

**Caracterización de la accidentalidad laboral en el proceso de minería subterránea de
carbón: una revisión de alcance**

**Heidy Dayany Cuevas Bonilla, Flor Angela María Parra Fino, Ana María Sánchez
Hernández**

Trabajo de grado para optar el título de especialista en seguridad y salud en el trabajo

Director

Julio César Urueta Atencio

Doctor en Proyectos

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Especialización en Seguridad y Salud en el Trabajo

2024

Dedicatorias

Al amor y misericordia infinita de Dios Padre, a la Virgen María y Nuestro Señor Jesús mi mayor riqueza, que me siguen llevando más allá de lo que he imaginado, gracias infinitas. A los amores de mi vida, mi madre hermosa Heny Bonilla Barón tesoro más grande ypreciado (mi MaPa) por sus oraciones, apoyo, fe y confianza, a mi hermanito Ángel Daniel Moros Bonilla quien es mi compañero de vida, a mi futuro esposo Luis Alejandro Tarazona Patiño quien con sus acciones y palabras siempre me alienta en medio de luchas, a mi hermanita Diana Patricia Urbano por su amor e incondicionalidad, orgullo y ejemplo de maravillosa mujer y madre. Muchas gracias familia, donde la vida comienza y el amor jamás termina.

Agradezco a Dios por permitirme obtener otro logro profesional, al igual a mi padre Luis Guillermo Sánchez quien ya no se encuentra con nosotros, por su ternura y concejos dados para enriquecerme como persona, también quiero agradecerle a mi madre Ana María Hernández, hermano Luis Guillermo Sánchez y a mi novio Luis Carlos, quienes son mi inspiración para lograr cada meta que me propongo. Infinitas gracias por ser mi motor de vida.

Me gustaría agradecer, primero a Dios por regalarme la sabiduría y fortaleza para ser una persona resiliente y alcanzar mis metas, a mi mamá Florinda Fino Mendoza, porque con sus palabras, oraciones y amor me llenaban de esperanza para continuar, mi hermana Yency Airey porque con su pericia me animaba a no desfallecer, mi hermana Maira Parra por siempre confiar en mí, mi hermano Sebastián Parra Fino, por sus vos de aliento, mis sobrinos porque con una palabra “Tía te amamos, eres la mejor” me llenaban de felicidad, mi papá a pesar de la distancia me apoyo, mi hermano Luis Arley Parra, por estar pendiente y demás (amigos y familiares) que hicieron posible que culminara con éxito este proceso de especialización.

Agradecimientos

Dedicamos este trabajo a Dios primeramente quien nos ilumina a través del Espíritu Santo, bendice nuestras vidas y da sentido a nuestra existencia de manera incondicional, por supuesto a nuestro equipo de investigación que con gran esfuerzo y dedicación lograron sacar adelante esta monografía, mediante la cual se intercambiaron y adquirieron nuevos conocimientos, toda una experiencia enriquecedora que independientemente de los lugares y de no conocerse personalmente generaron fuertes lazos de amistad. Del mismo modo se agradece a nuestro director de opción de grado Julio César Urueta Atencio quien dedicó su tiempo, conocimientos con paciencia para orientarnos y guiarnos en la construcción del proyecto.

A nuestras amadas familias quienes nos motivan día a día en la materialización de nuestros proyectos, anhelos, sueños, metas y propósitos, donde su apoyo es incondicional y son los grandiosos motores de luchar para seguir siempre adelante independiente del estado del tiempo.

Contenido

Introducción	13
1. Caracterización de la accidentalidad laboral en el proceso de minería subterránea de carbón: una revisión de alcance	14
1.1. Planteamiento del problema	14
1.1.1 Formulación del problema.....	17
1.2 Justificación.....	18
1.3 Objetivos	20
1.3.1 Objetivo general	20
1.3.2 Objetivos específicos.....	20
2. Estructura temática.....	21
3. Marco referencial	22
3.1 Marco teórico	22
3.1.1 Antecedentes.....	22
3.1.2 Minería subterránea	26
3.1.3 Tipos de minería subterránea.....	30
3.1.4 Etapas de minería subterránea	30
3.1.5 Seguridad y salud en el trabajo en la minería subterránea	34
3.2 Marco conceptual.....	36
3.3 Marco legal.....	38
3.4 Marco normativo	41
4. Diseño metodológico	43
4.1 Alcance y limitaciones	43

4.2 Ecuación de búsqueda	43
4.3 Criterios de elegibilidad	45
4.4 Fuentes de información	45
4.5 Análisis de estudios recuperados.....	46
4.6 Participantes	46
4.7 Herramientas	47
4.8 Procedimientos	47
4.9 Aspectos éticos.....	48
5. Desarrollo.....	49
6. Conclusiones.....	60
7. Recomendaciones	62
Referencias.....	64

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Marco legal de Minería en Colombia</i>	38
---	----

Lista de figuras

Figura 1. <i>Árbol de problema</i>	17
Figura 2. <i>Diagrama de etapas de minería subterránea</i>	31
Figura 3. <i>Diagrama Método PRISMA</i>	49
Figura 4. <i>Diagrama de identificación de peligros en la minería subterránea de carbón.</i>	50

Lista de apéndices

Apéndice A. *Matriz de búsqueda*

Nota. Ver apéndice en archivos externos

Apéndice B. *Plan de acción de alternativas de prevención de la siniestralidad laboral para minería subterránea de carbón*

Nota. Ver apéndice en archivos externos

Resumen

La investigación identificó características relevantes de accidentalidad minería subterránea de carbón, ya que es una de las industrias más peligrosas del mundo, por tanto, se llevó a cabo con una revisión de alcance a partir de la metodología PRISMA en base de datos científicas de los últimos 10 años. Se destacaron los riesgos físicos, químicos, biomecánicos, psicosociales y naturales a los que están expuestos los trabajadores debido a las condiciones laborales deficientes. Las principales causas incluyen la falta de capacitación, actos inseguros y el cumplimiento de normas de seguridad. Es de suma importancia implementar Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo, promover prácticas preventivas y adoptar nuevas tecnologías para mejorar la seguridad laboral y reducir la accidentalidad.

Palabras clave: accidentalidad labora, minería subterránea de carbón, causalidad, peligros y prevención

Abstract

The research identified relevant characteristics of subway coal mining accidents, since it is one of the most dangerous industries in the world, therefore, it was carried out with a scope review based on the PRISMA methodology based on scientific data from the last 10 years. Physical, chemical, biomechanical, biomechanical, psychosocial and natural hazards to which workers are exposed due to poor working conditions were highlighted. The main causes include lack of training, unsafe acts and compliance with safety standards. It is of utmost importance to implement occupational health and safety management systems, promote preventive practices, and adopt new technologies to improve occupational safety and reduce accidents.

Keywords: workplace accidents, underground coal mining, causality, dangers, and prevention

Glosario

Análisis de riesgo: mecanismo por el cual se estipula el nivel de riesgo y se interpreta el origen (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2012).

Ausentismo Laboral: situación en la que un trabajador no asiste a su lugar de trabajo, debido a problemas relacionados con accidentes o salud en el trabajo (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2023).

Condiciones laborales: características y factores del entorno en el que llevan a cabo actividades de trabajo que influyen en el bienestar y la salud de los trabajadores (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2023).

Evaluación de riesgos: proceso de análisis e identificación de los peligros en el lugar de trabajo (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2023).

Emergencia minera: situación inesperada o peligrosa, como derrumbes o explosiones en mina, que requieren intervención inmediata para proteger a los trabajadores (Ministerio de Minas y Energía, 2015).

Exposición: el ser humano se relaciona directamente con una circunstancia peligrosa (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2012).

Gas: es conocido en la industria como aire impuro, cuya combinación de uno o varios elementos es perjudicial tanto para el ambiente como para el ser humano, al igual que puede convertirse en un detonante explosivo (Ministerio de Minas y Energía, 2015).

Ingreso básico de liquidación: compensación económica que se otorga a los trabajadores o sus familias en caso de accidentes o enfermedades laborales que causen incapacidades o fallecimiento (Congreso de Colombia, 2012).

Mantenimiento minero: programas de revisión destinados a inspeccionar y reparar maquinarias o equipos antes de que presenten fallas, con el objetivo de reducir la posibilidad de accidentes, dispuestos en las minas (Ministerio de Minas y Energía, 2015).

Peligro físico: se encuentra relacionado con factores como las vibraciones, ruido, temperatura extrema o el uso de maquinaria que puede ser peligrosas (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2012).

Peligros químicos: riesgos por la exposición a sustancias peligrosas o tóxicas como el polvo de carbón, gases peligrosos o productos químicos explosivos (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2012).

Prevención y promoción de riesgos laborales: estrategias y medidas implementadas para identificar y disminuir los peligros en el entorno de trabajo, con el objetivo de evitar enfermedades y accidentes (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

Peligros ergonómicos: afectan la salud física de los trabajadores, por posturas incómodas, movimientos repetitivos y levantar cargas pesadas (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2012).

Peligros psicosociales: están relacionados con la composición del trabajo que pueden afectar la salud mental, el estrés, las largas jornadas y las malas relaciones laborales (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2012).

Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST): conjunto de políticas, procedimientos y prácticas organizacionales que buscan prevenir riesgos laborales y crear un entorno seguro (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

Introducción

A nivel mundial, el sector minero juega un papel fundamental en las economías de muchos países, siendo una de las industrias de mayor impacto económico. Sin embargo, este sector también se caracteriza por su alto nivel de riesgo para los trabajadores, ya que las labores mineras implican actividades de alta peligrosidad debido a la complejidad de las tareas y a las condiciones particulares de trabajo. Las características de la minería exponen a los empleados a eventos adversos que pueden provocar graves lesiones e incluso la muerte, como resultado de accidentes laborales (Hao et al., 2024) (Serrano et al., 2016). Esta situación destaca la importancia de identificar los peligros inherentes a las actividades mineras y la necesidad de implementar medidas preventivas dentro del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), buscando no solo el cumplimiento normativo y la protección de las empresas, sino también la preservación de los recursos humanos, financieros y la infraestructura de la organización (Očenášová et al., 2020).

Es así, que a continuación se describe la presente investigación planteada como una revisión de alcance, que utilizó la metodología PRISMA, para facilitar la revisión exhaustiva, a través de bases de datos, de fuentes fundamentadas en artículos de revistas científicas indexadas. Esta revisión permitió caracterizar la siniestralidad en el sector, enfocándose en la identificación de peligros, el análisis de causas de accidentes y la propuesta de medidas preventivas, dirigidas a la minería subterránea de carbón. De esta manera, su propósito fue contribuir a la seguridad laboral, el mejoramiento de la calidad de vida de los trabajadores y la sostenibilidad en la productividad de este sector. (Arthur-Holmes et al., 2023).

1. Caracterización de la accidentalidad laboral en el proceso de minería subterránea de carbón: una revisión de alcance

1.1. Planteamiento del problema

La presente investigación tuvo como propósito evidenciar, desde una revisión de alcance, la importancia de los eventos adversos ocurridos en el sector minero, catalogado por la Organización Internacional del Trabajo (OIT) como uno de los sectores más peligrosos y arriesgado del mundo (Amponsah-Tawiah & Mensah, 2016), el cual con el desarrollo industrial ha ido en aumento y se convirtió en demanda esencial a nivel mundial, por las propiedades físicas y químicas que posee este mineral (Sapelkina & Kara-sal, 2023). Así, esta actividad tiene gran impacto económico, ambiental, pero sobre todo social y cultural, ya que hace parte del sustento diario de muchas comunidades, siendo labores prácticas de más de 30 millones de personas de la clase obrera trabajadora (Baraza et al., 2023). Por ello, desde la seguridad y salud en el trabajo, este sector emite altos índices de accidentalidad con graves consecuencias para los trabajadores, que en la mayoría de los casos ocasionan hasta la muerte (Sanmiquel et al., 2024).

En la actualidad, la minería sigue siendo de las ocupaciones más peligrosas del mundo para las industrias donde la seguridad laboral es una de las principales preocupaciones, ya que, a pesar de décadas de investigación sobre la gestión de la seguridad, accidentes y lesiones laborales son comunes. Esto se ve reflejado en los altos índices de accidentalidad en las minas de carbón subterráneas, debido a que anualmente se producen alrededor de 340 millones de accidentes laborales que tienen graves consecuencias para la salud y la moral de los trabajadores, así como para las organizaciones. Por ejemplo, en la India se ven alrededor de 925 trabajadores muertos y 4991 empleados que resultan gravemente heridos, de igual manera varios países productores de

carbón como China, Australia y los Estados Unidos de América, sufren lesiones y muertes derivadas de este sector económico (Kamran et al., 2023). Del mismo modo, en Colombia según la Agencia Nacional de Minería, la alarmante cifra de 85% de emergencias señaladas corresponden a actividades de minería subterráneas de carbón (Agencia Nacional de Minería, 2014). Por consiguiente, en esta industria los empleados son expuestos a diferentes riesgos de manera significativa y preocupante, de los cuales hacen parte factores como estresantes químicos, ergonómicos, físicos, psicosociales, fenómenos meteorológicos y alta vulnerabilidad. Esto es respaldado por estudios que registran resultados negativos por presencia en el ambiente laboral de polvo ocupacional, NO₂, metales pesados (Su & Hu, 2024), vibraciones, alta temperaturas, posturas forzadas, espacios confinados, entre otros, que pone en peligro la integridad de los trabajadores (Jin et al., 2024).

Por lo anterior, es fundamental llevar un registro de los eventos, analizar las condiciones que los han provocado, utilizar la información recopilada y la experiencia adquirida para prevenir futuros accidentes fatales (Kamran et al., 2023). Por ende, el incumplimiento de las empresas en la implementación del sistema de gestión en seguridad y salud en el trabajo en la minería subterránea de carbón conlleva a un riesgo tanto para los trabajadores como para las organizaciones, ya que puede aumentar las sanciones legales, afectando la productividad, deteriorando la reputación e incrementando los costos operativos, al igual que la capacidad de atraer talento humano calificado (Domínguez et al., 2019).

Es por ello, que la reducción de riesgos y la resiliencia ante los peligros mineros demandan un profundo conocimiento de las actividades que se llevan a cabo dentro del gremio, junto con la implementación de medidas apropiadas. Además, en la minería subterránea de carbón la carencia de prevención y promoción de buenas prácticas empeora los riesgos para los trabajadores y el

entorno. Por tal razón, es fundamental gestionar los riesgos de manera efectiva, promoviendo iniciativas de rehabilitación y conservación con la búsqueda de adaptación para las comunidades involucradas, como puede ser la construcción de una cultura de seguridad empresarial responsable en mineras de carbón para así brindar un entorno laboral más seguro (Eslamian & Eslamian, 2022).

Por lo anterior, la consolidación de información proveniente de diversas investigaciones a nivel internacional, nacional y local, relacionadas con los accidentes laborales ocurridos en este sector, permiten la identificación y el respectivo análisis de las características y/o circunstancias que pudieron estar asociadas a la causalidad de la accidentalidad laboral, para de esta forma, poder proponer acciones dirigidas a la prevención tanto de dichas causas como de la consecuente afectación por costos adicionales, que se pueden evitar de ser tratados de manera adecuada y oportuna (Altidis & Bayram, 2024).

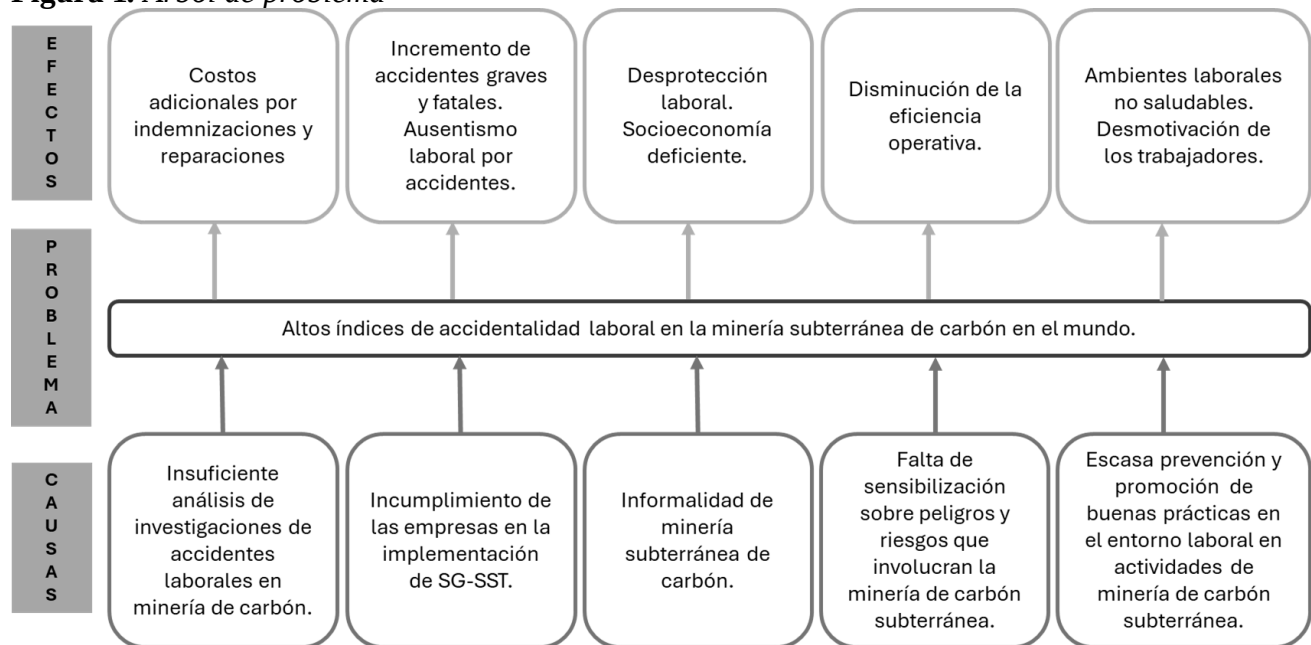
En este sentido, las estrategias de intervención en el lugar de trabajo derivadas de este estudio serán relevantes para el mejoramiento de la seguridad en los lugares de trabajo en las minas, por ende, el bienestar de las personas y la productividad misma de las empresas (Kamran et al., 2023). De acuerdo con lo anterior, la identificación y priorización de las intervenciones de seguridad en función de los peligros y riesgos mejoran el desempeño de los trabajadores en materia de seguridad, realizando intervenciones oportunas, ya que las organizaciones mineras de carbón generalmente trabajan en un entorno con recursos limitados (capital, equipo, personal e implementación de políticas), además de la ineficiencia de los gobiernos en las regulaciones, ilegalidad e informalidad falta de control en las condiciones físicas y protocolos de seguridad (Arthur-Holmes et al., 2023); lo que con lleva a un lugar de trabajo inseguro que aumenta las probabilidades de ocurrencia de accidentes de trabajo, por tal motivo es indispensable antes de comenzar el desarrollo de las diferentes actividades de minería subterránea realizar la

sensibilización de los peligros y riesgos con todo el personal involucrado, generando un lugar de trabajo seguro (Kamran et al., 2023).

Por consiguiente, para lograr el análisis de riesgos del lugar de trabajo es fundamental identificar los peligros que amenazan la seguridad y bienestar de los trabajadores. Ya que estudios realizados arrojan que los peligros más presentados en esta actividad económica son los biomecánicos, mecánicos (sistemas de transporte), químicos (voladuras, polvos y vapores), eléctricos, geoquímicos (materiales combustibles) y ambientales (Rahimdel et al., 2022).

Con base a lo anterior, por medio de un árbol de problema en la **Figura 1** se puede evidenciar de manera gráfica del problema propuesto.

Figura 1. Árbol de problema



1.1.1 Formulación del problema

¿Cuáles son las características de la accidentalidad laboral en la minería subterránea de carbón en el mundo según publicaciones científicas en los últimos 10 años?

1.2 Justificación

La minería subterránea de carbón es una de las actividades económicas que contribuyen en el desarrollo energético e industrial a nivel nacional y global. Si bien, es uno de los sectores más riesgosos en concepto de seguridad y salud en el trabajo, esto debido a las condiciones laborales, lo cual desencadena en alto índices de accidentalidad en el sector, por consiguiente, se pone en peligro la salud y vida de los trabajadores, afectando negativamente la sostenibilidad y productividad minera. De igual manera, se encuentran otros factores de riesgos tales como: actos inseguros (errores basados en habilidades), supervisión de seguridad inadecuada, gestión de seguridad desordenada, organización ilegal de la producción, ausencia de educación, capacitación inadecuada del personal y conciencia de seguridad débil entre el personal, ocasionando disminución de la eficiencia operativa de las organizaciones (He & Li, 2024).

Los accidentes por inseguridad en las minas de carbón que ocurren con frecuencia han causado grandes víctimas y pérdidas económicas, adicional estos eventos generan traumas afectando el estado mental de los trabajadores, lo que a menudo se pasa por alto en el proceso de evaluación de riesgos que hacen parte de los factores psicosociales, influyentes en el rendimiento de la producción de la organización, ocasionando que se presentan ambientes laborales no saludables. Así mismo, la falta de seguridad laboral, control del lugar de trabajo, despidos injustos provocando desmotivación en el trabajador afectando el entorno, bienestar físico y social, de esta manera aumentando la probabilidad de la ocurrencia de un suceso repentino en el área de trabajo, el cual pueda ocasionar lesiones graves y daños irremediables a los empleados (Petroutsatou et al., 2024).

Es así como la disminución de la eficiencia operativa de una industria minera se puede deber a varios aspectos, como lo son problemas logísticos, maquinaria obsoleta, fallos recurrentes

en el equipo por mantenimiento deficiente y transporte de material. Asimismo, influye la mala organización de los turnos y la falta de capacitación del personal, lo cual genera aumento en riesgo laborales y errores. Del mismo modo, la inestabilidad en los suministros, incumplimientos normativos como lo son la afiliación a protección de riesgos laborales causan la desprotección laboral, una socioeconomía deficiente a los trabajadores y su núcleo familiar (Ali & Pal, 2022), además problemáticas ambientales, lo que ocasiona incrementos en los costos operativos y afecta la rentabilidad de las industrias mineras (Yang et al., 2024).

En consecuencia, la minería enfrenta diversas externalidades a pesar de ser un sector impactante en diferentes regiones a nivel mundial principalmente aquellas que están en desarrollo, ya sea por su participación en el PIB o en exportaciones representativas como beneficios económicos en las industrias y medios de vida en las comunidades, por tanto, debe existir una compensación en los entornos locales y contribuir con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en medio de las actividades (Mundaca, 2022), donde el análisis de accidentalidad debe hacerse como parte fundamental de la gestión eficiente, ya que, es relevante en cuanto a los efectos irreparables, tanto para reconocimiento, daños en elementos tangibles, intangibles e integrantes de la organización como en el medio ambiente, siendo así los factores predominantes el riesgo social y financiero los más críticos en caso de eventualidades. De acuerdo con la Organización Internacional del Trabajo (OIT), muere un trabajador cada quince segundos y resultan heridos 153 trabajadores por accidentalidad laboral, acarreando consigo graves afectaciones financieras del producto mundial bruto estimado aproximadamente en un 4% (Mirzaei Aliabadi et al., 2022). Por ende, los incrementos en los costos adicionales por indemnizaciones, reparaciones y ausentismo laboral se ven reflejadas mediante pérdidas económicas que afectan la industria en la capacidad productiva y competitiva, poniendo a prueba los planes de gestión de riesgos, emergencias y

seguridad. Por otra parte, la falta de implementación de herramientas, estrategias y tecnologías en la identificación, evaluación y análisis de riesgos para la prevención y amortiguación de accidentalidad laboral evidencia un potencial y predictivo incremento de accidentalidad grave y fatal en el sector industrial (Su & Hu, 2024).

De esta manera, la investigación es de gran importancia ya que se evidencio la necesidad a nivel mundial de encontrar estrategias relacionadas con los sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo, la implementación y gestión de cada uno de los factores de riesgos relevantes en la industria, las cuales no deben ser ignoradas por lo que representa el sector en el mundo y la integridad del personal que se expone a diario en los procesos, además puede ser de utilidad para diversos estudios de accidentalidad minera subterránea de carbón, ya que permite ser aplicada a los diferentes países donde las averiguaciones se pueden ajustar de acuerdo a la normatividad vigente de cada estado, por tanto, se propuso una revisión de alcance a nivel mundial.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar las características de la accidentalidad laboral en el proceso de minera subterránea de carbón desde una revisión de la literatura científica en los últimos 10 años.

1.3.2 Objetivos específicos

Identificar los peligros a los cuales se exponen los trabajadores en la minería subterránea de carbón en el mundo.

Describir la causalidad asociada a los accidentes laborales ocurridos en actividades de minería subterránea de carbón en los últimos 10 años a nivel mundial.

Proponer alternativas de prevención de la siniestralidad laboral en la minería subterránea de carbón a través de un plan de acción para la promoción de ambientes de trabajo seguros y productivos.

2. Estructura temática

La presente investigación se centra en un análisis bibliográfico de alcance de la accidentalidad minera subterránea de carbón, fundamentado en la caracterización de los riesgos asociados al entorno laboral de esta industria. Este estudio identificó de peligros, la evaluación de riesgos y la implementación de medidas preventivas en los procesos de extracción de carbón bajo tierra. La estructura del estudio incluyó el planteamiento del problema, la justificación de la investigación, los objetivos, marco teórico y normativa que sustenta la investigación. Para ello se hace uso de conceptos fundamentales relacionados con la seguridad en la minería subterránea de carbón, tales como los peligros físicos, químicos y biomecánicos, así como los riesgos psicosociales a los que están expuestos los trabajadores. Para asegurar la pertinencia y validez del análisis, se basa en las normativas vigentes a nivel nacional que regulan las condiciones de seguridad y salud en el trabajo dentro de la industria minera subterránea de carbón, cumpliendo con las disposiciones legales y las políticas públicas de protección laboral desde la diversas perspectivas jurídicas y técnicas.

3. Marco referencial

En este capítulo se abordó, los aspectos más relevantes con respecto a las teorías y conceptos que fundamentan el desarrollo de la presente investigación, la cual, está ubicada dentro del campo de la accidentalidad minera subterránea de carbón; esto permitió brindar información sobre los factores de la accidentalidad, así como la gravedad, tipo y mecanismo de lesión que se presentan en el incidente. Para la realización de esta, se recurrió a la revisión de varios estudios que abordaron implícita y explícitamente el tema de investigación.

3.1 Marco teórico

El presente apartado tiene como objetivo principal definir e identificar los antecedentes y conceptos fundamentales para la investigación tales como lo son, minería subterránea, accidentes de trabajo, riesgos, peligros en seguridad y salud en el trabajo desde la perspectiva a nivel internacional y nacional.

3.1.1 Antecedentes

Yuemao Zhao, Yatao Yan, Kai Liu, Xingdong Zhao, Huaibin Li, Juncai Cao, Song Zhang & Keming Ma (2024), realizaron una investigación titulada *“Analysis of the causes and safety countermeasures of coal mine accidents: A case study of coal mine accidents in China from 2018 to 2022”*, que tenía como objetivo determinar los patrones de los accidentes, examinando las características de una base de datos de accidentes, el análisis se centra en todos los accidentes de carbón importantes (con tres o más muertes) que ocurrieron en China entre 2018 y 2022 (Tian et al., 2024).

Para llevar a cabo el desarrollo del tema, se analizaron diferentes estudios de casos para investigar exhaustivamente las historias y las causas subyacente de los incidentes, uno de los estudios que se analizó fue el de la India, donde se desarrollaron funciones de tasa y funciones de riesgo basados en un análisis de accidentes en las minas de carbón durante los últimos 100 años, otro fue el de Western Lignite Corporation, donde encontraron a través de análisis de datos, que la producción de carbón tiene una correlación limitada con la ocurrencia de accidentes, por otro lado en minas chinas, hallaron que los factores humanos son los principales contribuyentes a los accidentes por explosión de gas. En general, la literatura sugiere que las condiciones geológicas y el comportamiento humano son dos factores críticos que conducen a accidentes en las minas de carbón (Tian et al., 2024).

Por tal motivo, el trabajo determinó accidente por derrumbe de techo, debido a que, en los últimos seis años, se considera como el tipo de accidente más peligroso y el que más víctimas mortales provoca, como fue el caso donde tomo la vida de 9 personas y dejó 12 heridos, debido a golpes de presión que sufren las minas ocasionando una liberación repentina de energía elástica, estos factores llevaron a la ocurrencia de este accidente. A pesar de que se contaba con medidas de prevención como es soportes anti-impacto, sistemas de alivio de tensión de pozo y sistemas de monitoreo y presión, se presentó este fatal suceso, dejando en evidencia la deficiencia en los sistemas de monitoreo, lo que conlleva al mejoramiento de las estrategias de gestión antes de las excavaciones o extracción, así como también, las medidas de soporte adecuadas ya que los derrumbes de techos ocurren por condiciones inadecuadas de soporte. Para ello es importante, que las precauciones de seguridad gerencial pueden incluir la reducción del número de personas que trabajan en áreas peligrosas y evitar la producción en peligro (Tian et al., 2024).

Otro caso de estudio fue, por explosión de gas donde se han presentado 100 muertes entre el 2017 y 2022, para que ocurran siniestros de esta magnitud son necesarias tres condiciones, acumulación suficiente de gas (5–16%), ignición por fuego abierto, chispa o temperatura superior a 59,5 °C, y contenido de oxígeno adecuado (más del 9%). Se cuenta con 3 tipos de minas gaseosas, ligeramente gaseosas, muy gaseosas y propensas a explosiones. La mayoría de las explosiones de gas en el período de estudio ocurrieron en minas ligeramente gaseosas, lo que indica una falta de atención suficiente a la prevención de gases por parte de los administradores de minas en sus minas (Tian et al., 2024).

Como conclusión de los casos estudiados en la investigación, de los dos tipos principales de accidentes, China continental experimentó 98 accidentes graves relacionados con el carbón que provocaron 699 muertes. El número total de accidentes disminuyó gradualmente de 2019 a 2022. Por lo que la minería de carbón sigue siendo el método de extracción predominante y fue responsable de casi todos los accidentes relacionados con el carbón en el período de estudio (Tian et al., 2024).

Yongliang Deng, Canción de Liangliang, Zhipeng Zhou & Ping Liu (2017), la investigación titulada, *“Investigation of Occupational Accidents in Mining with Survival Analysis”* está basado en una revisión, la cual habla que la minería es una de las actividades que presenta altos índices de accidentalidad y enfermedades laborales en el mundo comparada con otras industrias, en donde de 30 millones de trabajadores de minas, uno de cada tres de ellos se dedica a la minería subterránea de carbón, de los cuales se presenta una accidentalidad grave aproxima del 8 % en este sector. De lo anterior algunas causas por las que se presentan estos siniestros son explosiones, propagaciones de emisiones de gases tóxicos, incendios, entre otros. Por consiguiente, los resultados obtenidos de la investigación muestran que los accidentes con

mayores porcentajes se desarrollan a causa del entorno o medio ambiente ocupando el primer lugar, en segundo lugar, está relacionado con las personas, por tal motivo para las empresas es de vital importancia tomar medidas preventivas para prevenir y mitigar la accidentalidad laboral, ya que se han convertido en uno de los principales problemas debido a la disminución en el bienestar de la calidad de vida de las personas (Bayraktar et al., 2023).

Oscar Joaquín Coy Fernández y Henry Sebastián Alarcón Restrepo (2019), la ponencia titulada “*Accidentes de trabajo en el sector minero en Colombia para el periodo 2005-2015*”, tenía como objetivo caracterizar los accidentes de trabajo en minería subterránea y a cielo abierto, esto se llevó a cabo mediante un estudio de corte transversal descriptivo, teniendo en cuenta variables sociodemográficas, laborales y las relacionadas con los accidentes de trabajo, en donde se identificaron la causalidad de los siniestros mineros reportados, además conocer las poblaciones que reportan mayor siniestralidad. Con base a esto, se recopilaron 829 registros, en donde 787 fueron accidentes en minería subterránea, siendo una de las actividades más peligrosas que puede desempeñar una persona (Coy y Alarcón, 2019).

De acuerdo con la investigación, se puede concluir que algunas de las causas de accidentes que ocasionaron estas pérdidas humanas fueron, derrumbe con 308 casos (37,2%), atmósferas viciadas 121 casos (14,6 %), acto inseguro 120 casos (14,5%), explosión 81 casos (9,8%) e incendio 73 casos (8,8%), los cuales se distribuyen entre minería ilícita y minería legal. Por lo anterior se puede decir que la mayor accidentalidad se da en la explotación minera de carbón, debido a que las condiciones son de mayor peligrosidad por la existencia de varios factores de riesgo ocupacional como lo son los físicos (vibración, traumas, ruidos, humedad) químicos (sílice, polvo de carbón) ergonómicos, derrumbes y explosividad (Coy y Alarcón, 2019).

Por ello es de vital importancia, que, con estas investigaciones, los entes encargados, puedan evidenciar las diferentes causas que ocasiona que se presenten estos siniestros y puedan tomar medidas preventivas y correctivas en las diferentes actividades que se desarrollen en este sector, con el fin de contribuir a minimizar los índices de accidentalidad, y contribuir en el bienestar de los trabajadores expuestos (Coy y Alarcón, 2019).

3.1.2 Minería subterránea

La minería es una de las actividades que ha acompañado al ser humano desde tiempos antiguos, contribuyendo en el desarrollo de las civilizaciones mediante la extracción de minerales esenciales para la producción de bienes y servicios. La minería subterránea en particular se encarga de la sustracción de minerales ubicados debajo de la tierra, para esto se utilizan diversas técnicas de excavación para acceder a estos minerales. Por ende, entre los métodos más usados en la minería subterránea, se encuentra cortes y rellenos, hundimientos por subniveles y cámara con pilares. Cabe resaltar que cada uno de uno de estos métodos dependen del mineral que se extrae y varía en los niveles de seguridad y eficiencia (Monte et al., 2019).

3.1.2.1 Minería subterránea a nivel mundial. La minería subterránea a nivel mundial representa el sector con mayor peligro para los trabajadores por ser una actividad de alto riesgo de acuerdo con las características de producción y explotación, ya que se dan bajo tierra, lo que indicó que a medida que aumenta el tiempo y la profundidad las condiciones laborales son más complejas, por lo que las explosiones e inundaciones son las principales causas de accidentalidad que dejan lesiones y muertes (Hao et al., 2024), (Meng et al., 2019). A su vez, teniendo en cuenta que la producción minera es clave en la economía de los diferentes territorios (Serrano et al., 2016), de

la cual al carbón corresponde el 60% del total de la producción minera mundial frente a los demás minerales (Holmberg et al., 2017), dentro de lo que sobresalen países productivos a nivel mundial como China, India, Indonesia, Estados Unidos, Australia y Rusia, por su parte en Latino América se destacan Colombia, Brasil, México y Venezuela. A estos países donde el sector minero se impone se les relacionó la ocurrencia de mayor cantidad de accidentes laborales fatales, los cuales son recurrente en esta práctica; a su vez se asocian los estados más consumidores de esta materia prima en el mundo como lo es China, India, Estados Unidos, Japón, Indonesia y Sudáfrica (Serrano et al., 2016) (Agencia Nacional de Minería, 2023) (Sima & Morosanu, 2022).

Es así como en las minas subterráneas de carbón en China uno de los productores y representante de mayor incidencia de accidentes laborales en las minas según investigaciones destacan un historial terrorífico, ya que el 70% de las muertes mundiales derivadas de estos eventos ocurrieron en este país, por explosión por gases relacionados a comportamientos inseguros como amenaza de seguridad en producción y vida del personal, y a eventos relacionados al peligro de agua se destacó como uno de los más graves en el mundo, por la irrupción del agua asociados a los requisitos de seguridad y falta de la supervisión de gestión de emergencias (Hao et al., 2024). Posteriormente, en la indagación de la India en materia de seguridad en las minas indicó que cerca de 925 trabajadores fallecieron y otros 4991 resultaron con graves heridas entre 2008 y 2019, en la cual predominaron causales como factores ocupacionales por malas condiciones laborales, deficientes ambientes laborales, insatisfacción laboral, inestabilidad emocional y alto grado de estrés laboral, donde de igual manera se unieron países como Australia y Estados Unidos, por lesiones y muertes en la industria carbonífera denotando características y circunstancias del entorno, clima y cultura de seguridad laboral en los trabajadores (Kamran et al., 2023).

Sumado a lo anterior, en Australia identificaron que los peligros generales se desencadenan de los empleados por las condiciones de trabajo en tiempo real como lo es la aptitud, rayos, vibraciones, fatiga, ruido, calor, polvo, calidad de aire, productos químicos peligrosos, tareas cerca del agua, los cuales están relacionados a las operaciones con los mecanismos de explotación, producción y almacenamiento del mineral. Pero estos peligros también se iluden a posteriores fases de la minería como el mantenimiento y la conservación de sitios clausurados por fallas de presas de relaves, explosiones, drenajes ácidos de minería, colapso de techos, riesgos relacionados con acopios, dragados, zanjeo, operaciones de sellado, hundimiento de pozos, extinción de incendios, inundaciones de galerías, drenaje de gases, entre otros, los cuales han llevado a lesiones sufridas y pérdida de vidas humanas, además de irrupciones en producción, daños en las infraestructuras que se han dado más que por elementos naturales o antropogénicos, ligados a las condiciones y prácticas inseguras en las minas, categorizándola así como fuente de peligro potencial perpetuo al darse un daño o colapso en las minas, infraestructuras, servicios públicos, áreas de almacenamiento, cambios en los terrenos de funcionalidad, y así mismo impactando los componentes ambientales (Sima & Morosanu, 2022).

De este modo, muchos países han optado por implementar normativas internacionales como el Convenio de OIT, donde se establecen los estándares de seguridad y salud en las minas, abordando temas de manejo de explosivos, ventilación y seguridad estructural de las excavaciones (Serrano et al., 2016), es importante reconocer que actualmente la tecnología es una herramienta importante que se emplea para mejorar la seguridad en este sector, pero no es suficiente, ya que se debe tener en cuenta las investigaciones relacionados a los aspectos ocupacionales e individuales apreciados por los trabajadores, al tiempo también el desempeño y actuación en el ámbito de seguridad laboral para que junto con los supervisores de forma conjunta se pueda realizar la

identificación con las participaciones más relevantes en materia de seguridad y salud en el trabajo (Kamran et al., 2023).

3.1.2.2 Minería subterránea a nivel nacional. En el ámbito nacional, Colombia potencia su economía a partir de la implementación de minería subterránea para la extracción de carbón, esmeraldas y oro. Por tal motivo, a minería industrial a gran escala y la minería artesanal y de pequeña escala en Colombia, destacando la persistencia de esta última pese a los esfuerzos históricos de gobiernos y élites por promover la minería industrial (Perdomo & Furlong, 2022). Dentro de las actividades de gran relevancia para el sector energético del país, se encuentra ubicada en los departamentos de Antioquia, Cauca, valle del Cauca, Cundinamarca, Boyacá, Santander y Norte de Santander (Agencia Nacional de Minería, 2023). Esta modalidad de extracción ha sido fuente importante de desarrollo y empleo en áreas rurales. A nivel de Colombia la minería enfrenta desafíos significativos relacionados con la seguridad de los trabajadores debido a las condiciones adversas de inestabilidad del terreno, operaciones y gases peligrosos. Sin embargo, esta industria es vital para el abastecimiento de carbón metalúrgico y térmico, por tal motivo hace frente a problemas ambientales y adaptaciones a normativas estrictas que garantizan la minería sostenible y segura (Jaramillo y Carmona, 2022).

Es de resaltar, que uno de los mayores productores de carbón y exportador de minerales preciosos a nivel de Latinoamérica es Colombia. Por tal motivo, las operaciones mineras de carácter ilegal enfrentan grandes retos en seguridad y salud de sus trabajadores (Serrano et al., 2016). Por otro lado, Boyacá es una de las regiones mineras esenciales para Colombia, con la extracción de carbón, esmeraldas y hierro. Sin embargo, la minería en Boyacá se caracteriza por la falta de tecnificación, ser en ilegal, artesanal y en pequeña escala lo cual incrementa el riesgo

para los trabajadores (Cardenas et al., 2017). Por tal motivo, Boyacá tiene una de las tasas más altas de accidentalidad minera en Colombia, por falta de condiciones geológicas completas en los yacimientos y ausencia en infraestructura segura (González, 2014).

3.1.3 Tipos de minería subterránea

Existen diferentes tipos de minería subterránea, los cuales varían según el yacimiento y las características del mineral a extraer. De los métodos más comunes se encuentra el método de cámaras y pilas, el cual consiste en crear cámaras para extraer el mineral, abandonando material sin extraer para amortiguar el techo de la mina, siendo este una alternativa eficiente para yacimientos planos. Por otro lado, el corte y relleno consiste en extraer en secciones el material y rellenar los vacíos resultantes con el desecho para otorgar estabilidad y firmeza a la mina cuando los yacimientos son empinados e irregulares. Asimismo, existe el método de corte y tajado abierto, el cual se utiliza en terrenos con capas gruesas, para este método se extraer el mineral por medio de cortes horizontales desde la parte superior hasta la inferior.

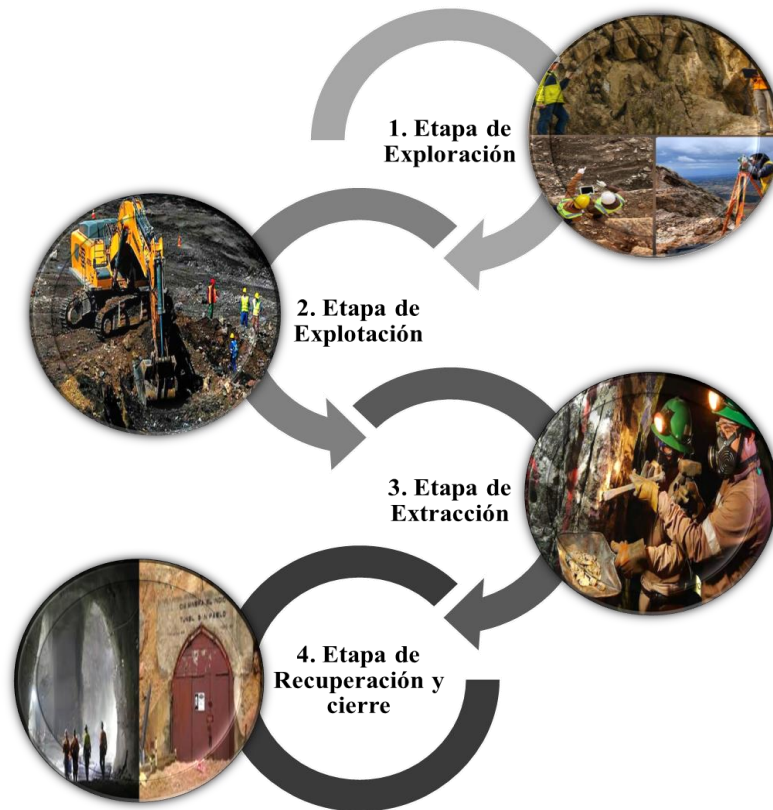
El método de hundimientos por subniveles perfora el yacimiento de abajo hacia arriba para extraer el material ocasionando que el techo de la mina colapse de manera controlada. Algo similar al método de túneles de espiral, el cual perfora túneles que permiten el acceso continuo a la mina sin frenar la producción (Chadid et al., 2014).

3.1.4 Etapas de minería subterránea

La minería subterránea se puede llevar a cabo por medio de 4 etapas principales (Herrera, 2020), que se observan en la **Figura 2;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, de las

cuales cada una conlleva diferentes criterios o aspectos de gran importancia en el desarrollo de las actividades de este sector.

Figura 2. *Diagrama de etapas de minería subterránea*



Nota: basado en (Herrera, 2020)(Herrera, 2019)

En la presente figura se evidencian las etapas de minería subterránea constituidas por etapa de exploración, explotación, extracción y, recuperación y cierre, descritas a continuación:

3.1.4.1 Etapa de exploración. La etapa de exploración de carbón comprende una serie de actividades destinadas a encontrar sedimentos y depósitos que contengan carbón y que puedan explotarse. Esta etapa se basa en una diversidad de técnicas geológicas para establecer la ubicación

y la calidad del carbón, estimar los recursos e identificar los factores geológicos que ayudarían o limitarían la explotación del carbón y su manejo ambientalmente aceptable. Además, esta etapa del carbón incluye actividades de campo, trabajo de laboratorio, estimación de recursos y reservas utilizando diferentes productos de software.

Los programas establecidos para la exploración de carbón incluyen varios componentes:

- Obtenga permiso legal para explorar el área.
- Evaluar la información geológica disponible y compilar mapas base confiables para una mayor exploración.
- Realizar exploraciones de superficie (mapeo geológico, geofísica, etc.) y recolectar datos ambientales.
- Realizar exploración del subsuelo (perforaciones y actividades de exploración subterránea: galerías, pozos, túneles, etc.
- Muestreo y análisis de carbón y otras rocas (Životić et al., 2024).

3.1.4.2 Etapa de explotación. Esta etapa de explotación se puede llevar a cabo por medio de la arquitectura ya que permite realizar el proceso de una forma tecnológicamente eficiente y económicamente viable. La correcta selección de este depende de la forma, tamaño y valor del carbón, adicional de la estabilidad, composición y fuerza del estrato rocoso, así como la demanda de producción y las condiciones de seguridad del trabajo. Esta etapa depende de factores nombrados a continuación:

- Geometría de yacimiento: forma (masiva, tubular, filoniana, entre otras), potencia y buzamiento, tamaño, regularidad.

- Aspectos geotécnicos: resistencia (mena, techo y muro), fracturación (intensidad y tipo), campo tensional in-situ (profundidad) y comportamiento tenso-deformacional.
- Aspectos económicos: leyes de la mena, valor unitario, productividad y ritmo de explotación.
- Seguridad y medio ambiente: aspectos de seguridad, impacto ambiental (paisaje, subsidencia, agua, entre otros) e impacto social (Herrera, 2019).

3.1.4.3 Etapa de Extracción. La etapa de extracción para que sea eficiente depende exclusivamente de la etapa de explotación, teniendo como finalidad la creación de los componentes básicos para asegurar una producción eficiente. Se debe llevar a cabo teniendo en cuenta los siguientes componentes:

- Accesos.
- Preparación(construcción) de la mina: excavación y construcción (desarrollo de mina), sostenimiento, ventilación, iluminación, drenaje y gestión del agua. La excavación y construcción es donde se prepara el yacimiento para llevar a cabo la producción minera, donde se debe planificar teniendo en cuenta lo siguiente.
- Pozos de acceso, producción y/o ventilación (plano inclinado o socavón según proceda).
- Rampas interiores y secundarias.
- Túneles y pozos de explotación.
- Galerías (principales y secundarias).
- Configuración y preparación de cámaras y tajos.
- Pozos auxiliares, piqueras, chimeneas, rampas, etc.
- Infraestructura para el personal.
- Infraestructura de servicios auxiliares: ventilación, drenaje, seguridad, etc.

- Infraestructura de trituración.
- Estaciones de carga.
- Infraestructura para el mantenimiento y estaciones de servicios (Herrera, 2020).

3.1.4.4 Etapa de Recuperación y cierre. La etapa de recuperación y cierre de una mina toma en consideración las condiciones del área antes de la explotación (líneas base ambientales), durante el desarrollo de la actividad, la finalización de las actividades y el uso posterior del suelo. Debe considerarse los siguientes criterios fundamentales:

- Calidad de aguas superficiales y subterráneas.
- Procesos de erosión y estabilidad a largo plazo de las estructuras que permanecerán en el área después del cierre.
- Usos del territorio y factores estéticos.
- Impacto social y económico por la reducción de las actividades económicas, relacionados con mantenimiento después del cierre.
- Consecuencias económicas para la compañía minera y para patrocinadores financieros (actores), con respecto a costos del cierre.
- Adecuación del terreno para uso sostenible (Herrera, 2020).

3.1.5 Seguridad y salud en el trabajo en la minería subterránea

Para salvaguardar la vida de los trabajadores de las minas y generar eficiencia en la actividad extractiva, se generan medidas de prevención para accidentes de trabajo a partir de las teoría de comportamiento seguro, las cuales se basan de normas internacionales, a partir de estas se crean programas de fiscalización y capacitación dentro del desarrollo normativo, que garantizan seguridad con altos estándares de calidad alrededor de la mejora de las condiciones del trabajador,

teniendo como respaldo las evaluaciones médicas y ocupacionales de manera obligatoria para determinar el estado de salud de un trabajador. De aquí, se establecen medidas de prevención mínimas para la minería tales como: sistema de protección para interruptores, revisión periódica de las instalaciones, iluminación adecuada y cumplir con lo establecido en la normatividad del trabajo eléctrico (González et al., 2019) .

3.1.5.1 Peligros y riesgos en la accidentalidad minera subterránea. El peligro en la minería subterránea hace referencia a cualquier característica o condición con alto potencial de ocasionar daño, como explosión de gas, derrumbes, exposición a sustancias tóxicas y manipulación de maquinaria pesada. Por ende, es la probabilidad de que el peligro pueda materializarse en accidente. En la minería subterránea las operaciones generan un riesgo elevado debido a circunstancias laborales extremas, como la posibilidad de fallos estructurales en las excavaciones y la falta de ventilación adecuada (Alonso et al., 2017).

En este sentido, la legislación de seguridad y salud en el trabajo para el sector minero tiene en cuenta la teoría de tasa de incidentes para clasificar estos accidentes de trabajo como: accidente leve cuando la lesión genera en el trabajador un descanso con retorno al siguiente día a sus labores, mientras que el accidente incapacitante se presenta cuando la lesión es mayor a un día con ausencia justificada. De aquí, la incapacidad puede ser parcial temporal, donde el trabajador se encuentra imposibilitado parcialmente para emplear su cuerpo, ya que está en tratamiento médico, la incapacidad total temporal se presenta cuando su organismo no puede realizar sus labores. La incapacidad total permanente se refiere a aquella lesión que genera la pérdida funcional de uno o varios miembros de su cuerpo, esto no le permitirá al trabajador volver a sus labores. Finalmente, el accidente mortal, que causa la muerte del trabajador por las labores desarrolladas por este.

En cuanto, al riesgo que generan las prácticas en las minas (Saade, 2015), preciso que de acuerdo a la magnitud del riesgo, se pueden clasificar como aquellas que son explotadas con operaciones tecnificadas, y aquellas en las cuales inciden factores de riesgo muy altos por la falta de instrumentos tecnológicos y maquinaria para las labores conocidas dentro de la teoría del error humano, en las cuales se ven expuestos los trabajadores a los siguientes tipos de riesgos según (Chadid et al., 2014), riesgos de diseño y explotación (explotación, diseño, transporte de carga y tráfico de vehículos ,eléctrico y carga física), riesgo ambiental (sustancias químicas, biológicos y control ambiental), riesgo relacionados con salud mental (estrés, horas en el trabajo, relaciones interpersonales, consumo de sustancias psicoactivas, remuneración, conductas sexuales de riesgo y neuropsicológico) (Cardenas et al., 2017).

3.1.5.2 Accidentes de trabajo en la minería subterránea de carbón. Los accidentes laborales son eventos comunes en la minería subterráneas, que ocurren de forma inesperada y provocan daños o lesiones a los trabajadores. Estos accidentes se deben a las condiciones inherentes a la actividad. Por lo cual, un accidente de trabajo se define como cualquier lesión corporal o enfermedad que sufre el trabajador por consecuencia de sus tareas laborales (Saade, 2015). En la minería subterránea, los accidentes pueden incluir explosiones, derrumbes y caídas con repercusión en lesiones graves y la muerte. En Boyacá, este problema se ha venido agravando debido a que se opera sin las medidas de seguridad necesarias y de forma ilegal (Saade, 2015).

3.2 Marco conceptual

Accidente de trabajo: es un evento repentino resultante motivado u ocasionado por desempeñar una labor, durante la materialización de una tarea dispuesta o autorizada por el

empleador fuera o en el área de trabajo, la cual, genere una lesión, alteración funcional, invalidez e incluso la muerte del empleado (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

Actividad minera: consiste en la extracción, explotación y transformación de minerales ubicados en el subsuelo y suelo, cuya práctica es de las más antiguas realizadas por el hombre, ya que, por las diversas aplicaciones, servicios y propiedades han representado gran importancia como lo ha sido el sector minero, convirtiéndose de esta forma en parte esencial de la vida del ser humano (Cardenas et al., 2017).

Condiciones y medio ambiente de trabajo: integran el entorno en el que se desenvuelve un trabajador diariamente para realizar las diferentes tareas que involucran el ejercicio de sus funciones a las que se relacionan equipos, herramientas, maquinarias, infraestructuras, factores psicosociales, ergonómicos, contaminantes entre otros, del lugar de trabajo los cuales intervienen en la seguridad y bienestar de ellos, los cuales pueden ser producto de riesgo inminente (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2012).

Minería subterránea de carbón: proceso de extracción de carbón que se realiza por debajo de la superficie terrestre, mediante la construcción de túneles o galerías subterráneas (Ministerio de Minas y Energía, 2015)

Mina subterráneo: por medio de la realización de excavaciones debajo de la corteza terrestre a través de procesos de perforación y voladura, creando un túnel para adentrarse al yacimiento y así obtener los minerales, de los cuales los materiales extraídos principalmente son el carbón, oro y las esmeraldas (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

Peligro: fuente, condición o hecho que se presenta generando alta probabilidad de ocurrencia de evento perjudicial, que afecte directamente a los empleados, aparatos e infraestructura del área u empresa (International Organization for Standardization, 2018).

Riesgo para SST: condición que expone a la viabilidad de la ocurrencia de acontecimientos peligros que a raíz de estos se generen posibles lesiones graves (International Organization for Standardization, 2018).

Sistema de gestión de Seguridad y salud en el trabajo: está diseñado para ocuparse de intervenir en dimensiones de salud y seguridad de los colaboradores para la prevención de los riesgos y peligros existentes en las diferentes áreas de trabajo relacionadas directamente con las industrias u organizaciones, con el fin de evitar accidentes laborales, lesiones, detrimento del bienestar físico y mental e incluso la muerte de los empleados derivados de las condiciones en el entorno laboral para así garantizar la saludabilidad integral (International Organization for Standardization, 2018) (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

3.3 Marco legal

El marco legal para la accidentalidad minera en Colombia está constituido primeramente por la Constitución Política de Colombia de 1991, seguido de Leyes, Decretos y Resoluciones las cuales establecen las normativas y procedimientos que garantizan la seguridad y salud en el trabajo.

Tabla 1. Marco legal de Minería en Colombia

Norma	Requisito legal	Descripción del requisito
Constitución	Constitución Política de Colombia de 1991	Máxima y suprema Ley de Colombia en la cual se establecen los principales deberes, derechos de los colombianos, además de definir la estructura y organización del Estado (Pueblo de Colombia, 1991).
	Ley 1753 de 2015	Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 “Todos por un nuevo país, artículo (20), artículo (21), artículo (22) y artículo (24) (Congreso De La República De Colombia, 2015).
Leyes		

Norma	Requisito legal	Descripción del requisito
	Ley 1562 de 2012	Por la cual se modifica el sistema de riesgos laborales y se dictan otras disposiciones en materia de salud ocupacional (Congreso de Colombia, 2012).
	Ley 1530 de 2012	Por la cual se regula la organización y el funcionamiento del Sistema General de Regalías, artículo (2) (Congreso De Colombia, 2012).
	Ley 685 de 2001	Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones, garantizando que se lleven a cabo las actividades mineras de manera organizada y sostenible (Congreso de Colombia, 2001).
	Ley 9 de 1979	Por la cual se establece el Código Sanitario. En los artículos (81), artículo (84), artículo (85), artículo (93), artículo (101) (Congreso De Colombia, 1979).
Decretos	Decreto 944 de 2022	Formular las políticas y estrategias orientadas a facilitar la divulgación para el conocimiento de los derechos de las personas en materia de empleo. El artículo (12) y artículo (28) (Presidente De La República De Colombia, 2022).
	Decreto 1886 de 2015,	Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas. En los artículos (1), artículo (11), artículo (12), artículo (16) (Presidencia de la República de Colombia, 2015).
	Decreto 1072 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo. los artículo (2.2.4.6.4), (27), (48), (54), (2.2.4.6.7), (2.2.4.12.4) y (2.2.1.6.6.4) (Presidencia de la República de Colombia, 2015).
	Decreto 2090 de 2003	Por el cual se definen las actividades de alto riesgo para la salud del trabajador, se modifican y señalan las condiciones, requisitos y beneficios del régimen de pensiones de los trabajadores que laboran en

Norma	Requisito legal	Descripción del requisito
		dichas actividades. Los artículos (2), (4), (9), (8) (Ministerio de Protección Social, 2003).
Resoluciones	Resolución 2851 de 2023	Por medio de la cual se revoca la Resolución número 3032 de 2022 por la cual se expone la Guía para la Identificación de Actividades de Alto Riesgo, definidas en el Decreto número 2090 del 2003 (Ministerio del Trabajo, 2022).
	Resolución 0312 de 2019	Por la cual se definen los Estándares Mínimos del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo SG-SST para empleadores y contratantes para toda empresa, que contiene normas, requisitos y procedimientos establecidas para cumplirse obligatoriamente con las cuales establece, registra, verifica y controla el Sistema General de Riesgos Laborales (Ministra de Trabajo, 2019).
	Resolución 40391 de 2016	Por la cual se adopta la Política Minera Nacional, cuyo objetivo es la prevención de accidentes y fallecimientos a consecuencia de la ejecución de actividades mineras de acuerdo con la normatividad relacionada con el desarrollo del sector (Ministerio de Minas y Energía, 2016).
	Resolución 45 de 2012	Por la cual se declaran y delimitan unas Áreas Estratégicas Mineras y se adoptan otras determinaciones (Presidenta de la Agencia Nacional de Minería, 2012).
	Resolución 0708 de 2016	Por la cual se establecen los criterios para la elaboración, evaluación y ejecución de los Planes de Gestión Social, que son instrumentos e integral que están conformados por los programas, proyectos y actividades del sector para prevención, mitigación y atención de los diferentes riesgos sociales en cuanto a proyectos mineros, de acuerdo con lo dictaminado en el artículo 22 de la Ley 1753 de 2015 (Presidente de la Agencia Nacional de Minería, 2016)

Norma	Requisito legal	Descripción del requisito
Resolución 18-0876 de 2012	Por la cual se designa la función por parte del Ministerio a la Agencia Nacional de Minería con el fin de fiscalizar, hacer seguimiento y control de títulos mineros para la exploración y explotación de yacimientos minerales en Colombia (Ministerio de Minas y Energía, 2012).	
Resolución de 1356 de 2012	Por la cual se modifica la Resolución 652 de 2012, estableciendo la conformación y funcionamiento del Comité de Convivencia Laboral en las empresas, los cuales se ocupan de registrar y tramitar las diferentes quejas que se presenten por situaciones que expongan los empleados (Ministro del Trabajo, 2012).	
Resolución 1401 de 2007	Por la cual se reglamenta la investigación de incidentes y accidentes de trabajo, en la cual, se establecen las obligaciones y requisitos mínimos con lo concerniente a incidentes y accidentes laborales, para así determinar origen, eventos y naturaleza que lo generó, para proporcionar estrategias de prevención que permitan la eliminación o disminución las condiciones de riesgo y repetición de este (Ministerio de la Protección Social, 2007).	
Resolución 2346 de 2007	Por la cual se regula la práctica de evaluaciones médicas, manejo y contenido de las historias clínicas ocupacionales en gestión de los programas de medicina preventiva en los trabajadores (Ministerio de Protección Social., 2007)	

3.4 Marco normativo

Dentro del marco normativo internacional se relacionan la norma ISO (Organización Internacional de Normalización) 45001 de 2018, relaciona el Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo – Requisitos con orientación para su uso, primera norma que aborda este aspecto dando a conocer el marco para la organización y mejora los niveles de seguridad de los

puestos de trabajo en las empresas de todo lo relacionado con SST, la cual está estructurada para la identificación y gestión de los riesgos en materia de salud y seguridad en los puestos de trabajo, mediante la implementación del ciclo PHVA (International Organization for Standardization, 2018). Por otro lado, encontramos la guía de buenas prácticas NTP 257, donde se exponen esquemáticamente diferentes métodos de control y eliminación de polvo de carbón lo más cerca posible del punto de generación, en operaciones de perforación de estructuras de minerales (Caballero, 1989).

El protocolo y guía de procedimiento para la señalización interna y externa de minas subterráneas, es esencial para brindar seguridad y salud en el trabajo y optimizar las operaciones de excavación minera. Las directrices presentes en el protocolo establecen las normas y los estándares para la correcta señalización visual de advertencia de peligros, zonas restringidas, rutas de excavación y áreas de trabajo. Por otro lado, la implementación de la señalización interna permite las indicaciones claras de galerías y túneles, En tanto, a las externas busca alertar de riesgos en el entorno de la mina. El cumplimiento de estos requisitos reduce accidentes y facilita respuesta ante una emergencia (Ministerio de Minas y Energía, 2019).

Encontramos la guía técnica para el diseño de un plan de prevención y mitigación de explosiones por metano y polvo de carbón en las minas subterránea de Colombia, que es una directriz que pretende contribuir en la disminución de explosiones asociadas a metano y polvo de carbón en minería subterránea, si se adoptan los controles requeridos y se hace el seguimiento correspondiente por medio de metodologías, planes de prevención y mitigación, lineamientos técnicos, preparación y respuesta ante emergencias para el riesgo de explosión (Agencia Nacional de Minería, 2021).

4. Diseño metodológico

4.1 Alcance y limitaciones

La presente revisión tuvo un alcance de síntesis de evidencia para identificar ideas claves que dieron respuesta a la pregunta de investigación planteada, con un análisis cualitativo sin valorar críticamente la cantidad de los datos, si no determinando las principales características de la accidentalidad minera subterránea. Sin embargo, se presentó como limitación la escasa literatura en idioma castellano relacionada con el estudio, lo que representó un reto para la búsqueda en idioma inglés.

4.2 Ecuación de búsqueda

La literatura investigada se realizó a través de criterios en idioma inglés, ya que en idioma español fue muy restringida, debido a que la búsqueda de fuentes bibliográficas en las diferentes bases de datos arrojó muy pocas investigaciones e incluso no se encontró información, con las cuales se respaldó la revisión de alcance relacionada con la accidentalidad en minería subterránea de carbón; por tanto, se relacionan a continuación las ecuaciones y criterios de búsqueda:

- (accident or hazard) and (safety and health at work or occupational health) and (mining or coal)
- (accident or danger) and (mining or underground) and (coal or sector)
- underground mining in Colombia
- ("accidentalidad laboral" OR "accidentes laborales") AND ("minería subterránea" OR "minería de carbón")

- ("occupational safety" OR "prevention of occupational risks") AND ("risk factors" OR "working conditions")
- ("risk factors" OR "working conditions") AND ("scoping review" OR "risk analysis")
- ("underground mining" OR "coal mining")
- accidentalidad minera
- accidents AND in AND mines AND coal AND underground
- accidents in underground coal mining
- alternatives for preventing accidents in underground coal mining
- analysis of investigations into accidents in underground coal mines
- biomechanical hazards in underground coal mining
- causality of work accidents in underground mining
- chemical hazards in underground mines
- countries with the highest underground coal mining accidents in the world
- countries with the most underground coal mining
- dangers of underground mining
- dangers to which workers are exposed to underground coal mining.
- explosion dangers in underground mines
- high underground mining accident rates
- largest producers in the world of underground coal mining
- mining accidents
- mining and work accidents
- noise dangers in underground mines
- psychosocial risk in underground coal mines

- safety in mine accidents
- underground coal mining in the world

4.3 Criterios de elegibilidad

Para esta revisión, se establecieron criterios de elegibilidad específicos, donde los estudios seleccionados deben abarcar el periodo de comprendido entre 2014 a 2024 y pueden estar redactados en inglés o español, ya que en idioma español no hay diversidad de investigaciones, por tanto, fue necesario implementar los criterios de búsqueda en idioma inglés. Se consideraron estudios cualitativos para facilitar un análisis y planteamiento de discusión narrativa. Las fuentes de información incluyeron bases de datos académicas dentro de las cuales estuvieron las de la Universidad Santo Tomás (Science Direct, IEEE Xplore, Sage Journals, Scopus, SpringerLink, EBSCOhost), google académico, repositorios universitarios y paginas oficiales de entes gubernamentales a nivel nacional e internacional relacionadas con la seguridad y salud en el trabajo en sector minero.

4.4 Fuentes de información

Bases de datos y páginas oficiales consultadas: Bases de datos de la Universidad Santo Tomás del centro de recursos para el aprendizaje y la investigación (CRAI), google académico, base de datos externo scielo, repositorios universitarios, y páginas oficiales gubernamentales nacionales e internacionales.

4.5 Análisis de estudios recuperados

Los análisis de estudios fueron recuperados mediante la realización de una búsqueda de alcance entre los años 2014 a 2024 sobre accidentalidad minera subterránea de carbón. A través de los diferentes resultados de las investigaciones se evidenciaron las actividades y circunstancias que favorecen los factores de riesgo e involucran altos índices de accidentes en el sector minero. Teniendo en cuenta la caracterización de peligros y la causalidad relacionada a los accidentes laborales en las minas de carbón subterráneas, con el fin de proponer alternativas de prevención basadas en la revisión de alcance para los riesgos de exposición ante los cuales se enfrentan los trabajadores, debido a que es uno de los sectores con mayor índice de accidentalidad en el sector de extracción de minerales a nivel mundial. De acuerdo con lo anterior, se construyó una matriz de revisión literaria general, la cual permitió la clasificación de las investigaciones, lo que facilitó la organización y clasificación para la recopilación de la información.

4.6 Participantes

Los artículos referenciados para investigación se consultaron en bases de datos científicas indexadas de acceso por medio del CRAI USTA Bucaramanga, para lo cual, se realizó la búsqueda avanzada mediante las palabras claves: accidentalidad, carbón, minería subterránea, seguridad y salud en el trabajo, peligro, causalidad, alternativas, riesgo e implementación de la estrategia PIO con las ecuaciones de búsqueda (accident or hazard) and (safety and health at work or occupational health) and (mining or coal), (accident or danger) and (mining or underground) and (coal or sector), ("accidentalidad laboral" OR "accidentes laborales") AND ("minería subterránea" OR "minería de carbón"), ("occupational safety" OR "prevention of occupational risks") AND ("risk factors" OR "working conditions"), ("risk factors" OR "working conditions") AND ("scoping

review" OR "risk analysis"), ("underground mining" OR "coal mining"), accidents AND in AND mines AND coal AND underground. Dentro los cuales se identificaron artículos en los países con mayor relevancia en investigación de accidentalidad de minería subterránea de carbón como China, India, Estados Unidos, Turquía, Sudáfrica, España, Polonia, Rumania, Colombia, entre otros, en áreas principalmente de ingeniería y ciencias. Por consiguiente, en los accidentes reportados se resaltan aspectos como la fuga de gases, deficiencia de ventilación, falta de comunicación asertiva, derrumbes, fallas en maquinaria, equipos y seguridad de sistemas eléctricos, falta de control y monitoreo antes de iniciar las tareas y durante en cada uno de los frentes de trabajo, control y supervisión de las agencias de minería, incumplimiento de las normativas vigentes, exponiendo así las precarias condiciones laborales en el sector y evidenciando la ausencia del sistema de gestión de seguridad y salud en trabajo, además de la cultura de ilegalidad minera.

4.7 Herramientas

Se construyó una matriz general de resultados, donde se relacionaron los artículos más relevantes que aportaron con la información destacada de cada una de las investigaciones encontradas, las cuales se relacionaron en la clasificación de datos recopilados mediante las bases de datos utilizadas para la investigación, las cuales se canalizaron en tres matrices para dar cumplimiento a los objetivos propuestos. Ver apéndice A

4.8 Procedimientos

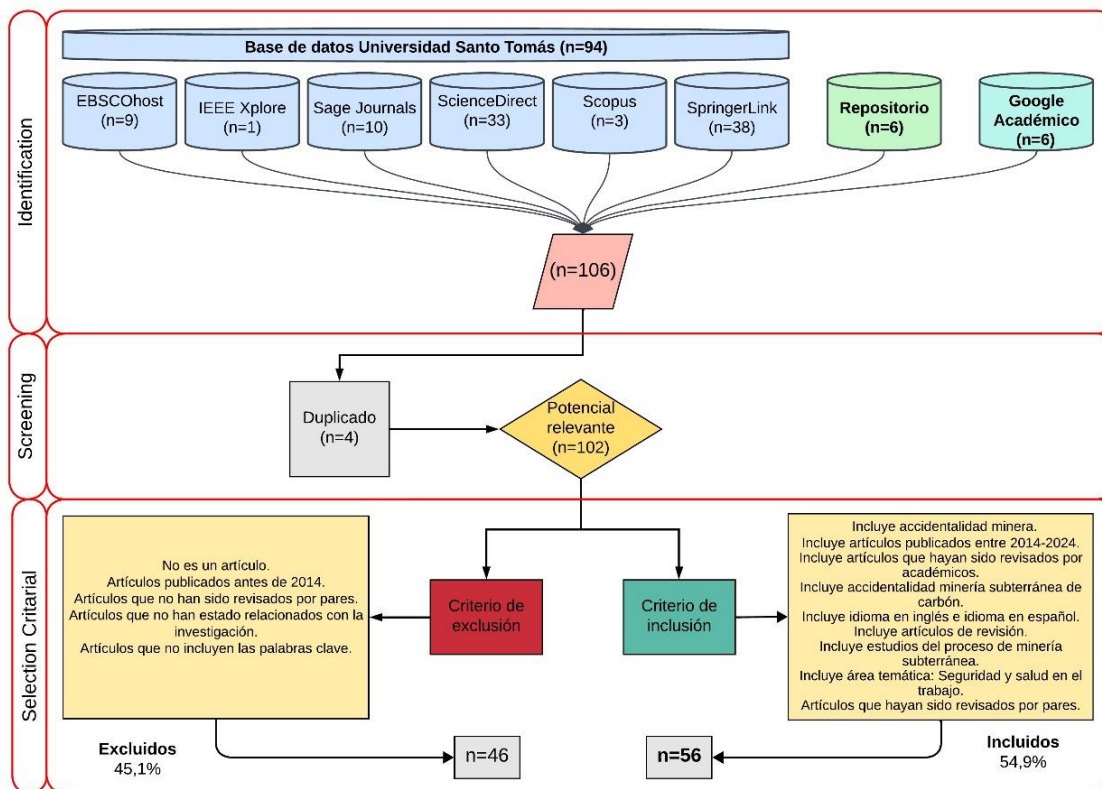
A partir de los artículos científicos recopilados de las diferentes fuentes de búsqueda en las bases de datos se procedió a seleccionar las investigaciones relacionadas a las limitaciones de

estudio con la finalidad de sustraer la información más relevante para sustentar los factores de riesgo y peligros que influyeren en la ocurrencia de accidentes en minería subterránea de carbón, los cuales permitieron la identificación de aspectos que afectan el desarrollo de las actividades del sector minero subterráneo de carbón y que pone en peligro la vida y seguridad de los trabajadores.

4.9 Aspectos éticos

El enfoque del estudio lo clasifica como una Investigación sin riesgo, ya que se emplearon técnicas y métodos de investigación documental retrospectivas basadas en la identificación de peligros y causalidades que contribuyen a la accidentalidad minera, para proponer alternativas de prevención de siniestralidad promocionando ambientes de trabajo seguros y productivos dentro de la minería subterránea, por tanto, no se abordaron cuestiones directamente relacionadas con dilemas éticos o decisiones morales en el ámbito empresarial o laboral (Ministerio de Salud, 1993).

Es así, como la metodología adoptada para el proceso de análisis e identificación de información fue desarrollada siguiendo el método PRISMA apreciado en **Figura 3**.

Figura 3. Diagrama Método PRISMA

5. Desarrollo

Para el desarrollo de los objetivos planteados en la revisión de alcances se siguieron enfoques lógicos que permitan analizar, describir y proponer soluciones basadas en estudios ya existentes, a través de las bases de datos que se encuentran en los recursos electrónicos multidisciplinarios que brinda la universidad en el CRAI.

En primer lugar, se logró la identificación de los peligros a los cuales se exponen los trabajadores en la minería subterránea de carbón en el mundo se realiza por medio de una recopilación de estudios que describen los principales riesgos laborales presentes en la minería subterránea de carbón con los criterios de búsqueda descritos a continuación:

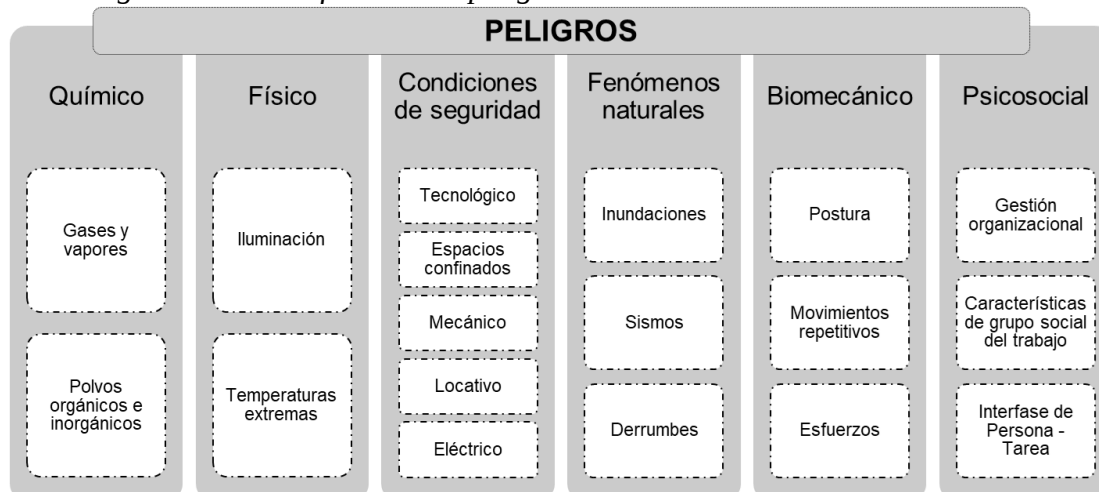
- dangers to which workers are exposed in underground coal mining

- chemical hazards in underground mines
- dangers of underground mining
- noise dangers in underground mines
- biomechanical hazards in underground coal mining
- causality of work accidents in underground mining
- countries with the most underground coal mining
- dangers to which workers are exposed in underground coal mining

En la revisión de alcance relacionados al primer objetivo con los criterios anteriormente mencionados los países que se destacaron en la investigación de peligros fueron China, Estados Unidos, Turquía, India, Australia, Sudáfrica y Alemania respectivamente.

Por medio de las cuales se identifican los patrones representativos de los peligros a los cuales se encuentran expuestos los trabajadores, para así tener una visión integral de los factores de riesgo predominantes en sector económico de los cuales se destacaron como principales 4 peligros expuestos en la **Figura 4**. Diagrama de identificación de peligros en la minería subterránea de carbón, a continuación:

Figura 4. Diagrama de identificación de peligros en la minería subterránea de carbón.



El presente diagrama está constituido por los cuatro peligros más relevantes en la minería subterránea de carbón según las fuentes de investigaciones científicas consultadas, de esta forma se destaca la clasificación de cada uno de ellos de la siguiente forma:

Peligro químico

- Gases y vapores: inhalación de gases CO₂, concentración de combustión por metano y CO₂ (Kamran et al., 2023), entrada de gases peligrosos, erupción de carbón y gas (Asare et al., 2024), envenenamiento por gases y vapores, asfixia (Dursun, 2023).
- Polvos orgánicos e inorgánicos: exposición al polvo del mineral (Utembe et al., 2015), Polvorientos (Eksert & Akcin, 2024).

Peligro físico

- Iluminación: falta de iluminación (Eksert & Akcin, 2024).
- Temperaturas extremas: elevadas temperaturas (Eksert & Akcin, 2024).

Peligro condiciones de seguridad

- Tecnológico: incendio por combustión (Kamran et al., 2023), incendió, explosión (Miao et al., 2023), erupción de carbón y gas (Zhang & Wang, 2023) (Dursun, 2023), combustión espontánea de carbón e ignición de materiales inflamables (Dursun, 2023).
- Espacios confinados: falta de ventilación (Miao et al., 2023), entornos cerrados y estrechos (Eksert & Akcin, 2024).
- Mecánico: problemas de maquinaria (Miao, et al., 2023), colisiones y atascos (Eksert & Akcin, 2024), maquinaria utilizada en el transporte de carbón personas y materiales (Dursun, 2023), equipos de excavación, carga y transporte (Bayraktar et al., 2023).
- Locativo: pequeñas estructuras como fallas o columnas hundidas en el frente (Fan, et al., 2020), hundimientos (Brücker & Preuße, 2020), caída de materiales (Eksert & Akcin,

2024), caída de techos y rocas, Caída/resbalón desde una altura, caída debajo de una pila, caída de herramienta manual (Dursun, 2023).

- Eléctrico: eléctrico (Dursun, 2023).

Peligro Fenómenos naturales:

- Inundaciones: irrupción de agua en la mina (Asare et al., 2024), (Brücker & Preuße, 2020), (Bayraktar et al., 2023) (Dursun, 2023).
- Sismo: inducido por la minería (Asare et al., 2024).
- Derrumbe: caída de tierra (Asare et al., 2024), (Brücker & Preuße, 2020).

Peligro Biomecánico:

- Postura: prologadas mantenidas y forzadas (Salve & Paul, 2022).
- Movimientos repetitivos: uso excesivo de manipulación de herramientas manuales pesadas (Salve & Paul, 2022).
- Esfuerzos: transporte manual pesado en caminos temporales o en bruto dentro de las áreas mineras activas. (Salve & Paul, 2022).

Peligro Psicosocial:

- Gestión organizacional: estilo de mando, pago, contratación, participación, inducción y capacitación, bienestar, social, evaluación del desempeño, manejo de cambios (Salve & Paul, 2022).
- Características de grupo social del trabajo: toma de decisiones, razonamiento, resolución de problemas, errores humanos y resiliencia (Salve & Paul, 2022).
- Interfase de persona – tarea: conocimientos, habilidades en relación con la demanda de la tarea, identificación de la persona con la tarea y la organización (Meng et al., 2019).

Posteriormente para el desarrollo del objetivo dos, se realizó la descripción de la causalidad asociada a los accidentes laborales ocurridos en actividades de minería subterránea de carbón se realizó por medio de una revisión de alcance de estudios que describen las principales causas vinculadas a los accidentes laborales con los criterios de búsqueda descritos a continuación:

- explosion dangers in underground mines
- psychosocial risk in underground coal mines
- causality of work accidents in underground mining
- dangers to which workers are exposed in underground coal mining

En la revisión de alcance relacionados al segundo objetivo con los criterios anteriormente mencionados los países que se destacaron en la investigación de peligros fueron China, India y Turquía, respectivamente.

De acuerdo, a los artículos consultados se obtuvieron las siguientes causalidades que favorecen la ocurrencia de accidentes en las minas de carbón subterránea:

Según (Fa et al., 2021) consideraron:

- Los factores de maquinaria y equipo, entorno físico, condiciones previas inseguras, conductas inseguras de los empleados e influencias externas como actos inseguros.

En cambio, (Tian C. et al., 2024) expusieron que:

- La temperatura, humedad, disminución del estado de alerta de los mineros, escaso tiempo de reacción y activación de la corteza prefrontal.

Por su parte (Salve & Paul, 2022) determinaron:

- Estrés térmico.
- Turnos más largos, mayor carga de trabajo, menor variación de tarea y libertad de decisión.

- Deficiencia organizacional, gestión de recursos, clima organizacional y procesos operativos.
- Toma de decisiones, el razonamiento, la resolución de problemas, los errores humanos y la resiliencia.

En este mismo sentido, (Yuxin et al., 2024) relacionaron:

- Acumulación y concentración de gas en el túnel, fuente de ignición, gestión compleja de la ventilación y mala capacidad de comunicación dentro de la mina.
- Conductas Inseguras, errores basados en habilidades, acciones inseguras(infracciones), factores organizacionales (infracciones y condiciones peligrosas), condiciones multifactoriales (presencia de materiales peligrosos, violaciones del personal, capacidades de seguridad de los trabajadores y lagunas en el sistema de gestión).

También según lo propuesto por (Dursun, 2023):

- Los explosivos no son adecuados para su uso en minas con gran concentración de gases de metano, además el encendido de estas es realizado por personas sin certificado de encendido incumpliendo normas y sin precauciones de seguridad necesarias.
- Los informes de análisis de mecánica de rocas del sitio minero no se preparan antes del inicio de las operaciones mineras, ni en el diseño de soporte, se implementa a la luz de la información técnica y las recomendaciones contenidas en estos informes.
- Uso de soportes inadecuados para los techos de los túneles, deterioro de estos, diseños deficientes y armazones de madera que no soportan la carga.
- No cumplen con la regla de realizar hundimientos y rellenos en los frentes (zona de producción).

- En pozos de producción se realizan aberturas excesivas, no se mantienen las tapas en tajos con flujo, además no se implementan técnicas de prevención para los techos con flujo.
- No se realizan apoyos correctos y completos en las diferentes áreas de operaciones mineras.
- Inadecuado sistema de ventilación y respiraderos para evitar la acumulación de los diferentes gases y vapores, sistemas de monitoreo y mediciones deficientes con sistema de alerta temprana.
- Actos y condiciones inseguras que generan chispas por fricción de metales, mecánicas o rocas detonantes de explosiones y arco eléctrico.
- Insuficientes equipos de medición de gases en cada turno laboral en intervalos aceptables.
- Inadecuado equipamiento antideflagrantes y disyuntores para el desarrollo de las actividades mineras.
- Falta de monitoreo de atmosferas en zonas de perforaciones.
- Uso inadecuado de los equipos de transponte de los materiales (vagones) al interior de la mina o en las cintas transportadoras que pueden generar atrapamiento.
- Inadecuada ubicación de las rutas de ventilación y escape de acuerdo con los requisitos normativos establecidos en las minas subterráneas.
- Falta de capacitación y sensibilización en los empleados frente a los riesgos presentes en el sector laboral.
- Falta de mantenimiento y reparación de maquinaria.
- Inadecuada generación, distribución y líneas de transmisión de energías.
- Carencia de estudios hidrogeológicos y drenaje de las aguas subterráneas, además de perforaciones inadecuadas donde existen los cuerpos hídricos.

- Poca implementación de suficientes pilares adecuados en las áreas de producción activas y producción antigua.
- Inadecuada disposición en la mina de los vertidos hídricos.
- Nula aplicación de procedimiento preventivo con el que detecte con antelación la combustión espontánea de carbón para activar el plan de emergencia.
- Utilización de equipos, herramientas y materiales no diseñados para trabajos en minería subterránea (correas, tuberías de plástico, mangueras y aceite de motor) por minimizar costos.
- Inadecuado procedimiento en la realización de actividades de voladura (dinamita).
- Contratación inadecuada de personal de acuerdo con el perfil requerido para trabajos mineros (experiencia).
- Exceso en horario laboral.

Adicionalmente de acuerdo con lo expresado por (Kumar et al., 2020):

- Chispa de un cable de señal eléctrica o de las rocas que se desprendieron durante la caída.
- Desprendimientos muy grandes en la carretera.
- Cable de arrastre que rozaba las vigas cerca del techo dieron como resultado la inducción de la chispa.

Por último, (Meng et al., 2019) mencionaron en su investigación:

- Comportamientos inseguros.

La descripción de la causalidad en los últimos 10 años a nivel mundial se da mediante el análisis de factores humanos, técnicos, normativos y ambientales los cuales contribuyen con efectos de accidentalidad e inadecuada implementación de Sistema de gestión de SST.

Finalmente, para el objetivo tres se hallaron alternativas de prevención en la siniestralidad laboral en la minería subterránea de carbón, las cuales se consolidan en un plan de acción (ver Apéndice B) siguiendo la Metodología 5W1H, como propuesta para la promoción de ambientes de trabajo seguros y productivos, mediante la revisión de alcance teniendo en cuenta los siguientes criterios de búsqueda:

- dangers of underground mining
- biomechanical hazards in underground coal mining
- dangers to which workers are exposed in underground coal mining

En la revisión de alcance relacionados al objetivo con los criterios anteriormente mencionados los países que se destacaron en la investigación de peligros fueron China, Estados Unidos, Australia, Eslovaquia, España y Malasia respectivamente. De esta manera, se consideraron las siguientes alternativas para la prevención de la siniestralidad minera subterránea de carbón derivadas de la información recopilada, así:

Propusieron (Karadeniz et al., 2022):

- Implementación de refugios dentro de la mina ante explosiones, instalación de cámaras de refugio y rescate, designados en un lugar seguro con previo punto de encuentro y área de preparación.

También (Dong et al., 2021) plantearon:

- Adoptar medidas integrales de mitigación para minimizar o eliminar los riesgos en cada etapa.
- Formar un equipo de control especializado para la mitigación de los peligros para mejorar las habilidades de prevención de riesgos.
- Enfoque técnico para predecir, controlar e investigar los diferentes desastres.

- Elaborar planes propios a mediano y largo plazo para la prevención y control de los riesgos organizando su ejecución y adoptando las medidas eficaces de acuerdo con los riesgos.
- Detener y evacuar de forma inmediata las operaciones mineras y las áreas potencialmente amenazadas por algún peligro, tomando medidas efectivas y realizando un análisis de causa.
- Fomentar la investigación científica e innovaciones tecnológicas para prevenir y controlar siniestralidades en las minas.
- Mejorar los conocimientos y las habilidades de los profesionales de cada área.
- Realizar estudios sobre las condiciones sobre la zona, elaborando un informe minucioso sobre las características del tipo de terreno, para así determinar las condiciones individuales de la mina, la cual debe hacerse cada tres años o después de la ocurrencia de un accidente tras evaluar sus condiciones.

A su vez (Pedram et al., 2021) enunciaron:

- Realizar capacitaciones utilizando como herramienta de seguridad realidad virtual, entrevistando posteriormente a los participantes para evaluar la experiencia del metaverso.

De igual manera (Očenášová et al., 2020) manifestaron:

- Utilizar metodologías sistemáticas de gestión en seguridad y salud en el trabajo basados en identificación de peligros en las áreas de trabajo para la evaluación del nivel de riesgo.
- Adoptar medidas y criterios bajo seguro, teniendo en cuenta la normatividad jurídica y técnica.
- Tener en cuenta el principio básico aplicado en la SST que integra el sistema hombre-máquina-medio, siendo el elemento básico de este principio el hombre (factor humano influenciado por predisposiciones físicas y mentales, máquina representa cualquier equipo

de trabajo utilizado en la empresa, medio todo factor que afecta a una persona durante las horas de trabajo).

- Implementar política de SST caracterizando el estado de las áreas de trabajo, garantizando que se minimice el peligro para el bienestar de los trabajadores.
- Aplicación de los principios PHVA.
- Cumplir con las normas de seguridad y salud en el trabajo como norma ética y humana.
- Expandir gradualmente la evaluación y protección de riesgos.
- Crear una cultura de seguridad corporativa dentro del Sistema de Gestión Integral de la empresa.
- Implementar tecnologías de comunicación e información direccionado a prácticas innovadoras y adaptación a nuevas condiciones, donde los directivos deben mantener informados y comunicarse con sus empleados, siendo responsables en su formación y supervisión, incluyendo estar abiertos a opiniones.
- Integrar una cultura de seguridad conjunta que permita relacionar empleados y empleadores en todos los niveles para crear condiciones de trabajo seguros.
- Fomentar una gestión proactiva de riesgos incluyendo medidas en caso de la ocurrencia de eventos adversos.
- El líder de SST debe tener los conocimientos técnicos para tomar medidas eficientes y efectivas para cualquier circunstancia que se presente.
- Implementación del SG-SST de acuerdo con las exigencias normativas el cual se caracteriza el sector bajo los lineamientos legales establecidos.

Igualmente, (Chu, et al., 2018) señalaron:

- Implementar como alternativa de mitigación el uso de hormigón con baja conductividad térmica para disminuir la temperatura en la mina.

Conforme a lo mencionado por (Sanmiquel et al., 2024) indicaron:

- Identificar aquellas áreas con alta probabilidad de siniestralidad para determinar las debilidades en el SG-SST.

Por su parte (Chu et al., 2018) puntualizaron:

- Implementar encuestas de cuestionarios por investigadores profesionales en diferentes áreas de trabajo.

6. Conclusiones

La accidentalidad en minas subterráneas de carbón presenta diversas particularidades, ya que se manifiesta en eventos repentinos, con consecuencias irreversibles y daños irremediables que generan gran impacto negativo en la salud de las personas y en la productividad del sector, ya que mediante los estudios recuperados se identificaron los principales peligros de la minería subterránea como atmósferas viciadas, temperaturas elevadas, explosiones, fallos en la ventilación, irrupción por aguas y derrumbe. Los peligros relacionados con las condiciones de trabajo son químicos, físicos, condiciones de seguridad, fenómenos naturales, biomecánicos y psicosociales, fueron identificados como factores críticos que incrementan la accidentalidad. Por tanto, a esto se suman la falta de implementación adecuada de los sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo (SG-SST) y la cultura de ilegalidad minera también fueron causas significativas de la siniestralidad en las minas subterráneas de carbón.

Por lo anterior, el trabajo de minería de carbón se consideró altamente riesgoso, ya que las condiciones del lugar de trabajo en las que se encuentran los empleados y el entorno en que realizan

las actividades diarias requieren de atención puntual en cada área de trabajo para la identificación y evaluación de los riesgos, donde la protección y prevención de estos se deben abordar desde el inicio con las etapas de exploración, explotación y extracción del mineral donde se pueden prever los peligros para la minimización de accidentes de trabajo, de tal forma que se implemente el sistema de seguridad y salud en el trabajo, el cual es deber, obligación y responsabilidad las empresas.

Se destacan diversas medidas de intervención consolidadas a manera de plan de acción (Ver Apéndice B), propuestas como alternativas para reducir la accidentalidad laboral, entre las que sobresalen, la instalación de refugios dentro de la mina, mejorar el sistema de monitoreo de gases, mantenimiento adecuado de equipos, capacitación constante de los trabajadores, entre otros. Por ende, la implementación de estas estrategias preventivas es crucial para crear ambientes de trabajo más seguros y productivos en la minería subterráneas. Por otro lado, mediante la construcción de un sistema integral de evaluación de respuesta ante emergencias de desastres se puede promover la respuesta inmediata ante cualquier siniestralidad de este tipo de eventos que proporcionen referencias de la prevención, gestión segura y eficiente para la minería subterránea de carbón, con el fin de salvaguardar la integridad de las personas que laboran en este medio.

Por consiguiente, uno de los pilares fundamentales para el desarrollo adecuado de los trabajos de minería subterránea, es que cuenten con el Sistema de seguridad y Salud en Trabajo, ya que este gestiona los riesgos, permite un trabajo eficiente, proporciona una cultura integral que impacta de manera empresarial e individual, ya que de esta forma disminuye los niveles de riesgo, evita que se generen lesiones y muertes. Es importante reconocer que las medidas de precaución y la identificación de los riesgos requieren de la participación de los trabajadores para hacerlos conscientes de que aquellos actos inseguros conllevan a desencadenar siniestros letales,

características por falta de control y planificación de SG-SST, en los cuales son escasas las estrategias de prevención y promoción de políticas en las organizaciones donde se centren en buenas prácticas de autocuidado para la concientización en cada uno de los empleados, por tanto las industrias se interesen en invertir en capacitaciones, talleres, planes y acciones de mitigación de riesgos para prevenir accidentes.

7. Recomendaciones

Se propone a través de la investigación realizada que para futuros estudios los criterios de exploración utilizados se generen en otros idiomas como mandarín, hindú, turco, ruso, portugués y alemán, entre otros, ya que son territorios donde se intensifica la actividad en este sector económico, debido a que en idioma español son muy pocas las consultas que arrojan las bases de datos a través de ecuaciones de búsqueda, para así tener un campo más amplio de información que contribuya a las revisiones. En vista de que la temática es de gran interés en países a nivel continental, ya que prevalece como se evidenció en esta investigación el impacto de la minería subterránea de carbón en la ocurrencia de accidentes a nivel mundial, por tanto, es de gran importancia nutrir los Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo, fortaleciendo los diversos programas en pro del bienestar de los trabajadores en las diferentes empresas, entes gubernamentales y la academia.

Es así como mediante las nuevas tecnologías adoptadas en los sistemas de gestión en las empresas se pueden detectar los peligros en las diferentes áreas y etapas de la minería subterránea, de este modo tomar medidas preventivas ante estos factores de riesgo evitando y minimizando la siniestralidad de eventos, previniendo pérdidas de vidas humanas y económicas. Por otro lado, a

través de las políticas establecidas dentro de las organizaciones deben estar encabezadas por los líderes de SST para la regulación de la minería subterránea y así mismo que permitan dar cumplimiento a la socialización y divulgación con todos los involucrados en la seguridad y salud en el trabajo.

Además, es de vital importancia tener en cuenta que todas las empresas que hacen parte de la extracción de este mineral deben estar legalmente constituidas bajo las normas internacionales que apliquen y las vigentes establecidas en cada país. Por medio de la regulación se reducen los riesgos persistentes de accidentes laborales en este sector, ya que la clandestinidad aumenta las lesiones y fatalidad en los trabajadores afectando no solo a la persona. Por último, en cuanto al plan de acción, este es adaptable a las necesidades y/o posibilidades en materia de Seguridad y Salud en el Trabajo de cada empresa de minería de carbón subterránea conforme actividades y recursos propios, siendo susceptible a la mejora continua, con base en el seguimiento y medición que considere y requiera la organización.

Referencias

- Agencia Nacional de Minería. (2014). *Agencia Nacional de Minería ordena suspensión de actividades en dos minas en Guachetá*.
- Agencia Nacional de Minería. (2021). *Guía Técnica Para El Diseño De Un Plan De Prevención Y Mitigación De Explosiones Por Metano Y Polvo De Carbón En Las Minas Subterráneas De Colombia*. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/guia_preencion_mitigacion.pdf
- Agencia Nacional de Minería. (2023, November 30). *Carbón*. Colombia Potencia de La Vida. [https://mineriaencolombia.anm.gov.co/sites/default/files/2024-02/Ficha%20Carb%C3%B3n%202023%20\(1\)_compressed.pdf](https://mineriaencolombia.anm.gov.co/sites/default/files/2024-02/Ficha%20Carb%C3%B3n%202023%20(1)_compressed.pdf)
- Ali, M., & Pal, I. (2022). Assessment of workers' safety behavior in the extractive industries: The case of underground coal mining in Pakistan. *The Extractive Industries and Society*, 10, 101087. <https://doi.org/10.1016/J.EXIS.2022.101087>
- Alonso, J., Arcos, C. A., & Echavarría, E. (2017). *Seguridad y salud en la pequeña minería Colombiana: estudios de caso en oro y carbón*. <https://www.responsiblemines.org/wp-content/uploads/2017/07/07-10-2017-Somos-Tesoro-Seguridad-y-Salud.compressed.pdf>
- Altidis, B., & Bayram, F. (2024). Data Mining Implementations for Determining Root Causes and Precautions of Occupational Accidents in Underground Hard Coal Mining. *Safety and Health at Work*. <https://doi.org/10.1016/J.SHAW.2024.09.003>
- Amponsah-Tawiah, K., & Mensah, J. (2016). Occupational Health and Safety and Organizational Commitment: Evidence from the Ghanaian Mining Industry. *Safety and Health at Work*, 7(3), 225–230. <https://doi.org/10.1016/J.SHAW.2016.01.002>

- Arthur-Holmes, F., Yeboah, T., & Abrefa Busia, K. (2023). Dimensions of women's mobility, livelihoods and vulnerability in artisanal and small-scale mining-induced local economy. *Journal of Rural Studies*, 101, 103061. <https://doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2023.103061>
- Asare, F. K., Moniri-Morad, A., Augustine, P. C., & Sattarvand, J. (2024). Vehicle-Augmented Evacuation Integer Programming Model for Improving Safety and Efficiency in Underground Mines. *Journal of Safety Science and Resilience*. <https://doi.org/10.1016/J.JNLSSR.2024.06.007>
- Baraza, X., Cugueró-Escofet, N., & Rodríguez-Elizalde, R. (2023). Statistical analysis of the severity of occupational accidents in the mining sector. *Journal of Safety Research*, 86, 364–375. <https://doi.org/10.1016/J.JSR.2023.07.015>
- Bayraktar, B., Uyguçgil, H., & Konuk, A. (2023a). Investigation of Occupational Accidents in Mining with Survival Analysis. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 40(5), 1827–1838. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00810-5>
- Bayraktar, B., Uyguçgil, H., & Konuk, A. (2023b). Investigation of Occupational Accidents in Mining with Survival Analysis. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 40(5), 1827–1838. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00810-5>
- Brücker, C., & Preuße, A. (2020). The future of underground spatial planning and the resulting potential risks from the point of view of mining subsidence engineering. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(1), 93–98. <https://doi.org/10.1016/J.IJMST.2019.12.013>
- Caballero, J. (1989). *NTP 257: Perforación de rocas: eliminación de polvo*. https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_257.pdf/b147b048-80f4-4b4a-873e-c2f83f23bcfd?version=1.1&t=1686065869242

- Cardenas, J., Arcos, A., & Echavarría, E. (2017). *Seguridad y salud en la pequeña minería Colombiana: estudios de caso en oro y carbón*. <https://www.responsiblemines.org/wp-content/uploads/2017/07/07-10-2017-Somos-Tesoro-Seguridad-y-Salud.compressed.pdf>
- Chadid Díaz, A., Orieth, ;, Molina Barón, Y., Palacios, I., Lina, G. ;, Ruiz, M., Lesly, A. ;, & Serna, P. (2014). *El entorno laboral minero a nivel internacional y nacional: sus efectos en la salud y propuesta de abordaje integral desde lo conceptual*. https://repository.ces.edu.co/bitstream/handle/10946/2065/Entorno_Laboral_Minero.pdf?sequence=2
- Chu, Z., Zhou, G., & Bi, S. (2018). Meso-characterization of the effective thermal conductivity of selected typical geomaterials in an underground coal mine. *Energy Exploration & Exploitation*, 36(3), 488–508. <https://doi.org/10.1177/0144598717740956>
- Congreso De Colombia. (1979). *Ley 9 de 1979, por la cual se dictan Medidas Sanitarias*. https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/ley%200009%20de%201979.pdf
- Congreso de Colombia. (2001). *Ley 685 de 2001, por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones*. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=9202
- Congreso De Colombia. (2012). *Ley 1530 de 2012, Por la cual se regula la organización y el funcionamiento del Sistema General de Regalías*. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=47474
- Congreso de Colombia. (2012). *Ley 1562 de 2012, por la cual se modifica el Sistema de Riesgos Laborales y se dictan otras disposiciones en materia de Salud Ocupacional*. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Ley-1562-de-2012.pdf>

- Congreso De La República De Colombia. (2015). *Ley 1753 de 2015, Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 “Todos por un nuevo país.*
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=61933>
- Coy Fernández O. J., & Alarcón Restrepo H. S. (2019). *Accidentes de trabajo en el sector minero en Colombia para el periodo 2005-2015* (Tesis 1, Universidad del Rosario).
<https://repository.urosario.edu.co/server/api/core/bitstreams/deff87e9-59a9-4f7a-8c6e-4bc2a6677146/content>
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (2023). *Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo* vigencia 2023.
https://www1.funcionpublica.gov.co/documents/418537/528603/Plan_seguridad_salud_trabajo_v3.pdf/7e454853-fe21-bd19-4383-1d60bbbd1b14?t=1675196904360
- Domínguez, C. R., Martínez, I. V., Piñón Peña, P. M., & Rodríguez Ochoa, A. (2019). Analysis and evaluation of risks in underground mining using the decision matrix risk-assessment (DMRA) technique, in Guanajuato, Mexico. *Journal of Sustainable Mining*, 18(1), 52–59.
<https://doi.org/10.1016/J.JSM.2019.01.001>
- Dong, S., Zhou, W., Liu, Q., Wang, H., & Ji, Y. (2021). *Best Practices in Water Hazards Control in Coal Mines* (pp. 467–510). Methods and Techniques for Preventing and Mitigating Water Hazards in Mines. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67059-7_10
- Dursun, A. E. (2023). Fatal Accident Analysis and Hazard Identification in Turkish Coal-Extracting Industry Using Analytic Hierarchy Process. *Mining, Metallurgy & Exploration*.
<https://doi.org/10.1007/s42461-023-00905-z>

- Eksert, P., & Akcin, H. (2024). A Review on the 3D Cartographic and Spatiotemporal GIS Models for Safety of Accidents in Deep Underground Coal Mines. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 41(3), 1221–1243. <https://doi.org/10.1007/s42461-024-00977-5>
- Eslamian, S., & Eslamian, F. (2022). Disaster Risk Reduction for Resilience: Disaster Risk Management Strategies. In *Disaster Risk Reduction for Resilience: Disaster Risk Management Strategies*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-72196-1>
- Fa, Z., Li, X., Qiu, Z., Liu, Q., & Zhai, Z. (2021). From correlation to causality: Path analysis of accident-causing factors in coal mines from the perspective of human, machinery, environment and management. *Resources Policy*, 73, 102157. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2021.102157>
- Fan, C., Zhi-Rong, Z., Yun-Fei, D., Yu, B., Chang-Qing, X., & Xiao-Feng, J. (2020). Correction of seismic attribute-based small-structure prediction errors using GPR data—A case study of the Shuguang Coal Mine, Shanxi. *Applied Geophysics*, 17(4), 489–500. <https://doi.org/10.1007/s11770-020-0841-7>
- González J. (2014). *La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: una mirada crítica*. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/014beaf1-cbc3-406d-a744-a8aa0ee619a6/content>
- González, O., Molina, R., & Patarroyo, D. (2019). Condiciones de Seguridad y Salud en el Trabajo, una revisión teórica desde la minería colombiana. *Redalyc: Revista Venezolana de Gerencia*, 24(85), 1–13. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?>

- Hao, Y., Yang, H., Zhang, L., & Sun, C. (2024). Study on the Effectiveness of the Integral Emergency Response System for Coal Mine Water Hazard Accidents Based on Combination Weighting. *Processes*, 12(1), 235. <https://doi.org/10.3390/pr12010235>
- He, Y., & Li, J. (2024). Analysis of coal mining accident risk factors based on text mining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. <https://doi.org/10.1177/1748006X241245579>
- Herrera Herbert, J. (2019). Introducción a la Minería Subterránea. Vol. I: Características generales. In *Introducción a la Minería Subterránea. Vol. I: Características generales*. (2 a edition, Vol. 1). Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/upm.book.62723>
- Herrera Herbert, J. (2020a). Introducción a la Minería Subterránea. Vol. I: Características generales. In *Introducción a la Minería Subterránea. Vol. I: Características generales*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/upm.book.62723>
- Herrera Herbert, J. (2020b). Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación de interior. In *Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación de interior* (2nd ed., Vol. 4). Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/upm.book.62726>
- Herrera Herbert, J. (2020c). Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación de interior. In *Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación de interior* (2nd ed., Vol. 4). Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/upm.book.62726>

- Holmberg, K., Kivikytö-Reponen, P., Härkisaari, P., Valtonen, K., & Erdemir, A. (2017). Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, 115, 116–139. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2017.05.010>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, I. (2012). *GUÍA TÉCNICA GTC COLOMBIANA 45 GUÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS Y LA VALORACIÓN DE LOS RIESGOS EN SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL*. http://132.255.23.82/sipnvo/normatividad/GTC_45_DE_2012.pdf
- International Organization for Standardization. (2018). *International Organization for Standardization ISO 45001:2018*. www.iso.org
- Jaramillo, P., & Carmona, S. (2022). Temporal enclosures and the social production of inescapable futures for coal mining in Colombia. *Geoforum*, 130, 11–22. <https://doi.org/10.1016/J.GEOFORUM.2022.01.010>
- Jin, S., Gao, W., Huang, Z., Bi, M., Jiang, H., Si, R., & Wen, G. (2024). Suppression characteristics of methane/coal dust explosions by active explosion suppression system in the large mining tunnel. *Fire Safety Journal*, 150, 104251. <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2024.104251>
- Kamran, M., Chaudhry, W., Wattimena, R. K., Rehman, H., & Martyushev, D. A. (2023). A Multi-Criteria Decision Intelligence Framework to Predict Fire Danger Ratings in Underground Engineering Structures. *Fire*, 6(11). <https://doi.org/10.3390/fire6110412>
- Karadeniz, K. E., Nowak, S., Guner, D., & Sherizadeh, T. (2022). Evaluation on Underground Refuge Alternatives and Explosion Survivability: a Review. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 39(6), 2311–2331. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00682-1>

- Kumar, A., Nair, S., Yadav, B. P., & Arun, P. A. (2020). *Hazard and Risk in Mining Industry: A Case Study Based on Senghenydd Colliery Disaster* (pp. 225–232). *Advances in Industrial Safety*. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6852-7_19
- Meng, X., Liu, Q., Luo, X., & Zhou, X. (2019). Risk assessment of the unsafe behaviours of humans in fatal gas explosion accidents in China's underground coal mines. *Journal of Cleaner Production*, 210, 970–976. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.067>
- Miao, D., Lv, Y., Yu, K., Liu, L., & Jiang, J. (2023). Research on coal mine hidden danger analysis and risk early warning technology based on data mining in China. *Process Safety and Environmental Protection*, 171, 1–17. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2022.12.077>
- Ministerio de la Protección Social. (2007). *Resolución 1401 de 2007, Por la cual se reglamenta la investigación de incidentes y accidentes de trabajo*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=53497>
- Ministerio de Minas y Energía. (2012). *Resolución 180876 de 2012, Por medio de la cual se reasume una función por parte de este Ministerio y se delega en la Agencia Nacional de Minería la función de fiscalización, seguimiento y control de los títulos mineros para la exploración y explotación de yacimientos minerales*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=47768>
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). *Resolución 40599 de 2015, por medio de la cual se adopta el Glosario Técnico Minero*. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/res_40599_15_glosario_tecnico_minero.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). *Resolución 40391 de 2016, por la cual se adopta la Política de Minería Nacional*. <https://justiciaambientalcolombia.org/wp-content/uploads/2016/04/politica-nacional-minera-resolucion-40391-2016.pdf>

- Ministerio de Minas y Energía. (2019). *Protocolos y guía de procedimiento para la señalización interna y externa de minas subterráneas de carbón*. National Research Council Canada = Conseil national de recherches Canada. https://www.minenergia.gov.co/documents/9602/Prot_Se%C3%B1alizacion_carbon.pdf
- Ministerio de Protección Social. (2003). *Decreto 2090 DE 2003 Por el cual se definen las actividades de alto riesgo para la salud del trabajador y se modifican y señalan las condiciones, requisitos y beneficios del régimen de pensiones de los trabajadores que laboran en dichas actividades*. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Decreto-2090-2003.pdf>
- Ministerio de Protección Social. (2007). *Resolución 2346 de 2007, por la cual se regula la práctica de evaluaciones médicas ocupacionales y el manejo y contenido de las historias clínicas ocupacionales*. <https://www.bogotajuridica.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=25815>
- Ministerio de Salud. (1993). *Resolución 8430 de 1993, por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud*. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/lists/bibliotecadigital/ride/de/dij/resolucion-8430-de-1993.pdf>
- Ministerio del Trabajo. (2022). *Resolución 2851 de 2023, por medio de la cual se revoca la Resolución No. 3032 de 2022 “Por la cual se expone la Guía para la Identificación de Actividades de Alto Riesgo, definidas en el Decreto 2090 del 2003.”* <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?dt=S&i=153457>
- Ministra de Trabajo. (2019). *Resolución 0312 de 2019, establece los estándares mínimos del Sistema de Gestión de SST y deroga la Resolución 1111 de 2017*.

<https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/59995826/Resolucion+0312-2019-+Estandares+minimos+del+Sistema+de+la+Seguridad+y+Salud.pdf>

Ministro del Trabajo. (2012). *Resolución 1356 de 2012, por medio de la cual se determinó la conformación de los comités de convivencia laboral a cargo de los empleadores. Ministro del Trabajo*.

https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/45107/resolucion_00001356_de_2012.pdf/1fb4a978-0a6b-de95-2197-7ff9c0767fcc

Mirzaei Aliabadi, M., Mohammadfam, I., & Shabani, K. (2022). Causal Analysis of the Zemestan-Yurt Coal Mine Explosion in Iran. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 22(2), 519–530. <https://doi.org/10.1007/s11668-021-01309-1>

Monte, D., Los, E. N., Xviii, S., Xix, Y., Rivera, E. G., Carmen, D. :, & García, S. (2019). *Trabajo, salarios y niveles de vida de los mineros de Real del Monte (México) en los siglos XVIII y XIX* [Tesis, Universidad Autónoma de Barcelona]. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/667922/egr1de1.pdf>

Mundaca, G. (2022). Economic valuation of environmental and health impacts from mining: the case of Peru. *Environment, Development and Sustainability*, 26(1), 2415–2441. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02826-1>

Očenášová, M., Seňová, A., Pavolová, H., Rovňák, M., & Muchová, M. S. (2020). *A Systematic Approach to Occupational Safety and Health Focusing on Prevention of Damaging Aspects and Risk Categories in Mining Company* (pp. 187–206). *New Approaches in Management of Smart Manufacturing Systems*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40176-4_12

- Pedram, S., Ogie, R., Palmisano, S., Farrelly, M., & Perez, P. (2021). Cost–benefit analysis of virtual reality-based training for emergency rescue workers: a socio-technical systems approach. *Virtual Reality*, 25(4), 1071–1086. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00514-5>
- Perdomo, J., & Furlong, K. (2022). Producing mining territories: The centrality of artisanal and small-scale gold mining in Colombia from colonization to the present. *Geoforum*, 137, 22–31. <https://doi.org/10.1016/J.GEOFORUM.2022.10.001>
- Petroutsatou, K., Antoniou, F., & Markoulatos, E. S. (2024). Qualitative prioritization of accident risks in the mining industry. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s41872-024-00276-4>
- Presidencia de la República de Colombia. (2015a). *Decreto 1072 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo*. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=72173
- Presidencia de la República de Colombia. (2015b). *Decreto 1886 de 2015, por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas*. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=65325
- Presidenta de la Agencia Nacional de Minería. (2012). *Resolución 45 de 2012, por la cual se declaran y delimitan unas Áreas Estratégicas Mineras y se adoptan otras determinaciones*. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=4007264>
- Presidente de la Agencia Nacional de Minería. (2016). *Resolución 0708 de 2016, por la cual se establecen los criterios para la elaboración, evaluación y ejecución de los Planes de Gestión Social, conformidad con lo establecido por el artículo 22 de la Ley 1753 de 2015*. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/res_0708_29_agosto_2016.pdf

Presidente De La República De Colombia. (2022). *Decreto 944 de 2022 Nivel Nacional, Ppr el cual se modifica el Decreto 1886 de 2015.*

<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=124217>

Pueblo de Colombia. (1991). *Constitución Política De La República De Colombia 1991.*

https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=4125

Rahimdel, M. J., Aryafar, A., & Vaziri, S. (2022). Fuzzy FMEA for the safety risk analysis of underground coal mining (a case study in Iran). *Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*, 131(2), 104–114.

<https://doi.org/10.1080/25726668.2022.2051273>

Saade, M. (2015a). *Buenas prácticas que favorezcan una minería sustentable: la problemática en torno a los pasivos ambientales mineros en Australia, el Canadá, Chile, Colombia, los Estados Unidos, México y el Perú.*

<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/a9c2e0f9-bdc6-42cc-b579-60252b3b150f/content>

Saade, M. (2015b). *Buenas prácticas que favorezcan una minería sustentable: la problemática en torno a los pasivos ambientales mineros en Australia, el Canadá, Chile, Colombia, los Estados Unidos, México y el Perú.*

<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/a9c2e0f9-bdc6-42cc-b579-60252b3b150f/content>

Salve, U. R., & Paul, A. (2022). *Ergonomics in Mining: Current Status and Future Challenges* (pp. 253–271). Medical Geology in Mining. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99495-2_11

Sanmiquel, L., Rossell, J. M., Bascompta, M., Vintró, C., & Yousefian, M. (2024). Data mining of accidents in Spanish underground mines in the period 2003–2021 caused by a collision

- with a moving object. *Heliyon*, 10(2), e24716.
<https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E24716>
- Sapelkina, T. V., & Kara-sal, B. K. (2023). Composition and Properties of Coal Mine Overburden in Tuva: Areas of Application. *Journal of Mining Science*, 59(1), 176–182.
<https://doi.org/10.1134/S1062739123010192>
- Serrano, A. M., Martínez Bernal, M. S., & Fonseca Páez, L. A. (2016). Diagnóstico y caracterización de la minería ilegal en el municipio de Sogamoso, hacia la construcción de estrategias para la sustitución de la minería ilegal. *Tendencias*, 17(1), 104–119.
<https://doi.org/10.22267/rtend.161701.16>
- Sima, M., & Morosanu, G. A. (2022). Mining Hazard Risk Reduction and Resilience. In *Disaster Risk Reduction for Resilience* (pp. 73–99). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-72196-1_4
- Su, G., & Hu, E. (2024). Research on coal mine safety risk evolution and key hidden dangers under the perspective of complex network. *Scientific Reports*, 14(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-71004-2>
- Tian, C., Li, H., Tian, S., Tian, F., & Yang, H. (2024). The neurocognitive mechanism linking temperature and humidity with miners' alertness: an fNIRS study. *Scientific Reports*, 14(1), 11796. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62674-z>
- Tian, S., Wang, Y., LI, H., Ma, T., Mao, J., & Ma, L. (2024). Analysis of the causes and safety countermeasures of coal mine accidents: A case study of coal mine accidents in China from 2018 to 2022. *Process Safety and Environmental Protection*, 187, 864–875.
<https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2024.04.137>

- Utembe, W., Faustman, E., Matatiele, P., & Gulumian, M. (2015). Hazards identified and the need for health risk assessment in the South African mining industry. *Human & Experimental Toxicology*, 34(12), 1212–1221. <https://doi.org/10.1177/0960327115600370>
- Yang, Y., Wang, Z., Dong, C., & Cheng, T. C. E. (2024). How does heavy haze weather impact operational efficiency? An empirical study of Chinese manufacturing firms. *International Journal of Production Economics*, 273, 109264. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2024.109264>
- Yuxin, W., Gui, F., Qian, L., Jingru, W., Yali, W., Meng, H., Yuxuan, L., & Xuecai, X. (2024). Accident case-driven study on the causal modeling and prevention strategies of coal-mine gas-explosion accidents: A systematic analysis of coal-mine accidents in China. *Resources Policy*, 88, 104425. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2023.104425>
- Zhang, G., & Wang, E. (2023). Risk identification for coal and gas outburst in underground coal mines: A critical review and future directions. *Gas Science and Engineering*, 118, 205106. <https://doi.org/10.1016/J.JGSCE.2023.205106>
- Životić, D., Jovanovski, G., Simić, V., Boev, I., Cvetkov, V., Makreski, P., Polomčić, D., & Ristić Vakanjac, V. (2024). Coal: exploration, reserves, and utilization. *ChemTexts*, 10(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s40828-023-00186-5>

Apéndice A. *Matriz de búsqueda*

Nota. Ver apéndice en archivos externos

Apéndice B. *Plan de acción de alternativas de prevención de la siniestralidad laboral para minería subterránea de carbón*

Nota. Ver apéndice en archivos externos