



AGENCIA NACIONAL DE
MINERÍA

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**

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO 001 2021 ENTRE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA Y LA AGENCIA
NACIONAL DE MINERÍA



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Ministro de Minas y Energía

Dr. Diego Mesa Puya

Viceministra de Minas y Energía

Dra. Sandra Rocio Sandoval Valderrama

Presidente de la Agencia Nacional De Minería

Dr. Juan Miguel Durán Prieto

Vicepresidente de Seguimiento, Control y Seguridad Minera

Dr. Gustavo Raad de la Ossa

EQUIPO TÉCNICO DE LA AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA

Ing. Gloria Catalina Gheorghe

Ing. José Luis Niño Carvajal

Ing. Sindy Lorena Herrera Rodríguez

Ing. Daniel Eduardo Mayorga Mayorga

Abogada. Ana Alejandra Villoria Trujillo

EQUIPO TÉCNICO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

PhD. Jorge Martín Molina Escobar

PhD. Astrid del Socorro Blandón

Ing. Víctor Aguirre del Valle

Ing. Gloria María Soto Calle

Ing. Pedro Xavier Castilla Mangones

Ing. Sebastián López Gómez

Ing. Yuver Darío Ramírez Álvarez

Ing. Rafael Emiro Fuentes Chica

Ing. Linda Mishell Jaramillo Urrego

2021



Nota: Esta guía 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. La Universidad Nacional de Colombia y la Agencia Nacional de Minería no son responsables de cualquier suceso adverso que pueda ocurrir, lo cual requiere el desarrollo de una investigación rigurosa.

Contenido

LISTA DE TABLAS	6	5.4.1.2. Controles de sustitución	36
LISTA DE FIGURAS	7	5.4.1.3. Controles de ingeniería	37
1 INTRODUCCIÓN	8	5.4.1.4. Controles administrativos	37
2 OBJETIVOS	11	5.4.1.5. Equipos y Elementos de Protección Personal y Colectivo	37
2.1 Objetivo General	12	6 MODELO PARA UN PLAN DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN CONTRA EXPLOSIONES	39
2.2 Objetivos específicos	12	6.1 Descripción de la organización del trabajo	41
3 ANTECEDENTES	13	6.2 Especificaciones del proceso y actividades que serán evaluadas	41
4 MARCO LEGAL	15	6.3 Clasificación de las labores en función de las condiciones atmosféricas con riesgo de explosión	42
5 METODOLOGÍA DE GESTIÓN DEL RIESGO DE EXPLOSIÓN	18	6.4 Evaluación de riesgo	42
5.1 Determinación y descripción de la tarea minera a evaluar	20	6.5 Medidas de control requeridas	43
5.2 Identificación de peligros	20	6.5.1. Medidas de prevención	43
5.2.1. Presencia de metano	21	6.5.1.1. Medidas de prevención contra el riesgo de metano	44
5.2.1.1. Metodología para la toma de muestras de canal	24	6.5.1.2. Medidas de prevención para la reducción de las fuentes de polvo de carbón	44
5.2.1.2. Metodología para la realización de análisis de desorción	26	6.5.1.3. Medidas de prevención para la neutralización del polvo de carbón	46
5.2.2. Presencia de polvo de carbón	27	6.5.1.4. Capacitaciones en seguridad y salud en el trabajo	46
5.2.2.1. Instructivo de medición de polvo	29	6.5.2. Medidas de mitigación	47
5.2.2.2. Procedimiento para la determinación de la concentración de polvo de carbón	31	6.5.2.1. Barreras de protección	48
5.2.2.3. Determinación de la tasa de depósito del polvo de carbón	31	6.5.2.2. Estructuras y medidas constructivas de protección	54
5.2.3. Presencia de posibles fuentes de ignición	32	7 LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA EL SEGUIMIENTO Y CONTROL DEL PLAN DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN CONTRA EXPLOSIONES	57
5.3. Estimación y valoración del riesgo	32	7.1 Seguimiento y control a la presencia de metano	59
5.4. Análisis de las opciones de reducción del riesgo	35	7.2 Seguimiento y control a la presencia de polvo de carbón	59
5.4.1. Jerarquía de controles	36	7.3 Seguimiento y control a la presencia de fuentes de ignición	60
5.4.1.1. Controles de eliminación	36		

8	PREPARACIÓN Y RESPUESTA ANTE EMERGENCIAS	62		
8.1	Legislación	63	A.3.1.	Triángulo de fuego 88
8.2.	Metodología	67	A.3.2.	Evolución de un incendio 89
8.2.1.	Diagnóstico del plan de emergencias	68	A.4.	Explosiones en minería subterránea 90
8.2.2.	Identificación y evaluación de amenazas	68	A.4.1.	Deflagración 91
8.2.3.	Análisis de vulnerabilidad	69	A.4.2.	Detonación 91
8.2.4.	Determinación del nivel de riesgo	71	A.4.3.	Pentágono de explosividad 92
8.2.4.1.	Interpretación del nivel de riesgo	72	A.4.4.	Mecanismos de la explosión en minería subterránea 93
8.3.	Protocolo de evacuación	73	A.4.4.1.	Explosión primaria 94
			A.4.4.2.	Explosión secundaria 94
				ANEXO B. CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS Y SISTEMAS PARA MINERÍA SUBTERRÁNEA DE CARBÓN 96
			B.1.	Características de los equipos eléctricos para minería subterránea 96
			8.2.	Características del cableado para minería subterránea 99
				ANEXO C. METODOLOGÍA DE CERTIFICACIÓN DE CONFORMIDAD PARA EQUIPOS EN MINERÍA DE CARBÓN SUBTERRÁNEA 100
			c.1.	Acreditación y organismos de evaluación de la conformidad 100
			c.2.	Certificación de conformidad de productos 100
				ANEXO D. RESPONSABILIDADES, PROGRAMA DE CAPACITACIÓN, ENTRENAMIENTO Y COMUNICACIONES 102
				ANEXO E. METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS Y VALORACIÓN DEL RIESGO PARA LA PREVENCIÓN DE EXPLOSIONES 104
				ANEXO F. ENSAYOS MÍNIMOS PARA LA EVALUACIÓN Y TOMA DE DECISIONES FRENTE AL RIESGO DE EXPLOSIÓN 106
				ANEXO G. ELEMENTOS AUDIOVISUALES 107
				REFERENCIAS DE ANEXOS 107
9	EPÍLOGO	74		
	REFERENCIAS	76		
	ANEXOS	79		
	ANEXO A. MARCO TEÓRICO	80		
A.1.	Definiciones	80		
A.2.	Características del gas metano y del polvo de carbón	82		
A.2.1.	Gas metano	82		
A.2.2.	Polvo de Carbón	84		
A.2.2.1.	Tamaño de partícula	85		
A.2.2.2.	Contenido en material volátil	85		
A.2.2.3.	Contenido de cenizas y de humedad	85		
A.2.2.4.	Sensibilidad a la inflamación	85		
A.2.2.5.	Severidad de explosión	86		
A.2.2.6.	Susceptibilidad térmica	87		
A.3.	Incendios en minería subterránea	88		

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Actividades para el estudio del metano.	23	Tabla E2. Identificación de peligros.	104
Tabla 2. Actividades para el análisis de la presencia de polvo de carbón.	29	Tabla E3. Valoración del riesgo.	105
Tabla 3. Determinación del nivel de deficiencia para el metano.	33	Tabla E4. Análisis de las opciones de reducción del riesgo.	105
Tabla 4. Determinación del nivel de deficiencia para el polvo de carbón.	33	Tabla F1. Resumen de los ensayos mínimos para la evaluación y toma de decisiones frente al riesgo de explosión.	106
Tabla 5. Determinación del nivel de exposición para las fuentes de ignición.	34		
Tabla 6. Significado del nivel de consecuencia.	34		
Tabla 7. Determinación del nivel de riesgo.	35		
Tabla 8. Significado del nivel de riesgo.	35		
Tabla 9. Características de las barreras de polvo.	49		
Tabla 10. Resumen normativo referente al Plan de Prevención, Preparación y Respuesta ante Emergencias.	64		
Tabla 11. Calificación de amenazas.	69		
Tabla 12. Calificación de la vulnerabilidad.	70		
Tabla 13. Grado de vulnerabilidad.	70		
Tabla 14. Calificación del nivel de riesgo.	72		
Tabla A1. Propiedades características del metano.	84		
Tabla B1. IP mínimos para minería subterránea.	96		
Tabla B2. IK mínimos para minería subterránea.	97		
Tabla B3. Condiciones de equipos para labores en minería subterránea.	97		
Tabla E1. Descripción de actividades.	104		

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Normas colombianas vigentes al año 2021 en Seguridad y Salud en el Trabajo, y Seguridad Minera.	17	Figura 19. Diamante de riesgo.	71
Figura 2. Pasos de la metodología de gestión del riesgo de explosión.	19	Figura A1. Triángulo del fuego.	88
Figura 3. Diagrama de flujo de actuación previa ante atmósfera explosiva de metano.	22	Figura A2. Representación gráfica del comportamiento de gases durante un incendio.	89
Figura 4. Metodología para la toma de muestras de canal.	25	Figura A3. Reacción de propagación por deflagración.	91
Figura 5. Metodología para la realización de análisis de desorción.	26	Figura A4. Reacción de propagación por detonación.	92
Figura 6. Diagrama de flujo de actuación previa ante atmósfera explosiva de polvo de carbón.	28	Figura A5. Pentágono de explosividad.	93
Figura 7. Metodología propuesta para la medición de polvo.	30		
Figura 8. Jerarquía de controles.	36		
Figura 9. Modelo para un plan de prevención y mitigación contra explosiones.	40		
Figura 10. Medidas de prevención.	43		
Figura 11. Medidas de mitigación.	47		
Figura 12. Niveles de protección.	48		
Figura 13. Barreras de polvo livianas.	50		
Figura 14. Barreras de polvo pesadas.	51		
Figura 15. Contenedores de agua.	51		
Figura 16. Cordón de barreras en intersección de galerías.	53		
Figura 17. Lineamientos técnicos para el seguimiento y control del plan de prevención y mitigación contra explosiones.	58		
Figura 18. Metodología para dar seguimiento al Plan de Prevención, Preparación y Respuesta ante Emergencias.	67		



1

Introducción



La Ley 1562 del 2012 modifica el Sistema de Riesgos Laborales en Colombia. Este Sistema es “el conjunto de entidades públicas y privadas, normas y procedimientos, destinados a prevenir, proteger y atender a los trabajadores de los efectos de las enfermedades y los accidentes que puedan ocurrirles con ocasión o como consecuencia del trabajo que desarrollan” (Ley 1562, 2012, Artículo 1). Dentro del concepto de seguridad y salud en el trabajo, la protección de los trabajadores frente a riesgos de explosiones juega un papel de vital importancia, sobre todo en la industria extractiva del carbón (Echeverry y Campo, 2016).

Son múltiples los esfuerzos de investigadores y expertos en seguridad minera frente a la implementación de medidas de prevención y mitigación de explosiones por metano y polvo de carbón. Sin embargo, estos sucesos se siguen generando en muchas partes del mundo, sin ser Colombia la excepción. La generación de explosiones en las minas de carbón se inicia por la presencia de gas metano y una fuente de ignición, el metano es liberado por el manto de carbón. Dicho gas es explosivo cuando se presenta en concentraciones volumétricas de 5 a 15% (Ortega Ramos, Franco Bonfante, Blandón Montes y Molina Escobar, 2018).

La mayor liberación de metano se da durante el proceso de arranque, al igual que sucede con el polvo de carbón. El polvo de carbón, producido por la extracción de este mineral, se puede acumular en paredes, techos y pisos de las instalaciones de la mina, dando lugar a zonas que bajo ciertas condiciones pueden ser potencialmente peligrosas. Está demostrado que los materiales combustibles reducidos a un tamaño de partícula lo suficientemente pequeño pueden iniciar una explosión cuando se encuentran en suspensión y en una concentración mínima necesaria, confinados, en presencia de un comburente (oxígeno) y de una fuente de ignición con la energía requerida para dar inicio a la reacción (Universidad Nacional de Colombia, 1996). La mezcla de estos dos componentes, metano y polvo de carbón, eleva sustancialmente la probabilidad de ocurrencia y gravedad de una explosión. Por tal motivo, es fundamental realizar un monitoreo constante de los niveles de metano e implementar campañas periódicas para la inertización del polvo de carbón, sobre todo, en zonas como los frentes de explotación donde se puede presentar la acumulación de polvo de carbón y una mayor liberación de gas metano (Universidad Nacional de Colombia, 1996).

Según el reporte Sabana de accidentalidad con fecha de corte al 23/11/2021 de la Agencia Nacional de Minería, durante el periodo comprendido entre el año 2010 y el 23 de noviembre de 2021, Colombia ha registrado 1591 emergencias y 1469 mortalidades, de las cuales 117 y 140 corresponden al año 2021, respectivamente (Agencia Nacional de Minería – ANM, 2021). En el año 2021, con corte al 23 de noviembre, se presentaron 6 emergencias y 25 víctimas mortales por explosiones en minas subterráneas de carbón, siendo la segunda causa, después de falla geomecánica, que genera mayores mortalidades en minería (ANM, 2021). En total, Colombia cuenta con el lamentable registro de 286 personas fallecidas desde el 2010 hasta el 23 de noviembre de 2021 por explosiones en minería subterránea de carbón.

En julio de 1977, el país sufrió su peor tragedia tras la explosión en una mina de carbón en Amagá, Antioquia debido a la acumulación de gases dejando como resultado 86 personas fallecidas. En el 2010, 33 años después, se repetiría una tragedia semejante en el mismo municipio y por causas similares, dejando un saldo de 73 personas fallecidas. Esta última explosión ocurrió cuando se realizaba el cambio del primer turno y en donde cerca de 90 trabajadores salieron ilesos (Redacción RPP, 2010). Durante el 2020 murieron 42 personas en 18 de estos eventos (ANM, 2021). A partir de estos registros se puede determinar que las explosiones de metano y polvo de carbón son uno de los sucesos más catastróficos en la minería colombiana.

Siendo la seguridad de los trabajadores el aspecto de mayor importancia en cualquier empresa, las estadísticas mencionadas indican que existen

falencias en las medidas implementadas o en la forma en cómo estas se están ejecutando, ya que no garantizan que los trabajadores se encuentren fuera de peligro. Por ende, es evidente la necesidad de investigar, diseñar e implementar nuevas técnicas enfocadas directamente en la prevención y mitigación de atmósferas explosivas con el fin de promover mejores condiciones laborales.

Analizando los criterios de evaluación de los factores de riesgos existentes, y los registros de emergencias, se establece una metodología para identificar y valorar los riesgos en atmósferas explosivas. Dicha metodología hace parte de la presente guía técnica cuya finalidad es estructurar un plan de prevención y mitigación de explosiones basados en la reglamentación del Decreto 1886 del 2015, la Guía Técnica Colombiana GTC 45 y la Guía española para la elaboración del plan de prevención contra explosiones en instalaciones de minería subterránea aplicada en España.



2

Objetivos

2.1.

Objetivo General

Formular, estructurar e implementar una guía técnica que brinde directrices para la identificación y valoración de riesgos asociados a la presencia de metano y polvo de carbón, con el fin de diseñar un plan de prevención, mitigación y atención de la emergencia contra explosiones en minería subterránea de carbón.

2.2.

Objetivos específicos

- 1.** Determinar cuáles son los factores que inciden directamente en la formación de atmósferas explosivas en la minería subterránea de carbón.
- 2.** Diseñar una metodología para identificar los peligros asociados a la formación de atmósferas explosivas y valorar la probabilidad de ocurrencia de una explosión por metano y polvo de carbón que sea aplicable en el país.
- 3.** Determinar medidas preventivas que contribuyan al mejoramiento de las condiciones de la atmósfera minera con el fin de evitar la formación de atmósferas explosivas promoviendo así, la seguridad y salud de los trabajadores.



3

Antecedentes



Para el desarrollo general de las actividades de extracción de minerales en Colombia, el Congreso Nacional de la República promulgó la Ley 685 de 2001 también conocida como el Código de Minas, encargado de regular la actividad minera del país. Así mismo, en concordancia con esta Ley se establecieron otras normas enfocadas en la prevención de riesgos y disminución de lesiones y mortalidades asociadas a la extracción de minerales. Estas incluyen el Decreto 1886 de 2015 por el cual se dispone el reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas, el Decreto 1072 de 2015 que consagra el nuevo Sistema de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) y la Guía Técnica Colombiana GTC 45 que hace referencia a la metodología aplicada para la identificación de peligros y valoración del riesgo de seguridad y salud en el trabajo.

Dentro del ámbito académico colombiano se han llevado a cabo investigaciones relacionadas con la explosividad en minas subterráneas. Por ejemplo, Baquero, Blandón & Molina (2012) publicaron un estudio cuyo objetivo era establecer los factores que influyen en la explosividad del polvo de carbón en las minas subterráneas. El análisis se realizó con muestras de polvo de carbón y de asociaciones de litotipos recolectadas de varias minas en el país. Los resultados obtenidos evidenciaron que gran parte del polvo de carbón existente en las minas seleccionadas es explosivo y requiere control de inertización (Baquero et al., 2012).

En el 2014, Molina-Escobar y Blandón realizaron una investigación enfocada en el análisis de las evidencias del choque térmico en partículas de polvo luego de que ocurriera una explosión en una mina de carbón. El objetivo era determinar las temperaturas alcanzadas y la transformación que sufría el polvo de carbón a lo largo de una explosión. Se analizaron muestras de los dos tipos de carbón (térmico y coquizable) y se realizaron diversas pruebas de laboratorio las cuales arrojaron diferentes resultados frente a la explosividad, permitiendo concluir que no se puede generalizar la influencia de los distintos factores que participan en este proceso (Molina-Escobar y Blandón, 2014).

La Agencia Nacional de Minería en asocio con la Universidad Nacional de Colombia por medio del Convenio No 005 de 2017, presentaron el diseño e implementación de estrategias de mejora de las capacidades, espacios de entrenamiento y formación en atmósferas explosivas en el país. A través del Convenio 001 del 2021, nuevamente estas dos instituciones unen esfuerzos con la finalidad de elaborar un documento que brinde directrices para prevenir las atmósferas mineras explosivas en Colombia. Para ello, se formulará, estructurará e implementará una guía técnica con directrices para el diseño de un plan de prevención de explosiones por polvo de carbón o metano en las minas de carbón en Colombia.



4

Marco
Legal

Colombia inicia su camino hacia la instauración de un contexto normativo relacionado con la protección de los trabajadores durante el siglo XX (Cárdenas, Arcos y Echavarría, 2017). La creación de diferentes normas ha consolidado el marco legal en el ámbito de Seguridad y Salud en el Trabajo y Seguridad Minera (Ver Figura 1). A la fecha, resaltan el Decreto 1072 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo, y el Decreto 1886 de 2015 donde se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas. El primero reúne todas las normas que reglamentan el trabajo, entre ellas el Decreto 1443 de 2014 que estipula las obligaciones legales que tienen los empleadores públicos y privados respecto a la salud y seguridad en el trabajo de los empleados. Así mismo, el Decreto 1072 establece que la implementación de un Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) por parte del empleador, debe ser de carácter obligatorio teniendo cobertura sobre trabajadores dependientes, contratistas, trabajadores cooperadas y trabajadores en misión.

En términos generales, se puede definir el SG-SST como el desarrollo de un proceso lógico por etapas, enfocado en la mejora continua y que tiene en cuenta: política, organización, planificación, aplicación, evaluación, auditoría y acciones de mejora. Todo esto con el fin de anticipar, reconocer, evaluar y controlar los riesgos que puedan afectar la seguridad y la salud en el trabajo. Como se mencionó, el SG-SST debe ser liderado e im-

plementado por el empleador o contratante y tiene que contar con la participación de los trabajadores y/o contratistas. Adicionalmente, el SG-SST tiene que adaptarse al tamaño y características de la empresa y también puede ser compatible con otros sistemas de gestión con los que cuente la empresa (Decreto 1072, 2015).

Por otra parte, el Decreto 1886 de 2015 establece las normas mínimas para la prevención de riesgos en la minería subterránea. De igual forma, adopta medidas para la inspección, vigilancia y control de todas las labores mineras con el fin de preservar las condiciones de seguridad y salud en dichos lugares donde se efectúan labores. Adicionalmente, y en concordancia con lo planteado por el Decreto 1072/2015, el empleador minero es el responsable de identificar, medir y priorizar la intervención de los riesgos asociados a su operación minera, así como de implementar los controles respectivos y hacer seguimiento a su efectividad, incluyendo el riesgo de explosiones subterráneas. Esta valoración debe estar enmarcada en el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo de la empresa.

Así mismo, se ha analizado la legislación europea incluyendo las normas UNE-EN 1127-1, donde se especifican los métodos para la identificación y análisis de situaciones de riesgo que conducen a una explosión, y el diseño de las respectivas medidas de seguridad (CNT, 2012); y la UNE-EN 1127-2: que es una guía general para la prevención y protección contra la explosión en la minería (CNT,

2003). Adicionalmente, la Directiva 2014/34/UE establece normas para la comercialización y puesta en servicio de aparatos y sistemas de protección usados en atmósferas potencialmente explosivas (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2014).

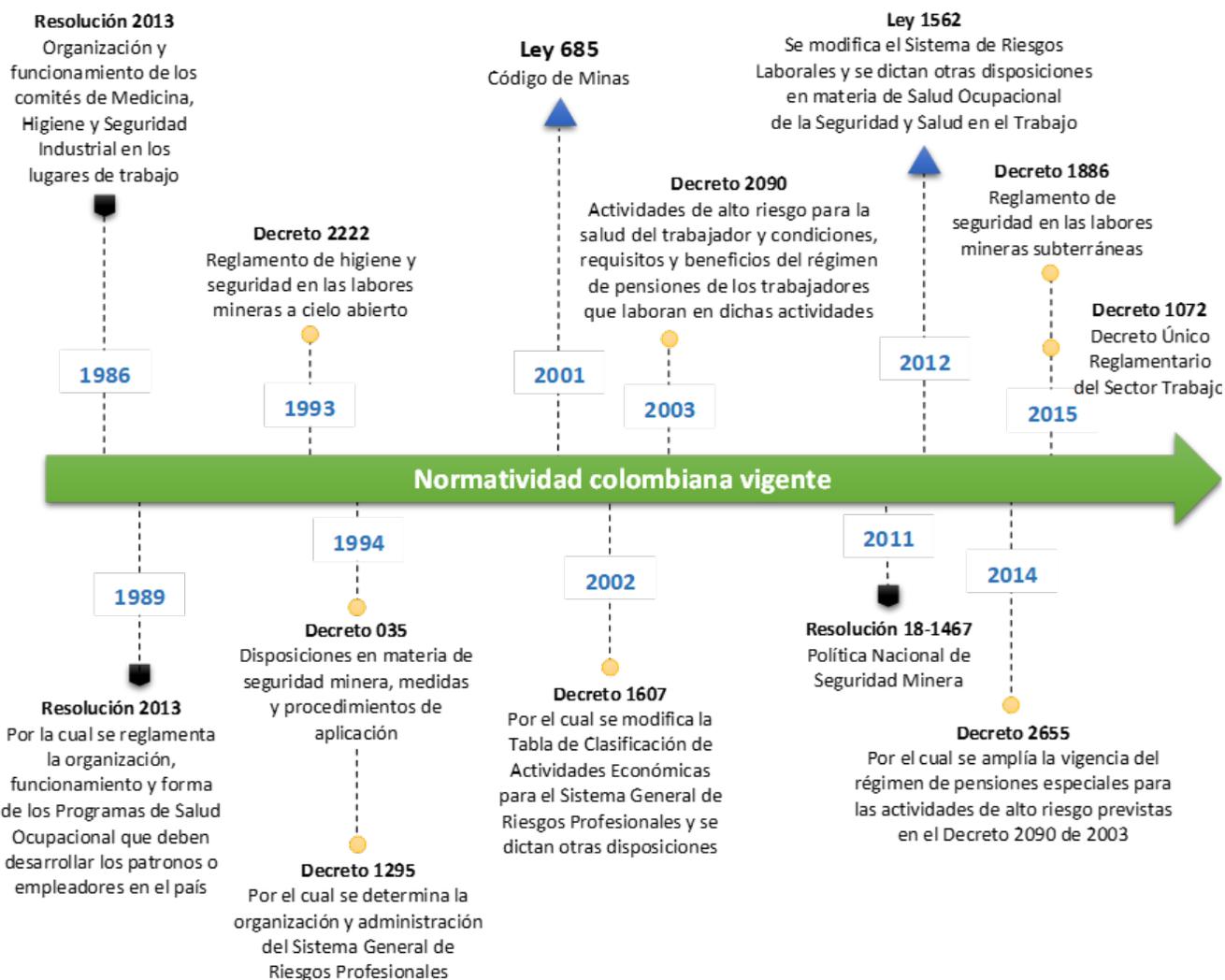
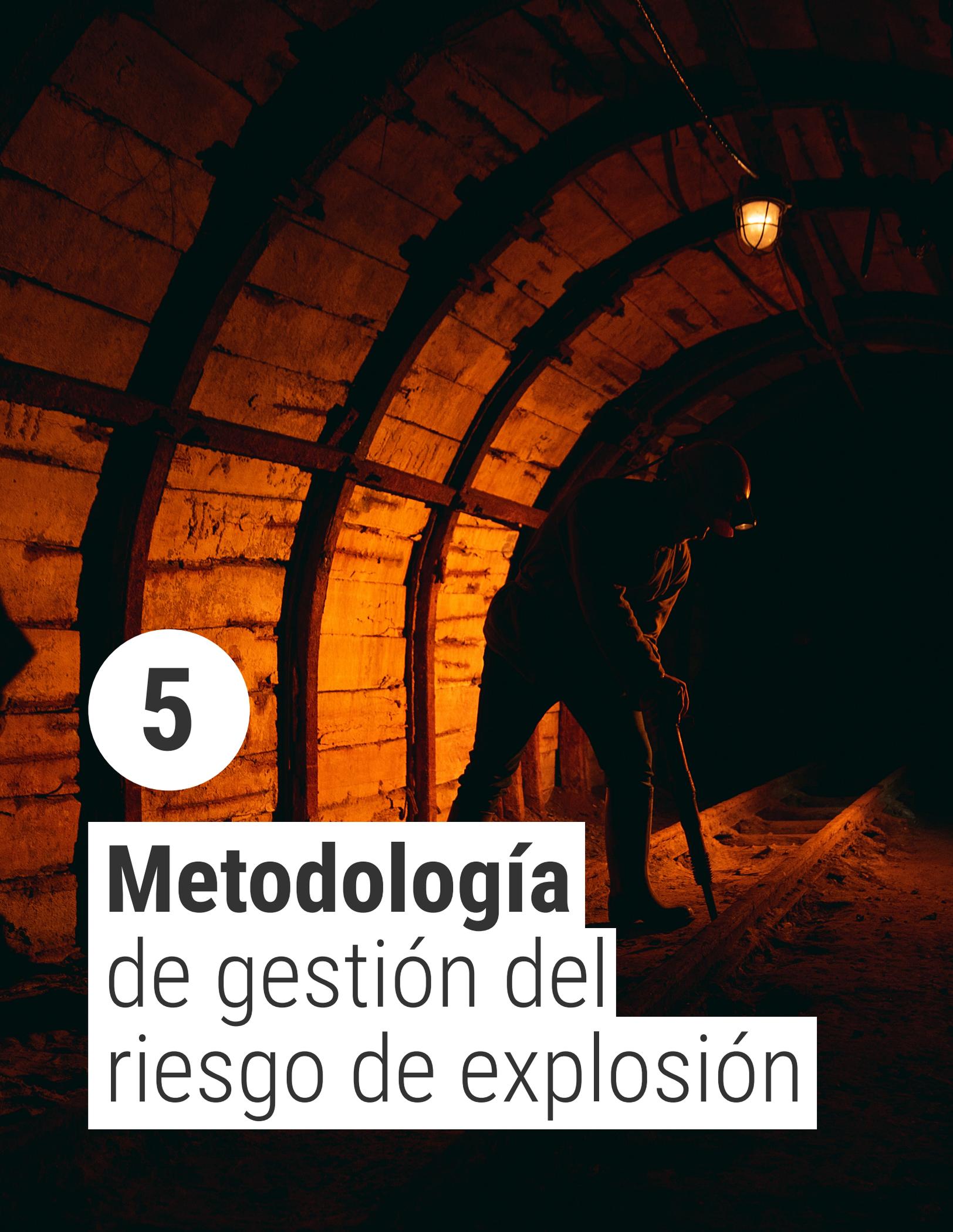


Figura 1. Normas colombianas vigentes al año 2021 en Seguridad y Salud en el Trabajo, y Seguridad Minera. Fuente: elaboración propia a partir de (Cárdenas, Arcos y Echavarría, 2017).

A worker in a dark tunnel, wearing a hard hat and a headlamp, is using a tool to work on the ground. The tunnel is supported by a series of wooden arches. A lantern hangs from the ceiling, casting a warm glow. The overall atmosphere is dim and industrial.

5

Metodología de gestión del riesgo de explosión

Mediante el enfoque de gestión Planear, Hacer, Verificar y Actuar (PHVA) se plantea la siguiente metodología simple e interactiva que busca implementar cambios en las actividades y posibles soluciones a problemas encaminados a la mejora continua del proceso en el tiempo.

La gestión del riesgo de explosiones presentada en esta guía es la adaptación de tres metodologías, dos de ellas ya evaluadas e implementadas, y una propuesta de estudio. La base principal de la metodología creada es la Guía para la elaboración del plan de prevención contra explosiones en instalaciones de minería subterránea de España y la Guía para la identificación de los peligros y la valo-

ración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional GTC 45. Esta metodología va encaminada a la identificación, valoración y reducción de riesgos que se derivan de la presencia de atmósferas explosivas durante el desarrollo de un proceso.

La metodología propuesta contempla las características de procesos donde exista presencia de equipos en funcionamiento relacionados con la tarea a realizar y la probabilidad de aparición de atmósferas explosivas en determinados momentos debido a la presencia de metano o polvo de carbón. La aplicación de la metodología deberá realizarse en el orden marcado por los pasos definidos en **la Figura 2**.



Figura 2. Pasos de la metodología de gestión del riesgo de explosión

La evaluación de riesgos es un proceso secuencial repetitivo. Después de evaluar un riesgo, se implementan las medidas oportunas para reducirlo a un nivel aceptable. Es fundamental

comprobar que las medidas aplicadas reducen el riesgo y no generan por sí mismas nuevos peligros por lo que se considera un proceso de retroalimentación.

5.1.

Determinación y descripción de la tarea minera a evaluar

La base fundamental de la evaluación de riesgos es conocer al detalle la labor a evaluar. Se debe determinar y describir la tarea, herramientas y equipos usados para desarrollarla, las personas involucradas y la manera cómo puede aparecer cada posible riesgo de explosión. Este trabajo preliminar proporciona una lista de actividades rutinarias y no rutinarias en las que puede darse una explosión.

La descripción de la tarea debe contemplar el paso a paso y ser minuciosa. Toda la información debe ser sistematizada y actualizada constantemente. Puede contemplar la interacción con otros procesos, sustancias utilizadas o encontradas en la zona de trabajo (humos, gases, polvos, etc.), y medidas de control establecidas con el fin de que haya una comunicación clara entre las actividades de trabajo y la valoración del riesgo. Para recopilar todos los datos, la metodología propone la elaboración de una matriz (véase el Anexo E) donde se caracterice:

- **Proceso**
- **Actividades**
- **Tarea**
- **Número de involucrados**
- **Descripción**

5.2.

Identificación de peligros

La identificación de peligros es uno de los apartados más importantes en cualquier evaluación de riesgos. En esta fase del proceso es necesario poseer un gran conocimiento acerca del funcionamiento de los equipos involucrados, así como de los posibles fallos que puedan ocurrir causados por equipos, instalaciones o por errores humanos.

Cabe resaltar que debe determinarse con gran precisión la tarea minera que luego será analizada para determinar qué fuentes de ignición pueden aparecer en ella. Dado que la guía está enfocada a la prevención de atmósferas explosivas, los peligros a identificar son la presencia de metano, polvo de carbón y fuentes de ignición.

Es importante establecer un orden lógico de los pasos a seguir para determinar si los riesgos de una explosión existen en las instalaciones de la mina. Por lo tanto, se establecen los siguientes aspectos como directrices para el empleador y trabajador minero en la identificación y evaluación de peligros, y en concordancia a ellos implementar medidas correctivas que permitan disminuir la existencia del peligro a un nivel tolerable, tanto para el metano como para el polvo de carbón.

5.2.1

Presencia de metano

La Figura 3 es un diagrama condicional que indican cada uno de los pasos previos que debe realizar el personal para la identificación y valoración general de la presencia de metano en la atmósfera minera. Primero, se inicia con la identificación de metano en las labores y se continúa con la clasificación de acuerdo con la presencia de metano según el Decreto 1886 del 2015, con el fin de elaborar un plan de prevención y mitigación de explosiones que tenga en cuenta el contenido de gas asociado al carbón y la velocidad con la que este desorbe el gas. Se establece que un diseño correcto del sistema de ventilación es la medida preventiva por excelencia para evitar la formación de una atmósfera explosiva por metano, y por ende, la explosión por metano.

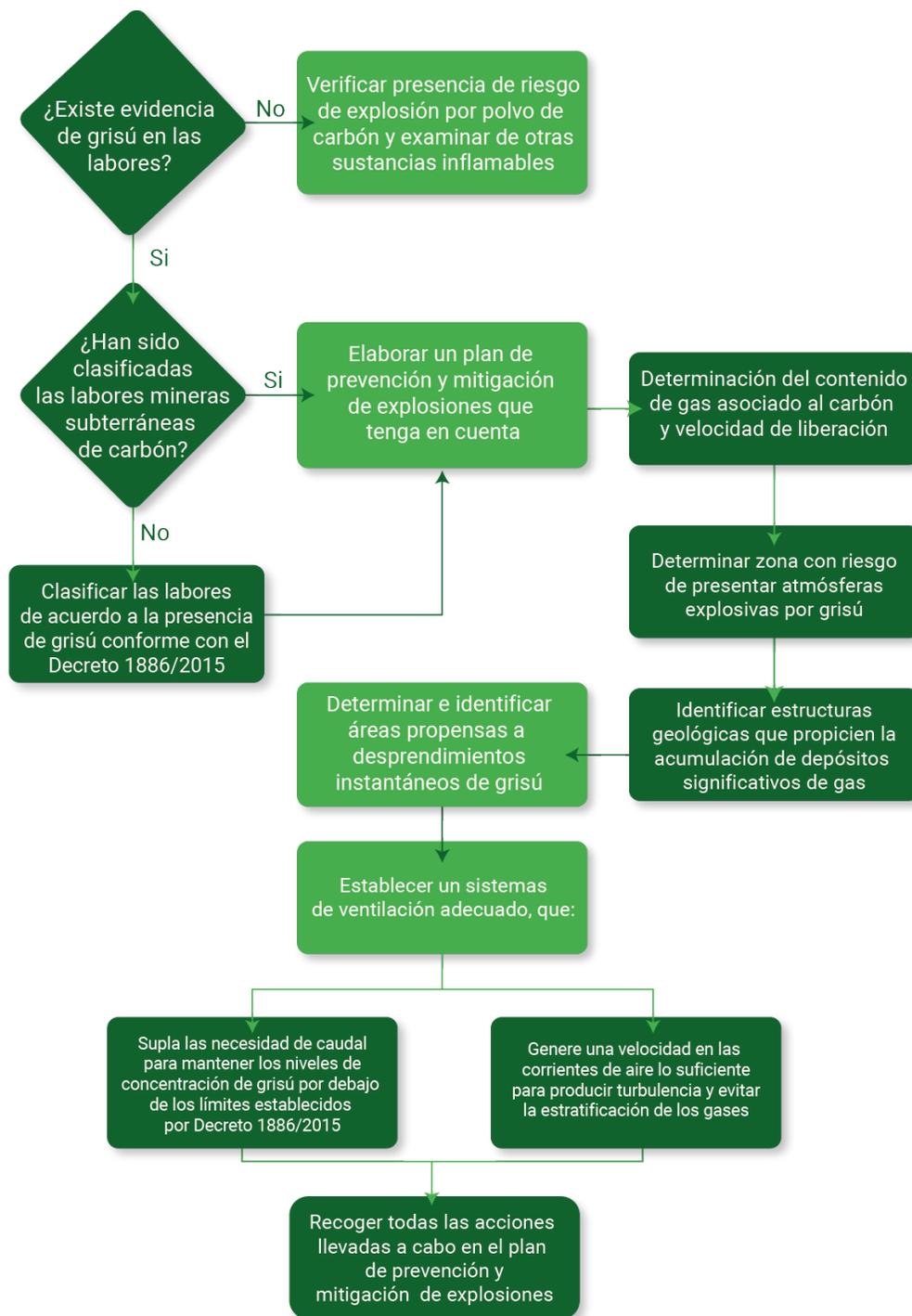


Figura 3. Diagrama de flujo de actuación previa ante atmósfera explosiva de metano.

Una forma de identificar la presencia de metano se puede realizar como se encuentra establecido en la Tabla 1. La identificación de este gas se puede lograr usando multidetectores con sensores de metano y a través de medición de contenidos de metano. La zona en la que se realiza la medición estará en función de la forma de identificación. Es decir, al usar multidetectores se determinará la presencia de metano en zonas de fallas, frentes

abandonados, puntos de recirculación de aire, etc. Mientras que, la medición de los contenidos de metano del manto se realizará en los frentes de explotación. Los puntos de medición con los multidetectores corresponden a techo, puntos a la mitad de la altura de la sección y puntos muertos de la ventilación (velocidad del aire inferior a 0,5 m/s) en cada zona de interés.

Tabla 1. Actividades para el estudio del metano.

Identificar el peligro	¿Cómo se identifica?	¿En qué zonas se mide?	¿En qué puntos?	¿Cómo se evalúa?
Metano	Uso de detectores de metano	1. Zonas de Fallas	Deben realizarse mediciones en techo, puntos medio, pisos, cavidades y puntos muertos de la ventilación	La evaluación debe hacerse teniendo en cuenta los controles existentes, definiendo la aceptabilidad del riesgo
		2. Donde se observe cambios en el espesor		
		3. Puntos de recirculación		
		4. Zonas de baja velocidad donde no se generan flujos turbulentos		
		5. Frentes abandonados		
	Análisis de contenidos de metano y medición con medidores de gases	6. Frentes de explotación		Para el caso del metano el control existente es la ventilación. Se debe evaluar si esta logra diluir de forma eficiente el volumen de metano presente

Nota: Las zonas de fallas son puntos clave para el monitoreo y control de riesgo por metano. Es importante implementar todas las medidas de control existente una vez se identifiquen las zonas de falla:

- 1.** Realizar perforaciones de mínimo 3 metros de longitud con el fin de identificar acumulaciones anómalas mayores de metano (conocido comúnmente en Colombia como “bolsas de metano”).
- 2.** Incrementar el monitoreo continuo.
- 3.** Identificar estratos de lutitas y arcillolitas carbonosas, las cuales en muchos casos también presentan contenidos de metano.
- 4.** Verificar la velocidad de la corriente de ventilación antes de iniciar cualquier labor.
- 5.** Si es posible, realizar perforaciones o inyectar agua para desgasificar la zona.
- 6.** Asegurarse de que sea seguro utilizar equipos que puedan ser posibles fuentes de ignición.

El muestreo de canal en los frentes de explotación se hace con el fin de recolectar muestras frescas para los diferentes análisis que se le deba hacer al carbón para definir, no solo las características de calidad, sino sus posibles riesgos en la explotación. Dentro de estos análisis se encuentran los ensayos de desorción que consisten en determinar el contenido de gas metano asociado a los mantos de carbón y a las rocas de la secuencia carbonosa proporcionando una aproximación de la emisión máxima de metano que puede desorber (liberar) el carbón por unidad de masa. Dichos análisis se pueden hacer en los Laboratorios de Carbones de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín y el Laboratorio de Hidrocarburos no Convencionales de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en Sogamoso. A

continuación, se presenta el paso a paso para la toma de muestras de canal y para el análisis de desorción.

5.2.1.1

Metodología para la toma de muestras de canal

La metodología consta de seis pasos, que se resumen en la Figura 4. A continuación, se describe cada uno de ellos.



Figura 4. Metodología para la toma de muestras de canal.

1. El sitio para muestrear debe estar perfectamente localizado. En lo posible se hará el respectivo levantamiento topográfico.

2. Describir, registrar y levantar una columna local del manto de carbón con las observaciones geológicas, descripción macroscópica del carbón, posición de las intercalaciones separables y no separables, techo y piso.

3. Se buscará tomar la muestra en un sitio que, por conocimiento anterior, permita establecer que no se trata de una zona de adelgazamiento o engrosamiento. Así mismo, se debe descartar el muestreo en zonas de fallas y en la vecindad a intrusiones cercanas a las zonas de meteorización.

4. La muestra se obtiene por la elaboración de un canal mediante un corte uniforme y continuo. Se debe lograr una superficie lo más regular posible.

5. Se debe limpiar bien la superficie a muestrear hasta una profundidad de 5 cm como mínimo. En el caso particular y a juicio del geólogo, cuando fuere necesario tomar la muestra en un frente de una mina inactiva, la profundidad deberá ser mayor de 10 cm.

6. Marcar los lados del canal con tiza, así como los materiales y cuerpos locales no representativos al carbón y cuales deben descartarse tales como intercalaciones separables, nódulos o concentraciones de minerales, etc.

5.2.1.2.

Metodología para la realización de análisis de desorción

La metodología para el análisis de desorción es un proceso minucioso, en el cual los pasos son simples, pero de no realizarse pueden generar errores en los resultados. Por ello, debe entenderse completamente el procedimiento, el cual se resume en la Figura 5.

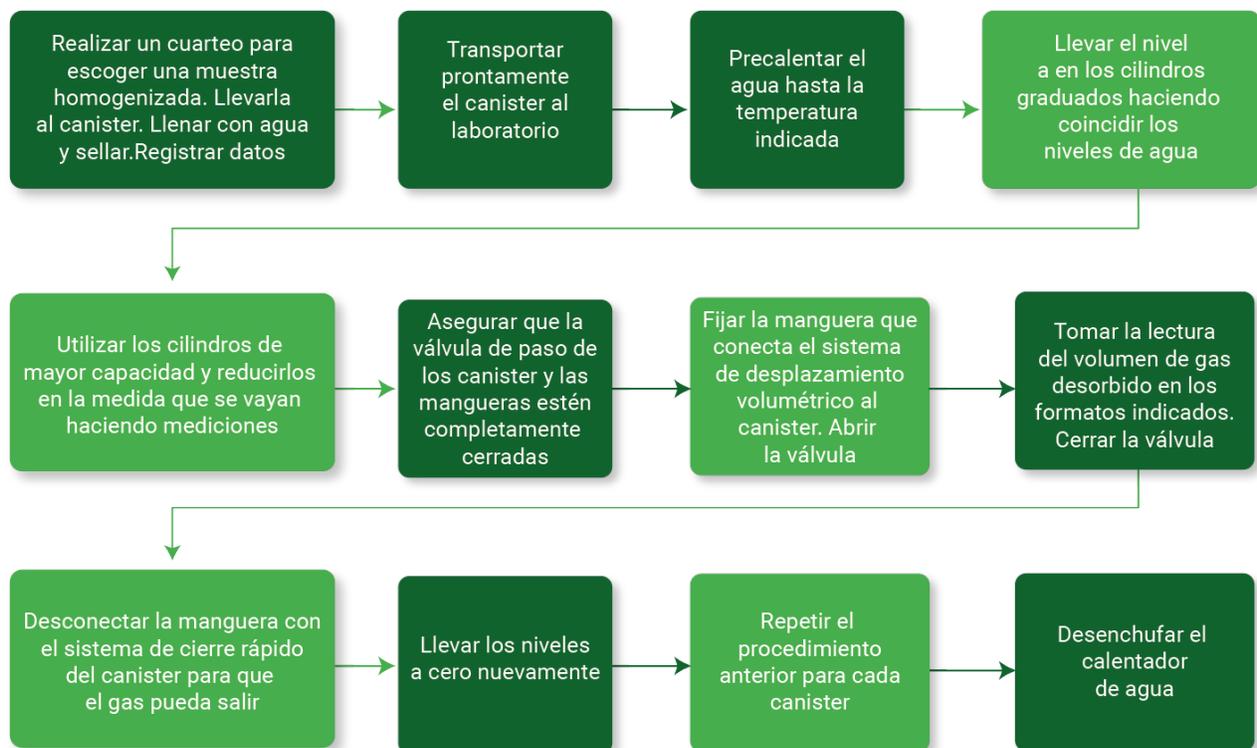


Figura 5. Metodología para la realización de análisis de desorción.

1. Después de recolectarse la muestra de canal, se realiza un cuarteo para escoger una muestra homogenizada que va directamente al canister. Una vez la muestra esté en el interior se procede a llenar con agua y se sella para evitar fugas. Cerrado el canister se deben registrar los siguientes datos: tiempo para empezar a picar y tomar la muestra, tiempo en el cual queda expuesto el frente, tiempo de cierre del canister, peso del canister con muestra, peso del canister con muestra y agua, profundidad de la muestra, temperatura en el frente y presión atmosférica.

2. El canister sellado debe llevarse en el menor tiempo posible a superficie a la zona designada (laboratorio) para empezar las mediciones del contenido de gases.

3. Precalentar el agua hasta la temperatura indicada (donde están sumergidos los canisters).

4. Llevar el nivel a cero en los cilindros graduados haciendo coincidir los niveles de agua. Se debe procurar mirar estos niveles horizontalmente para evitar errores.

5. Para las mediciones iniciales se deben utilizar los cilindros de mayor capacidad y reducirlos en la medida que se vayan haciendo mediciones.

6. Hay que asegurar que la válvula de paso de los canisters y las mangueras estén completamente cerradas.

7. Fijar la manguera que conecta el sistema de desplazamiento volumétrico al canister en donde se va a realizar la medida. Abrir la válvula del canister.

8. Tomar la lectura del volumen de gas desorbido en los formatos indicados. Cerrar la válvula.

9. Desconectar la manguera con el sistema de cierre rápido del canister para que el gas pueda salir.

10. En los casos en que la medida de gas sea

superior a la capacidad del cilindro interior graduado, se deben hacer mediciones consecutivas, midiendo, cerrando (la válvula del canister), haciendo cero, volviendo a abrir la válvula del canister y volviendo a medir.

11. Llevar los niveles a cero nuevamente.

12. Repetir el procedimiento anterior para cada canister.

13. Después de finalizar las mediciones se desenchufa el calentador de agua.

5.2.2.

Presencia de polvo de carbón

La mayoría de las veces una explosión de polvo de carbón está precedida por una explosión de metano, razón por la que inicialmente se debe evitar la explosión por este gas. El siguiente diagrama condicional, Figura 6, presenta el paso a paso de las actividades de identificación y valoración general de la presencia de polvo de carbón que se deben realizar al interior de la mina. Se inicia con la identificación de la producción de polvo por los mantos presentes. A través de estudios granulométricos se analiza la posibilidad de que el polvo se encuentre en las condiciones requeridas para propagar la explosión. El plan de prevención y mitigación debe contemplar medidas que logren neutralizar el polvo de carbón con el fin de que dado el caso se produzca una explosión por metano, el polvo de carbón no participe en la explosión y no agilice su propagación.

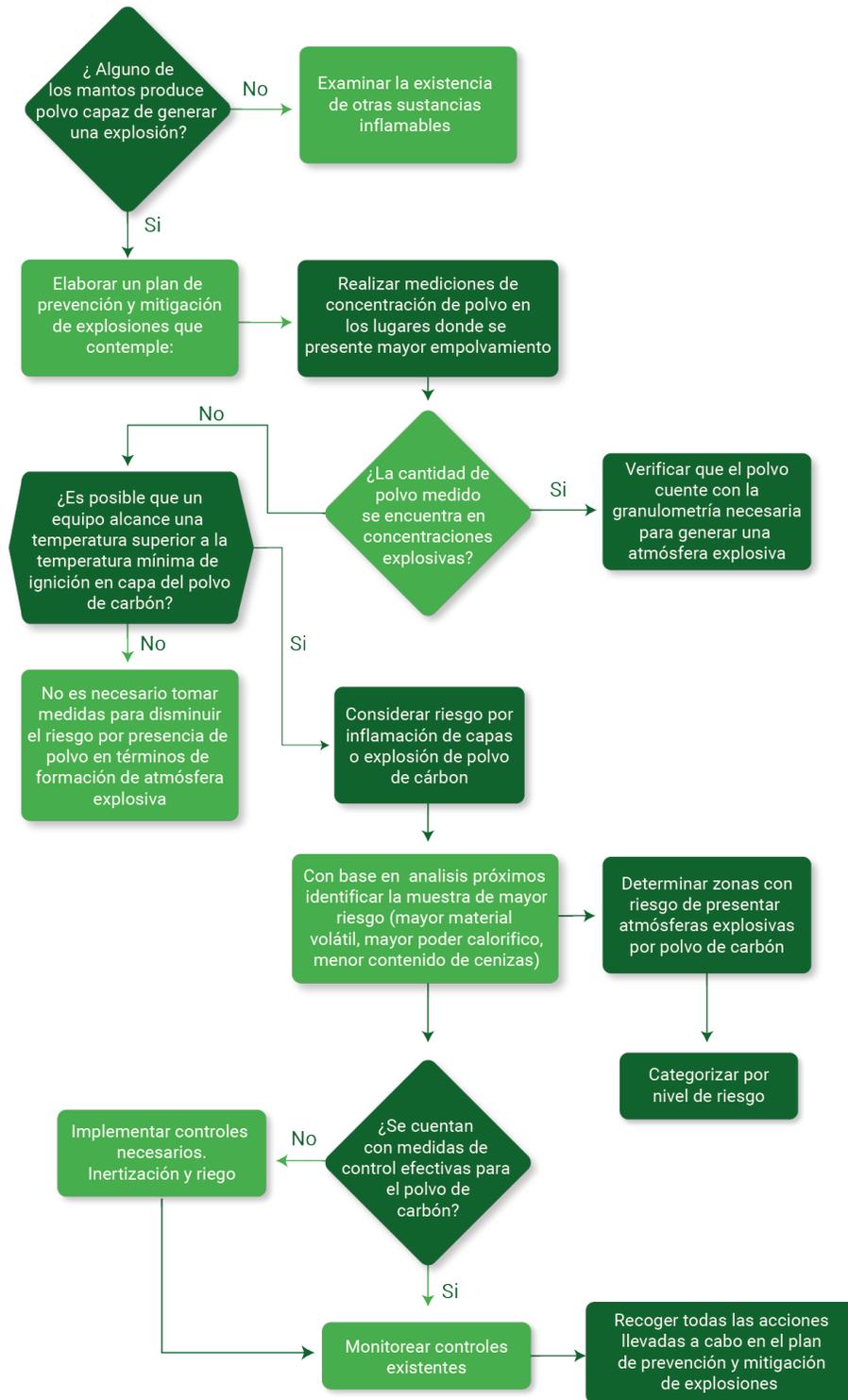


Figura 6. Diagrama de flujo de actuación previa ante atmósfera explosiva de polvo de carbón.

Para identificar la presencia de polvo de carbón se pueden seguir las actividades establecidas en la Tabla 2. Esta identificación se puede realizar tomando muestras en zonas de interés (puntos de transferencia de carbón, frentes de explotación, zonas de recirculación de aire, etc.), con el fin de obtener concentraciones presentes en dichos puntos de muestreo. Estas concentraciones se calculan a partir de la cantidad muestreada y el volumen de la zona de muestreo. Así mismo, se pueden realizar análisis granulométricos a las muestras obtenidas con el fin de determinar el porcentaje de polvo que puede ser explosivo (<800 micras). La metodología para recolectar las muestras se explica en la sección 5.2.2.1 Instructivo de medición de polvo.

Tabla 2. Actividades para el análisis de la presencia de polvo de carbón.

Identificar el peligro	¿Cómo se identifica?	¿En qué zonas se mide?	¿Cómo se recolecta?	¿Cómo se evalúa?
Presencia de polvo de carbón	Es necesario realizar análisis granulométricos para identificar el polvo de carbón. Este debe ser pasante malla #20 (0.850 mm)	1. Puntos de transferencias	Ver instructivo de recolección de polvo de carbón (5.2.2.1)	Análisis granulométricos, análisis próximos, análisis petrográficos, ensayos ATEX (concentración mínima explosiva, temperatura mínima de ignición en nube, presión máxima de la explosión)
		2. Puntos de transporte		
	También se debe evaluar si la cantidad del polvo se encuentra en las concentraciones requeridas	3. Recirculación de aire		
		4. Frentes de explotación		
		5. Sectores de mayor acumulación de polvo		
		6. Puntos de descargue		

La recolección de muestras de polvo permite realizar un estimado de la cantidad de polvo que se acumula en las instalaciones de la mina. Esta práctica es importante para identificar cada cuanto se alcanza el límite de explosividad y tomar decisiones e implementar medidas preventivas tales como la neutralización del polvo de carbón. Por ello, esta guía describe los pasos para la recolección de muestras de polvo de carbón, la determinación de la concentración y tasa de depósito.

5.2.2.1.

Instructivo de medición de polvo

Los resultados de los análisis de explosividad del polvo de carbón dependen en gran medida de cómo se realice la recolección de esta muestra. Por ende, esta guía técnica brinda una directriz a las empresas mineras de cómo pueden realizar una adecuada recolección de muestras. La Figura

7 representa grosso modo, el proceso de medición de polvo y luego se detalla el paso a paso de la metodología de recolección propuesta.



Figura 7. Metodología propuesta para la medición de polvo.

El personal encargado de recolectar el polvo de carbón debe conocer la operación minera. Es importante tener en cuenta zonas de interés tales como:

- **Puntos de aforo.**
- **Frentes de explotación.**
- **Salidas del material.**
- **Maquinaria de transporte (bandas transportadoras, panzers).**
- **Puntos de transferencias (tolvas, pilas).**
- **Zonas donde exista recirculación de aire.**
- **Zonas donde existan potenciales fuentes de ignición.**
- **Otras zonas donde se observe acumulación de polvo de carbón.**

Se debe verificar que la zona que se va a muestrear se encuentre libre de humedad.

La zona de muestreo debe ser señalizada con el fin de realizar un segundo muestreo para conocer la tasa de depósito del polvo de carbón en la mina. Se recomienda demarcar la zona de muestreo, es decir, acotar mediante dos franjas la longitud que se planea barrer, ya sea que la recolección se haga en paredes, techo y piso.

La recolección de las muestras de polvo de carbón debe realizarse de manera cuidadosa para evitar desprendimientos de rocas que puedan contaminar la muestra. Se debe recordar que se considera polvo de carbón a los finos pasante malla #20 (0.850 mm) por lo que la toma de

muestra debe realizarse cuidadosamente.

Para la toma de muestra se puede hacer el barrido con una brocha de 3 pulgadas y un recolector. El polvo recolectado (100 g como mínimo para realizar análisis en el laboratorio) debe ser almacenado en bolsas plásticas ziploc debidamente codificadas con el número de la muestra. Es importante que al realizar los análisis próximos se identifique cada muestra. Una vez la muestra se encuentre en la bolsa verificar que esta quede completamente cerrada.

Por cada estación se deben recolectar muestras de paredes, techo y piso, siempre y cuando se encuentren secos.

Realizar la medición del área transversal en cada zona de muestreo (galerías, frentes de explotación, tambor, etc.).

5.2.2.2

Procedimiento para la determinación de la concentración de polvo de carbón

Una vez realizada la primera recolección de muestras del polvo depositado en paredes, techos y piso, se procede a calcular un aproximado de la concentración de polvo presente en el sitio de muestreo aplicando la siguiente expresión matemática (Ecuación 1). El análisis debe realizarse con el material pasante malla #20 (0.850 mm).

$$Cpc = Masa / (Área * Longitud) \quad (Ec.1)$$

Dónde:

Cpc: concentración aproximada de polvo de carbón (g/m^3)

Masa: masa de polvo de carbón recolectado (g)

Área: Área transversal de la galería (m^2)

Longitud: Longitud barrida en la estación de muestreo (m)

5.2.2.3

Determinación de la tasa de depósito del polvo de carbón

El cálculo de la tasa de depósito del polvo de carbón se realiza con la información recolectada en el segundo muestreo. Este segundo muestreo se puede realizar pasados 15 o 20 días en las mismas estaciones escogidas para la primera recolección de polvo, por tal motivo es necesario demarcar las zonas muestreadas. La masa de polvo de carbón recolectada es tamizada (pasante malla #2 o 0.850 mm) y pesada. La Ecuación 2 determina la tasa de depósito del polvo de carbón.

$$TDpc = M' / (Área' * Tiempo) \quad (Ec.2)$$

Dónde:

TDpc: tasa de depósito de polvo de carbón ($g/d/m^2$)

M': cantidad de polvo recolectado en el segundo muestreo (g)

Tiempo: tiempo entre el primer y segundo muestreo (día)

Área': Área donde se realizó el muestreo (m^2)

5.2.3

Presencia de posibles fuentes de ignición

Se debe examinar detalladamente la tarea minera evaluada para identificar qué fuentes de ignición pueden aparecer. Por tal motivo, se debe realizar un listado con los equipos involucrados durante la ejecución de las labores. A continuación, se listan las fuentes de ignición incluidas en el Anexo C, de la ISO/IEC 80079-38: Equipos y componentes usados en atmósfera explosiva en minería subterránea (ISO/IEC, 2016).

- **Superficies calientes**
- **Llamas, gases y partículas calientes**
- **Chispas de origen mecánico**
- **Aparatos eléctricos**
- **Corrientes de fuga, corrosión de las protecciones catódicas**
- **Electricidad estática**
- **Rayo**
- **Radiofrecuencias (ondas electromagnéticas de 10^4 Hz a 3×10^{12} Hz)**
- **Ondas electromagnéticas de 3×10^{11} Hz a 3×10^{15} Hz**
- **Radiación ionizante**
- **Ultrasonidos**
- **Compresión adiabática y ondas de choque**
- **Reacciones exotérmicas, incluyendo autoignición de polvos**

Es importante que cada riesgo identificado sea sistematizado sin excepción. La finalidad de esta acción es generar una lista de situaciones con riesgo de explosión, lo que daría paso para efectuar la estimación de todos los riesgos de explosión identificados. Esta lista se adquiere al analizar la

presencia de atmósfera explosiva y la lista de las fuentes de ignición encontradas en la misma localización. De esta manera, se obtendrán todos los casos donde pueda originarse el riesgo de explosión mientras se realiza la tarea analizada.

5.3

Estimación y valoración del riesgo

Este es un proceso que consiste en determinar la probabilidad de que ocurra una explosión y la magnitud de sus consecuencias usando la información disponible. Para ello, se calcula el Nivel de Riesgo (NR) por explosión tanto para el metano como para el polvo de carbón a partir del producto entre el Nivel de Deficiencia (ND), Nivel de Exposición (NE) y el Nivel de Consecuencia (NC), como se observa en la Ecuación 3.

- **$NR=ND*NE*NC$ (Ec. 3)**

Donde:

- **NR: Nivel de Riesgo**
- **ND: Nivel de Deficiencia**
- **NE: Nivel de Exposición**
- **NC: Nivel de Consecuencia**

El Nivel de Deficiencia (ND) asociado al metano y al polvo de carbón es la relación existente entre el peligro identificado, en este caso, la presencia de metano o polvo de carbón, y la eficiencia de las medidas preventivas existentes en la operación. Este se determina usando la Tabla 3 y la Tabla 4 para el metano y polvo de carbón, respectivamente. El Nivel de Exposición (NE) viene dado por la presencia de equipos que pueden actuar como

fuentes de ignición según la Tabla 5. Se refiere al tiempo en el que se encuentra un equipo que puede generar una fuente de ignición dentro de una atmósfera potencialmente explosiva en una determinada labor. El Nivel de Consecuencia (NC) abarca los resultados negativos que pueden obtenerse una vez se materialice el riesgo, en este caso la explosión. Es decir, pérdidas humanas, infraestructura y administrativas. Tanto el valor de NC como su significado se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 3. Determinación del nivel de deficiencia para el metano.

Contenido de gas (m ³ /t)	Ventilación en funcionamiento normal			Ventilación parada (programada o por fallo)	
	Velocidad (0,5 m/s)	Nivel de Deficiencia	Valor	Nivel de Deficiencia	Valor
< 3	cumple	Bajo	1	Alto	6
	no cumple	Alto	6		
3 – 5	cumple	Bajo	1	Muy alto	10
	no cumple	Alto	6		
> 5	cumple	Medio	2	Muy alto	10
	no cumple	Muy alto	10		

Nota: para determinar el cumplimiento o no de la velocidad del aire, remitirse al artículo 56 del Decreto 1886 de 2015.

Tabla 4 . Determinación del nivel de deficiencia para el polvo de carbón.

Granulometría media	Existen medidas antiempolvamiento		No existen medidas antiempolvamiento		
	Nivel de Deficiencia	Valor	Concentración	Nivel de Deficiencia	Valor
Gruesa (>800 μm)	Bajo	1	C > CME (50 g/m ³)	Medio	2
			C < CME (50 g/m ³)	Bajo	1
Media (800-200 μm)	Bajo	1	C > CME (50 g/m ³)	Alto	6
			C < CME (50 g/m ³)	Bajo	1
Fina < 200	Bajo	1	C > CME (50 g/m ³)	Alto	6
			C < CME (50 g/m ³)	Bajo	1

C: Concentración CME: Concentración Mínima Explosiva

Nota: la concentración mínima explosiva que aquí se plantea es la establecida por el Decreto 1886 del 2015, pero cabe resaltar que este resultado puede ser diferente según el tipo de carbón y para obtenerla es necesario realizar el ensayo de concentración mínima explosiva.

Tabla 5. Determinación del nivel de exposición para las fuentes de ignición.

Tipo de equipo	Horas de funcionamiento	Recibe mantenimiento periódico		No recibe mantenimiento periódico	
		Nivel de Exposición	Valor	Nivel de Exposición	Valor
Sin declaración de conformidad del fabricante ATEX	< 10000	Frecuente	3	Continua	4
	10000 < h < 100000	Frecuente	3	Continua	4
	> 100000	Frecuente	3	Continua	4
Con declaración de conformidad del fabricante ATEX	< 10000	Esporádica	1	Ocasional	2
	10000 < h < 100000	Esporádica	1	Frecuente	3
	>100000	Ocasional	2	Continua	4

Nota: en caso de tener la presencia de equipos neumáticos, la valoración del nivel de exposición viene determinada por el mantenimiento periódico que este reciba. Para las voladuras, en caso de contar con agentes explosivos permisibles, accesorios de voladura no explosivos y disposiciones internas de seguridad para esta labor, se le asignará el valor de 1. Por otro lado, si no se cuentan con estos elementos mencionados anteriormente, se le asignará el valor de 4.

Tabla 6. Significado del nivel de consecuencia.

Nivel de Consecuencia	Valor	Significado
Catastrófico	100	Muertes o pérdidas totales de infraestructura y equipos
Muy grave	60	Daños severos o lesiones o enfermedades irreparables (incapacidad permanente, parcial o invalidez), o daños muy graves a infraestructura o equipos
Grave	25	Daños menores o lesiones o enfermedades con incapacidad laboral temporal, o daños graves a infraestructura o equipos
Leve	10	Daños menores o lesiones o enfermedades que no requieren incapacidad, o daños menores a infraestructura o equipos

Una vez calculado el nivel de probabilidad a partir de la Ecuación 3, se determinan los valores que puede tomar NR usando la Tabla 7 y su clasificación correspondiente.

La Tabla 8 sintetiza el significado del NR obtenido.

Tabla 7. Determinación del nivel de riesgo.

Nivel de riesgo NR= NDxNEx NC		Nivel de deficiencia x Nivel de exposición			
		40-24	20-10	8-6	4-2
Nivel de consecuencia (NC)	100	2000-1200	2000-1200	800-600	400-200
	60	1200-600	1200-600	480-360	200 100
	25	1000-600	500-250	200-150	100-50
	10	400-200	200 100	80-60	40 IV 20

Tabla 8. Significado del nivel de riesgo.

Nivel de Riesgo	Valor	Significado
I	4000 – 600	Situación crítica. Suspender actividades hasta que el riesgo esté bajo control. Intervención urgente.
II	500 – 150	Corregir y adoptar medidas de control de inmediato. Sin embargo, suspenda actividades si el nivel de riesgo está por encima o igual de 360.
III	120 – 40	Mejorar si es posible. Sería conveniente justificar la intervención y su rentabilidad.
IV	20	Mantener las medidas de control existentes, pero se deberían considerar soluciones o mejoras y se deben hacer comprobaciones periódicas para asegurar que el riesgo aún es aceptable.

5.4.

Análisis de las opciones de reducción del riesgo

Este análisis se enfoca en establecer controles de acuerdo con las situaciones alarmantes y de intervención inmediata encontradas en la identificación de peligros y valoración del riesgo. Una vez realizado el análisis, los nuevos controles a implementar estarán determinados por el principio de jerarquía de los controles.

5.4.1.

Jerarquía de controles

La jerarquía de controles proporciona una directriz para la selección e implementación de controles establecidos en el Artículo 2.2.4.6.24. del Decreto 1072 de 2015 acorde con la OSHA 18001, norma diseñada para controlar los riesgos en la salud y seguridad en el trabajo. En esta jerarquía se plantean

controles para eliminar o reducir el riesgo. Una vez se ha realizado la evaluación de riesgos, se determina si los controles existentes son los adecuados o si, por el contrario, es necesario implementar nuevos controles. La jerarquía de controles establece la existencia de controles de eliminación, sustitución, de ingeniería, administrativos y elementos de protección personal, dejando a éstos como última medida o barrera de protección entre el trabajador y el riesgo, como se muestra en la Figura 8.

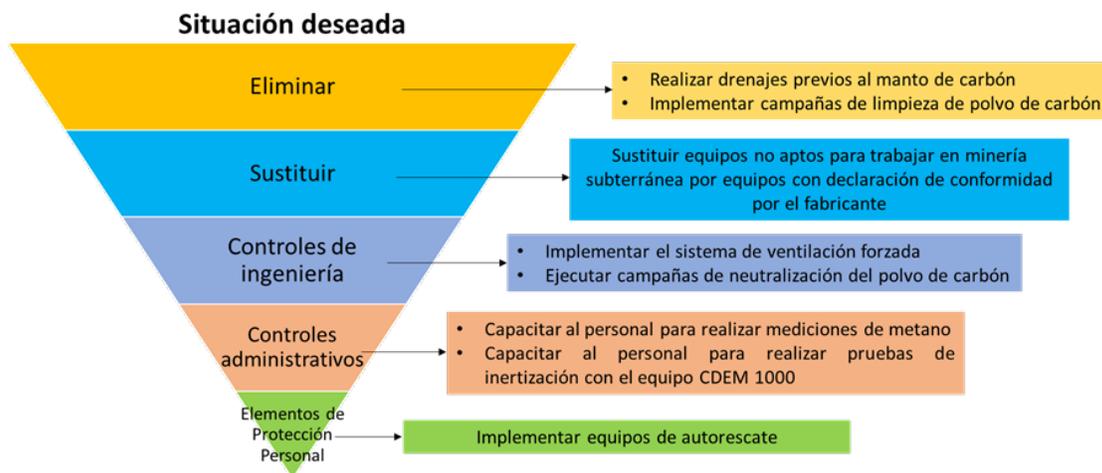


Figura 8. Jerarquía de controles.

Fuente: elaborado a partir de (Decreto 1072, 2015, Artículo 2.2.4.6.24.).

5.4.1.1.

Controles de eliminación

Son aquellos controles implementados para modificar el diseño y eliminar el peligro. Por ejemplo, realizar campañas de desgasificación al manto de carbón previamente a realizar su explotación e implementar limpiezas en zonas con concentración de polvo.

5.4.1.2.

Controles de sustitución

Se implementan controles que permitan sustituir o cambiar elementos peligrosos por materiales que disminuyan el riesgo. Por ejemplo, sustituir equipos o maquinaria no certificada para laborar en atmósferas explosivas por equipos certificados.

5.4.1.3.

Controles de ingeniería

Son medidas técnicas que permiten reducir el riesgo, tal como la implementación de ventilación forzada (principal y secundaria) y sistemas de ventilación para la dilución de metano, realizar campañas periódicas de inertización en zonas con altas concentraciones de polvo, realizar inyección de agua en los mantos de carbón que permita la migración del gas metano hacia el exterior del manto y que a su vez funciona como medida de humectación para el control de polvo.

5.4.1.4.

Controles administrativos

Los controles administrativos están enfocados en procedimientos de seguridad, inspección de equipos y diferentes señalizaciones en instalaciones donde se es permitido o no laborar. Por ejemplo, delimitación y señalización de zonas abandonadas, control en el mantenimiento preventivo de los equipos, procedimientos de medición de gases y caracterización del polvo de carbón presente en la mina. Así mismo, como parte de estos controles están las capacitaciones y entrenamientos en seguridad y monitoreo de gases.

5.4.1.5.

Equipos y Elementos de Protección Personal y Colectivo

De acuerdo con lo descrito en el Decreto 1886 de 2015, es obligatorio el uso de Elementos de Protección Personal y que estos estén debidamente certificados para labores mineras subterráneas. El titular minero, el explotador o el empleador minero tiene como obligación proveer estos elementos a sus trabajadores y estos a su vez tienen la obligación de usarlos de la manera en la que se indique en el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo. Además de proveer los elementos, es obligación del titular, el explotador o el empleador minero, capacitar y entrenar continuamente a sus trabajadores en su uso. Esta capacitación debe abarcar como mínimo lo siguientes temas.

- Los riesgos a los que se enfrentan los trabajadores en las labores subterráneas y como estos Elementos de Protección Personal pueden mitigar estos riesgos.
- En qué momento o condición se debe utilizar cada uno de los EPP.
- Como verificar que el EPP se encuentra en óptimas condiciones de uso.
- Identificar la necesidad de mantenimiento, ajuste o calibración.

Para minería subterránea los Elementos de Protección Personal se componen por: casco minero bajo tierra, lentes de seguridad, protectores auditivos, lámpara con batería, overol con cintas reflectivas, botas de seguridad impermeables con punta

de acero, guantes de protección, cinturón, respirador con sus respectivos filtros y autorrescatador.

Aunque los Equipos y Elementos de Protección Personal no previenen per se una explosión, se mencionan en este apartado por ser de uso obligatorio y porque es un equipo que podría ayudar a salvar vidas en algunas circunstancias. De este modo, el autorrescatador es un elemento que permitirá al minero contar con tiempo para ser evacuado en caso de que una explosión ocurra al interior de la mina. El autorrescatador se debe seleccionar según las características que defina la autoridad minera, se debe tener en cuenta que la vida útil estipulada por el fabricante puede verse disminuida si por ejemplo el equipo es usado en dos turnos de trabajo. Este es un elemento que una vez accionado deberá ser reemplazado en su totalidad. Todo trabajador o persona que vaya a ingresar bajo tierra debe portarlo para ser accionado en caso de que se presente una atmósfera irrespirable. El trabajador debe ser regularmente entrenado en su uso y deben realizarse simulacros prácticos, es muy importante si se requiere usarlo en una atmósfera contaminada que el trabajador se entrene en realizar una apnea previa antes de su uso, para no inhalar los gases tóxicos.



6

Modelo para
un plan de
prevención y
mitigación contra
explosiones

Entiéndase como Plan de Prevención y Mitigación al plan único desarrollado por cada unidad minera donde se define la estructura, funciones, procedimientos y recursos necesarios para aplicar de forma eficiente la gestión del riesgo y atenuar las consecuencias potenciales sobre la vida de los trabajadores y los bienes materiales de la labor.

posible. Por ello, se relacionan a continuación las principales variables que se deben tener en cuenta para estructurar un programa con enfoque en prevención y mitigación de explosiones en labores mineras subterráneas (Ver resumen en la Figura 9).

La gestión de riesgo propende por la prevención y mitigación del riesgo con el fin de evitar que un desastre suceda o, si sucede, cause el menor daño



Figura 9. Modelo para un plan de prevención y mitigación contra explosiones.

6.1.

Descripción de la organización del trabajo

Para poder evaluar riesgos es fundamental realizar una descripción sistemática del proceso de explotación. El paso preliminar a la evaluación de riesgos es consolidar de forma racional y manejable una lista de las tareas de trabajo. Para ello, se recomienda realizar la clasificación de las tareas de la siguiente forma:

- Etapa en el proceso de explotación
- Trabajos planificados y de mantenimiento
- Tareas rutinarias y no rutinarias

En lo que respecta a minería subterránea, una forma de clasificación de las etapas del proceso podría ser la siguiente:

- **1. Arranque**
- **2. Descargue**
- **3. Transporte**
- **4. Sostenimiento**
- **5. Operaciones auxiliares**
 - 5.1 Ventilación
 - 5.2 Desagüe
 - 5.3 Mantenimiento
 - 5.4 Iluminación
 - 5.5 Señalización

6.2.

Especificaciones del proceso y actividades que serán evaluadas

El proceso puede ser detallado de forma escrita especificando todas las etapas a ejecutar encaminadas a desarrollar la labor. Así mismo, se pueden realizar diagramas de flujo que expliquen el proceso. Para cada actividad puede ser importante recopilar información acerca de los siguientes aspectos:

- **1. Tareas por realizar (duración y frecuencia)**
- **2. Lugares donde se realiza la actividad o el trabajo**
- **3. Sustancias inflamables producidas en el trabajo**
- **4. Medidas de control existentes**
- **5. Personal que realiza el trabajo (tanto permanente como ocasional)**
- **6. Personas que puedan verse afectadas por las actividades realizadas**
- **7. Procedimientos escritos de trabajo o permisos de trabajo**
- **8. Maquinaria y equipos empleados**
- **9. Datos de evaluación de riesgos existentes**
- **10. Formas de energía empleadas (neumática, eléctrica, etc.)**
- **11. Organización del trabajo**

6.3.

Clasificación de las labores en función de las condiciones atmosféricas con riesgo de explosión

La clasificación de atmósferas explosivas en minería subterránea resulta ser más compleja de lo que aparenta. Al interior de la mina circulan corrientes de aire por medio de la ventilación forzada, cuyo objetivo es diluir las concentraciones de gases provenientes de los mantos de carbón y de la voladura garantizando que no se acumulen gases y polvos que puedan originar una atmósfera explosiva. En consecuencia, podría pensarse que las zonas ventiladas adecuadamente no presentan atmósferas explosivas. Sin embargo, el análisis del riesgo debe considerar posibles daños en ventiladores lo que cambiaría por completo las condiciones de la mina pudiendo generar una atmósfera explosiva.

Por ello, esta guía considera dos condiciones: la primera es aquella donde existe la atmósfera explosiva y la segunda donde existe una atmósfera potencialmente explosiva. La primera condición es aquella donde las concentraciones de metano y polvo de carbón se encuentran dentro del rango de explosividad y es asignada a aquellas labores donde se presentan estas situaciones: daños en los ventiladores, emisión repentina de metano debido a cambios de presión del aire. Una vez de-

tectada la situación, los equipos presentes deben ser des-energizados, salvo aquellos que permitan o faciliten la evacuación del personal tales como la lámpara del casco, radios de comunicación y medidores de gases. La segunda condición o atmósfera potencialmente explosiva, es asignada a todas las instalaciones que pueden estar expuestas a la presencia de metano y polvo de carbón y sus concentraciones se encuentran dentro de los límites permisibles. En general, todas las minas subterráneas de carbón pueden considerarse como atmósferas potencialmente explosivas así sea por poco tiempo.

6.4.

Evaluación de riesgo

Este apartado establece los resultados de la evaluación de riesgos, discusión de la existencia de posibles zonas peligrosas y posibles fuentes de ignición. Dicha evaluación deberá incluir lo siguiente, siendo desarrollada con mayor detalle en el Capítulo 5. METODOLOGÍA DE GESTIÓN DEL RIESGO DE EXPLOSIÓN.

La probabilidad de formación de atmósferas explosivas (Nivel de Deficiencia) asociada al metano y polvo de carbón.

La probabilidad de presencia de fuentes de ignición (Nivel de Exposición).

La magnitud de los efectos previsible.

Lugares donde puedan crearse atmósferas explosivas.

6.5.

Medidas de control requeridas

Las medidas que se deberán implementar serán medidas de índole técnico-organizativo (controles de eliminación, controles de sustitución, controles de ingeniería, controles administrativos y controles de Elementos de Protección Personal – EPP) y se basan en la evaluación de riesgos buscando que:

El entorno de trabajo sea el adecuado para que se efectúe correctamente y de manera segura cualquier labor.

Se garantice la reducción, en la mayor medida posible, el riesgo de explosión.

6.5.1.

Medidas de prevención

Las medidas de prevención, Figura 10, están encaminadas a prevenir la materialización del riesgo de explosión en las minas subterráneas de carbón. Con la implementación de estas medidas se busca eliminar, sustituir o controlar el riesgo en la fuente.



Figura 10. Medidas de prevención.

6.5.1.1.

Medidas de prevención contra el riesgo de metano

• Dilución de metano por ventilación

La dilución de metano por ventilación es la medida de control por excelencia para evitar la formación de atmósferas explosivas por presencia de este gas en las minas de carbón. Se considera que una mina se encuentra bien ventilada cuando por sus instalaciones circula aire en la calidad y cantidad suficiente para diluir las concentraciones de metano, y la velocidad de aire garantiza la no estratificación del gas metano. Establecer y regular una buena ventilación es primordial para prevenir el riesgo de explosión ya que una labor bien ventilada necesita concentraciones de metano considerables (>5% Vol. CH₄) para que se forme la atmósfera explosiva.

El Decreto 1886 del 2015, Capítulo I “Reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas”, establece la obligatoriedad de implementar el plan de ventilación y establece los parámetros básicos para el diseño de este. Es importante recordar que toda mina debe implementar ventilación forzada y que para evitar la estratificación de gases es recomendable generar velocidades de aire como mínimo de 0,5 m/s.

• Desgasificación previa a las labores

El drenaje previo a la ejecución de actividades

es una medida preventiva que se utiliza para desgasificar el manto. Los contenidos de metano que salen del manto se mezclan con la corriente de aire al interior de la mina. Es de vital importancia realizar mediciones continuas de concentración en la atmósfera mientras se realizan estas actividades preventivas para evitar riesgos operativos. Estas se realizan a través de perforaciones de 3 metros de longitud para facilitar la salida del gas.

6.5.1.2.

Medidas de prevención para la reducción de las fuentes de polvo de carbón

El sistema de supresión de polvo está determinado por la concentración y distribución de partículas que se producen al interior de la mina. También se encuentra condicionado por la cantidad de polvo permisible en la salida y por la velocidad de aire establecida en la normatividad.

• Control y eliminación de polvo de carbón mediante métodos de limpieza

Con el fin de controlar y eliminar el polvo de carbón producido en las labores mineras, es necesario programar operaciones de limpieza y mantenimiento para impedir la formación de acumulaciones. Se debe prestar mayor atención a los puntos donde el polvo tiende a depositarse. Las partículas con tamaños menores a 100 µm se

pueden desplazarse por el circuito de ventilación y depositarse sobre superficies (aristas, maquinarias o lugares donde existan cambios en la velocidad del aire). A continuación, se relacionan los principales lugares de interés para tener en cuenta en la operación de limpieza:

- **Áreas de arranque de mineral o tajos**
- **Parte baja de planos inclinados**
- **Debajo de bandas transportadoras**
- **Puntos de transferencia, carga, entre otros**
- **Galerías de retorno de aire viciado**
- **Puertas de ventilación**
- **Cambios de sección**

Para mantener las labores mineras en condiciones más seguras, una de las medidas necesarias es eliminar el polvo de carbón acumulado en la medida de lo posible. Esta medida reduce la cantidad de material combustible que podría participar en una posible explosión. Cabe resaltar que, con una limpieza rigurosa será menor la cantidad de material inerte a emplear (Laboratorio Oficial J.M. Madariaga – LOM, 2009).

La eficacia de la limpieza debería comprobarse por medio de una verificación in situ con el fin de asegurar que es correcta. Al aplicar las operaciones de limpieza como una medida preventiva, es importante especificar las áreas a tratar, el método que se va a emplear y el tiempo transcurrido entre dos operaciones de limpieza (LOM, 2009).

- **Mitigación con agua**

El uso de agua en las fuentes de polvo proporciona una protección ante la suspensión en el aire del polvo de carbón y evita que pueda participar en la propagación de una explosión o provocarla. La

mitigación de agua puede realizarse a través de riego y aspersión con agua.

Riego: se utiliza especialmente en las instalaciones de la mina donde es posible humedecer los depósitos de polvo y en zonas de trabajo donde se genera el aporte de material sólido, como es el caso de zonas cercanas a los frentes de explotación, vías de altas pendientes o avances en carbón de capas potentes. Este riego puede realizarse mediante chorros prolongados de agua y deben ser abundantes para garantizar la fijación del polvo y humedad superior al 12%.

Inyección con agua: es la técnica más utilizada para la supresión del polvo. Se trata de inyectar agua en el manto a través de perforaciones. El flujo de agua es introducido y se mueve a través de las grietas y fracturas naturales de carbón con el fin de humedecer las partículas de polvo de carbón. Se ha evidenciado que esta práctica es aplicada como medida de prevención para disminuir la probabilidad de contraer neumoconiosis y para el control de emisiones de gas metano, dado que el agua logra desplazar el gas hacia el exterior del macizo. En las medidas de seguridad para la implementación de este procedimiento no se recomienda realizarlo en zonas cercanas a fallas, ni estratos de pisos o techos débiles.

- **Sales higroscópicas**

La humectación del manto de carbón con soluciones salinas higroscópicas (CaCl_2 y MgCl_2) favorecen la absorción de la humedad del aire en la mina generando que las partículas de polvo de carbón se adhieran a ellas y no participen en una explosión. En algunas ocasiones se agregan surfactantes para aumentar la adsorción de

partículas de polvo de carbón.

El uso de surfactantes favorece que las zonas permanezcan húmedas lo que aumenta el tiempo para realizar el proceso de humectación nuevamente. Las sales higroscópicas pueden ser aplicadas en forma de polvo, líquida o de pellet. Durante el manejo de estas sales es importante evitar el contacto con los ojos, con la piel y la inhalación, por lo que se recomienda el uso de Elementos de Protección Personal (EPP) ya que estos productos son irritantes.

• Ventilación

La dilución y remoción de concentraciones excesivas de polvos suspendidos por medio de ventilación principal o secundaria es una de las técnicas implementadas para el control de fuentes de polvo. La velocidad necesaria que garantiza una correcta dilución y remoción corresponde a la velocidad mínima para garantizar flujos turbulentos (0,5 m/s) en la cual se incluye un factor de seguridad. El límite superior de velocidad, por lo general, es determinado por el costo económico sostenible. Cabe resaltar que altas velocidades de aire pueden levantar el polvo de carbón (Artículo 56, Decreto 1886 de 2015).

6.5.1.3.

Medidas de prevención para la neutralización del polvo de carbón

• Neutralización con material estéril

Consiste en mezclar polvo de carbón con un material incombustible en tamaño de partícula adecuado, el cual se ponga en suspensión al mismo tiempo que el polvo de carbón y evite

que este participe en la propagación de la explosión. La mezcla de polvo de carbón y material incombustible debe ser la suficiente para asegurar la neutralización del polvo de carbón. El material no puede ser tan fino para que no sea arrastrado por la corriente de aire y finalmente debe tener las características adecuadas para absorber calor, enfriar la llama y evitar la propagación de la explosión. Las concentraciones y la tasa de depósito se calculan de acuerdo con lo establecido en los numerales 5.2.2.2 y 5.2.2.3.

• Materiales incombustibles

Los materiales incombustibles utilizados para neutralizar el polvo de carbón son la caliza, esquistos, arenas y yeso. La acción de estos materiales depende directamente del estéril utilizado. El estéril logra captar la radiación emitida por el polvo de carbón y absorbe el calor disminuyendo la temperatura de la llama y el calentamiento del polvo de carbón. Algunos estériles tienen la capacidad de subdividirse y cuando su temperatura aumenta se genera una transformación endotérmica. Este proceso provoca una disociación del material calcáreo, deshidratación de esquistos y yeso. Las distintas transformaciones liberan gases inertes, dióxido de carbono y agua que disminuyen la concentración de oxígeno en el aire.

6.5.1.4.

Capacitaciones en seguridad y salud en el trabajo

De acuerdo con lo descrito en el artículo 11, numeral 19 del Decreto 1886 de 2015, el titular minero, el explotador minero y el empleador, deberán facilitar

la capacitación de los trabajadores a su cargo en materia de seguridad y salud en el trabajo y asumir los costos de esta, incluyendo lo relacionado con el tiempo que requiere el trabajador para recibirla. Por otra parte, los artículos 31 y 32 del mismo Decreto establecen que se debe disponer de una brigada de emergencia conformada por trabajadores capacitados y certificados como brigadistas, socorredores mineros o auxiliares de salvamento minero. El número de brigadistas o socorredores mineros será como mínimo el 30% del total de trabajadores de la mina o labor subterránea, garantizando que haya brigadistas en todos los turnos. Los socorredores mineros y auxiliares de salvamento minero se deben reentrenar una (1) vez al año sobre las actividades de salvamento minero. Estos cursos son ofertados por la Agencia Nacional de Minería y no tienen

ningún costo económico.

6.5.2.

Medidas de mitigación

El enfoque principal de esta guía es prevenir la formación de atmósferas explosivas, pero se sugieren las siguientes medidas de mitigación encaminadas a disminuir la expansión y propagación de la onda una vez se materialice la explosión limitando sus efectos catastróficos. Estas medidas se reducen a la implementación de barreras de protección que eviten o disminuyan la continuidad de la onda. La Figura 11, muestra las medidas de mitigación.



Figura 11. Medidas de mitigación.

6.5.2.1

Barreras de protección

Consiste en plataformas dispuestas a lo largo de la galería. Su principio de funcionamiento se basa en derramar una sustancia extintora en un momento preciso dentro de una cierta sección de una galería, con el fin de que el frente de llama encuentre una zona donde sea imposible que continúe su propagación. Las barreras son una parte impor-

tante del sistema de prevención y protección contra explosiones por polvo de carbón en las minas subterráneas utilizadas con frecuencia. La eficacia de esta medida de mitigación depende de su ubicación y del ancho de la galería. Para minas con secciones pequeñas, no se recomienda ubicar barreras cercanas a las intersecciones de las galerías ya que es posible que la onda de choque se propague sin accionarlas.

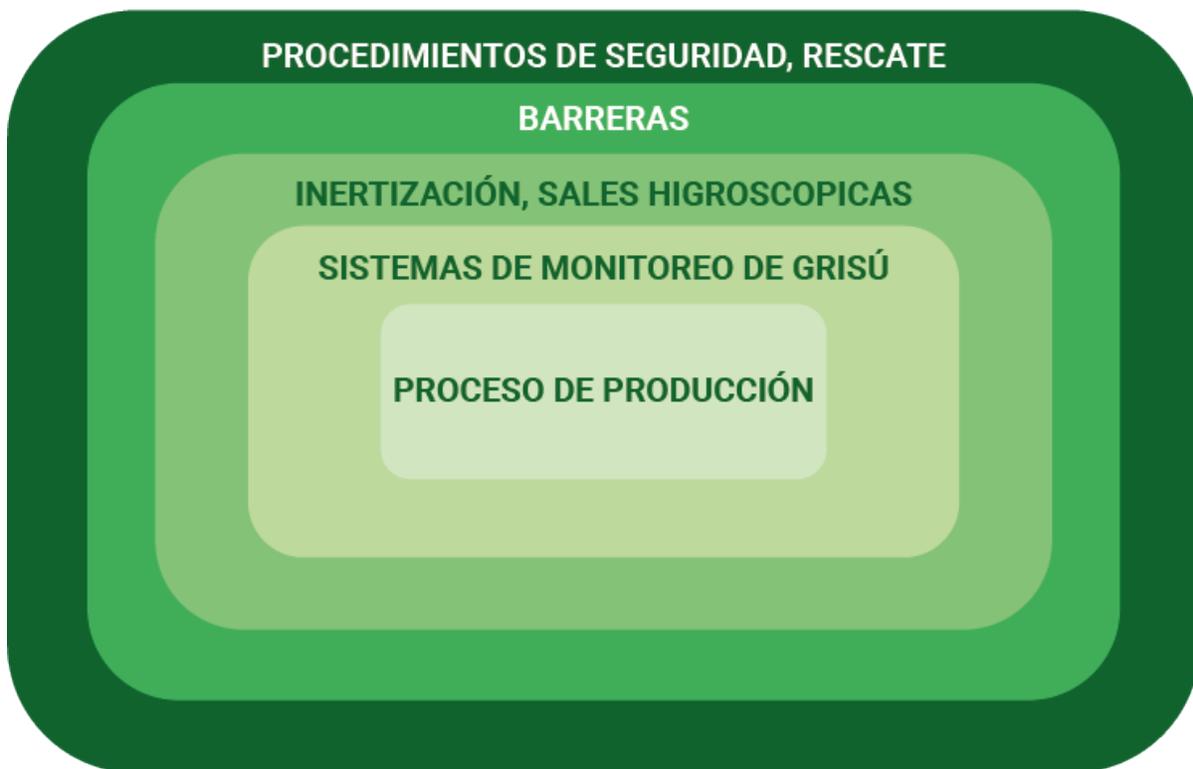


Figura 12. Niveles de protección.ente: (LOM, 2009).

En la Figura 12 se muestra la disposición de las barreras en el sistema de protección. El uso de barreras se asocia a un nivel de protección considerablemente alejado del proceso de producción. Estas barreras entran a participar cuando se tienen deficiencias de los niveles de protección más cercanos al proceso de producción. Normalmente se instalan para proteger, por ejemplo, frentes de arranque de carbón, zonas con desprendimientos frecuentes de metano, entre otras zonas, que puedan presentar un alto riesgo de presentar una atmósfera explosiva.

• **Barreras de polvo inerte**

El polvo inerte empleado para cargar estas barreras puede ser de caliza, dolomita, yeso, entre otros. Dicho polvo actúa como un diluyente inerte cuando la mezcla está suspendida aumentando la distancia entre las partículas de polvo combustible. Así mismo, las partículas del polvo inerte absorben calor y reducen la posibilidad de que la nube de polvo de carbón se inflame y se propague.

La ubicación de estas barreras debe ser analizada con cuidado puesto que, si se colocan demasiado cerca de la explosión el frente de llama puede pasar antes de que se distribuya correctamente la nube de polvo inerte. Por otro lado, si las barreras se sitúan muy lejos de la explosión la nube de polvo se puede dispersar antes de que llegue el frente de llama (Universidad Nacional de Colombia, 1996). En promedio, las barreras suelen instalarse a una distancia entre 60 y 200 metros de la zona de riesgo. Estas barreras se ubican a lo largo de la vía, dispuestas relativamente cerca una de otra, de modo que al momento de producirse una explosión la onda de choque accione la descarga del polvo inerte. La distancia entre las plataformas no debe sobrepasar los 3 metros y no puede ser inferior a 0,60 metros (Universidad Nacional de Colombia, 1996). Las barreras de polvo se clasifican de acuerdo con su tamaño y peso en ligeras y pesadas, como muestra la Tabla 9.

Tabla 9. Características de las barreras de polvo.

Barrera	Ancho (m)	Distancia entre anaqueles (m)	Peso máx. /metro (kg/m)	Polvo total (kg/m ²)
Liviana	0,36	1 – 2	9,0	12,0
Pesada	0,36 – 0,50	1,22 – 2,6	9 – 18	12 – 24

Fuente: (Universidad Nacional de Colombia, 1996).

Barreras de polvo livianas: estas barreras están diseñadas para ser usadas cerca del frente. Deben componerse completamente de soportes cargados ligeramente con un ancho no superior a los 36 centímetros, como se muestra en la Figura 13. Se recomienda que estas barreras sean cargadas con no menos de 100 kilogramos de polvo por cada metro cuadrado de sección transversal de la galería (Servicio Nacional de Salvamento Minero, 2014).

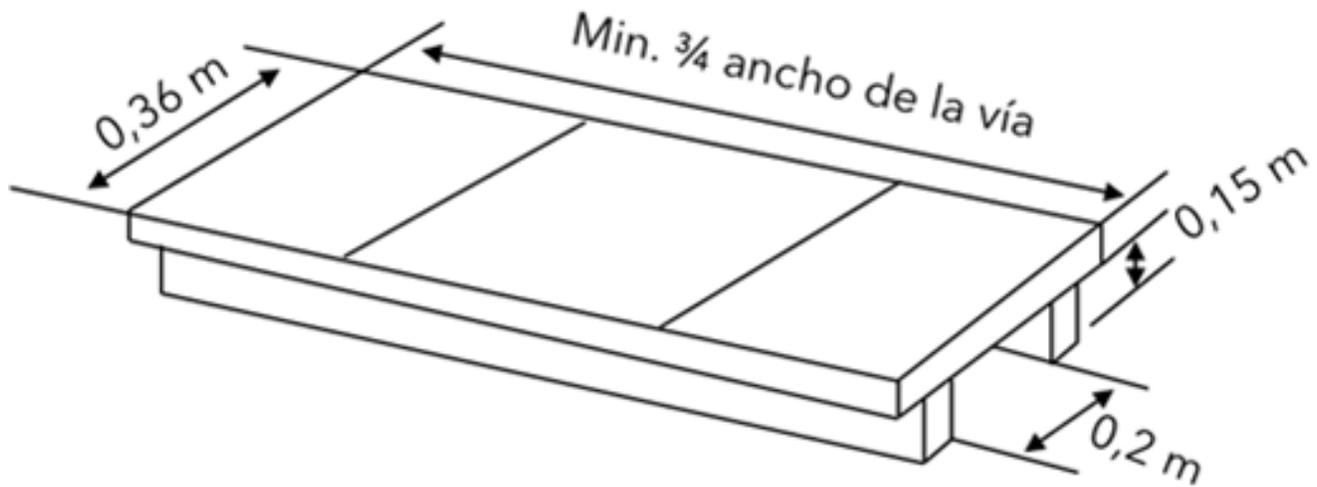


Figura 13. Barreras de polvo livianas.

Fuente: (Universidad Nacional de Colombia, 1996).

Barreras de polvo pesadas: estas barreras se ubican alejadas del posible lugar de origen de la explosión. Deben contener más polvo inerte ya que la mayor distancia permitirá a la explosión desarrollarse con mayor violencia, por lo que será más difícil de detener. Sin embargo, en ocasiones las explosiones pueden desplazarse distancias considerables sin desarrollar gran violencia, en especial donde la neutralización del polvo de carbón ha logrado prevenir la propagación de la explosión. Por tal motivo, las barreras deben estar diseñadas para satisfacer ambas condiciones. Es recomendable que estas barreras estén compuestas por algunos estantes muy cargados y otros levemente carga-

dos. Los estantes cargados levemente serán afectados en el caso de una explosión débil, mientras que los estantes muy cargados proporcionarán el polvo inerte adicional para suprimir una explosión violenta. La Figura 14 es un esquema de las medidas de este tipo de barreras (Servicio Nacional de Salvamento Minero, 2014).

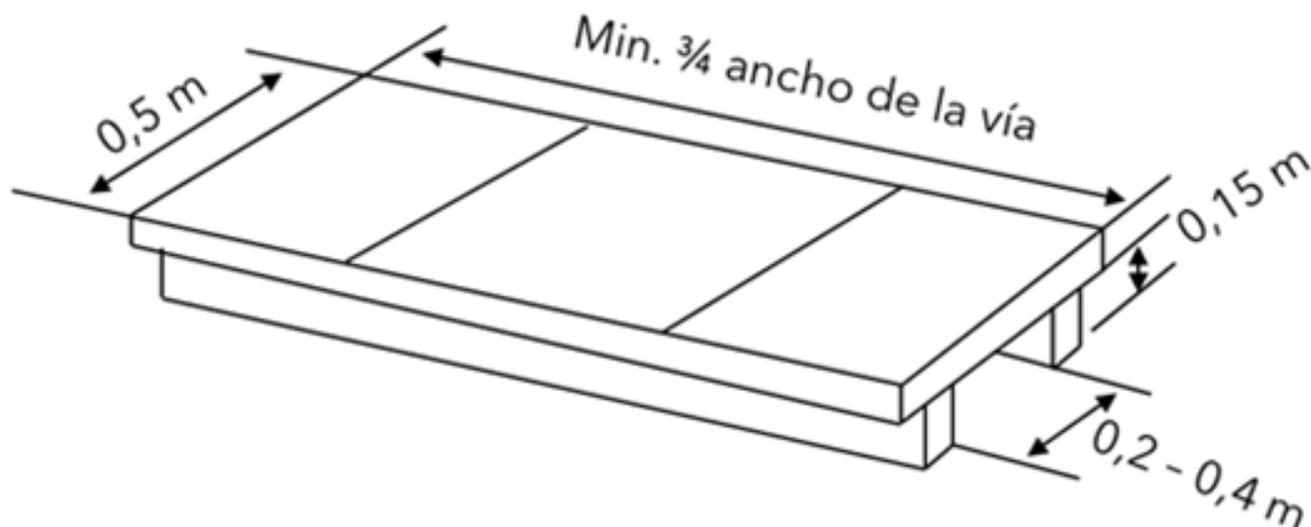


Figura 14. Barreras de polvo pesadas.

Fuente: (Universidad Nacional de Colombia, 1996).

Barreras de agua

Estas barreras consisten en contenedores llenos de agua (cubas, tubos o bolsas) dispuestos sobre plataformas, diseñados de forma que se destruyan en el caso de una explosión. Los contenedores, también conocidos como canales o artesas, están organizados en grupos a lo largo de la vía en posiciones calculadas. La cantidad de contenedores y de grupos están en función de la sección transversal y de la longitud de la galería. El principio de funcionamiento de estas barreras se basa en que, al ocurrir la explosión, la onda de choque romperá los contenedores produciendo un espacio saturado de agua que extinguirá el frente de llama de la explosión (Servicio Nacional de Salvamento Minero, 2014).

Los contenedores utilizados pueden ser de dos tamaños como se ilustra en la Figura 15) con una capacidad de 40 litros para contener al menos 35 litros de agua, y 2) con una capacidad de 90 litros para contener al menos 80 litros de agua. Estos

contenedores deben poder ser destruidos por la acción de la onda de choque, estar fabricados con material no inflamable, ser anti-estáticos, estar equipados con tapas para reducir la evaporación, ser capaces de ser llenados sin remover la tapa y capaces de ser drenados. La proporción del ancho de la galería debe ser cubierta por los contenedores montados de la siguiente manera:

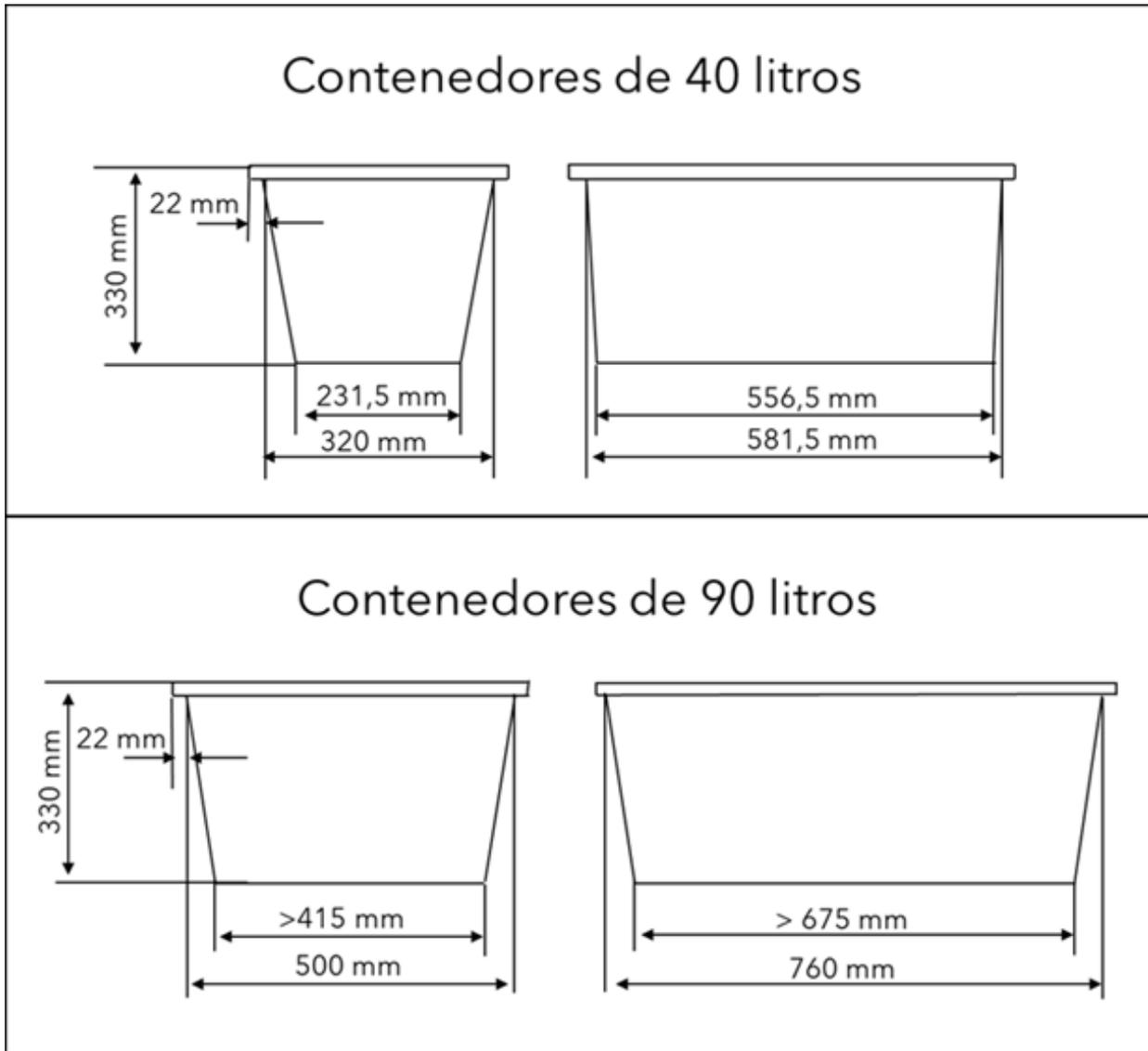
Sección transversal de hasta 10 m² : 35%

**Sección transversal de hasta 10 m² –
15 m² : 50%**

Sección transversal de más de 15 m² : 65%

Figura 15. Contenedores de agua.

Fuente: (LOM, 2009).



La distancia vertical desde el piso hasta la base del contenedor no debe exceder los 2,6 metros y desde la base del contenedor hasta la parte inferior del soporte del techo no debe superar los 2 metros. Si se excede esta distancia es necesario poner contenedores adicionales. En este caso, la distancia vertical entre la parte inferior de los contenedores en cada fila debe tener menos de 2 metros. Los contenedores deben estar separados horizontal-

mente a una distancia menor o igual a 1,5 metros (Servicio Nacional de Salvamento Minero, 2014).

Las barreras de agua se clasifican en dos tipos de acuerdo con la distribución de los grupos de contenedores (Ver Figura 16):

Barrera distribuida: los grupos de barreras distribuidas se disponen en posiciones fijas a lo largo de la longitud de la galería. La distancia mínima entre

los grupos no debe exceder los 30 metros. La cantidad de agua requerida es 1 litro por metro cúbico de volumen de la galería. La distancia entre estas barreras y las intersecciones no debe exceder los 30 metros (Servicio Nacional de Salvamento Minero, 2014).

Barrera concentrada: como su nombre lo indica, los grupos de barreras están dispuestas más cerca siendo la distancia máxima entre grupos de 3 metros. La distancia máxima entre barreras concentradas es de 400 metros. Dichas barreras deben al menos contener 200 litros de agua por metro cuadrado de sección transversal de la

galería. Así mismo, al menos 5 litros de agua por metro cúbico de volumen de galería a lo largo de la longitud de la barrera. La distancia entre estas barreras y las intersecciones no debe exceder los 75 metros (Servicio Nacional de Salvamento Minero, 2014).

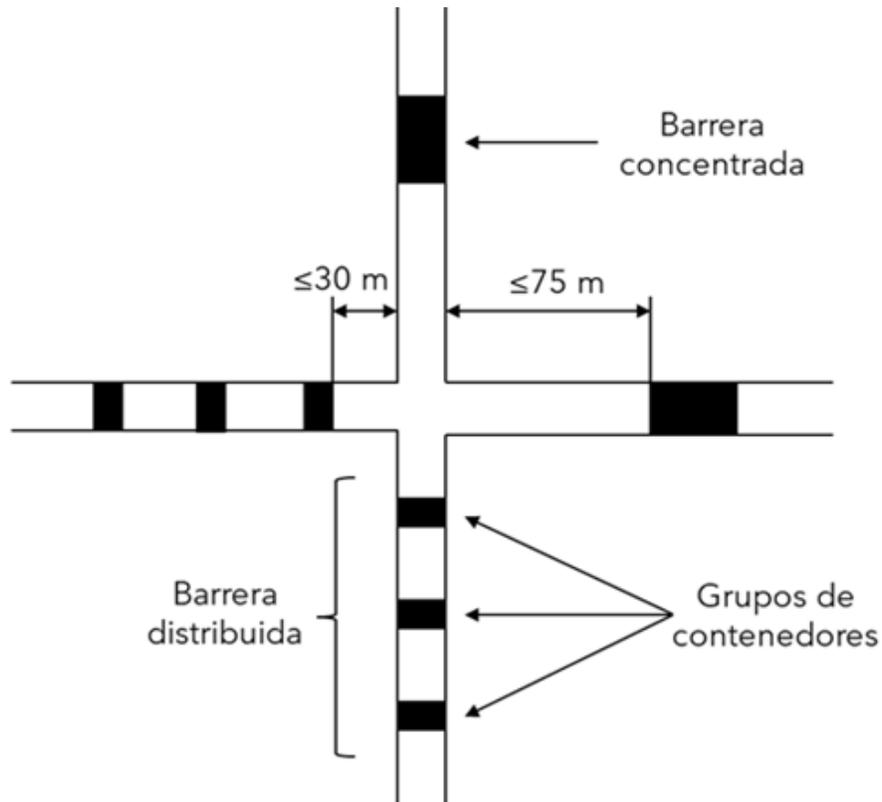


Figura 16. Cordón de barreras en intersección de galerías.
Fuente: (LOM, 2009).

Barreras automáticas y detectores de explosión

Las barreras automáticas, también conocidas como barreras activas, son aquellas donde la energía necesaria para la activación del extintor no depende de la explosión. La actuación de estas barreras puede producirse una vez exista por lo menos una simple inflamación de metano, a diferencia de las barreras pasivas. El agente extintor puede ser agua o polvo inerte. Al ocurrir la explosión se activa un dispositivo de dispersión comandado por una señal de disparo procedente de un sensor. Los sensores pueden ser sensibles a la presión, a la temperatura o a la luminosidad de un frente de llama. Por ende, hay que limitar la activación de la barrera a rangos donde se supere cierto umbral evitando activaciones innecesarias.

Las barreras activas están diseñadas para que el agente supresor se dispare de forma perfecta exactamente cuando la llama alcance la barrera ya que, si el disparo se realiza minutos antes o después, la barrera no logra su objetivo de detención. La eficacia de estas barreras depende del estado de la tecnología a implementar, del ambiente en el que están instaladas (ya que las minas son dinámicas) y del mantenimiento frecuente y riguroso. Estas están compuestas por cuatro elementos principales que son:

1. Sensores: dispositivo que detecta la explosión que se acerca por cambios en la presión estática, temperatura o por radiación. Es capaz de activar el mecanismo dispersor. Existen sensores ultravioletas, sensor infrarrojo, termopar sensor de llama, sensor termomecánico y detector de presión.

2. Dispersores: este elemento es el encargado de descargar el material inerte. Los dispersores más utilizados tienen un mecanismo de cuerda

detonante o en gas presurizado como fuente de energía.

3. Contenedor del agente supresor: son cilindros de acero y almacena el agente supresor y al propulsor.

4. Agente supresor: entre los agentes supresores encontramos agua y polvos inertes como la caliza, bicarbonato sódico, cloruro potásico, cloruro sódico y bicarbonato potásico.

6.5.2.2.

Estructuras y medidas constructivas de protección

Otras medidas de protección para mitigar los efectos de una explosión son las estructuras anti-explosión como las puertas y sellos resistentes a la presión generada durante este suceso. De hecho, en caso de producirse una explosión, la llama puede resultar extinguida en la zona donde está instalada la barrera (en el mejor de los escenarios) (LOM, 2009). Las características de estas estructuras son las siguientes.

Puertas resistentes a la presión de explosiones:

Pueden emplearse estructuras resistentes a la explosión conformadas por elementos de cierre robustos tales como compuertas tipo guillotina, puertas abatibles, entre otras, las cuales permanecen abiertas mientras se ejecutan de forma normal las operaciones en las galerías y se cierran de forma automática al ocurrir una explosión. Por consiguiente, la onda de choque resulta amortiguada y se evita la propagación de la explosión (Medic, 2012). Las puertas deben ubicarse en puntos estratégicos donde no sean obstáculo para la ventilación principal. Una estructura de ventilación para

sobrepresiones conlleva al menos un cuadro de cierre de aire, el cual divide la sección de la galería dejando aberturas para transporte, paso de personal, bandas transportadoras, tuberías y aberturas necesarias para asegurar el flujo de aire requerido para la ventilación. Los materiales empleados para los cuadros de cierre de aire deben ser incombustibles y estar aprobados para su uso en minería. Las líneas de control y las conexiones deben protegerse de los posibles efectos de una explosión (Medic, 2012).

Sello para zonas abandonadas:

Las áreas abandonadas son consideradas zonas con alto riesgo de explosión debido a la continua emanación de metano que sigue generándose desde los mantos. Por ello, al momento de realizar el abandono de área, éstas deben ser selladas de manera que los sellos construidos eviten el aporte de metano a las corrientes de ventilación, la fuga de aire a través de los minados abandonados y soporten o mitiguen la presión de la explosión. El área debe ser escogida por el personal de la mina. El sello se instala a una distancia mínima de 2 metros de las esquinas para mayor soporte a la infraestructura. Además, debe ser anclado en las paredes y reforzado con hormigón por las debilidades de la roca (ECSI LLC, 2014).

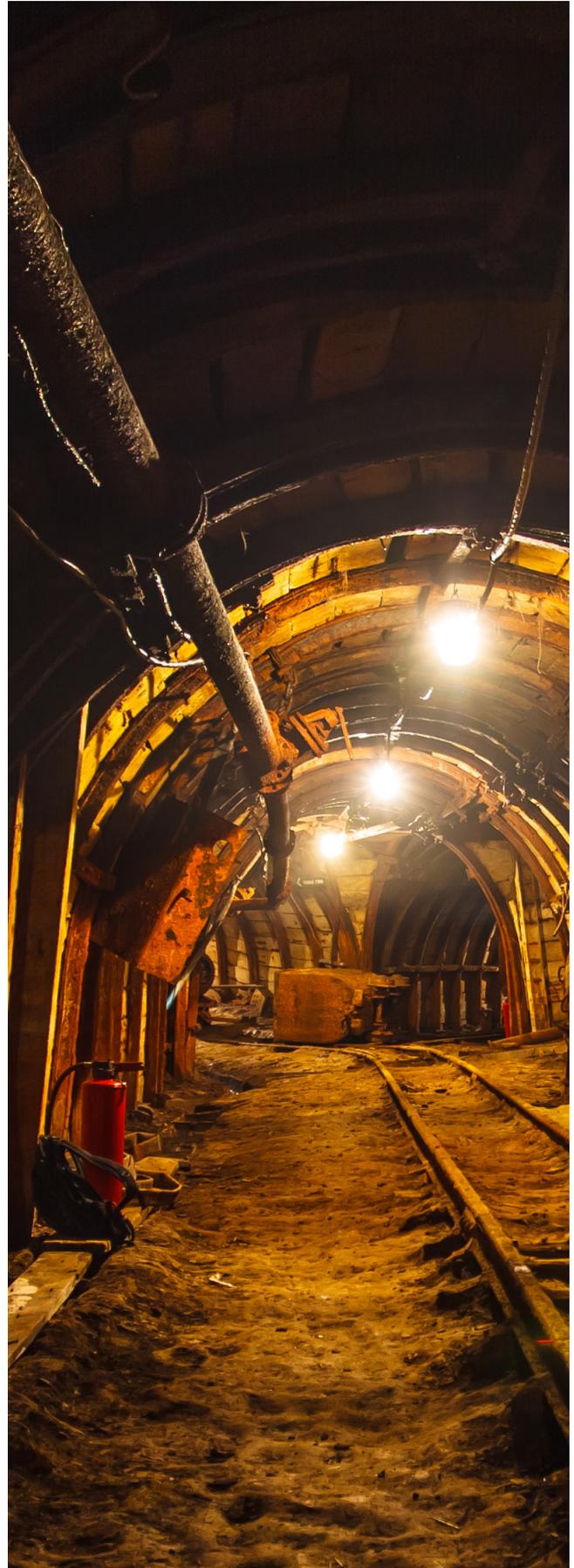
El sello puede ser construido con varias capas de madera, bloques de hormigón o paneles de acero. El sello dependerá de las presiones que tenga que soportar, es decir, al momento de diseñarlo se deben tener en cuenta las cargas verticales y horizontales que tendrá que soportar. Se recomienda que el perímetro donde se ubicará el sello sea lo más rugoso posible para aumentar la resistencia al corte a lo largo del plano. Antes de sellar la zona,

se debe verificar que al interior no queden materiales que puedan ser posibles fuentes de ignición, tales como equipos e inestabilidades en el techo. Así mismo, se deben eliminar posibles residuos. A continuación, se describe la secuencia de construcción de sellos en madera (ECSI LLC, 2014):

- 1.** Se deben instalar soportes espaciados equitativamente que deben ir atornillados al techo, paredes y pisos para garantizar que el encofrado se mueva mientras se vierte el hormigón de resistencia media.
- 2.** Al ubicar las diferentes capas de madera, $\frac{3}{4}$ de pulgada debe estar sujeta a la estructura del encofrado desde el techo hasta el piso y de pared a pared.
- 3.** Deben realizarse agujeros (respiradores o desfogues) que permitan el ingreso de tuberías con válvulas para realizar mediciones de gases. También es posible ingresar tuberías para realizar drenajes de agua y para ventilar la zona. Los respiradores deben ubicarse máximo a 30 centímetros del techo. Las tuberías deben ser no conductoras y no corrosivas ($\frac{1}{2}$ pulgadas) con especificaciones de presión de ruptura interna de mínimo 240 psi y deben estar soportados por pernos o entramados.
- 4.** Además de las tuberías de mediciones y drenado, es importante crear la tubería para el relleno del encofrado con hormigón, siendo este el paso final antes de sellar por completo la zona. La ubicación de esta tubería debe estar en el tercio superior del encofrado, siendo posible que ciertas zonas necesiten más de una tubería para el llenado. Para la instalación del sello es posible utilizar bombas de hormigón las cuales

permiten bombear hasta 1000 metros. Debido a las características del hormigón no se requiere vibración ya que tiene alto asentamiento, pero debe cumplir con la Norma ASTM C42.

5. Una vez finalizado el sellado, se debe verificar que no queden fugas de aire en el área sellada.





7

Lineamientos
técnicos para el
seguimiento y
control del plan
de prevención y
mitigación contra
explosiones

Una vez establecido el plan de prevención y mitigación, es necesario generar un mecanismo de control y verificación a las medidas implementadas. Una de las maneras de verificar la eficiencia de los controles establecidos es a través de indicadores que nos permitan instaurar la mejora continua al proceso de implementación del plan de prevención y mitigación contra explosiones, como se muestra en la Figura 17.

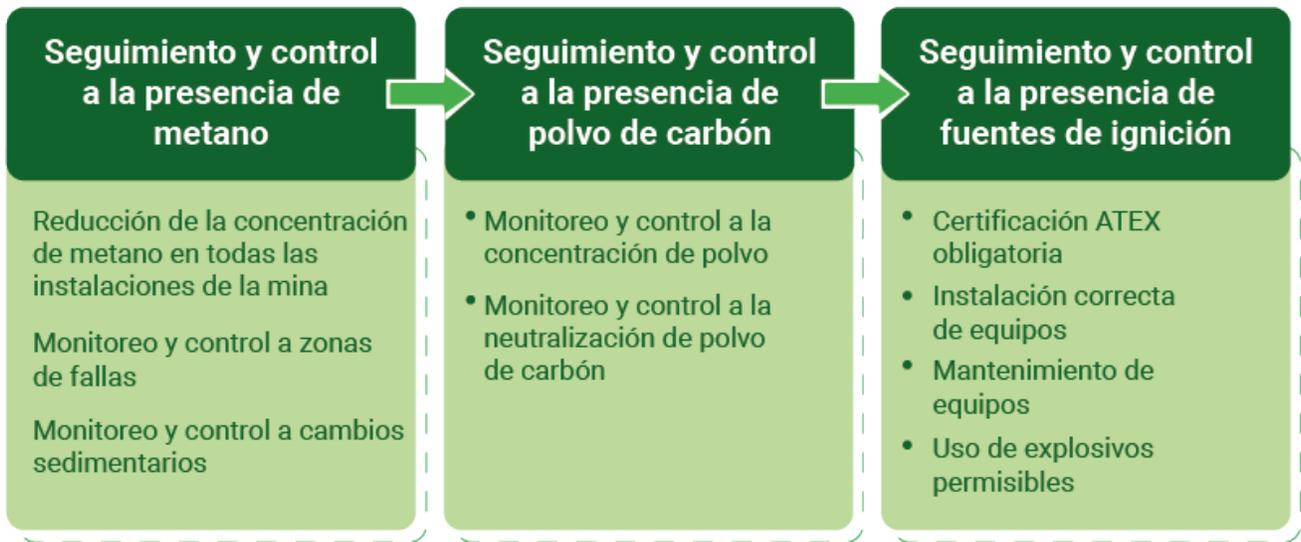


Figura 17. Lineamientos técnicos para el seguimiento y control del plan de prevención y mitigación contra explosiones.

7.1

Seguimiento y control a la presencia de metano

1. Reducción de la concentración de metano en todas las instalaciones de la mina. Se puede establecer una concentración máxima de metano con base en los registros con los que cuenta la mina por cada labor. Estas concentraciones deben estar por debajo de la concentración permisible (< 1%). Una vez implementada la medida preventiva, se verifica la eficiencia del control establecido para la reducción de las concentraciones de metano presente en cada instalación.

2. Monitoreo y control a zonas de fallas. Una vez encontrada una zona de falla es importante establecer un monitoreo continuo, ya que de no ser controladas pueden aportar suficiente metano hasta lograr concentraciones explosivas. Cuando se encuentren estas zonas, se deben realizar perforaciones para identificar posibles acumulaciones anómalas mayores de metano. Además, se debe verificar la velocidad del aire en esa zona para garantizar flujos turbulentos y si es posible, inyectar el manto a través de perforaciones en dirección del plano de falla siguiendo la dirección del cambio estructural o atravesándolo.

3. Monitoreo y control a cambios sedimentarios (cambios en el espesor del manto y de las intercalaciones, unión de dos mantos o estratos carbonosos). Cuando se presentan estos cambios es pro-

bable que se registren incrementos del contenido de metano que pueden generar la formación de atmósferas explosivas. Se debe evitar la presencia de concentraciones por encima de las permisibles, si esto ocurre la suspensión de actividades y evacuación debe realizarse de manera inmediata. En caso de que esto ocurra, es necesario suspender las actividades y realizar estudios de contenidos de gas asociados al carbón para adoptar las medidas pertinentes.

7.2

Seguimiento y control a la presencia de polvo de carbón

1. Monitoreo y control a la concentración de polvo. La línea base se establece a partir del estudio de polvo de carbón en la mina, es decir, a través de la recolección de polvo realizada en puntos de muestreos. El seguimiento se hará a las medidas preventivas de limpieza en la mina y la inyección de agua a los mantos, verificando si estas reducen la tasa de depósito de polvo de carbón.

2. Monitoreo y control a la neutralización del polvo de carbón. Luego de implementar las medidas de neutralización al polvo de carbón (humectación, inertización y riego) por medio del uso del equipo CDEM 1000, se puede verificar si la inertización implementada logra neutralizar el polvo de carbón y a través de campañas periódicas que permitan establecer si la frecuencia de la aplicación de la medida es la conveniente.

7.3

Seguimiento y control a la presencia de fuentes de ignición

1. Certificación de conformidad obligatoria. Todos los equipos, elementos, instalaciones hidráulicas, eléctricas, materiales de trabajo y la dotación de elementos de protección personal que puedan aportar una manifestación energética que llegue a inflamar el metano y el polvo de carbón, deben de ser certificados por el fabricante para trabajar en atmósferas potencialmente explosivas.

2. Instalación correcta de equipos. Las actividades que incluyen tornillos apretados, entradas de cable correctamente ejecutados, entre otros, se deben realizar bajo las instrucciones del fabricante. Las interconexiones de los equipos de seguridad intrínseca constituyen un sistema y deben estar correctamente diseñados (requieren un conocimiento eléctrico de los sistemas de seguridad intrínseca) conforme a las instrucciones del fabricante.

3. Mantenimiento de equipos. Los equipos deben estar involucrados en un programa de mantenimiento con revisiones periódicas que contemplen las recomendaciones del fabricante para la sustitución de piezas. Las personas que realicen el mantenimiento requieren certificación de competencias para realizar estas actividades. Todas las reparaciones a equipos e instalaciones eléctricas

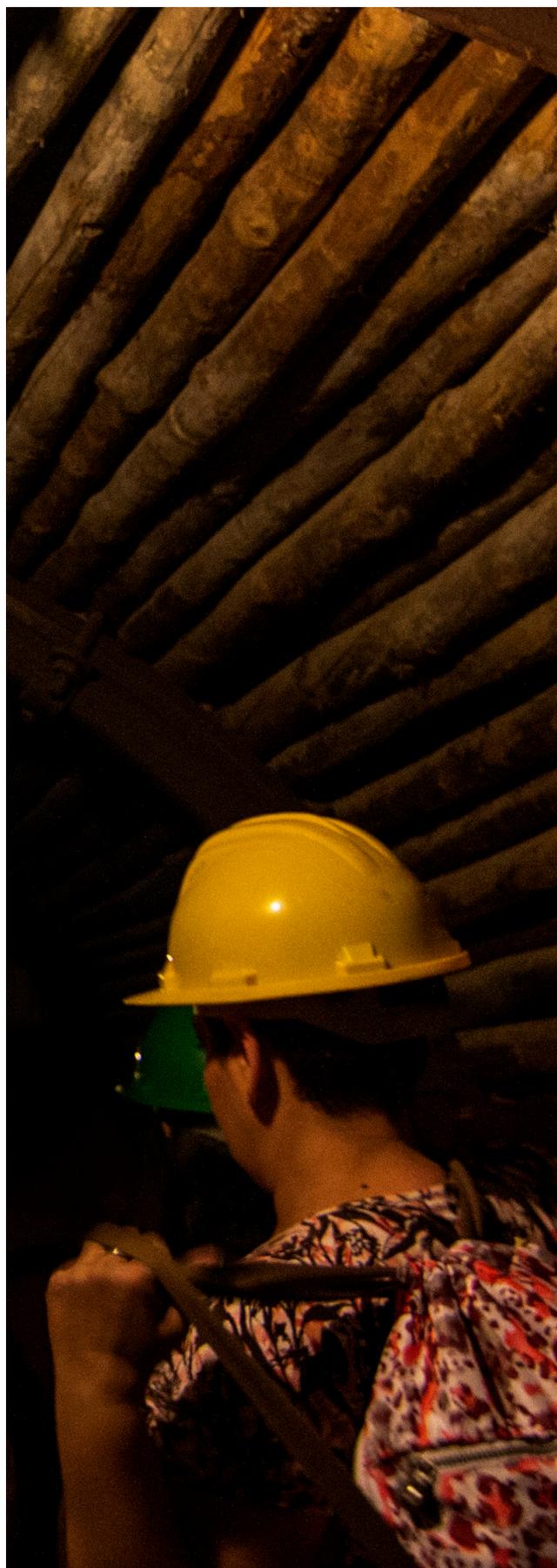
en una mina se deben realizar previa desenergización de los mismo y se debe realizar monitoreo de la atmósfera minera contando con los permisos exigidos en la norma

4. Uso de explosivos permisibles. En las labores de avance o de arranque se debe utilizar únicamente explosivos y agentes de voladura de seguridad que sean permisibles para minería subterránea de carbón. Es de aclarar que el retacado de los barrenos debe asegurar el confinamiento y debe hacerse con materiales y elementos que no generen descarga eléctrica o chispa por efecto de la fricción o la presión. Así mismo, el manejo de materiales explosivos y accesorios de voladura será efectuado solo por el operador de explosivos que esté debidamente certificado y capacitado para tal fin. También, se debe contar con las respectivas disposiciones internas de seguridad para la ejecución correcta y segura de esta labor. Todos estos elementos deben estar en conformidad con lo estipulado en el Título VI del Decreto 1886 de 2015.

Nota: todo el personal debe ser capacitado en materia de análisis de riesgos e implementación del plan de prevención y mitigación hasta que llegue a interiorizarlos en función de la seguridad individual y colectiva.

Es de resaltar que el Plan de Prevención y Mitigación desarrollado por cada mina a partir de los criterios presentados en esta guía, debe ser actualizado constantemente según lo requieran las operaciones mineras, sin exceder el periodo de un

año. Es decir, como parte de la mejora continua intrínseca en la metodología propuesta, la guía debe re-implementarse periódicamente dado que las condiciones al interior de la mina están en constante dinámica. Por ende, se deberá actualizar el Plan de Prevención y Mitigación cada vez que se presenten cambios en las instalaciones, en la maquinaria o en los equipos, o cada vez que ocurra un evento adverso (explosión) al interior de la mina.





8

Preparación y respuesta ante emergencias

La Preparación y Respuesta ante Emergencias es un instrumento de diagnóstico de carácter administrativo, organizacional y operativo que le permite a la empresa seguir unos principios de acción simples antes, durante y después de una emergencia con el fin de disminuir los efectos de estas. Con este plan se busca mitigar las consecuencias y la severidad de los eventos catastróficos que probablemente puedan suceder en las instalaciones de las empresas disminuyendo las lesiones humanas, daños ambientales y las pérdidas económicas.

El cumplimiento de los propósitos de la Preparación y Respuesta ante Emergencias y los programas que desarrolla el comité de emergencias y la brigada, no están enfocados solamente en el trabajo de capacitación técnica y profesional de quienes lo ejecutan, sino también en el desarrollo humano y la facilidad del trabajo en equipo que posee el personal. El tema de las emergencias deberá sobrepasar lo normativo y laboral, estableciéndose como un asunto de interés general, trabajando desde la prevención hasta la disminución de los efectos.

8.1

Legislación

Desde el marco normativo colombiano se regula el Plan de Prevención, Preparación y Respuesta ante Emergencias. La Tabla 10 establece los numerales relacionados al Plan de Emergencia según el Decreto 1072 de 2015 y el Decreto 1886 de 2015.

Tabla 10. Resumen normativo referente al Plan de Prevención, Preparación y Respuesta ante Emergencias.

<p style="text-align: center;">DECRETO 1072 DE 2015</p> <p style="text-align: center;">Regula el Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo antes llamado Programa de Salud Ocupacional</p>		
<p>Decreto único reglamentario del sector trabajo. Capítulo 2.2.4.6.25 del Decreto 1072 de 2015. El empleador o contratante implementará las disposiciones necesarias en prevención, preparación y respuesta ante emergencias, con cobertura a todos los centros y turnos de trabajo y a todos los trabajadores, sin importar la forma o tipo de contratación. El plan de prevención, preparación y respuesta ante emergencias debe considerar los siguientes aspectos:</p>		
NUMERAL	DEFINICIÓN	APLICACIÓN
Numeral 1	Identificar sistemáticamente todas las amenazas que puedan afectar a la empresa.	Toda explotación minera, deberá contar con una matriz de identificación de peligros; evaluación y valoración de riesgos, de cada una de sus áreas de trabajo.
Numeral 2	Identificar los recursos disponibles, incluyendo las medidas de prevención y control existentes al interior de la organización para prevención, preparación y respuesta ante emergencia, así como las capacidades existentes en las redes institucionales y de ayuda mutua.	Toda empresa dentro de su plan de emergencias debe contar con los recursos necesarios para la atención de una emergencia, tales como, camillas, botiquines, extintores, elementos de protección personal, entre otros. Así como incluir los contactos de las entidades de socorro y de apoyo, tales como defensa civil, cruz roja, bomberos, policía nacional, hospitales, GSSM de la Agencia Nacional de Minería, entre otros.
Numeral 3	Analizar la vulnerabilidad de la empresa frente a las amenazas identificadas, considerando las medidas de prevención y control existentes.	Con base en la matriz de identificación de peligros; evaluación y valoración de riesgos, la empresa debe contar con las medidas de prevención y control para la mitigación y/o eliminación de los mismos. Por ejemplo, la inertización del polvo de carbón, utilizando material calcáreo, instalación de barreras de agua o material calcáreo, entre otras.
Numeral 4	Valorar y evaluar los riesgos considerando el número de trabajadores expuestos, los bienes y servicios de la empresa.	Ya teniendo identificados los peligros y los riesgos presentes en las áreas de trabajo, calcular el daño potencial que pueda generar cada uno de ellos y priorizar los que puedan afectar en mayor medida si llegan a materializarse.
Numeral 5	Diseñar e implementar los procedimientos para prevenir y controlar las amenazas priorizadas o minimizar el impacto de las no prioritarias.	Así como la empresa debe tener sus PTS (Procedimientos de Trabajo Seguro), los procedimientos para la atención de emergencia también deben estar consignados y socializados en todos los niveles de la organización. Por ejemplo, debe contar con procedimientos para trabajo seguro con rutas de evacuación, atención prehospitalaria, control de incendios, entre otros.

Numeral 6	Formular el plan de emergencia para responder ante la inminencia u ocurrencia de eventos potencialmente desastrosos.	Toda empresa debe diseñar e implementar un plan de emergencias, de acuerdo, con la identificación de peligros; evaluación y valoración de riesgos, que contenga, los recursos necesarios para su ejecución, planos de rutas de evacuación, simulacros a realizarse, programa de capacitación y equipos de plan de emergencia. Este plan de emergencia debe ser actualizado cada 6 meses o antes si se presenta algún evento extraordinario.
Numeral 7	Asignar los recursos necesarios para diseñar e implementar los programas, procedimientos o acciones necesarias para prevenir y controlar las amenazas prioritarias o minimizar el impacto de las no prioritarias.	Toda empresa debe encargarse de la asignación de los recursos necesarios para cada una de las áreas de trabajo, con el fin de permitir la correcta ejecución del plan de emergencias que se diseñó previamente.
Numeral 8	Implementar las acciones factibles para reducir la vulnerabilidad de las empresas frente a estas amenazas, que incluye entre otros, la definición de planos de instalaciones y rutas de evacuación.	Con base en la matriz de identificación de peligros; evaluación y valoración de riesgos, la priorización de estos, y el diseño del plan de emergencias, la empresa debe elaborar los planos de instalaciones y rutas de evacuación y socializarlos a todos los colaboradores, así como los programas para implementar las acciones para mitigar las amenazas. Por ejemplo, programas de limpieza de polvo de carbón, programas de monitoreo de gases, y polvo de carbón, programas de capacitación, procedimientos de instalación de barreras de agua o material inerte, entre otros.
Numeral 9	Informar, capacitar y entrenar incluyendo a todos los trabajadores para que estén en capacidad de actuar y proteger su salud e integridad, ante una emergencia real o potencial a todos los trabajadores.	La empresa debe diseñar e implementar los programas de capacitaciones dirigido a todos sus trabajadores, con el fin, que tengan la capacidad de actuar ante la ocurrencia de una emergencia.
Numeral 10	Realizar simulacros como mínimo una vez al año con la participación de todos los trabajadores.	En el diseño del plan de emergencia se debe incluir el programa de simulacros que se realizaran en el transcurso de la vigencia del plan de emergencia, con el fin de preparar a los trabajadores ante la ocurrencia de una emergencia.
Numeral 11	Conformar, capacitar, entrenar y dotar la brigada de emergencias acorde con su nivel de riesgo y los recursos disponibles que incluyan la atención de primeros auxilios.	La empresa tiene la obligación de contar, como mínimo con el 30% del total de los trabajadores debidamente capacitados y entrenados, como socorredores mineros, auxiliares de salvamento minero o brigadista, y asignar los recursos pertinentes para estos.

Numeral 12	Inspeccionar con la periodicidad que sea definida en el SG-SST, todos los equipos relacionados con la prevención y atención de emergencias incluyendo sistemas de alerta, señalización y alarma con el fin de garantizar su disponibilidad y buen funcionamiento.	Se debe diseñar e implementar un programa de inspección, mantenimiento y/o ajuste de los equipos y elementos que se encuentran estipulados en el plan de emergencia, para garantizar su correcto funcionamiento ante la ocurrencia de una emergencia.
Numeral 13	Desarrollar programas o planes de ayuda mutua ante amenazas de interés común, identificando los recursos para la prevención, preparación y respuesta ante emergencias en el entorno de la empresa y articulándose con los planes que para el mismo propósito puedan existir en la zona donde se ubica la empresa.	La empresa dentro de su plan de emergencia debe contemplar la existencia de aliados cercanos que compartan amenazas similares, con el fin de poder contar con una ayuda mutua en el caso de materializarse una emergencia.
Parágrafo 1	De acuerdo con la magnitud de las amenazas y la evaluación de la vulnerabilidad tanto interna como en el entorno y la actividad económica de la empresa, el empleador o contratante puede articularse con las instituciones locales o regionales pertenecientes al Sistema Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres en el marco de la Ley 1523 de 2012.	La empresa tiene la posibilidad de aliarse o buscar un apoyo con las alcaldías, gobernaciones u otras entidades pertenecientes al Sistema Nacional de Gestión de Riesgos y Desastres ante la ocurrencia de una emergencia dentro de sus labores.
Parágrafo 2	El diseño del plan de prevención preparación y respuesta ante emergencias debe permitir su integración con otras iniciativas como los planes de continuidad de negocio, cuando así proceda.	El plan de prevención, preparación y respuesta ante emergencia deberá estar enfocado para garantizar la continuidad de la operación, las acciones que se deben implementar para prevenir la ocurrencia de una emergencia y evitar los elevados costos que representan la atención de una emergencia.
<p>Decreto 1886 de 2015</p> <p>Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas</p>		
<p>Artículo 29. Plan de Emergencias</p>		
<p>Toda empresa que realice labores mineras subterráneas debe elaborar un plan de emergencias conforme a lo establecido en el numeral 18 del artículo 11 de la resolución 1016 de 1989 de los ministerios de trabajo y Seguridad Social y de salud o las normas que la modifiquen adicionen o sustituyan.</p>		

8.2

Metodología

A continuación, se establece una metodología para dar seguimiento al Plan de Prevención, Preparación y Respuesta ante Emergencias (Ver Figura 18).

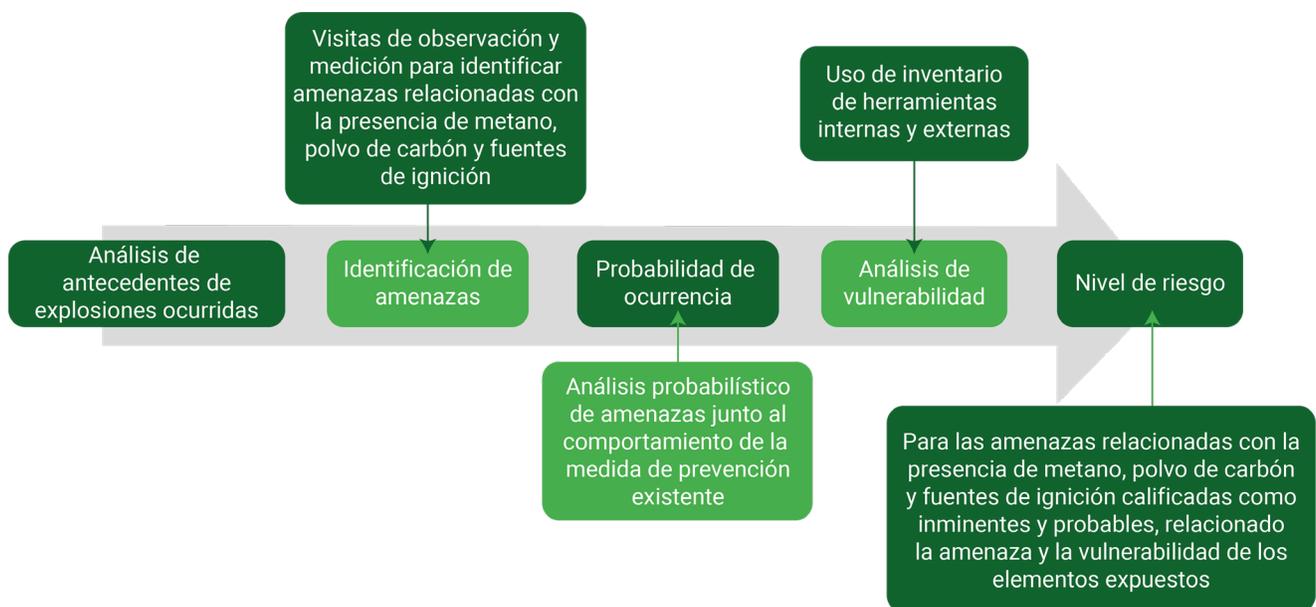


Figura 18. Metodología para dar seguimiento al Plan de Prevención, Preparación y Respuesta ante Emergencias.

1. Análisis de la información existente suministrada por diversas fuentes en cuanto antecedentes de explosiones ocurridas.

2. Identificación de amenazas. Visitas de observación y medición en las instalaciones para identificar amenazas relacionadas con la presencia de metano, polvo de carbón y fuentes de ignición que propicien la ocurrencia de una explosión, la cual puede manifestarse en un sitio específico y en un determinado tiempo. Con esta actividad se consolida un registro general de los riesgos específicos observados.

3. Probabilidad de ocurrencia. Una vez identificadas las amenazas se procede a evaluarlas combinando el análisis probabilístico con el comportamiento de la medida de prevención existente, y utilizando información de análisis de laboratorios y lo observado en campo.

4. Análisis de vulnerabilidad. Luego de conocer el origen de los riesgos encontrados y teniendo en cuenta el inventario de herramientas internas y externas (talento humano, recursos logísticos y recursos económicos) con los que se cuenta para evitar una explosión y atender correctamente la situación de peligro, se procede a determinar el grado de vulnerabilidad.

5. Nivel de riesgo. Se determina el nivel de riesgo para las amenazas relacionadas con la presencia de metano, polvo de carbón y fuentes de ignición calificadas como inminentes y probables, relacionando la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Esta relación se representa mediante un diamante de riesgo el cual posee cuatro cuadrantes: uno de ellos representa la amenaza

para la cual se va a determinar el nivel de riesgo y los otros tres representan la vulnerabilidad en los elementos de bajo riesgo (personas, recursos, sistemas y procesos).

8.2.1

Diagnóstico del plan de emergencias

A la hora de realizar el diagnóstico es necesario tener al alcance toda la información disponible, con el fin de comunicar a los grupos de apoyo sobre las condiciones técnicas y funcionales de las instalaciones. Se deberá actualizar el diagnóstico con cada cambio organizacional que surja.

8.2.2

Identificación y evaluación de amenazas

La identificación y evaluación de amenazas se realiza por medio de la observación e inspección de las instalaciones en la mina. Para ello se realiza el análisis de la presencia de metano, polvo de carbón y fuentes de ignición que pueden originar una explosión teniendo en cuenta la clasificación de estas según la norma NFPA 1600 (Ver Tabla 11).

Tabla 11. Calificación de amenazas.

	Descripción	Color
Posible	Evento que nunca ha sucedido en las instalaciones de la institución, pero que es factible su ocurrencia. Es un fenómeno o evento del cual no existen razones históricas o científicas para decir que no sucederá.	Verde
Probable	Evento ya ocurrido en la institución o en otras con condiciones similares. Son eventos de los cuales hay argumentos técnicos y científicos para creer que volverán a suceder en algún momento.	Amarillo
Inminente	Hay alta probabilidad de ocurrencia. Existen antecedentes de sucesos anteriores y condiciones que ocasionaron el evento que en el momento no han sido intervenidas adecuadamente, por lo tanto, es muy posible que se vuelva a presentar.	Rojo

8.2.3

Análisis de vulnerabilidad

La vulnerabilidad se entiende como la disposición o sensibilidad que tiene un elemento a ser afectado. El análisis de la vulnerabilidad determina el nivel de exposición y la susceptibilidad a la pérdida de elementos ante un riesgo determinado. Esta se evalúa desde las siguientes perspectivas:

- **Vulnerabilidad en las personas.**

Se entiende por personas a los empleados, visitantes y clientes de la empresa. Se analiza la organización de la empresa para la prevención y control de la emergencia, la capacitación, el entrenamiento y el suministro de elementos de protección personal de acuerdo con la amenaza por explosión.

- **Vulnerabilidad en los recursos.**

Los recursos se estudian desde dos componentes: instalaciones físicas, y materiales y equipos. Para cada uno de estos componentes se califica la instrumentación, la protección física y los sistemas de control de la siguiente manera.

- 1 La instrumentación y monitoreo son las acciones de vigilancia y equipos implementados para supervisar cualquier cambio en el riesgo que pueda generar una explosión.
- 2 La protección física como barreras de protección o diseño estructural de sellos para zonas abandonadas que disminuyen los efectos que pueda ocasionar la explosión.
- 3 Los sistemas de control como la instalación de monitoreo de gases continuos o normas administrativas que permitan dar respuesta ante la presencia de concentraciones no permisibles de metano, polvo de carbón y fuentes de ignición con el fin de prevenir y

disminuir las consecuencias.

• **Vulnerabilidad en los sistemas y procesos.**

Se entiende cómo proceso al desarrollo de las actividades productivas de los componentes bajo riesgo involucrado, y los sistemas como servicios auxiliares y procedimientos. En este campo se analizan dos variables:

-La primera está relacionada con el procedimiento de reactivación o acciones planeadas que permitan ante una emergencia poner nuevamente los servicios auxiliares, cómo es el sistema de ventilación,

a funcionar ya sea por sí mismos o a través de protocolos.

La segunda son los procedimientos alternos que permiten realizar la misma función temporalmente en la fase de impacto o recuperación de una emergencia. Tal es el caso del uso de autorrescatadores y ductos de ventilación móviles.

Cada uno de los anteriores aspectos se califica según la vulnerabilidad como indica la Tabla 12.

Tabla 12. Calificación de la vulnerabilidad

Calificación	Aspectos
0	Se cuenta con suficientes elementos
0.5	Se cuenta parcialmente con los elementos o están en proceso de adquisición
1	Se carece completamente o no se cuenta con recursos

Luego de calificar cada uno de los elementos, se suman y finalmente se determina el grado de vulnerabilidad según las tres perspectivas del nivel de riesgo de la Tabla 13.

Tabla 13. Grado de Vulnerabilidad.

Calificación	Nivel de Riesgo	Color
0 - 1	Bajo	Verde
1.1 - 2	Medio	Amarillo
2.1 - 3	Alto	Rojo

8.2.4

Determinación del nivel de riesgo

El riesgo es la probabilidad de materializarse un evento el cual conlleva unas consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio específico y durante un tiempo de exposición determinado. Se obtiene de relacionar la probabilidad de ocurrencia de la atmósfera explosiva y la existencia de la fuente de ignición y la vulnerabilidad de los elementos ya mencionados (personas, recursos y sistemas). Esta relación es representada por un diamante de riesgo cómo se observa en la Figura 19.

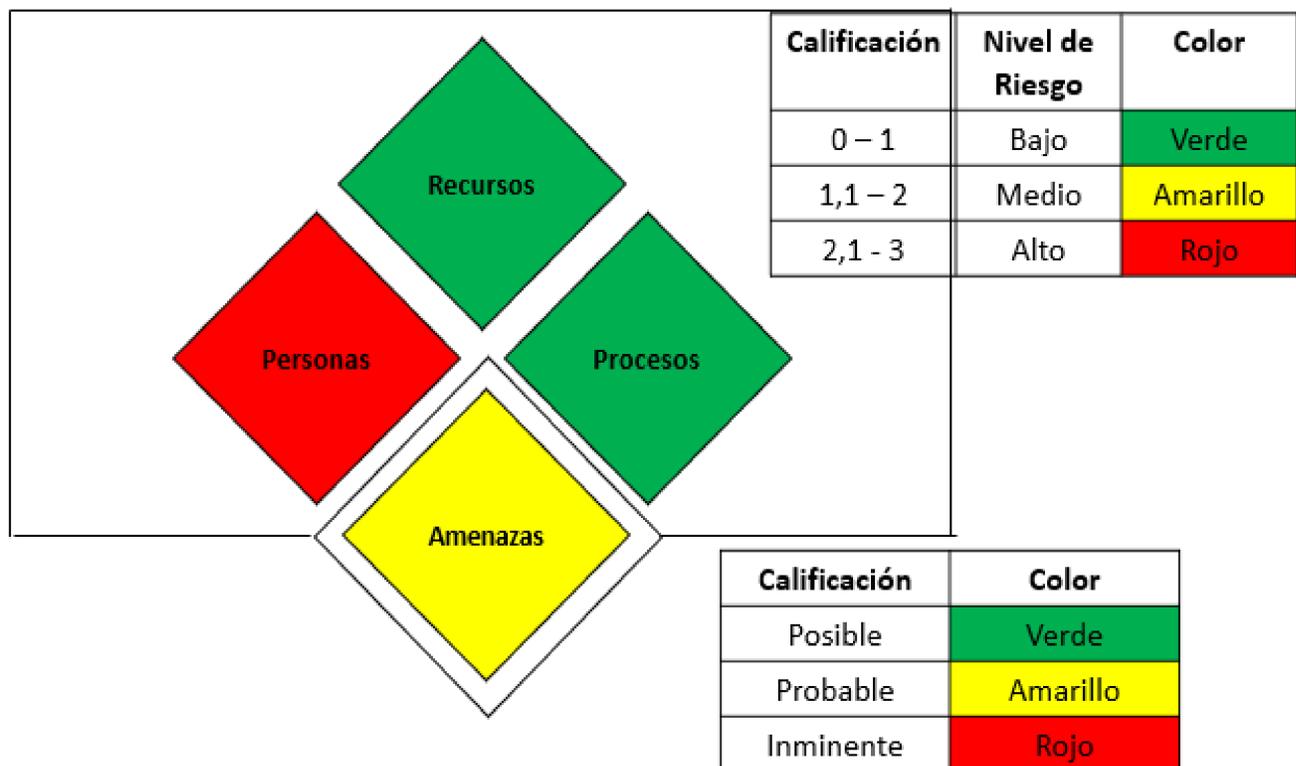


Figura 19 Diamante de riesgo.

8.2.4.1

Interpretación del nivel de riesgo

La interpretación del nivel de riesgo depende de los resultados obtenidos en el paso anterior. Para ello, se implementa la Tabla 14.

- **Riesgo alto** – 3 o 4 rombos rojos. Significa que entre el 75% y 100% de los valores que representan la vulnerabilidad y la amenaza están en su punto crítico para que los efectos de la explosión originen daños en las personas, la economía, la infraestructura y el medio ambiente.
- **Riesgo medio** – 1 a 2 rombos rojos o 4 amarillos. Significa que del 50% al 74% de los valores que representan la vulnerabilidad son altos. También es posible que tres de todos los com-
- ponentes sean calificados como medios, por lo tanto, las consecuencias y efectos sociales, económicos y del medio ambiente pueden ser de magnitud importante, pero se espera sean menores que los ocasionados por el riesgo alto.
- **Riesgo bajo** – 1 a 3 rombos amarillos y los restantes verdes. Significa que del 25% al 49% de los valores calificados en la amenaza y la vulnerabilidad representan valores de bajo a medios. En este caso se espera que las consecuencias sociales, económicas y del medio ambiente sean de menor impacto.

Tabla 14. Calificación del nivel de riesgo.

Calificación nivel de riesgo	
3 – 4 Rombos Rojos	ALTO
1 – 2 Rombos Rojos o 4 Rombos Amarillos	MEDIO
1 – 3 Rombos Amarillos o los restantes en Verde	BAJO

8.3

Protocolo de evacuación

El protocolo de evacuación hace parte del componente operativo que debe implementarse durante la emergencia. Tienen el propósito de dirigir a las personas a lugares que se consideran seguros y protegidos contra la amenaza específica que esté generando la emergencia.

Por tal razón, el protocolo de evacuación debe prever cada situación que pueda desencadenarse dentro de las amenazas prioritarias ya identificadas. No hay un sitio que pueda clasificarse siempre como seguro, por lo que deben considerarse alternativas que permitan en cada evento identificar el mejor lugar para conducir al personal o decidir, incluso, si el lugar más seguro es aquel donde se encuentran en un momento dado.

Objetivos

- **Establecer mecanismos necesarios para la evacuación de personas y posibles víctimas en un evento no planeado.**
 - **Identificar los procedimientos correctos para la evacuación del personal o visitantes.**
 - **Asegurar la integridad de las personas que se encuentren en las instalaciones.**
 - **Realizar una pronta evacuación que permita disminuir las consecuencias en las personas ante un evento.**
- **Evacuación de instalaciones**
Cuando las particularidades de la emergencia son un peligro para la integridad de las personas, los brigadistas o personal de apoyo en evacuación deben realizar acciones por cada una de las áreas. El brigadista de evacuación es el encargado de dirigir a su grupo por la ruta de evacuación, verificando a medida que evacúa la presencia de posibles víctimas de la emergencia y otros eventos importantes que requieran la intervención de personal brigadista.

Estas personas deben tener una dotación mínima para la identificación visible como peto, chaleco de color reflectivo, lámpara minera, pito, lista de ocupantes habituales, instrucciones, radio (opcional), megáfono (opcional) y botiquín portátil.

Para las rutas de evacuación se debe tener en cuenta:
 - **El circuito de ventilación de las labores mineras.**
 - **En estas zonas se deben garantizar condiciones óptimas en calidad y cantidad de flujo de aire.**
 - **Tener señalización específica, reflectiva y garantizar la visibilidad ante ausencia de flujo eléctrico.**
 - **Realizar divulgación de estas zonas, en procesos de inducción y capacitación a todo el personal y realizar validación del conocimiento adquirido.**

A Mercedes-Benz truck is positioned in a dark tunnel. A large, brown, flexible pipe runs diagonally across the upper part of the frame. The truck's headlights are on, and a person is visible in the driver's seat. In the background, there is a large, arched opening with bright lights. A white circle with the number 9 is overlaid on the left side of the image.

9

Epílogo



La Agencia Nacional de Minería en asocio con la Universidad Nacional de Colombia elaboraron esta guía con el fin de concientizar al sector minero sobre la necesidad de disminuir las emergencias y muertes producto de las explosiones por metano y polvo de carbón. Como parte del gremio minero, **ambas entidades tienen la responsabilidad de disminuir las lesiones y muertes de los trabajadores y daños a la infraestructura. Por ello, la guía se basa en la implementación de buenas prácticas en la minería y está enfocada en la mejora continua de los procesos para garantizar condiciones de seguridad para todo el personal al interior de las minas.**

La prevención de explosiones de metano en las minas de Colombia inicia con la implementación de un sistema de ventilación principal y secundario. La ventilación debe ser diseñada para suministrar el caudal suficiente con la velocidad requerida para diluir el metano a las concentraciones permitidas en las labores, evitando la formación de atmósferas explosivas. En muchas ocasiones la acumulación de gases en el interior de la mina puede producirse por una parada en la ventilación, sea programada o por una falla en el sistema, y por la emisión repentina de una mayor cantidad de metano durante un periodo, cantidad que no es posible diluirse con la ventilación existente. Cuando ocurre la primera situación es necesario suspender las actividades y adelantar acciones correctivas sobre el sistema de ventilación, ya sea principal o secundario. En el segundo caso, podrían existir

diversas causas tales como el acercamiento a una falla o a una zona donde existe mayor tensión, generando mayor compresión en el gas adsorbido que al ser perturbado es liberado a la atmósfera súbitamente.

Es aquí donde radica la importancia de implementar estudios acerca de los contenidos de gas asociados a las capas de carbón. En los primeros instantes del arranque se presenta la mayor liberación del gas, el cual en concentraciones explosivas y en presencia de fuentes de ignición puede ser el inicio de grandes catástrofes. Si bien es cierto que en Colombia se implementa una metodología de medición que nos proporciona los contenidos de gas por unidad de masa, este método no nos permite medir directamente los contenidos reales desprendidos por la muestra en los primeros segundos de su arranque. Por ello, se usan métodos matemáticos para devolverse al tiempo cero una vez es finalizado todo el ensayo y calcular así el gas perdido que no se pudo medir.

El Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo influye las condiciones ambientales, condiciones inseguras de los equipos o comportamientos inseguros de los operarios. Las explosiones asociadas a metano y polvo de carbón y sus lamentables consecuencias asociadas a muertes y lesiones de trabajadores y daños a la infraestructura, si pueden prevenirse, para ello es necesario implementar un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo y contar además con el lide-

razgo y responsabilidad del empleador minero y de todos los niveles de la organización. También, es fundamental realizar una adecuada valoración del riesgo, implementar controles como planes de ventilación, control de polvo de carbón y selección y mantenimiento de quipos, establecer procedimientos como el monitoreo de condiciones atmosféricas y seguimiento para la toma de decisiones. Del mismo modo, es importante capacitar continuamente a los trabajadores en el desarrollo de habilidades en su trabajo y la toma de decisiones correctas para evitar la formación de atmósferas explosivas.

Son diversos los retos que enfrenta el país en el manejo de los riesgos de explosión. En primer lugar, está lograr que las minas de carbón implementen un sistema de ventilación forzado eficiente, tanto principal como secundario. Otro reto es la transición del uso de equipos no aptos para trabajar en atmósferas explosivas a la implementación de equipos con declaración de conformidad ATEX, los cuales deben recibir mantenimiento periódico preventivo. En consecuencia, es conveniente que la Agencia Nacional de Minería establezca un periodo de transición para la implementación de equipos seguros. Esto propenderá por la reducción de emergencias por explosiones, aunque no debe olvidarse que entre más mecanizada se encuentra la mina, mayor es el riesgo de que se presente una explosión.

Un tercer reto es la aplicación de un método que permita medir en los primeros segundos de perturbación del manto de carbón, los contenidos de gas que se desprenden de sus capas. Esto desembocará en el diseño óptimo de sistemas de ventilación para diluir concentraciones de metano.

Por otra parte, sensibilizar al empleador y trabajador minero sobre el valor de la vida individual y colectiva hace parte de las precauciones para disminuir el riesgo de explosión. Adoptar y cumplir las normas y procedimientos que se establecen en el Decreto 1072 del 2015, el Decreto 1886 del 2015, y la 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, son pasos fundamentales en esta tarea.

Estamos seguros de que con el cumplimiento de estas normas y procedimientos se da un gran paso para disminuir los índices de catástrofes ocurridas en los últimos años en el país, y que con la implementación de la guía técnica inicia un gran reto para las empresas mineras de carbón.

Referencias

- Agencia Nacional de Minería – ANM. (2020). Estudio de caso de una explosión de metano y polvo de carbón [Diapositivas]. <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/estudio-caso-explosion-metano-y-polvo-carbon.pdf>
- Agencia Nacional de Minería – ANM. (2021). Sabana accidentalidad 23_11_2021.
- Baquero, K., Blandón, A., & Molina, J. (2012). Análisis de los factores que influyen en la explosividad del polvo de carbón en las minas subterráneas. *Ingeniería y competitividad*, 14(2), 147-160. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30332012000200014&lng=en&tlng=
- Cárdenas, J., Arcos, A., Echavarría, E. (2017). MAPE Responsable. Seguridad y salud en la pequeña minería colombiana: estudios de

- caso en oro y carbón. Volumen (10). <https://www.responsablemines.org/wp-content/uploads/2017/07/07-10-2017-Somos-Teso-ro-Seguridad-y-Salud.compressed.pdf>
- CTN. (2003). UNE-EN 1127-2:2003. Atmósferas explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Parte 2: Conceptos básicos y metodología para minería. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0028988>
 - CTN. (2012). UNE-EN 1127-1:2012. Atmósferas explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Parte 1: Conceptos básicos y metodología. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0049930>
 - CODELCO. (s.f.). Jerarquía de controles. Santiago, Chile. https://www.codelco.com/jerarquia-de-controles/prontus_codelco/2011-07-13/122010.html
 - Código de Minas. Ley 685 de 2001. 15 de agosto de 2001. Colombia.
 - Decreto 1443 de 2014. Por el cual se dictan disposiciones para la implementación del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST). 31 de julio de 2014. D.O. No. 49229.
 - Decreto 1072 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo. 5 de noviembre de 2021. D.O. No. 51833.
 - Decreto 1886 de 2015. Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en Labores Mineras Subterráneas. 21 de septiembre de 2015. D.O. No. 49642.
 - ECSI LLC. (abril, 2014). MSHA Approval Number 120M-18.0. 120 PSI Reinforced Wall Seal. Installation Manual For Seals Up to 8 Feet in Height. Lexington, US. <https://arlweb.msha.gov/Seals/Approved/120PSI/120M-18.0.pdf>
 - Echeverry, R., & Campo, L. (2016). Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) para la mina El Porvenir, municipio de Móngua, departamento de Boyacá [Tesis de pregrado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia].
 - ISO/IEC. (2016). Equipos y componentes usados en atmósfera explosiva en minería subterránea (ISO/IEC 80.079-38).
 - Laboratorio Oficial J.M. Madariaga – LOM. (2009). Guía para la prevención de explosiones de polvo de carbón en minería subterránea y limitación de sus consecuencias. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Secretaría de Estado de Energía. Gobierno de España. <https://energia.gob.es/mineria/Seguridad/Guias/Gu%C3%ADas/2009-Guia-barreras-polvo-carbon.pdf>
 - Ley 1562 de 2012. Por la cual se modifica el sistema de riesgos laborales y se dictan otras disposiciones en materia de salud ocupacional. 11 de julio de 2012. D.O. No. 48488.
 - Medic, L. (2012). Análisis de la viabilidad de las barreras de explosión pasiva en galerías de sección reducida [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid].
 - Molina-Escobar, Jorge M., & Blandón, Astrid. (2014). Evidencias del choque térmico en partículas de polvo después de una explosión en minería de carbón. *Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 23-33. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-30332014000200003&lng=en&nr-m=iso&tlng=es
 - Ortega Ramos, C. A., Franco Bonfante, T. M., Blandón Montes, A., & Molina Escobar, J. M. (2018). Evaluación del riesgo de explosividad del gas metano en minería subterránea de carbón, caso de la cuenca del Sinifaná, Colombia. *Boletín de Geología*, 40(1). <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletin-degeologia/article/view/7961/8136>

- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2014). Directiva 2014/34/UE. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/LSU/?uri=CELEX%3A32014L0034>
- Quintero, J. y EFE. (24 de agosto de 2021). Explosión en mina de Boyacá dejó 12 mineros muertos. El Colombiano. <https://www.elcolombiano.com/colombia/mineros-muertos-en-mina-de-carbon-de-topaga-boyaca-OE15440970>
- Redacción RPP. (25 de junio del 2010). Tragedia de mina en Colombia dejó 73 muertos, todos rescatados. RPP Noticias. <https://rpp.pe/mundo/actualidad/tragedia-de-mina-en-colombia-dejo-73-muertos-todos-rescatados-noticia-275164?ref=rpp>
- Servicio Nacional de Salvamento Minero. (2014). Lineamientos para ejecutar operaciones de Salvamento Minero en Minas Subterráneas. Vademécum de Salvamento Minero Colombiano. Agencia Nacional de Minería. Colombia. https://www.anm.gov.co/?q=nuevo_vademecum_salvamento_minero_boletin_prensa
- Universidad Nacional de Colombia. (1996). Condiciones ambientales de la minería subterránea del carbón en la cuenca de Amagá-Angelópolis. Primera parte. Riesgo potencial de explosiones de polvo combustible en minas subterráneas de carbón. Informe final. <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=1200501010005112970000000000>



Anexos

ANEXO A.

MARCO TEÓRICO

A.1.

Definiciones

Para los propósitos de esta guía, se implementan las siguientes definiciones.

Accidente de trabajo: es todo suceso imprevisto que ocurra por causa o con ocasión del trabajo, y que genere al trabajador una lesión, perturbación funcional o psiquiátrica, invalidez o la muerte. Se incluyen en esta categoría los sucesos que se produzcan mientras se ejecuten órdenes del empleador o durante la realización de una labor bajo su autoridad, incluso fuera del lugar y horas de trabajo ([Ley 1562, 2012, Artículo 3](#)).

Atmósfera explosiva: mezcla de sustancias inflamables ya sea en forma de gases, vapores, nieblas o polvos, con el aire (condiciones atmosféricas), y que posterior a un evento de ignición, la reacción de combustión generada se siga propagando a la totalidad de la mezcla que aún no haya reaccionado ([Laboratorio Oficial J.M. Madariaga – LOM, 2006](#)).

Barreras pasivas: depósito de polvo inerte o agua, ubicado ya sea en el techo, o en la pared lateral de sitios estratégicos en una vía subterránea. Su finalidad es la de contribuir a frenar la propagación de una explosión, ya que forma una nube incombustible en el momento de ser alcanzado por un golpe producto de la onda expansiva durante la

explosión de metano o polvo de carbón ([Decreto 1886, 2015, Artículo 7](#)).

Canister: se refiere a un recipiente cilíndrico con tapa, usualmente de metal, usado especialmente para envasar sustancias como alimentos, químicos o gases bajo presión ([Cambridge Dictionary, 2021](#)).

Desorción: proceso por el cual el gas metano producido durante el proceso de carbonificación y posteriormente adsorbido por el carbón es liberado por diferentes causas. Se da en el arranque del carbón, durante su transporte y molienda. ([Consortio EG Carbón - Metano, 2016](#)).

Energía Mínima de Ignición – EMI: energía eléctrica mínima acumulada en un condensador, que al momento de liberarse es suficiente para generar la ignición de la atmósfera más fácilmente inflamable, en condiciones de ensayo determinadas ([LOM, 2006](#)).

EPL Ma: nivel de protección “muy alto” para equipos con la seguridad suficiente para que la probabilidad de que se convierta en una fuente de ignición en funcionamiento normal sea baja. Incluso cuando existe la presencia de la atmósfera explosiva (concentración por fuera de lo permisible) puede seguir energizado ([Ex Testing & Certification, 2020](#)).

EPL Mb: nivel de protección para equipos implementados en instalaciones de minas con probabilidad de aparición de grisú. El grado de protección “alto” en los equipos indica que tiene la seguridad suficiente para que sea poco probable que se convierta en una fuente de ignición en operación

normal, es decir, cuando la atmósfera no presenta metano fuera de los límites permisibles (**Ex Testing & Certification, 2020**).

Ex: símbolo cuyo propósito es señalar que los equipos, sistemas de protección y componentes pueden ser utilizados en áreas con riesgo de explosión (**Decreto 1886, 2015, Artículo 7**).

Frente ciego: frente de trabajo al que solo se puede acceder por medio de una vía o galería principal, es decir, vías que comunican con los túneles o galerías de acceso, usados principalmente para transporte de material y personal (**Decreto 1886, 2015, Artículo 7**).

Grisú: gas adsorbido en el carbón, compuesto principalmente por metano y otros gases (etano, dióxido de carbono, hidrógeno, entre otros), que al mezclarse con el aire puede dar lugar a una atmósfera explosiva 8 (**LOM, 2006**).

Incidente de trabajo: suceso de carácter imprevisto asociado con el trabajo, en el que pudo haber ocurrido lesión, enfermedad (independiente de su nivel de severidad) o víctima mortal (**ICONTEC, 2015**).

Inertización: proceso que conlleva la aplicación de sustancias inertes con el fin de impedir la generación de atmósferas explosivas (**LOM, 2006**).

Incendio en mina subterránea: existen dos tipos de incendios. Exógeno, generado por la inflamación con llama abierta de los elementos que se ingresan para la explotación; Endógeno, producido por la autocombustión u oxidación del carbón sin llama abierta, aunque puede generarla

posteriormente (**Decreto 1886, 2015, Artículo 7**).

Límites de explosividad: límites que demarcan el rango de explosividad. Es una propiedad específica para cada gas y material particulado, incluido el polvo de carbón (**LOM, 2006**).

Límite Inferior de Explosividad – LEL (Lower Explosive Limit): es aquella concentración mínima de gases, vapores o nieblas inflamables presente en el aire, en la cual la mezcla sigue siendo explosiva. Es decir, por debajo de este nivel de concentración no habrá explosividad. Este límite se puede medir con un explosímetro o monitor de gases de lectura directa con sensor (**Decreto 1886, 2015, Artículo 7**).

Límite Superior de Explosividad – UEL (Upper Explosive Limit): es aquella concentración máxima de gases, vapores o nieblas inflamables presente en el aire, en la cual la mezcla sigue siendo explosiva. Es decir, por encima de este nivel de concentración no habrá explosividad (**LOM, 2006**).

Macerales: son remanentes vegetales reconocibles únicamente de forma microscópica, que constituyen la parte orgánica del carbón. Existen tres grupos de macerales: grupo vitrinita, grupo liptinita y grupo inertinita (**Consorcio EG Carbón – Metano, 2016**).

Mezcla híbrida: se presenta cuando hay varias sustancias inflamables con diferentes estados físicos en combinación con el aire. Por ejemplo, cuando se tiene polvo de carbón, metano y aire (**LOM, 2006**).

Rango del carbón: clasificación que se le asigna al

carbón de acuerdo con el grado de carbonización logrado (Consortio EG Carbón – Metano, 2016).

Rango de explosividad: intervalo de concentración de una sustancia presente en el aire dentro del cual esta puede ser explosiva (LOM, 2006).

Sustancia inflamable: sustancia que se puede presentar en diferentes estados (gas, vapor, líquido, sólido o de sus mezclas), la cual después de un evento de ignición sufre una reacción exotérmica con el aire (LOM, 2006).

Tasa de inertización: porcentaje de material inerte determinado mediante técnicas de laboratorio, que es necesario para aplacar los depósitos de polvo combustible que se tienden a formar en labores mineras subterráneas (Decreto 1886, 2015, Artículo 7).

A.2.

Características del gas metano y del polvo de carbón

En el ámbito de seguridad de minas subterráneas de carbón, la actividad más crítica es el arranque del mineral. En esta tarea es donde se realiza la mayor perturbación al macizo rocoso permitiendo así la liberación del gas metano y de partículas de carbón. Como ya se ha mencionado, estos agentes en presencia de una fuente de ignición con la suficiente energía para inflamarlos pueden ocasionar catástrofes. A continuación, se presentan algunas de las características de estos factores.

A.2.1.

Gas metano

El metano es un gas que proviene del mismo origen que el carbón y su formación se da al mismo tiempo que la de él. Durante la carbonificación, el carbón libera varios elementos como oxígeno en forma de agua, carbono, hidrógeno y gases como el metano, dióxido de carbono, entre otros. Una parte de estos gases se acumula en los estratos y capas del carbón. El metano se adsorbe en las superficies internas del carbón entre las partículas de carbono y las moléculas del gas debido a las fuerzas de Van der Waals. También puede encontrarse de forma libre en las fisuras, grietas y fracturas que se encuentran en las capas y en el mismo carbón.

La presencia del metano en las atmósferas mineras es uno de los factores más peligrosos en la extracción subterránea de carbón, ya que al encontrarse en concentraciones entre el 5 y 15% de aire es explosivo, y ha sido el precursor de muchas emergencias en el mundo. Con el avance de la tecnología se han logrado diseñar e implementar sistemas de detección temprana que permiten un monitoreo continuo en las instalaciones de la mina. Sin embargo, aún se puede generar la explosión si no se implementan medidas de prevención. La forma más eficiente de controlar y diluir las concentraciones de metano a límites permisibles es a través de un sistema de ventilación que lo logre evacuar de la mina.

Como se dijo anteriormente, la mayor liberación del metano se da durante el arranque del carbón

y el desprendimiento será mayor dependiendo de la profundidad y la velocidad del método implementado para arrancarlo. Cabe resaltar que la geología juega un papel fundamental para entender cómo se comporta el metano en los mantos de carbón. De hecho, un factor que aumenta el riesgo de tener concentraciones altas de este gas son las acumulaciones anómalas mayores de metano, las cuales normalmente, son zonas asociadas a fallas inversas donde se presenta una acumulación del gas y que tienden a ser encontradas conforme se avanza en las labores mineras. Esto da lugar a que se libere todo el gas acumulado en poco tiempo y que la ventilación implementada no sea suficiente generando fácilmente atmósferas explosivas (Ortega Ramos et al., 2018).

Debido a que el metano es un factor decisivo en la seguridad de las minas subterráneas, la Tabla A1 presenta sus características más influyentes en la explosividad.

Tabla A1. Propiedades características del metano.

PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DEL METANO	
Temperatura Mínima de Inflamación	537 °C
Límite Inferior de Explosividad (LIE)	5%
Límite Superior de Explosividad (LSE)	15%
Energía Mínima de Inflamación (EMI)	280 μJ
Densidad Relativa	0,7

Fuente: (Medic, L, 2012).

El metano biogénico se forma gracias a la actividad bacteriana que se da durante el proceso de coalificación como un subproducto de la respiración de bacterias aerobias. Primero, se metaboliza cualquier oxígeno libre presente en los sedimentos. Una vez la temperatura aumenta y excede el valor en el cual las bacterias ya no sobreviven, aproximadamente 50 °C, se da la formación del metano termogénico el cual es producto de la catálisis. Durante el proceso de coalificación una parte de este metano migra hacia la superficie o depósitos adyacentes y otra parte se fija como gas libre dentro de las fracturas naturales del carbón, como gas disuelto en agua dentro del carbón fijado por adsorción gracias a la fuerza molecular en la superficie de los componentes orgánicos o se absorbe dentro de los poros del carbón. Los carbones que se encuentran a mayor profundidad contienen mayor contenido de metano fijado por adsorción, ya que este proceso depende de la presión y del tipo de carbón. A diferencia de estos, en los carbones que se encuentran a menores profundidades predomina el gas libre y disuelto (U.S. Geological Survey, 1997).

A.2.2.

Polvo de Carbón

De acuerdo con Medic (2012), en la extracción subterránea de carbón es imposible no hablar de la presencia del polvo de carbón. Su formación es inevitable durante el arranque, transporte y trituración, extendiéndose por toda la mina por medio de las corrientes de aire de la ventilación. Una vez generado este polvo, puede ponerse en suspensión en una corriente de ventilación o por el contrario depositarse en paredes, techos y pisos de las instalaciones de la mina.

Para fines académicos, se puede caracterizar la cantidad de polvo de carbón dependiendo de la concentración de polvo en kg/m³ u otras unidades y de la tasa de depósito del polvo en kg/m²/día. Esta intensidad de sedimentación a su vez depende de la intensidad de la fuente de emisión de polvo en kg/h, la distribución de los tamaños de partículas, la velocidad del aire en la labor, entre otros parámetros (Medic, 2012).

A.2.2.1.

Tamaño de partícula

La explosividad del polvo de carbón está muy influenciada por la granulometría, ya que cuanto más pequeña sea la partícula se tiene mayor probabilidad de que se origine una explosión debido a la mayor superficie específica. Por ello, el análisis de la distribución granulométrica del polvo se considera cómo parte esencial de la evaluación de su explosividad (Medic, 2012).

Una de las medidas de prevención contra la explosión por polvo de carbón consiste en su neutralización por medio de la aplicación de polvo de caliza en paredes, techos y pisos. Por medio del equipo CDEM se establece el nivel de explosividad. Este dispositivo proporciona una idea de cuánto polvo de caliza es necesario para lograr neutralizar al polvo de carbón.

A.2.2.2.

Contenido en material volátil

Es una propiedad influyente en la explosividad del polvo de carbón. El Límite Inferior de Explosividad varía de acuerdo con el tamaño de partícula, la presencia de metano y el contenido en volátiles. Cuando existe la concentración ideal y un contenido en volátiles superior al 25%, se originan explosiones más violentas en comparación a las explosiones por polvo con menores contenidos de volátiles (Medic, 2012).

Se ha demostrado que el contenido de material

volátil influye en los parámetros de explosividad. Por ejemplo, la temperatura mínima de inflamación disminuye cuando hay mayor contenido de volátiles sin importar si el ensayo de explosividad del polvo de carbón se realiza en capa o en nube. El Límite Inferior de Explosividad y la Energía Mínima de Inflamación (EMI) también se reducen al aumentar el contenido en volátiles (Medic, 2012).

A.2.2.3.

Contenido de cenizas y de humedad

El contenido de cenizas y de humedad es un atenuante en los valores de presión máxima de explosión. Por lo general, contenidos altos de estos factores ocasionan que sean necesarias temperaturas, concentraciones y Energías Mínimas de Inflamación más altas.

A.2.2.4.

Sensibilidad a la inflamación

Son todas las características de sustancias sólidas en forma de granos, polvos o fibras relacionadas con la capacidad de inflamarse ante la presencia de distintos tipos de fuentes de ignición. Para el estudio de la sensibilidad a la inflamación se involucran parámetros cómo la Temperatura Mínima de Ignición, Límite Inferior de Explosividad y Energía Mínima de Inflamación. Estos parámetros son empleados en el diseño e implementación de medidas para prevenir una explosión, ya que entre más bajas sean las temperaturas, concentraciones

o energía mínima de inflamación del polvo, mayor serán las medidas que deben implementarse para reducir los riesgos (Medic, 2012).

- **Temperatura Mínima de Ignición**

Se conoce cómo la menor temperatura necesaria para inflamar una muestra de polvo. Es posible realizar pruebas con la muestra de polvo en suspensión, ensayo que se conoce como Temperatura Mínima de Ignición en nube (TMIn), del cual se obtiene la temperatura más baja a la cual una suspensión de polvo en aire produce espontáneamente la ignición y puede propagar la llama. Esta temperatura depende de la turbulencia del polvo ya que se relaciona directamente con el tiempo en contacto del polvo con la superficie caliente (Cejalvo, s.f.).

También es posible conocer la Temperatura Mínima de Ignición en capa (TMlc). Esta prueba nos proporciona la temperatura mínima de una superficie caliente a la que puede inflamar una cantidad de polvo depositado sobre ella. Un factor determinístico es el espesor de la capa (Cejalvo, s.f.).

- **Límite Inferior de Explosividad – LEL (Concentración mínima explosiva, CME)**

Según Medic (2012), esta propiedad es la concentración límite del polvo en suspensión en la que no se produce inflamación, por lo tanto, es el límite en el que la mezcla en suspensión se considera potencialmente explosiva.

- **Energía Mínima de Inflamación – EMI**

Es considerada cómo la menor energía que puede descargar un condensador para producir la inflamación de la mezcla aire – polvo en suspensión. Se obtiene realizando varios ensayos donde se modi-

fica la concentración de polvo en el aire. En esta energía se tiene en cuenta la capacidad total del circuito de descarga y la tensión aplicada (Medic, 2012).

A.2.2.5.

Severidad de explosión

Una vez se produce la inflamación de alguna sustancia en un espacio confinado, se ocasiona una explosión. Experimentalmente se pueden conocer las características que permiten evaluar los efectos de la explosión. Esto se conoce cómo severidad de la explosión la cual depende de la presión de explosión ($P_{m\acute{a}x}$), de la velocidad máxima de aumento de presión ($K_{m\acute{a}x}$) y de la concentración límite de oxígeno (Medic, 2012).

- **Presión de explosión – $P_{m\acute{a}x}$**

Es la máxima pendiente de la tangente a la curva presión – tiempo a cada concentración de polvo. Por lo general, la presión aumenta moderadamente en los primeros instantes y después logra alcanzar valores muy altos. La mayor presión registrada en el proceso es a la que se le conoce cómo máxima presión de explosión.

- **Velocidad máxima de aumento de explosión – $K_{m\acute{a}x}$**

La constante $K_{m\acute{a}x}$ es un parámetro propio de cada tipo de polvo combustible utilizado para clasificar la explosividad del polvo. También se conoce cómo el gradiente máximo de presión (dP/dt) $m\acute{a}x$, el cual depende del volumen e indica el efecto destructivo de una explosión. Este parámetro se utiliza en el cálculo y diseño de los sistemas de explosión contra explosiones.

• **Concentración Límite de Oxígeno – CLO**

Este parámetro de gran importancia se refiere al porcentaje de oxígeno por debajo del cual no se presenta la ignición en el rango de concentraciones explosivas. En los ensayos para identificar esta concentración se realizan pruebas a una determinada concentración de polvo con un porcentaje de oxígeno alrededor del 15%. Como gas inerte se utiliza nitrógeno. En caso de que se produzca la explosión con el porcentaje de oxígeno en 15%, se reducen las concentraciones en un 3% y se repite el proceso hasta que no se obtenga la explosión.

Cuando sucede lo contrario, es decir, no se produce la explosión con el porcentaje inicial de oxígeno, se aumenta el porcentaje en un 1% hasta que se produzca la explosión, y así definir la frontera de explosión y no explosión. También se varían las concentraciones del sólido pulverulento.

A.2.2.6.

Susceptibilidad térmica

Medic (2012), indica que cuando se presentan procesos de oxidación y autocalentamiento es recomendable realizar las pruebas para caracterizar la susceptibilidad térmica de los productos para identificar y conocer el comportamiento térmico y la tendencia a la autocombustión. Estos parámetros propios de la susceptibilidad son el Índice de Maciejasz (IM), Temperatura de Emisión de Volátiles Inflamables (TEV), Ensayo de Termogravimetría (TG), Ensayo de Calorimetría Diferencial del Barrido (DSC), Energía de activación (Ea) y Temperatura característica (T_{caract}).

• **Índice de Maciejasz – IM**

Este ensayo se realiza con el fin de conocer la susceptibilidad a la inflamación de sustancias orgánicas. La muestra es expuesta a agua oxigenada. Durante el análisis se observa el comportamiento. Si la muestra tiene afinidad con el oxígeno reaccionan exotérmicamente generando una elevación en la temperatura. Cuando el IM es mayor a 10 se considera riesgo alto de combustión.

• **Temperatura de Emisión de Volátiles Inflamables – TEV**

Este ensayo permite estudiar la degradación térmica de materias orgánicas con generación de materiales volátiles con tendencia a ser inflamadas. El ensayo consiste en exponer a temperaturas crecientes una muestra de materia orgánica con una fuente de ignición compuesta por una resistencia incandescente. Si la muestra libera vapores inflamables, estos serán más sensibles a la ignición que la muestra sólida pudiendo ser inflamados a temperaturas más bajas, incluso menor a la TMI_n, siendo esta mezcla resultante de mayor gravedad.

• **Ensayo de Termogravimetría – TG**

En este ensayo una muestra es sometida a un calentamiento programado mientras se registra la pérdida de peso experimentada en el tiempo. Después de muchos estudios realizados se han encontrado que los resultados más significativos son la temperatura de inducción a la combustión, la temperatura de máxima pérdida de peso y el incremento de peso al inicio del calentamiento. La temperatura donde se produce la mayor velocidad de pérdida de peso representa el orden de reactividad del producto. Cuando se registran mayores temperaturas en las muestras esto

indica que el producto es menos susceptible a la combustión.

- **Ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC)**

En este ensayo se miden los intercambios de calor (procesos exotérmicos y endotérmicos) que experimenta una muestra de polvo de carbón comparándola con una muestra de referencia.

La energía de activación se calcula a partir del ensayo de termogravimetría convencional. Esta energía de activación aparente se calcula en el punto de máxima pérdida de peso aplicando el modelo matemático de J. W. Cummings, en el cual se relaciona la velocidad de pérdida de peso con la energía de activación. A partir de la pendiente de una recta ajustada por mínimos cuadrados a los datos de ensayo seleccionados, se puede obtener una energía de activación aparente.

- **Temperatura característica (T_{carac})**

La susceptibilidad de la autoignición se estudia a través de la técnica termogravimétrica incorporándole una corriente de oxígeno al proceso. El aporte del oxidante al proceso puede generar pérdidas de peso repentinas, asociadas a una combustión rápida, la cual se produce a una temperatura característica para cada sustancia.

A.3.

Incendios en minería subterránea

A.3.1.

Triángulo de fuego

La manera más familiar de comprender los elementos básicos necesarios para que se produzca una llama es usando el triángulo del fuego. Para que se produzca el fuego se requiere la presencia del oxígeno, un combustible y una fuente de ignición como se observa en la Figura A1. Con presencia de fuego en grandes proporciones, debido a la combustión incontrolada, se da la manifestación de un evento al que conocemos como incendio. Este suceso puede dejar a su paso lesiones personales por el humo, gases tóxicos y altas temperaturas, daños materiales a las instalaciones, productos fabricados y edificios (Navarro, 2013).



Figura A1. Triángulo del fuego.

Fuente: elaboración propia a partir de (Harris, 2018).

Cómo ya se mencionó, el fuego se produce cuando existen simultáneamente en el tiempo y en el espacio los siguientes factores (Navarro, 2013):

- **Combustible:** son materiales sólidos (madera, carbón), líquidos (gasolina, disolventes), gaseosos (metano, butano) o metales que arden con facilidad.
- **Oxígeno:** sustancia oxidante en la reacción. Se encuentra en una proporción aproximadamente del 21% en volumen en el aire.
- **Fuente de ignición:** energía en forma de calor capaz de ocasionar que el combustible alcance su temperatura de ignición.

Adicional a estos factores se considera la existencia de reacciones en cadena generadas por la autoinflamación de los gases que se desprenden del combustible, los cuales generan nuevos gases que se calientan y se vuelven a inflamar generando un proceso cíclico. Según Navarro (2013), la presencia de los tres factores (combustible, oxígeno y fuente de ignición) junto con las reacciones en cadena recibe el nombre de tetraedro del fuego.

A.3.2.

Evolución de un incendio

El fuego puede considerarse como el proceso de combustión originado por una reacción química de oxidación debido a la presencia de un combustible. Una vez producida esta reacción puede alcanzar temperaturas elevadas que generan el suficiente calor con la energía mínima necesaria para garantizar que la combustión continúe. El tipo de combustible influye mucho en las temperaturas que alcanza la combustión. Esta temperatura puede variar desde 1039 °C hasta 1700 °C.

Debido a la condición de confinamiento existente en los túneles, las temperaturas pueden duplicarse en comparación a las temperaturas que se producen en incendios generados en espacios abiertos como se muestra en la Figura A2. El calor se encierra en el recinto lo que puede ocasionar un colapso en la zona afectada.

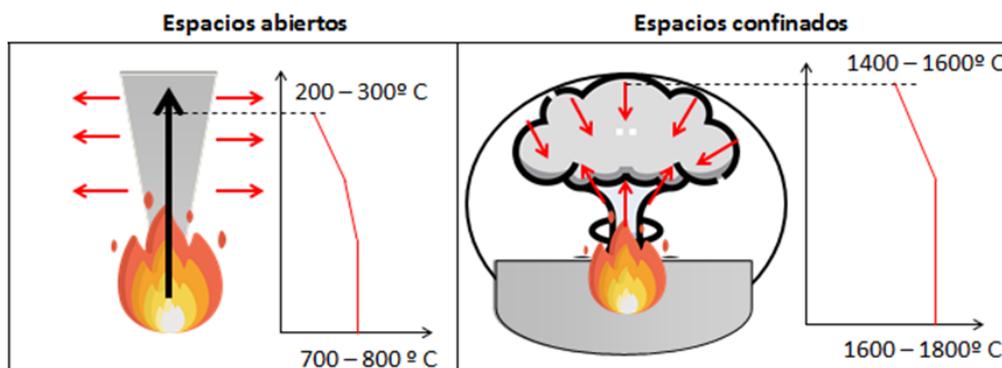


Figura A2. Representación gráfica del comportamiento de gases durante un incendio.

Fuente: elaboración propia a partir de (De la Puente, 2014).

Los gases calientes liberados durante un incendio generado en un espacio confinado se ubican en la parte superior del recinto ocasionando un calentamiento de este. La capa de humo y las superficies calientes despiden calor en dirección al origen del incendio calentando nuevamente la superficie de combustible e inflamando los gases, lo que ocasiona un aumento en la velocidad de combustión.

A medida que la proporción de un incendio aumenta, se incrementa la velocidad de liberación de calor y la velocidad de aparición de los productos de combustión, los cuales realizan un aporte de sustancias tóxicas y humos formados por partículas. La presencia de estos productos aumenta a medida que el caudal de aire en el recinto disminuye.

Los incendios en minería subterránea pueden generarse por agentes externos o por combustión espontánea, proceso que se da por la oxidación del carbón cuando se expone a condiciones apropiadas, ya sea por minería o por procesos geológicos. Cuando el carbón se oxida puede iniciarse el autocalentamiento y posteriormente la liberación de calor, la cual se propaga por todos los mantos. La combustión espontánea es un tema de gran importancia en los estudios de los mantos de carbón ya que puede convertirse en una fuente de ignición que, combinada con el oxígeno y el metano

en concentraciones explosivas, pueden originar una explosión.

A.4.

Explosiones en minería subterránea

El concepto de explosión alude a una liberación súbita de gas a alta presión en el ambiente. Las explosiones se pueden clasificar según su origen en explosiones físicas y explosiones químicas. La principal diferencia entre estos dos tipos de explosión radica en la presencia o no de reacción química. Es decir, en las explosiones físicas la liberación del gas a alta presión ocurre sin presencia de una reacción química, mientras en las explosiones químicas ocurre lo opuesto (Botta, 2015).

Se puede definir una explosión química como una reacción súbita de oxidación o de descomposición la cual suscita un aumento de temperatura, de presión o de ambas sincrónicamente (ISO, 2016). Este tipo de explosión puede suceder por dos mecanismos diferentes: deflagración y detonación.

A.4.1.

Deflagración

Una deflagración es una reacción de propagación cuyo frente avanza a una velocidad inferior a la del sonido. La masa que reacciona puede encontrarse en estado sólido, líquido, gas, vapor, polvo en suspensión o mezclas de estos. También puede encontrarse libre o confinada. Se pueden generar presiones de 1-10 bares, velocidades de propagación de 0,001-100 m/s y un frente de llama atrasado respecto a la onda de presión (Botta, 2015). La Figura A3 representa una reacción de propagación por deflagración.

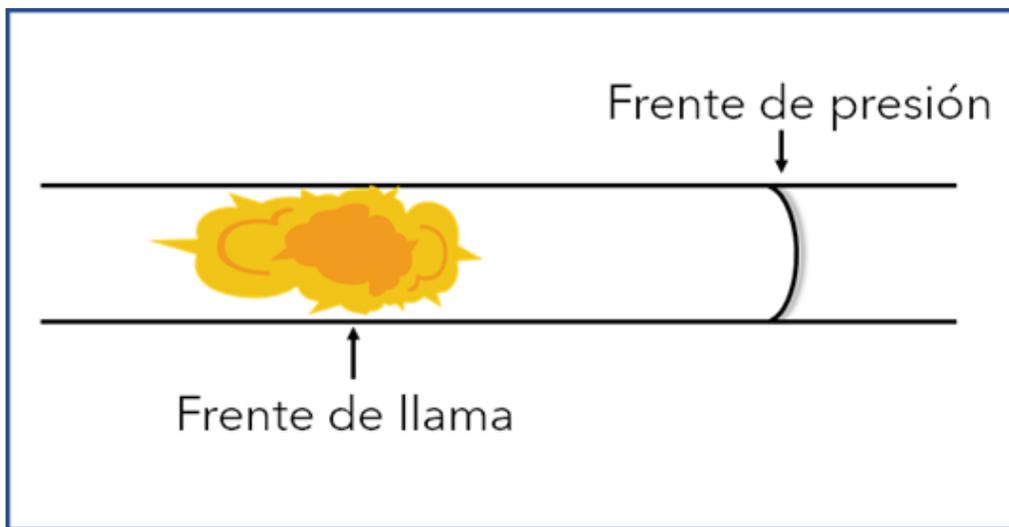


Figura A3. Reacción de propagación por deflagración.
Fuente: elaboración propia a partir de (Botta, 2015).

A.4.2.

Detonación

Una detonación es una reacción de propagación cuyo frente avanza a una velocidad igual o superior a la del sonido. La masa que reacciona puede encontrarse en estado sólido, líquido, gas, vapor o polvo en suspensión (bajo ciertas condiciones de

confinamiento), también puede estar libre o confinada. En una detonación se pueden generar presiones de más de 105 bares, velocidades de propagación de más de 1000 m/s y un frente de llama acoplado junto con la onda de presión, como lo muestra la Figura A4 (Botta, 2015).

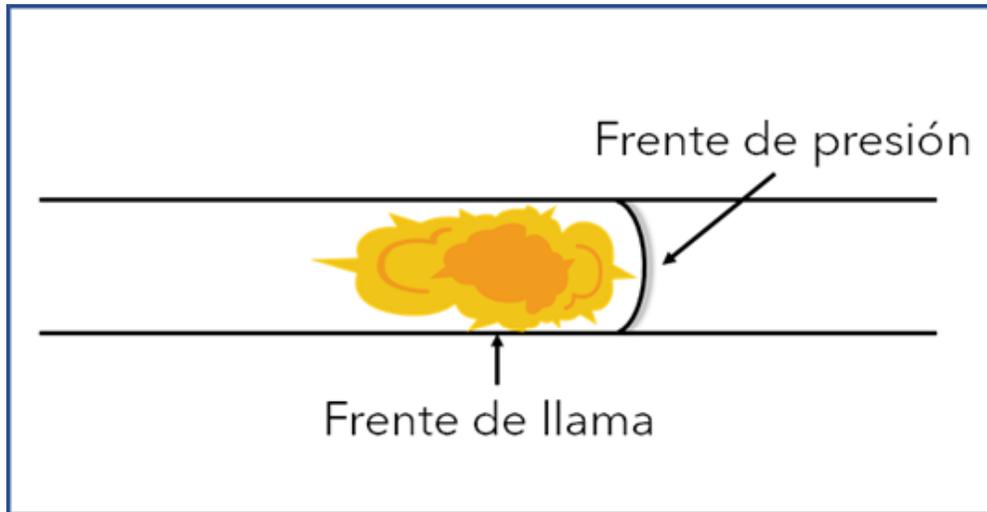


Figura A4. Reacción de propagación por detonación.
Fuente: elaboración propia a partir de (Botta, 2015).

A.4.3.

Pentágono de explosividad

Como se mencionó anteriormente, una explosión es un evento de carácter súbito. Para que ocurra es necesario que se presenten las siguientes condiciones:

- El material combustible (gases inflamables, polvo en suspensión, etc.) se encuentre en una concentración dentro de los límites de explosividad.
- Exista un comburente, en este caso el oxígeno, en las cantidades suficientes para alimentar la reacción.
- Exista una fuente de ignición (temperatura, llama, chispa, etc.) capaz de entregar la energía suficiente para iniciar la reacción.

Si alguno de los factores mencionados anteriormente está ausente no se producirá una explosión. Cuando se presenta polvo como el material

combustible, es necesario adicionar otros dos factores de gran importancia:

- Suspensión o dispersión del polvo
- Confinamiento del polvo

En la Figura A5 se puede observar una representación del pentágono de explosividad conformado por los factores necesarios para que se presente una explosión.

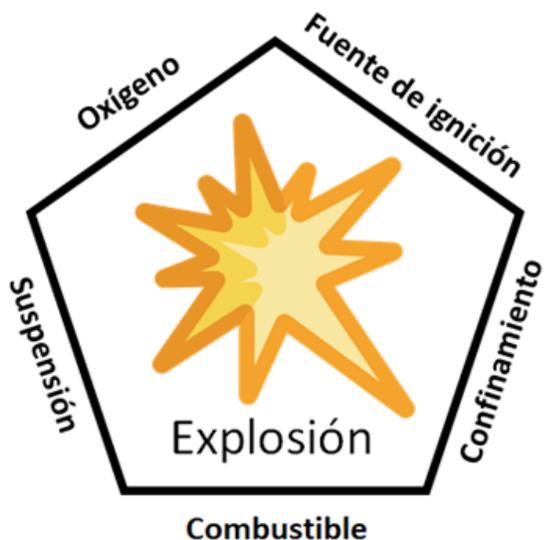


Figura A5. Pentágono de explosividad.
Fuente: elaboración propia a partir de (Harris, 2018).

Las partículas de polvo de carbón pueden pasar de estar depositadas en una superficie, donde la probabilidad de explosión es baja, a estar en suspensión. Esto puede ser causado por una ráfaga repentina de aire con la fuerza suficiente para levantar el polvo desde el suelo o separarlo de las paredes y techo. De hecho, un desprendimiento de rocas del techo puede ocasionar esta dispersión.

Cuando se presenta una explosión de gas en una mina subterránea, la misma onda de presión es capaz de poner en suspensión las partículas de polvo de carbón. Sumado a esto, el confinamiento permite que se dé una rápida transferencia de calor entre las partículas, dando paso a que la explosión se propague con mayor rapidez.

A.4.4.

Mecanismos de la explosión en minería subterránea

Una vez iniciada una explosión, esta seguirá propagándose siempre y cuando el medio sea inflamable. La temperatura del material que se está encendiendo se elevará a aproximadamente 2000 °C y se concentrará en la llama. La llama proporciona una fuente de ignición continua, dando lugar a que la explosión siga propagándose a través de cualquier medio aún sin quemar. La rápida expansión del gas debido al calor desarrolla una onda de presión que empuja tanto el gas quemado como el que falta por quemar (Medic, 2012).

A.4.4.1.

Explosión primaria

Existen formas diferentes en las que se puede generar una explosión primaria, ya sea por una explosión de metano, de polvo de carbón o por el detonador usado con los explosivos.

• Explosión por metano

Una explosión primaria para el caso de una mina de carbón puede ser una explosión por metano. Dicha explosión, que inclusive puede ser simplemente la deflagración de una pequeña cantidad de gas (más fácil de inflamar que el polvo de carbón), es suficiente para poner en suspensión el polvo de carbón depositado en las galerías contiguas. Esto a su vez daría paso a una explosión secundaria que puede propagarse cientos de metros a lo largo de las galerías conforme vaya levantando el polvo que alimenta el frente de llama (Medic, 2012). La explosión primaria de metano y una o varias explosiones secundarias de polvo de carbón, componen la secuencia más frecuente en las catástrofes mineras por explosión.

• Explosión por polvo de carbón

Cuando en alguna zona se alcanzan acumulaciones de polvo con concentraciones por encima del límite inferior de explosividad, en conjunto con las condiciones mencionadas anteriormente en el pentágono de explosividad, se puede generar la explosión de una primera nube de polvo. Dicha explosión puede ser primaria y en un principio solo afectaría una pequeña área. No obstante, esta explosión primaria produce ondas de presión que favorecen la suspensión de cierta cantidad de polvo

depositado. Esto propicia que se presenten nuevamente las condiciones para una explosión, siendo la explosión primaria la que da paso a la nueva explosión, o secundaria (Medic, 2012).

Es importante mencionar que existe otro mecanismo para iniciar una explosión de polvo de carbón mucho menos frecuente que el anterior. Dicho mecanismo consiste en que el polvo depositado en forma de capa puede sufrir autocombustión a causa de diferentes razones, como:

- Oxidación del carbón al estar en contacto con la atmósfera. Este es un proceso exotérmico capaz de alcanzar la temperatura de inflamación.
- Oxidación de la pirita presente en algunos carbones, lo cual da paso al desprendimiento de calor.

En función de la composición del polvo de carbón puede ocurrir un proceso exotérmico, ya sea debido a que la capa se encuentre depositada sobre una superficie caliente, o bien se puede deber a las características propias del polvo o de contaminantes que este contenga como la pirita. Los procesos de autocalentamiento mencionados anteriormente generan un riesgo tanto de incendio como de explosión.

A.4.4.2.

Explosión secundaria

Se ha comprobado experimentalmente que durante la propagación de una explosión secundaria (polvo de carbón) viaja una onda de presión por delante del frente de llama. Esta presión vie-

ne dada por la expansión de los gases producidos en las combustiones llevadas a cabo en el frente de llama o frente de reacción. La onda de presión, también conocida como onda de choque, es la que pone en suspensión parte del polvo de carbón depositado generando una nube de polvo que es posteriormente inflamada por el frente de llama.

Usualmente, la velocidad de la onda de presión se mantiene constante y es superior a la del frente de llama que suele disminuir. Por lo tanto, conforme avanza la explosión la distancia entre ambos frentes aumenta. Solo cuando se presenta una detonación tanto el frente de llama como el de presión viajan juntos a velocidades del orden de 2000 m/s. El frente de llama y el de presión actúan como un pistón de manera que el aire que se encuentra delante es comprimido en cierta medida, mientras que el aire que está por detrás es expandido (Medic, 2012). La interacción entre la onda de presión y la llama depende de sus respectivas velocidades y de la longitud de la galería, de tal manera que el frente de llama puede verse reiteradamente acelerado y frenado.

ANEXO B.

CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS Y SISTEMAS PARA MINERÍA SUBTERRÁNEA DE CARBÓN

Los equipos para minería subterránea deben cumplir con los requisitos de protección adecuados según la Resolución 90708 de agosto 30 de 2013, Anexo General del RETIE. Los grados de protección son los presentados en las Tabla B16 a la Tabla B18.

B.1.

Características de los equipos eléctricos para minería subterránea

El grado de protección IP (Protección al Ingreso) hace referencia a la capacidad que tiene el equipo para evitar el paso de partículas de polvo y de agua. Este grado de protección IP es seguido de dos números. El primer número se refiere al tamaño de partícula que puede ingresar al equipo cuyo rango varía de 1 a 6. Entre más elevado el número, menor será la partícula que puede ingresar al equipo (Ver Tabla B1).

Tabla B1. IP mínimos para minería subterránea.

Grado de protección IP o su equivalente en NEMA (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos)	Definición	IP Mínimos para Minería Subterránea		
	Se refiere a la obstrucción frente a la penetración del polvo y del agua en cualquier envoltente. La manera de identificar los equipos que cumplen esta normatividad es por medio del código IP seguido de dos números, el primero hace referencia a la estanqueidad (propiedad de los equipos que se basa en la oposición al ingreso de partículas) al polvo y el segundo al agua.	IP 20	Conocido como protección de dedos. Este grado de protección hace referencia a partes de aparatos contenidos en otras envoltentes.	
		IP 23	Es obligatorio para envoltentes de equipo sin modo de protección. Estos equipos deben estar instalados en instalaciones cerradas donde no haya acceso de personal.	
		IP 54	Es obligatorio para envoltentes de equipos sin modo de protección que se encuentran ubicados en lugares donde el personal tiene acceso. También es para los equipos con modo de protección antideflagrante.	
		IP 55	Es obligatorio en envoltentes de equipos de Seguridad Intrínseca y de Seguridad Aumentada, o ambos como modo de protección.	

Fuente: (Resolución 90708, 2013).

El grado de protección de la envoltente contra el impacto (IK) varía de 0 a 10 siendo, cero la menor resistencia y 10 la mayor resistencia al impacto (Ver Tabla B2). La Tabla B3 presenta condiciones para el encerramiento de transformadores, aislamiento de transformadores y tableros eléctricos.

Tabla B2. IK mínimos para minería subterránea.

Grado de protección de robustez mecánica IK o su equivalente NEMA	Definición	IK Mínimos para Minería Subterránea	
	Este grado de protección está relacionado con la protección de la envolvente o parte de ella contra impactos. Los equipos eléctricos de interior deben presentar alta resistencia mecánica con el objetivo de asegurar el suministro eléctrico en condiciones de seguridad necesarias para operaciones subterráneas.	IK09	Para equipos eléctricos utilizados en frentes de arranque y preparación. En general cualquier labor que se relacione con maquinaria pesada.
		IK07	Para equipos eléctricos como alumbrado general, señalización, control de gases, entre otros.

Fuente: (Resolución 90708, 2013).

Tabla B3. Condiciones de equipos para labores en minería subterránea.

ENCERRAMIENTO DE TRANSFORMADORES	Deben estar protegidos contra daños físicos y estar ubicados en instalaciones cerradas donde solo tenga acceso personal autorizado o calificado. Así mismo, la instalación donde se encuentre debe tener espacio donde se garantice el desplazamiento seguro del personal capacitado para realizar el mantenimiento, inspecciones o reparaciones al equipo. La base donde se debe ubicar el transformador debe ser a prueba de fuego dispuesta de tal manera que minimice la propagación del fuego. Si el equipo no está certificado para operar sumergido, es importante que sea un lugar donde no exista el riesgo de inundación. Dar cumplimiento a la NTC 2050.
AISLAMIENTO DE TRANSFORMADORES	De acuerdo con la IEC 85 los materiales de transformadores de tipo seco o de relleno con nitrógeno deben ser aislantes iguales o superiores que la clase H (Equipos preparados para trabajos en ambiente cerrado). Deben estar distanciados como mínimo 3 m de donde circula el personal.
TABLEROS ELÉCTRICOS	Es obligatorio que la maquinaria utilizada en actividades de arranque, preparación y transporte sean monitoreadas desde tableros eléctricos apropiados, también denominados cofres de tajo, los cuales deben tener Certificación de Conformidad con la norma que le aplique. Para minas con riesgo de explosión deben estar certificados y marcados como IECEx, ATEX o algún equivalente.

Fuente: (Resolución 90708, 2013).

La Organización Internacional de Normalización y la Comisión Electrotécnica Internacional publican en el 2016 el estándar ISO/IEC 80079 – 38: Atmósferas explosivas. Parte 38: equipos y componentes utilizados en atmósferas explosivas en minería subterránea, en el cual se establecen los requisitos de protección contra explosiones. Estos requisitos incluyen equipos eléctricos y no eléctricos, maquinaria y componentes para trabajos en minas susceptibles a la formación de atmósferas explosivas por grisú y polvo de carbón. Los equipos y componentes utilizados en las áreas de estas minas en las que no pueda excluirse el riesgo de presencia de atmósferas explosivas deben cumplir, como mínimo, con el Nivel de Protección del Equipo (EPL por sus siglas en inglés) Mb. Adicionalmente, para los equipos y componentes que deban seguir en operación cuando se superan los límites reglamentarios de grisú, el EPL debe ser Ma. Los equipos eléctricos deben cumplir con los requisitos de esta norma, la IEC 60079 – 0, y alguna de las normas citadas a continuación.

- **IEC 60079-1 Atmósferas explosivas. Parte 1:** Protección del equipo por envolventes antideflagrantes “d”.
- **IEC 60079-2 Atmósferas explosivas. Parte 2:** Equipos de protección por envolventes presurizadas “p”.
- **IEC 60079-5 Atmósferas explosivas. Parte 5:** Protección de equipos por relleno pulverulento “q”.
- **IEC 60079-6 Atmósferas explosivas. Parte 6:** Protección del equipo por inmersión líquida “o”.
- **IEC 60079-7 Atmósferas explosivas. Parte 7:** Protección del equipo por seguridad aumentada “e”.

- **IEC 60079-11 Atmósferas explosivas. Parte 11:** Protección del equipo por seguridad intrínseca “i”.
- **IEC 60079-13 Atmósferas explosivas. Parte 13:** Protección del equipo por salas presurizadas “p” y salas ventiladas artificialmente “v”.
- **IEC 60079-18 Atmósferas explosivas. Parte 18:** Protección del equipo por encapsulado “m”.
- **IEC 60079-25 Atmósferas explosivas. Parte 25:** Sistemas eléctricos de seguridad intrínseca.
- **IEC 60079-28 Atmósferas explosivas. Parte 28:** Protección de material y sistemas de transmisión que utilizan radiación óptica.
- **IEC 60079-33 Atmósferas explosivas. Parte 33:** Protección del equipo por protección especial “s”.

Los equipos y componentes no-eléctricos deberán cumplir con la norma ISO y en caso de ser necesario, contar con uno de los tipos de protección enlistados en la norma.

- ISO 80079-36 Atmósferas explosivas. Parte 36: Equipos no eléctricos destinados a atmósferas explosivas. Metodología básica y requisitos, de 2016,
- ISO 80079-37 Atmósferas explosivas. Parte 37: Equipos no eléctricos destinados a atmósferas explosivas. Tipo no eléctrico de protección por seguridad constructiva “c”, por control de las fuentes de ignición “b”, por inmersión en líquido “k”.

El Nivel de Protección del Equipo se refiere a la probabilidad de que éste se convierta en una fuente de ignición. La clasificación de los equipos

depende de los dispositivos EPL con los que se realiza el ensamblaje. La clasificación Mb se le da a un equipo para uso en instalaciones de minas con probabilidad de aparición de grisú. El grado de protección “alto” en los equipos tiene la seguridad suficiente para que sea poco probable que se convierta en una fuente de ignición en operación normal, es decir, cuando la atmósfera no presenta metano fuera de los límites permisibles. Estos equipos deben desenergizarse una vez las condiciones cambien y se genere la situación de alarma.

Aquellos equipos con EPL Ma tienen un nivel de protección “muy alto”. Esta seguridad es suficiente para que la probabilidad de que se convierta en una fuente de ignición en funcionamiento normal sea baja. Incluso, cuando existe la presencia de la atmósfera explosiva (concentración por fuera de lo permisible) los equipos pueden seguir energizados si es necesario por motivos de seguridad.

B.2.

Características del cableado para minería subterránea

Los requisitos que deben cumplir los cables utilizados al interior de minas subterráneas también es posible encontrarlos en la Resolución 90708 de agosto 30 de 2013, Anexo General del RETIE. A continuación, se resumen los requisitos que estipula la norma.

1. Aquellos cables de potencia que estén conectados a equipos fijos y con tensiones a tierra que excedan los 150 V, deben estar contruidos y aprobados bajo la clasificación requerida. Estos cables son:

- **Cables armados utilizados en instalaciones fijas.** Los tres conductores aislados para sistemas trifásicos deben estar contruidos en un solo bloque, deben constar de una cubierta exterior de PVC, de armadura metálica y de un relleno de material.

- **Cables flexibles armados o semiflexibles en instalaciones de baja movilidad.** Estos cables por lo general se pueden utilizar en todas las instalaciones subterráneas. Están compuestos por tres conductores aislados para sistemas trifásicos, relleno central de plástico, armadura metálica y la cubierta exterior presenta características que la hacen resistente a la abrasión.

- **Cables flexibles.** Son cables de construcción y tratamientos complejos por lo que exigen una protección eléctrica especial conocida como protección de cable flexible. Deben ser utilizados en zonas móviles. Este tipo de cables están diseñados con tres conductores aislados para sistemas trifásicos, un relleno central plástico, pantalla metálica y una cubierta exterior de gran resistencia a la abrasión.

2. Los empalmes en cables que superen tensiones de 750 V deben presentar características mecánicas y eléctricas equivalentes a las del cable, deben ser debidamente sellados contra humedad y presentar aislamiento superior o igual al del cable original.

3. Deben contar con la marcación y certificación específicamente para uso en minería.

ANEXO C.

METODOLOGÍA DE CERTIFICACIÓN DE CONFORMIDAD PARA EQUIPOS EN MINERÍA DE CARBÓN SUBTERRÁNEA

Los equipos utilizados en minería subterránea, en emplazamientos donde no pueda dejar de considerarse el riesgo de presencia de atmósfera explosiva, deberán contar con el certificado de los organismos de evaluación de la conformidad responsable de los servicios de evaluación. Por esto, el proceso de certificación lo inicia el fabricante del equipo de la siguiente manera:

- 1.** Una vez el equipo esté diseñado, se deberán realizar las distintas pruebas y ensayos en los laboratorios acreditados por el ente certificador para los cuales se aplica la Norma ISO 17025 – Aplicables a Laboratorios de Ensayos.
- 2.** El informe emitido por el laboratorio de ensayo es analizado y verificado por el ente certificador bajo la Norma 17065, el cual también debe revisar los componentes del equipo y finalmente emitir el certificado de conformidad.
- 3.** Una vez el equipo es instalado, las Entidades de Inspección bajo la Norma ISO 17020 realizan la verificación de la instalación y aprueban o no la utilización del equipo.

C.1.

Acreditación y organismos de evaluación de la conformidad

Los certificados de conformidad para los equipos utilizados en minería subterránea deben ser emitidos por entidades de certificación acreditadas de acuerdo con la norma pertinente de la Serie ISO 17000. Las decisiones de las entidades de certificación deben estar basadas en ensayos realizados por laboratorios de ensayo acreditados con la Norma ISO 17025. En Colombia, la acreditación es responsabilidad exclusiva del Organismo Nacional de Acreditación – ONAC.

En el caso de que en Colombia no existan laboratorios que puedan brindar los servicios de pruebas o ensayos para demostrar la conformidad de acuerdo con el reglamento, el organismo de certificación acreditado en Colombia podrá aceptar pruebas y ensayos realizados en el exterior efectuados en laboratorios acreditados por organismos de acreditación reconocidos por la Cooperación Internacional de Acreditación de Laboratorios, ILAC (por sus siglas en inglés) o en su defecto de reconocido prestigio.

C.2.

Certificación de conformidad de productos

Como ya se mencionó, los equipos utilizados en minería deben demostrar que cumplen con los requisitos establecidos en la Resolución 90708 de agosto 30 de 2013, Anexo General del RETIE,

por medio del Certificado de Conformidad de Producto expedido por un organismo de certificación acreditado por la ONAC.

Se debe cumplir con los requisitos y procedimientos establecidos en los artículos 7° y 8° del Decreto 2269 de 1993 por el cual se organiza el Sistema Nacional de Normalización, Certificación y Metrología, o aquellos que lo modifiquen, adicionen o sustituyan y los criterios de acreditación de la norma ISO/IEC 17065 y los sistemas de certificación de producto establecidos en la norma ISO/IEC 17067, en la versión más actualizada.

ANEXO D.

RESPONSABILIDADES, PROGRAMA DE CAPACITACIÓN, ENTRENAMIENTO Y COMUNICACIONES

Para la correcta implementación y adaptación de esta guía, se establecen unas responsabilidades y temas sugeridos en el programa de capacitación.

Titular del derecho minero, el explotador y el empleador.

En materia de seguridad concerniente a la atmósfera minera y ventilación, se deben garantizar como mínimo los recursos necesarios para la ejecución del plan de ventilación adecuado a las necesidades de las labores.

Responsable de la labor subterránea.

Es la persona calificada y capacitada, responsable de la ejecución técnica de los trabajos que se realizan en una mina o en una labor subterránea, la cual es nombrada por el titular o explotador minero según el Artículo 7, Decreto 1886 de 2015 (MIN-MINAS, 2015). Además de las funciones delegadas, el responsable técnico de la labor subterránea tiene las siguientes funciones en materia de seguridad en cuestiones atmosféricas:

- **Capacitaciones.** Programar capacitaciones en relación con la ventilación y atmósfera minera para el personal. Se deben abarcan como mínimo los siguientes temas: componentes del aire y de la atmósfera minera, características de los gases y contaminantes

presentes en la mina, Valores Límites Permisibles, socialización del circuito de ventilación de la mina, mantenimiento de equipos, accesorios e infraestructura soporte de la ventilación, equipos de medición de gases, lectura de los tableros de registro de mediciones atmosféricas y disposiciones en materia de ventilación según el Reglamento de Seguridad en Labores Mineras Subterráneas.

- **Capacitación para el encargado de la supervisión de la ventilación.** La persona encargada de la supervisión de la ventilación, adicionalmente de recibir la capacitación para el personal minero debe asistir a la siguiente capacitación: manejo de los equipos de detección de gases; diligenciamiento del tablero, libro o planilla de registro de las medidas atmosféricas, y medición de gases en los diferentes frentes de trabajo subterráneos. Se recomienda que el encargado de la supervisión de la ventilación esté capacitado y haga parte de la brigada de emergencia de la empresa.
- **Evacuación de la mina.** Cuando se ponga en riesgo la seguridad del personal por falencias en la ventilación o por fallas de la energía eléctrica por la que se suspenda la ventilación, el responsable técnico de la labor subterránea quien se encuentre a cargo de la seguridad de la mina o el encargado de la supervisión de la ventilación, debe ordenar la evacuación inmediata de todo el personal de la mina.
- **Aforos de ventilación.** Programar men-

sualmente las mediciones en los aforos correspondientes a los caudales de ventilación, temperaturas (seca, húmeda) y humedad relativa. De ser necesario se tomará la decisión de realizar los aforos con intervalos de tiempos más cortos.

- **Mantenimiento de equipos y vías.** Para el mantenimiento de equipos, infraestructura y accesorios se elabora un Programa de Mantenimiento Preventivo y las Hojas de Vida de los equipos. Así mismo, deben gestionarse recursos económicos, personal calificado, repuestos y materiales necesarios para el mantenimiento de los elementos que son soporte de la ventilación en la mina.
- **Dotación.** Todo el personal debe tener Elementos de Protección Personal (EPP) destinados para la protección contra material particulado y polvo, aparición de gases tóxicos o deficiencia de ventilación.

Encargado de la supervisión de la ventilación.

Es un trabajador delegado en cada turno el cual se encarga de la supervisión de la ventilación en todas las labores. El encargado debe estar capacitado para realizar esas funciones. La persona encargada de escoger al supervisor de ventilación es el responsable técnico de la labor subterránea.

Para garantizar la seguridad del personal relacionada a factores atmosféricos en cada turno de trabajo, debe elegirse una persona que reciba la capacitación necesaria para tomar decisiones pertinentes y realizar las siguientes funciones:

- Manejar equipos de mediciones de gases.
- Realizar mediciones de gases antes de iniciar cada turno en cada frente activo y frentes donde se realicen trabajos periódicos. Si se van a realizar trabajos después de ejecutar una voladura, se debe realizar la medición de gases en los frentes y las labores por donde transita el personal y los frentes que puedan verse afectados por la emanación de gases por los explosivos utilizados en la voladura.
- Revisar los equipos e infraestructura del sistema de ventilación como ventiladores, ductos, derivaciones, tabiques, puertas, entre otros.
- Actualizar diariamente los tableros y libros de registro de las mediciones atmosféricas.

Trabajadores mineros.

El personal involucrado en las labores subterráneas tiene la obligación de salvaguardar toda la infraestructura o equipos que soportan al sistema de ventilación. Así mismo, deben reportar al encargado de la supervisión de la ventilación y al responsable de la labor subterránea los daños, perturbaciones o anomalías que se presenten en la atmósfera de la mina. También es obligación para los trabajadores asistir a las capacitaciones y entrenamientos sobre seguridad y salud en el trabajo y salvamento minero que sean impartidas por la empresa o externos (ARL, ANM o Salvamento Minero de la región).

ANEXO E.

METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS Y VALORACIÓN DEL RIESGO PARA LA PREVENCIÓN DE EXPLOSIONES

Tabla E1. Descripción de actividades.

Proceso	Actividad	Tarea	Personal involucrado	Descripción de la tarea a evaluar

Tabla E2. Identificación de peligros.

Proceso	No.	Indicador del factor de riesgo	Fuente del peligro	Riesgo

Tabla E3. Valoración del riesgo.

Proceso	Zona/ Lugar	Actividades	Tareas	Rutinario (Si / No)	Probabilidad de ocurrencia				Evaluación del riesgo				Valoración	
					Peligro	ATEX	Fuentes de ignición		Efectos posibles	Nivel de Deficiencia	Nivel de Exposición	Nivel de Consecuencia	Nivel de Riesgo (NR) e intervención (ND*NE*NC)	Interpretación del NR

Tabla E4. Análisis de las opciones de reducción del riesgo.

Interpretación del riesgo				Controles				
Zona/Lugar	Peligro	Nivel de riesgo	Aceptabilidad del riesgo	Eliminación	Sustitución	De ingeniería	Administrativo	Elementos de Protección Personal

ANEXO F.

ENSAYOS MÍNIMOS PARA LA EVALUACIÓN Y TOMA DE DECISIONES FRENTE AL RIESGO DE EXPLOSIÓN

Tabla F1. Resumen de los ensayos mínimos para la evaluación y toma de decisiones frente al riesgo de explosión.

ENSAYOS	DESCRIPCIÓN
Metano	
Análisis de desorción	Con este ensayo se busca determinar el contenido total de metano asociado al carbón. Este parámetro es utilizado para determinar el nivel de deficiencia asociado al metano en la metodología de evaluación de riesgo de explosión. Así mismo, es un parámetro que puede usarse para calcular la ventilación requerida para la dilución del metano.
Polvo de carbón	
Concentración Mínima Explosiva (Límite Inferior de Explosividad)	Este parámetro corresponde a la concentración mínima requerida de polvo de carbón para que se pueda presentar una explosión. Cabe resaltar que esta concentración puede variar para cada tipo de carbón. Este parámetro es utilizado para determinar el nivel de deficiencia asociado al polvo de carbón en la metodología de evaluación de riesgo de explosión.
Inertización	Con este ensayo se determina el porcentaje de material inerte necesario para neutralizar el polvo de carbón. Este parámetro es utilizado para las campañas de neutralización en la mina y para verificar que estas campañas están siendo efectivas para neutralizar el polvo de carbón.
Granulometría	Este ensayo permite determinar qué tan finogranular se encuentra el polvo de carbón, lo cual está estrechamente relacionado con su explosividad. La granulometría media es utilizada en la metodología de evaluación de riesgo como un parámetro para estimar el nivel de deficiencia asociado al polvo de carbón.
Porcentaje de cenizas	Una vez obtenidas las muestras de polvo de carbón tomadas en campo, se realiza este ensayo con el fin de determinar el porcentaje de polvo de carbón que compone la muestra, ya que al momento del muestreo se pueden venir contaminantes, tales como: caliza, rocas, etc. Es muy importante saber cuál es la cantidad de polvo de carbón exento de cenizas, puesto que, para la evaluación de riesgo la concentración de polvo es un parámetro que se evalúa.
Severidad de explosión	Con este ensayo se busca determinar la presión máxima que puede alcanzar la explosión y la velocidad máxima de aumento de presión con el tiempo, con la que se determina la constante característica (K_{max}). Dichos parámetros son empleados para el diseño de sistemas contra explosiones como sellos o compuertas.

ANEXO G.

ELEMENTOS AUDIOVISUALES

Universidad Nacional de Colombia y Agencia Nacional de Minería. (diciembre de 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 [Archivo de Vídeo]. YouTube. https://youtu.be/-9QyH_aTje4

Universidad Nacional de Colombia y Agencia Nacional de Minería. (diciembre de 2021). Implementación de la metodología de gestión del riesgo de explosión [Archivo de Vídeo]. YouTube. <https://youtu.be/PcuIRDJyjIw>

Universidad Nacional de Colombia y Agencia Nacional de Minería. (diciembre de 2021). Monitoreo y control del gas metano [Archivo de Vídeo]. YouTube. <https://youtu.be/xU4qFCtPtQA>

Universidad Nacional de Colombia y Agencia Nacional de Minería. (diciembre de 2021). Muestreo de polvo de carbón [Archivo de Vídeo]. YouTube. <https://youtu.be/vIhTJo9nw4Y>

Universidad Nacional de Colombia y Agencia Nacional de Minería. (diciembre de 2021). Uso del equipo CEDEM 1000 [Archivo de Vídeo]. YouTube. <https://youtu.be/Tz5VAFhaR28>

REFERENCIAS DE ANEXOS

• Botta, N. (2015). Dinámica de las explosiones industriales (1ra ed.). Red Proteger. https://www.redproteger.com.ar/editorialredproteger/serieexplosiones/30_Dinamica_Explosiones_

Industriales_%201a_edicion_Diciembre2015.pdf

- Cambridge Dictionary. (2021). Canister. Cambridge University Press. <https://dictionary.cambridge.org/es/diccionario/ingles/canister>
- Cejalvo, A. (s.f.). NTP 369: Atmosferas potencialmente explosivas: instalaciones eléctricas. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. INSHT. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, España. https://www.insst.es/documents/94886/326827/ntp_369.pdf/6d14e4e6-7d2c-4a3c-b160-1e6dc407943a
- Consorcio EG Carbón – Metano. (2016). Estrategias para el aprovechamiento del gas metano asociado a los mantos de carbón en explotaciones bajo tierra (Informe N°004-2016). Unidad de Planeación Minero Energética. http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Estrategias_para_el_aprovechamiento_del_Gas_Metano.pdf
- De la Puente, G. (2014). Incendios en minería subterránea. Seguridad Minera. <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/incendios-en-mineria-subterranea/>
- Decreto 2269 de 1993. Por el cual se organiza el Sistema Nacional de Normalización, Certificación y Metrología. 16 de noviembre de 1993. D.O. No. 41110.
- Decreto 1886 de 2015. Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en Labores Mineras Subterráneas. 21 de septiembre de 2015. D.O. No. 49642.

- Ex Testing & Certification. (2020). Equipment Protection Levels. <https://www.extesting.com.au/protection-levels/>
- Harris, M. (2018). Investigaciones recientes de NIOSH sobre el polvo de roca. National Institute for Occupational Safety and Health – NIOSH. U.S. Department of Health & Human Services. <https://www.cdc.gov/spanish/niosh/mining/topics/polvoRoca.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (2015). Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional – GTC 45. <https://idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/gtc450.pdf>
- Laboratorio Oficial J.M. Madariaga – LOM. (2006). Guía para la elaboración del plan de prevención contra explosiones en instalaciones de minería subterránea. Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. Dirección General de Política Energética y Minería (DGPEM). Gobierno de España. <https://energia.gob.es/mineria/Seguridad/Guias/Gu%C3%ADas/2002-Guia-atex-mineria-subterranea.pdf>
- Ley 1562 de 2012. Por la cual se modifica el sistema de riesgos laborales y se dictan otras disposiciones en materia de salud ocupacional. 11 de julio de 2012. D.O. No. 48488.
- Medic, L. (2012). Análisis de la viabilidad de las barreras de explosión pasiva en galerías de sección reducida [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid].
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). Glosario técnico minero. Bogotá D.C., Colombia. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/698204/GLOSARIO+MINERO+FINAL+29-05-2015.pdf/cb7c030a-5ddd-4fa9-9ec3-6de512822e96>
- Navarro, F. (2013). El Triángulo y el Tetraedro del Fuego. Revista Digital INESEM. <https://revista-digital.inesem.es/gestion-integrada/el-triangulo-y-el-tetraedro-del-fuego/>
- Organización Internacional de Normalización – ISO. (2016). Flame arresters – Performance requirements, test methods and limits for use (ISO 16852). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:16852:ed-2:vi:en>
- Ortega Ramos, C. A., Franco Bonfante, T. M., Blandón Montes, A., & Molina Escobar, J. M. (2018). Evaluación del riesgo de explosividad del gas metano en minería subterránea de carbón, caso de la cuenca del Sinifaná, Colombia. Boletín de Geología, 40(1). <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegelogia/article/view/7961/8136>
- Resolución 90708 de 2013 [Ministerio de Minas y Energía]. Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE. 30 de agosto de 2013. D.O. No. 48904.
- U.S. Geological Survey – USGS. (1997). Coalbed Methane--An Untapped Energy Resource and an Environmental Concern. Energy Resource Surveys Program. <https://webharvest.gov/peth04/20041017073627/http://energy.usgs.gov/factsheets/Coalbed/coalmeth.html>



AGENCIA NACIONAL DE
MINERÍA

PLAN DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN
DE EXPLOSIONES POR METANO Y
POLVO DE CARBÓN EN LAS MINAS
SUBTERRÁNEAS DE COLOMBIA



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA