y Seguridad Del Trabajo*, 60(235), 290-303.

<https://doi.org/10.4321/S0465-546X2014000200002>

Kumar, P., Gupta, S., & Gunda, Y. R. (2020). Estimation of human error rate in underground coal mines through retrospective analysis of mining accident reports and some error reduction strategies. *Safety Science*,

123. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2019.104555>

Lomas, R. S. A. (2019). GESTIÓN DE RIESGO E INCERTIDUMBRE PARA PASAR DE LA FASE DE EXPLORACIÓN AVANZADA A LA FASE DE EXPLOTACIÓN DE UN PROYECTO MINERO A GRAN ESCALA EN EL



ECUADOR. Revista Científica GeoLatitud, 2(1), 48–55.
<https://geolatitud.geoenergia.gob.ec/ojs/ojs/index.php/GeoLatitud/article/view/27>

López, D. (2022). Simulación de dispersión de contaminantes en una explotación minera [Tesis de posgrado, Universidad Internacional de Andalucía]. <https://dspace.unia.es/handle/10334/7144>

Mahmud, A., Marindra, J., Yun, G., Khairul, M., Mahmad, N., Mohd, R., Rozainy, M. A. Z., & Baharun, N. (2016). Applications of Radio Frequency Identification (RFID) in Mining Industries. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 133(1), 012050.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/133/1/012050>

Melody, S. M., & Johnston, F. H. (2015). Coal mine fires and human health: What do we know? *International Journal of Coal Geology*, 152, 1–14.
<https://doi.org/10.1016/J.COAL.2015.11.001>

Molina, J. M., Vallejo, L., López, S., Soto, D., Torero, J., Molina, A., & Ortiz, A. (2023). IA y nuevas tecnologías aplicadas a la seguridad minera. *Protección y Seguridad*, 1. <https://ccs.org.co/wp-content/uploads/2024/01/IA-y-seguridad-minera-PS-411.pdf>

Organización Internacional del Trabajo. (2022). Extractos del informe general del informe 2022 de la Comisión de Expertos en Aplicación de Convenios y Recomendaciones.
https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@ed_norm/@normes/documents/meetingdocument/wcms_839383.pdf



Ortega, G. (2023). SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN EN LA EMPRESA GRUMINTOR S.A [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/19469/1/53T0068.pdf>

Ortiz, O., Giraldo, M., & Canchari, G. (2008). Control y prevención de incendios En operaciones mineras metálicas. *Revista Del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 11, 7-12.

https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v12_n23/pdf/a06v12n23.pdf

Quintanilla, M. (2023, July). Iot en Minería: Tecnologías de monitoreo y sensores para mejorar la seguridad y la eficiencia en la operación minera. CODEA.

<https://www.codeauni.com/comunidad/blog/108/>

Ramírez, G., Palma, E., Barrera, Y., & Ruiz, Á. (2024). Guía de seguridad en instalaciones eléctricas en labores mineras subterráneas. CNSST Sector Minero. https://www.fondoriesgoslaborales.gov.co/wp-content/uploads/2024/11/GUI%CC%81A_37_DE-SEGURIDAD-EN-INSTALACIONES-ELE%CC%81CTRICAS-EN-LABORES_MINERAS-SUBTERRA%CC%81NEAS-27.08.2024.pdf

Registro Oficial No. 517. (2009). Ley de Minería. https://www.geoenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/11/16_Ley_Mineria.pdf

Reglamento de Prevención, Mitigación y Protección Contra Incendios, 2 (2009). www.lexis.com.ec



Resolución Nro. ARCERNNR-013/2020. (2020). EL DIRECTORIO DE LA AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES CONSIDERANDO.

[https://www.rekursyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/10/4.-Resoluci%C3%B3n-Nro.-ARCERNNR-013-2020-signed signed.pdf](https://www.rekursyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/10/4.-Resoluci%C3%B3n-Nro.-ARCERNNR-013-2020-signed%20signed.pdf)

Salgado, G. (2017). Monitoreo de concentración de monóxido de carbono usando tecnología Long-Range. *Ingenius*, 18, 73-83.

<https://doi.org/10.17163/INGS.N18.2017.09>

Useda, M. (2020). Riesgos operacionales en proyectos de minería subterránea. *Revista TEKNOS*, 16(1), 19-27.

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6382665.pdf>

Valencia, E. (2019). METODOLOGIA DE MODELAMIENTOS DE INCENDIOS PARA MINERIA SUBTERRÁNEA [Tesis de posgrado, Universidad de Chile].

https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/173811/cf_valencia_sb.pdf?sequence=1&isAllowed=y Vega, J., Lagos, M., &

Villaseñor, M. (2019). Seguridad y salud en el trabajo en una empresa minera del estado de Hidalgo [Tesis de grado, Universidad Autónoma Metropolitana].

<https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/bitstream/123456789/2205/1/183415.pdf>

