

MODELO EN LA PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE EXPLOSIONES

DE METANO Y

POLVO DE CARBÓN

E N E R O D E 2 0 2 4

Autor: Gloria Catalina Gheorghe

INFORMACIÓN DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Todos los derechos reservados. No se permite la reproducción total o parcial de ninguna parte de esta obra, ni su comercialización ni su publicación en cualquier medio, sin el permiso previo y escrito de Propiedad Intelectual de SURA S.A., 2024.

ELABORADO POR: GLORIA CATALINA GHEORGHE

- Ingeniera de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia.
- Magister en Salud Ocupacional y Ambiental de la Universidad del Rosario.
- Especialista en Ingeniería Contra Incendios y Explosiones de la Universidad Nacional de Colombia.
- Especialista en Seguridad Minera. Escuela de Minas de Alés, Francia.
- Especialista en Gerencia en Salud Ocupacional. Universidad Jorge Tadeo Lozano.

DESCARGO DE RESPONSABILIDAD

La guía técnica presenta un modelo de gestión del riesgo de explosiones de metano y polvo de carbón con el propósito de prevenir y mitigar estos eventos en la minería subterránea. Como todo modelo de gestión del riesgo, parte de caracterizar el proceso minero e identificar los peligros que pueden derivar en una explosión, entender sus consecuencias, seleccionar e implementar los controles más apropiados, evaluar de manera permanente la efectividad de las intervenciones y hacer las mejoras que se requieren para reducir el riesgo de explosión. La organización debe desarrollar capacidades para ir mejorando sus medidas de intervención en función de la dinámica de la mina, los cambios en el método de explotación, equipos y otros, buscando siempre que los peligros estén bajo control para reducir el riesgo. De otra parte, el entendimiento sobre las explosiones subterráneas sigue en permanente investigación y, en consecuencia, los métodos más efectivos para prevenir su ocurrencia.

Prólogo	07
1 Introducción	08
1.1 Contexto de las explosiones en minería subterránea en Colombia.	08
1.2 Lecciones aprendidas de investigaciones de explosiones.	10
1.3 Marco legal.	16
2 Entendiendo las explosiones	18
2.1 Definiciones y tipos de explosiones	19
2.1.1 Definición de explosión.	19
2.1.2 Clasificación por la velocidad de la reacción.	20
2.2 Variables que influyen en la severidad de las explosiones	24
2.2.1 Combustibles: metano y polvo de carbón.	24
2.2.2 Fuentes de ignición.	27
3 Modelo en la prevención y mitigación de explosiones de metano y polvo de carbón	29
3.1 La gestión del riesgo de explosiones	30
3.2 Etapas 1: caracterización del proceso	33
3.3 Etapas 2: Identificación de los peligros asociados a explosiones	35
3.3.1 Metano.	35
3.3.2 Polvo de carbón.	35
3.3.3 Fuentes de ignición.	39
3.4 Etapas 3: Evaluación del riesgo de explosión de la mina	39
3.4.1 Determinación del nivel de riesgo de explosión.	40
3.4.2 Evaluación de riesgos asociados a metano.	41
3.4.3 Evaluación de riesgos asociados al polvo de carbón.	42
3.4.4 Evaluación de riesgos de fuentes de ignición.	43

INDICE

3.5	Etapla 4: Identificar e implementar los controles más apropiados	44
3.5.1	Medidas preventivas.	45
3.5.2	Medidas de mitigación.	52
3.5.3	Medidas de soporte.	55
3.6	Etapla 5: Monitoreo de la efectividad y mejora continua	
3.6.1	Evaluación de tendencias en las concentraciones de gases.	57
3.6.2	Efectividad en la inertización del polvo de carbón.	57
3.6.3	Investigación de explosiones.	58
4	Conclusiones y recomendaciones	61
	Bibliografía	62

L I S T A D E T A B L A S		PG.
Tabla 1.	Recuento de las 20 explosiones más catastróficas en minería subterránea de carbón en Colombia. Período 2005-2023	09
Tabla 2.	Síntesis de los resultados de las investigaciones realizadas por la ANM de cuatro explosiones en minas subterráneas de carbón	14
Tabla 3.	Síntesis de los planes y medidas de control establecidas en el reglamento de seguridad minera para la prevención de explosiones	17
Tabla 4.	Productos gaseosos de una explosión de metano y de una de polvo de carbón	21
Tabla 5.	Variables a considerar del metano y del polvo de carbón	25
Tabla 6.	Fuentes de ignición frecuentes en minería	28
Tabla 7.	Elementos requeridos para realizar muestreos de polvo de carbón y análisis sobre su sensibilidad a la explosión	38

L I S T A D E G R Á F I C A S		PG.
Gráfica 1.	Pentágono de explosividad.	19
Gráfica 2.	Perfil típico de una deflagración.	20
Gráfica 3.	Conceptos de peligro, riesgo y gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST).	30
Gráfica 4.	Peligros, riesgos y efectos asociados a una explosión primaria de metano y secundaria de polvo de carbón.	31
Gráfica 5.	Jerarquía de controles.	32
Gráfica 6.	Modelo de gestión del riesgo de explosiones de metano y polvo de carbón.	33
Gráfica 7.	Medidas contra explosiones de metano y polvo de carbón.	45
Gráfica 8.	Objetivos de una investigación de explosiones.	58
Gráfica 9.	Protocolo de 20 pasos en la investigación de explosiones de metano y polvo de carbón.	59

LISTA DE ECUACIONES		PG.
Ecuación 1.	Concentración de polvo de carbón	37
Ecuación 2.	Tasa de depósito del polvo de carbón	38
Ecuación 3.	Nivel de riesgo de explosión	40
Ecuación 4.	Flujo de gas metano	41
Ecuación 5.	Relación de dilución de los gases.	42

LISTA DE FOTOS		PG.
Foto 1.	Elementos mínimos requeridos para la realización del muestreo.	36



PRÓLOGO

Las explosiones de metano y polvo de carbón representan la segunda causa de muerte en la industria minera en Colombia, y han causado el mayor número de eventos catastróficos en términos de pérdidas de vidas humanas. Estas también causan enormes daños a la infraestructura, tienen consecuencias reputacionales para el sector minero, requieren muchos recursos por parte de las entidades interesadas (titular minero, Administradora de Riesgos Laborales (ARL), autoridad minera y las entidades que hacen parte de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), entre otras); además, la atención de emergencias derivadas supone enormes riesgos de seguridad y salud en los socorredores mineros.

Las investigaciones han mostrado que las explosiones que han ocurrido en nuestras minas eran prevenibles y fueron la consecuencia de una gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) centrada en procurar demostrar cumplimiento, y no en controlar los peligros de manera efectiva. Se encontró ausencia o debilidad en controles como: la ventilación, la inertización de polvo de carbón, la selección y el mantenimiento de equipos, el entrenamiento de los colaboradores, la supervisión para la toma de decisiones, el plan de emergencias, entre otros.

Sin embargo, prevenir una explosión no es un objetivo inalcanzable, por lo cual se propone un modelo de gestión para prevenir y mitigar las explosiones de metano y polvo de carbón en minas subterráneas. Los elementos que en este se proponen no difieren de lo que considera un modelo de gestión del riesgo, que implica caracterizar el proceso, identificar los peligros, evaluar los riesgos, diseñar e implementar las medidas de control y monitorear su efectividad.

No obstante, la clave radica en que las organizaciones no solo implementen los controles adecuados, sino que, también, tengan la sinergia de mejorar su desempeño de seguridad cada día.

Esta guía se divide en tres capítulos, en el primero, Introducción, se presenta un contexto de las explosiones en Colombia, una síntesis de algunas lecciones aprendidas de investigaciones y el marco legal. En el segundo capítulo, Entendiendo las explosiones, se presenta la definición de explosión, los tipos de explosiones en minería y las variables que aumentan y reducen sus riesgos; ya que si queremos reducirlos, debemos entender su naturaleza. En el tercer capítulo, Modelo en la prevención y mitigación de explosiones de metano y polvo de carbón, se incluye el contexto de lo que es un modelo de gestión y, posteriormente, se abordan las cinco etapas de gestión del riesgo. Sobre los controles necesarios, aunque se presenta un gráfico con las principales medidas, se hace énfasis en los que son más efectivos y alcanzables.

La guía busca ser muy práctica en términos de recomendaciones; no obstante, se debe tener presente que el entendimiento sobre las explosiones subterráneas sigue en permanente investigación y, en consecuencia, los métodos más efectivos para prevenirlas. Por último, se presentan algunas conclusiones y recomendaciones y, finalmente, la relación de la bibliografía consultada.

Esta guía técnica hace parte de un set de guías enfocadas en la gestión de la seguridad y la salud en minería; por ende, se recomienda que también sean consultadas las guías técnicas: “Lo esencial en la gestión de seguridad y salud en la minería”, “Diseño y gestión de la ventilación en minería subterránea” y la guía “Sistema de gestión de emergencias en minería y atención prehospitalaria”.

1 INTRODUCCIÓN

Preguntas que se discutirán en el capítulo:

- ¿Son las explosiones un problema de seguridad que requiere atención?
- ¿Cuáles han sido las lecciones aprendidas de las explosiones?
- ¿Qué requisitos legales deben cumplir los empleadores con respecto al control de explosiones?

1.1 Contexto de las explosiones en minería subterránea en Colombia

De acuerdo con el registro de la Agencia Nacional de Minería (ANM), han perdido la vida, como consecuencia de riesgos mineros, 2098 trabajadores desde el año 2005 al año 2023, es decir, en un periodo de 19 años (ANM, 2024). La principal causa de mortalidad en la minería se debe a fallas geomecánicas, con un total de 577 muertes; la segunda causa son las explosiones, en 226 han muerto 520 trabajadores. De las 226 registradas, 179 corresponden a explosiones en minería subterránea de carbón, en las cuales 482 mineros perdieron la vida y 253 resultaron heridos.

Además de la alta frecuencia, las explosiones en minería subterránea de carbón han sido responsables de las mayores tragedias en la industria minera en Colombia; en tan solo 20 explosiones registradas en el período de 2005 al 2023, murieron 299 trabajadores mineros. En la Tabla 1 se presenta una relación de los eventos más catastróficos.

N	Fecha de explosión	Departamento	Municipio	Fallecidos	Heridos
1	16/06/2010	Antioquia	Amagá	73	0
2	03/02/2007	Norte de Santander	Sardinata	31	0
3	26/01/2011	Norte de Santander	Sardinata	21	6
4	14/03/2023	Cundinamarca	Sutatausa	21	0
5	26/02/2022	Boyacá	Tasco	15	0
6	30/05/2022	Norte de Santander	El Zulia	15	0
7	23/06/2017	Cundinamarca	Cucunubá	13	1
8	24/08/2021	Boyacá	Tópaga	12	1
9	04/04/2020	Cundinamarca	Cucunubá	11	4
10	06/08/2009	Antioquia	Fredonia	9	3
11	31/07/2020	Norte de Santander	El Zulia	9	0
12	11/06/2021	Boyacá	Socha	9	2
13	05/12/2017	Boyacá	Corrales	9	1
14	06/02/2007	Boyacá	Gámeza	8	0
15	01/08/2008	Cundinamarca	Cucunubá	8	2
16	02/12/2008	Boyacá	Gámeza	8	0
17	23/11/2010	Cundinamarca	Guachetá	7	1
18	21/09/2011	Boyacá	Socha	7	2
19	20/04/2023	Cundinamarca	Cucunubá	7	4
20	02/04/2020	Norte de Santander	San Cayetano	6	7

Tabla 1. Recuento de las 20 explosiones más catastróficas en minería subterránea de carbón en Colombia. Período 2005-2023. Fuente: ANM.

De los reportes de emergencias de la ANM y las explosiones que fueron investigadas, se tiene que en 179 de ellas participó el metano como combustible, por lo cual vamos entendiendo que la ventilación es una medida indispensable para prevenir la formación de atmósferas explosivas. Sin embargo, la más devastadora es la explosión primaria de metano y secundaria de polvo de carbón, como la mayoría de las registradas en la Tabla 1.

Más allá del lamentable número de pérdidas de vidas humanas, estos eventos han dejado

muchas secuelas en familias que ahora no cuentan con su cabeza de hogar, en comunidades afectadas por los largos cierres de las minas y en pérdidas económicas; a esto se le suman los riesgos de seguridad y salud mental que han supuesto la atención de tales eventos por parte de los miembros del Servicio Nacional de Salvamento Minero, coordinado por la ANM.

Por ello, ARL SURA ha desarrollado esta guía con el objetivo de aportar en la construcción de conocimiento en la prevención de las explosiones de metano y polvo de carbón.

1.2 Lecciones aprendidas de investigaciones de explosiones

En la Tabla 2 se presentan algunos datos y conclusiones de las investigaciones realizadas por la autoridad minera, ANM, de cuatro explosiones. Esta información fue consultada en la página web de la entidad, en la cual se publican algunas de las lecciones aprendidas de las investigaciones realizadas.

DATOS	EVENTO 1
Fecha: 05/12/2017	Principales causas: • Ausencia en la inertización y control del polvo de carbón. • Ausencia del plan de ventilación y suspensión de la ventilación en el horario no laboral. • Selección inadecuada de los equipos para operar la mina. • Deficiencias en el procedimiento, la implementación y la supervisión del monitoreo y control de las condiciones atmosféricas. • Ausencia de procedimientos de trabajo seguro para la operación e instalación de equipos y redes eléctricas. • Ausencia de equipos de autorrescate. • Deficiencias en la preparación de emergencias y control de turnos de trabajo.
Hora: 9:00 a. m.	
Lugar: municipio de Corrales, departamento de Boyacá	
Fallecidos: 9	
Heridos: 1	
Tipo de evento: explosión primaria de metano y secundaria de polvo de carbón.	

DATOS	EVENTO 1
Hipótesis sobre la fuente de ignición: chispa eléctrica proveniente de un martillo eléctrico no protegido.	• Conclusión: “la explosión tuvo lugar por realizarse una evaluación deficiente de las condiciones convenientes para operar; un desarrollo inadecuado de normas para estándares, procedimientos y reglas inconsistentes; una investigación insuficiente respecto a las materias y los equipos para operar en la mina; y un diseño inadecuado de estándares, especificaciones y criterios para la operación en la misma.”
Número de causas: 13 Tipo de causas (NTC 3701): Causas inmediatas: • Condiciones inseguras: 5 Actos inseguros: 1 Causas básicas: • Factores del trabajo: 7	

DATOS	EVENTO 2
Fecha: 04/04/2020	Principales causas: • Ausencia de personal con las competencias mínimas en la dirección de la operación. • Ventilación subterránea deficiente. • Ausencia de medidas para reducción e inertización del polvo de carbón. • Deficiencias en el monitoreo de la atmósfera minera. • Incumplimiento del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).
Hora: 12:20 p. m.	
Lugar: municipio de Cucunubá, departamento de Cundinamarca	

DATOS	EVENTO 2
Fallecidos: 11	- Sostenimiento deficiente de las labores mineras. - Protocolos de seguridad deficientes. - Deficiente planificación y respuesta ante emergencias. Conclusión: “ las causas anteriores se traducen en una causa básica principal: gestión deficiente de los riesgos mineros. Como consecuencia, el 4 de abril de 2020 tuvo lugar una explosión de gas metano, cuya explosión secundaria de polvo de carbón se propagó por cuatro minas más a una velocidad promedio de 200 m/s, con un frente de presión que causó afectaciones en la infraestructura y una atmósfera tóxica con cobalto (CO); lo que causó la muerte de asfixia por sofocación a diez trabajadores de la mina La Lomita y un trabajador de la mina Veracruz, e intoxicaciones severas a cuatro trabajadores más, quienes fueron rescatados por equipos de la ANM.”
Heridos: 4	
Tipo de evento: explosión primaria de metano y secundaria de polvo de carbón.	
Hipótesis sobre la fuente de ignición: - Chispa eléctrica de equipo no protegido (ventilador). - Fricción por caída de roca. - Agente explosivo no apto para minería de carbón.	
Número de causas: 23 Tipo de causas (NTC 3701): Causas inmediatas: - Condiciones inseguras: 11 Causas básicas: - Factores del trabajo: 11 - Factores personales: 1	

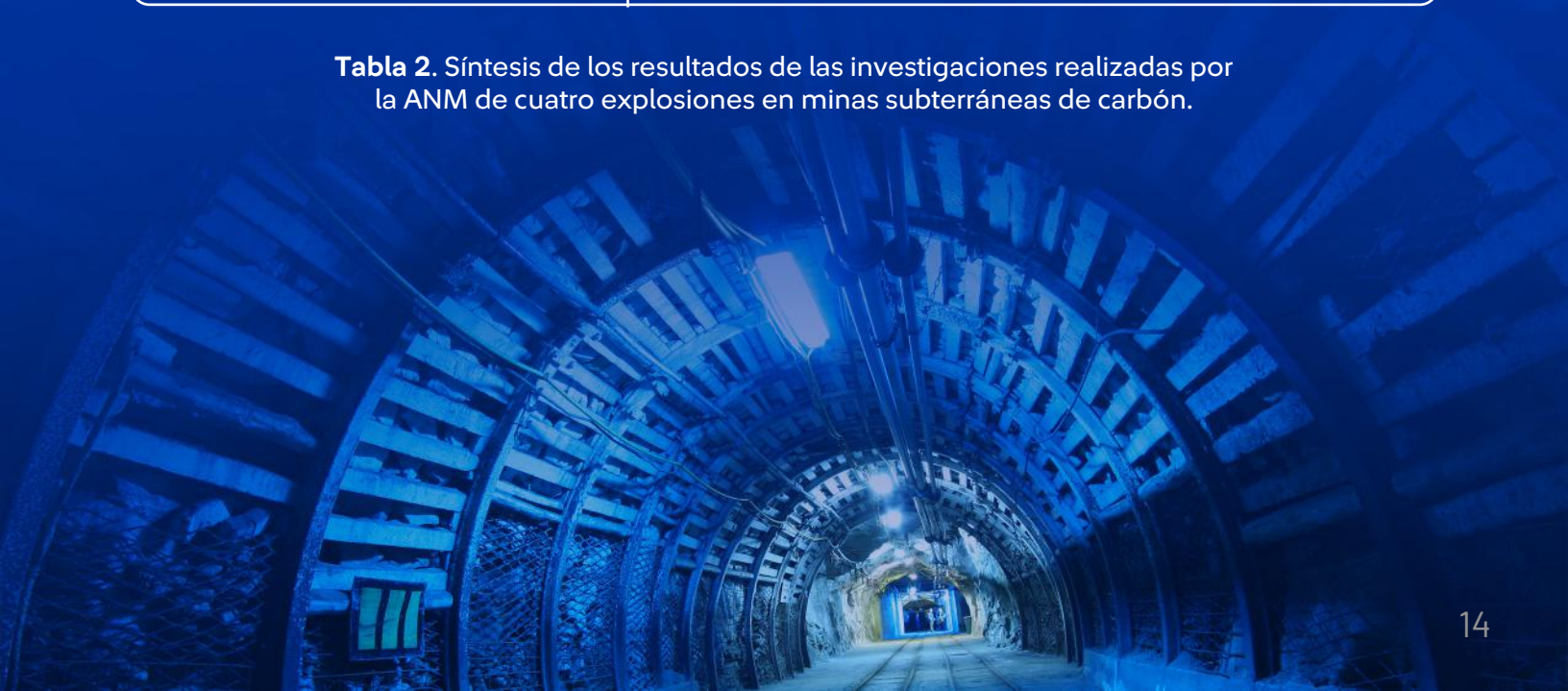
DATOS	EVENTO 3
Fecha: 24/08/2021	Principales causas y conclusión: “ Una inadecuada evaluación del riesgo y condiciones geológicas que propiciaron altas emanaciones de gas metano, sumado al hecho de una deficiente ventilación que no evitó la estratificación del gas y su dilución, dieron lugar a concentraciones y acumulaciones de metano que generaron una explosión inicial con una fuente de ignición de origen eléctrico; producto del uso de equipos que no eran protegidos y no contaban con mantenimiento preventivo.
Hora: 8:50 a. m.	
Lugar: municipio de Tópaga, departamento de Boyacá	
Fallecidos: 12	
Heridos: 2	

DATOS	EVENTO 3
Tipo de evento: explosión primaria de metano y secundaria de polvo de carbón.	La explosión primaria dio origen a una combinada de polvo de carbón, este se encontraba con la granulometría y concentración suficientes; además de poseer otras características que lo hacían altamente inflamable, no existía ninguna medida de gestión para su control. La explosión tuvo efectos sobre la totalidad de la mina, se generaron temperaturas que oscilaron entre los 300 a 1200 OC, una onda de presión y altas concentraciones de monóxido de carbono, lo que causó la muerte de asfixia por sofocación precedida de intoxicación por monóxido de carbono a doce trabajadores y afectaciones físicas y psicológicas a dos sobrevivientes. La ausencia de supervisión y procedimientos adecuados y una baja cultura de la seguridad en la organización, influyó en que los trabajadores, también, tuvieran una baja percepción del riesgo y no evacuaran ante las alarmas de los equipos de medición de gases, previo a la explosión.
Hipótesis sobre la fuente de ignición: chispa eléctrica proveniente de un martillo eléctrico no protegido	
Número de causas: 39 Tipo de causas (ICAM): - Defensas fallidas: 3 - Condiciones individuales y grupales: 11 - Factores del trabajo: 16 - Factores humanos: 1	
Factores organizacionales: 8	

DATOS	EVENTO 4
Fecha: 26/02/2022	Principales causas y conclusión: - Ausencia de un circuito de ventilación principal forzada. - Deficiencia en el circuito de ventilación secundaria. - Ausencia en el planeamiento minero. - Controles y seguimiento deficientes con relación a las emanaciones recurrentes de gas metano (230 registros de concentraciones de metano (CH₄) en 5% durante los dos meses previos a la explosión). - Uso de sustancias explosivas no aptas para minería de carbón. - Equipos eléctricos no protegidos. - Ausencia de controles para la generación e inertización del polvo de carbón. - Ausencia de barreras para la mitigación de la explosión. - Cultura permisiva frente a concentraciones de CH₄ en rango de explosividad (sin evacuación a superficie).
Hora: 3:50 p. m	
Lugar: municipio de Tasco, departamento de Boyacá	
Fallecidos: 15	
Heridos: 0	
Tipo de evento: explosión primaria de metano y secundaria de polvo de carbón.	

DATOS	EVENTO 4
Hipótesis sobre la fuente de ignición: • Uso de la sustancia pirotécnica no segura para minería de carbón. • Chispa por lámpara sin seguridad intrínseca.	• Ausencia de un sistema de monitoreo continuo de CH₄ que alertara de una situación de peligro. • Deficiencia en la supervisión de protocolos de seguridad referente al ingreso del autorrescatador. • Baja percepción del riesgo por parte de los colaboradores. • Conclusión: el conjunto de reglas de la organización con respecto a la seguridad y la supervisión tenían deficiencias que condujeron a propiciar condiciones ambientales en los equipos y en la percepción del riesgo de los colaboradores; tres elementos que conjugados materializaron que se presentaran cinco condiciones para el desenlace trágico de la muerte de quince trabajadores. Dichas condiciones son: una atmósfera explosiva por metano, una fuente de ignición con la energía de activación suficiente, polvo de carbón en el rango de explosividad, la ubicación de los trabajadores al interior de las labores mineras y la ausencia de medidas de mitigación como barreras de polvo inerte. La explosión también tuvo como consecuencia derrumbes, daños en equipos y en los servicios de la mina. Se estima que el radio de impacto fue de 180 m y con afectaciones en un 1km de labores mineras.
Número de causas: 51 Tipo de causas (ICAM): • Jerarquía de defensa ausentes: 8 • Acciones individuales o de grupo: 16 • Factores del trabajo: 19 • Factores organizacionales: 8	

Tabla 2. Síntesis de los resultados de las investigaciones realizadas por la ANM de cuatro explosiones en minas subterráneas de carbón.



Consideraciones de las lecciones aprendidas de las investigaciones presentadas:

1 Si bien una explosión es el resultado de que se conjuguen tres elementos como oxígeno, fuente de ignición y combustible, del análisis causal se deduce que estos elementos tienen lugar debido a factores del trabajo, organizacionales, humanos o defensas fallidas que condujeron a que estos peligros no estuvieran controlados. Por ejemplo, la formación de una atmósfera explosiva de metano no se da por el solo hecho de que emane metano del manto de carbón, sino por la deficiencia en el control, en este caso la ventilación forzada; así como una chispa eléctrica es el resultado de utilizar un equipo no protegido para minería y sin el mantenimiento propio.

Por tanto, las explosiones son eventos prevenibles en tanto que los eventos precipitantes son predecibles y prevenibles, es decir, son el resultado de no tener los peligros adecuadamente controlados. En la investigación Modelo jerárquico de causalidad de 100 eventos (Gheorghe, 2020), se concluyó que “las decisiones incorrectas y las condiciones ambientales desfavorables están condicionadas e influenciadas por el conjunto de las reglas de juego del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SSTT)”.

2 Los controles de ingeniería más importantes que participaron en la causalidad fueron: ausencia o deficiencia en la ventilación, ausencia de controles de polvo de carbón como inertización e inyección de agua, selección inadecuada de equipos eléctricos y sin mantenimiento y uso de agentes explosivos no seguros para minería de carbón. También se presentaron deficiencias en los siguientes controles administrativos: ausencia de monitoreo continuo de gases, procedimientos de trabajo seguro, capacitación de los colaboradores y supervisión deficiente, por ejemplo, se median gases, pero no se tomaban decisiones inmediatas como evacuar la mina ni se adoptaban mejoras en la ventilación al detectar que era frecuente que se superaran los valores límites permisibles para el metano.



3 En los eventos que tuvieron lugar en la mañana la fuente de ignición fue una chispa eléctrica y en los eventos que tuvieron lugar en la tarde, al cierre del turno, la fuente de ignición más probable estuvo asociada a voladuras. En todos los casos, la ventilación era inadecuada y no prevenía la formación de atmósferas explosivas. Había, además, deficiencia en los procedimientos de seguridad, dado que se ejecutaba la tarea pese a la condición ambiental insegura, como operar un equipo eléctrico no protegido. Ahora bien, si el procedimiento fuera adecuado, es decir se midieran gases y la respuesta al identificar concentraciones por encima de los Valores Límites Permisibles (VLP) fuera suspender la actividad y evacuar las personas a superficie, la explosión no habría ocurrido en ese día, a esa hora ni en ese

lugar; sin embargo, si no se toman medidas para que la situación de riesgo no se presente frecuentemente, el control administrativo será insuficiente (medir y suspender), ya que no controla el peligro.

Además, la respuesta no debería ser suspender indefinidamente la producción, con el tiempo la organización comienza a ser tolerante con las condiciones de riesgo inminente recurrentes; es decir, que los controles administrativos solo evitan que el evento se presente en un momento determinado, pero no reducen el riesgo, aunque, por supuesto, son también necesarios. En conclusión, las tendencias peligrosas deben conducir a realizar mejoras.

1.3 Marco legal

En Colombia el marco de referencia normativo con respecto a los requisitos de seguridad para la prevención de explosiones de metano y polvo de carbón está contenido en el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas, Decreto 1886 del 21 de junio de 2015, modificado parcialmente por el Decreto 944 del 1 de junio del 2022. Específicamente los siguientes títulos:

- El título II, “Ventilación”, artículos 35 al 65 del Decreto 1886 de 2015. Los artículos 46, 47, 48, 49, 51 y 65 fueron modificados por los artículos 8 al 13 del Decreto 944 de 2022.
- El título II, “Control de polvo”, Capítulo 1, “Polvos inflamables”, artículos 66 al 70 del Decreto 1886 de 2015.

En la Tabla 3 se presenta una síntesis de los principales requisitos y planes de seguridad que debe implementar el operador minero.

Plan de ventilación y circuito de ventilación forzada • Dec. 1886 de 2015 (art. 35, 36 y 37). • Dec. 944 de 2022 (art. 8).	• El plan de ventilación es el programa que contiene el diseño, la implementación, los procedimientos y el monitoreo de la ventilación. Este debe estar diseñado por una persona competente y cumplir con los objetivos necesarios, entre ellos prevenir la formación de atmósferas explosivas. • El circuito de ventilación forzada debe tener todos sus elementos enmarcados en los planos de ventilación. En total son catorce elementos, entre ellos: distribución de la corriente de aire, equipos y accesorios de ventilación, caudales, velocidades, sistemas de control, puntos de medición, sistemas, entre otros.
Estudio geológico • Dec. 1886 de 2015 (art. 62).	• Concentraciones de gas metano en los mantos de carbón del proyecto minero. Este es un elemento esencial para determinar el flujo de gas metano y calcular el caudal de aire necesario para evitar la estratificación del gas.
Análisis de riesgos • Dec. 1886 de 2015 (art. 63 y 64).	• Identificación de zonas propensas a desprendimientos de gas metano. Debe contener el estudio geológico y otros elementos como posibles tipos de desprendimientos y antecedentes, los planos geológicos estructurales, la profundidad y el rumbo del fracturamiento del manto.
Medidas de control del polvo de carbón y propagación de explosiones • Dec. 1886 de 2015 (art. 66-70).	• Evitación de las acumulaciones. • Neutralización del polvo de carbón con polvo de caliza, en porcentaje mínimo del 80 %; se debe evaluar la efectividad en la inertización. • Neutralización del polvo de carbón con agua. • Barreras de polvo inerte o recipientes con agua.
Responsable técnico de la labor minera. • Dec. 944 de 2022 (art. 2).	Es responsable de: • Designar en cada turno el responsable de supervisar la ventilación. • Determinar los casos en los que debe suspenderse la ventilación. • Determinar otros gases que deben monitorearse.
Monitoreo de gases • Dec. 944 de 2022. (art. 9-12). • Dec. 1886 de 2015 (art. 52).	• Debe realizarse con equipos intrínsecamente seguros y calibrados. • Se mide de manera permanente, como mínimo, oxígeno (O₂), cobalto (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxidos de nitrógeno (NO_x) y ácido sulfhídrico (H₂S); sus resultados deben estar disponibles y ser comunicados.
Procedimientos y capacitaciones • Dec. 1886 de 2015 (art. 9).	• Procedimientos de monitoreo ambiental y otros. • Registros de las capacitaciones en ventilación al personal minero.

Tabla 3. Síntesis de los planes y medidas de control establecidas en el Reglamento de Seguridad Minera para la Prevención de Explosiones.

2

ENTENDIENDO LAS EXPLOSIONES

Preguntas que se discutirán en el capítulo:

¿Qué es una explosión y cuáles son los criterios de clasificación?



¿La prioridad debe estar en el control del metano, del polvo de carbón o de ambos peligros?



¿Cuáles son las variables que reducen o aumentan el riesgo de explosión o su severidad?



2.1 | Definiciones y tipos de explosiones

2.1.1 | Definición de explosión

Una explosión es una conversión súbita de energía potencial, mecánica o química, en energía cinética que se da con la producción y emisión de gases bajo presión. Los gases hacen trabajo mecánico (NFPA 921, 2021), entonces el requisito esencial para que un evento sea considerado una explosión, no es que haya combustión, sino el aumento de la presión.

Las explosiones de metano o polvo de carbón se clasifican como explosiones químicas, la generación de altas presiones es producto de un proceso ¹exotérmico. Por lo tanto, se distinguen dos elementos: un frente de presión y un frente de llama. Las explosiones, además de generar presiones destructivas y fuego, generan gases como dióxido de carbono y monóxido de carbono.

En la Gráfica 1 se identifican los elementos necesarios para que tenga lugar una explosión, dependiendo del combustible se requiere de una concentración específica para que esta se presente.



Gráfica 1. Pentágono de explosividad

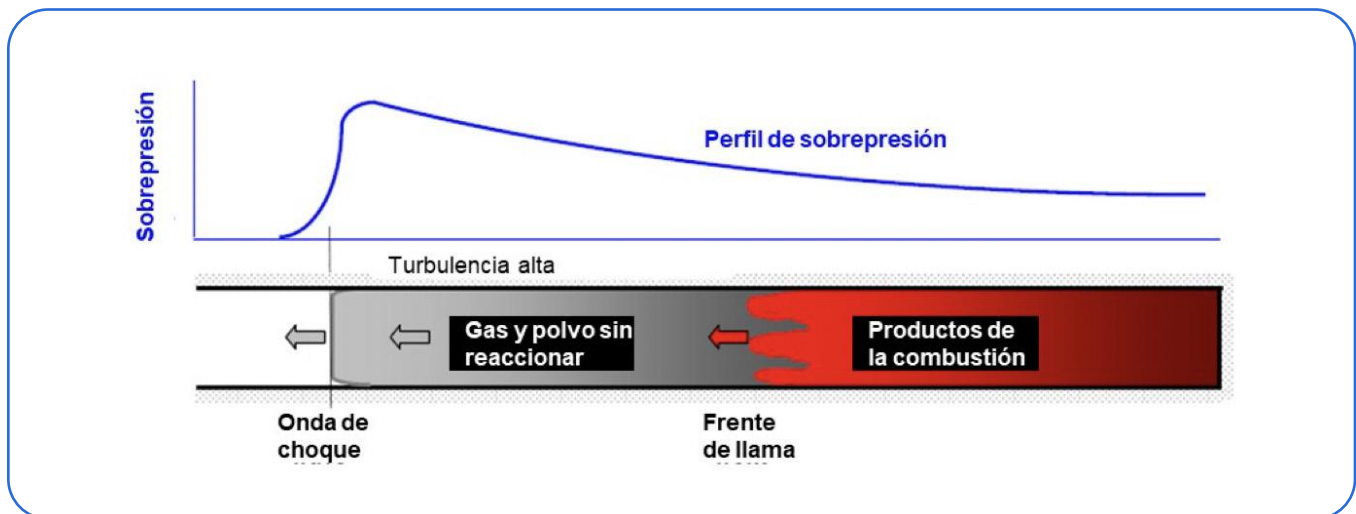
¹Reacción exotérmica es aquella en la que se libera energía en forma de calor.

2.1.2 | Clasificación por la velocidad de la reacción

Las explosiones se pueden clasificar de acuerdo con la velocidad que desarrollen:

- **Deflagración:**

es una reacción que propaga los compuestos sin reaccionar a una velocidad que es menor a la del ²sonido. La Gráfica 2 muestra el perfil de una deflagración, en esta la onda de choque viaja más rápido que el frente de llama, en consecuencia, el frente de presión y el frente de llama están desacoplados. Por tanto, los daños mecánicos ocasionados se verán metros más adelante, y no en el punto en el que se origina.



Gráfica 2. Perfil típico de una deflagración.
Fuente: McPherson M. J, 2012.

- **Detonación:**

es una reacción exotérmica que propaga los compuestos sin reaccionar a una velocidad mayor que la del sonido. El frente de llama y el frente de presión viajan a la misma velocidad, es decir, acoplados. Puede alcanzar presiones de 20 bares y velocidades de 2.000 m/s, es imposible que un ser humano sobreviva si es directamente afectado por esta. Elaine Oran ha explicado el mecanismo de transición entre una deflagración y una detonación, así:

“Las llamas generan choques, especialmente en espacios confinados y en presencia de obstáculos, y aumentan la fuerza de los choques que pasan a través de un flujo de llamas turbulento. A su vez, las interacciones de la onda de choque con las llamas crean e impulsan la turbulencia en las llamas de manera mucho más dinámica que las inestabilidades de una combustión estándar. Una mayor turbulencia significa una mayor tasa de liberación de energía y más fluctuaciones en el material que no ha reaccionado, lo que promueve la formación de centros de ignición o “puntos calientes”. Las detonaciones aparecen cuando las condiciones locales en el material que no ha reaccionado permiten que se forme una onda espontánea, y esta onda evoluciona hacia un choque que es lo suficientemente fuerte como para convertirse en una detonación que puede propagarse a través de mecanismos de gradiente de reactividad” (Oran, 2007).

²La velocidad del sonido a nivel del mar y 20 oC es de 343,2 m/s.

2.1.3 Clasificación de las explosiones en minería por el combustible y la secuencia

- **Explosiones por metano:**

generalmente son una deflagración, es decir, explosiones con un alcance limitado, pese a ello han causado muchas muertes y heridos graves debido a quemaduras, impactos e intoxicación con monóxido de carbono. Estas han sido las más frecuentes en nuestra industria minera. Las deflagraciones de grisú, mezcla explosiva de aire y metano, desarrollan presiones de 1 kPa a máximo 500 kPa (5 bares), su onda de presión rara vez es mayor a 100 kPa.

- **Explosiones de polvo de carbón:**

tienen lugar cuando en alguna zona se presentan acumulaciones de polvo por encima de la ³Concentración Mínima Explosiva (CME) y una fuente de ignición con la energía suficiente. El polvo de carbón no requiere en estricto modo de una explosión de metano previa para producirse, por ejemplo, un explosivo no seguro o el impacto de un coche que se desprenda de la guaya por un inclinado, puede ponerlo en suspensión y generar chispas por fricción; estos son mecanismos que pueden aportar la energía necesaria para explosionarlo.

En la *Tabla 4.* se identifica que los gases producto de una explosión de metano o de polvo de carbón, no solo generan atmósferas tóxicas o irrespirables debido al monóxido de carbono y la deficiencia del oxígeno, sino que pueden dar lugar a otros gases en el ⁴rango de explosividad, por ejemplo, hidrógeno y monóxido de carbono, ver *Tabla 4.*

Concentración	Metano			Polvo de carbón	
Gas%	8%	9%	12%	110 g/m ³	550 g/m ³
CO: monóxido de carbono	-	0,5	0,8	0,1	2,8
CO ₂ : dióxido de carbono	9,2	10,7	5,9	3,2	3,2
H ₂ : hidrógeno	-	0,3	8,5	-	1,0
CH ₄ : metano	-	0,2	0,4	-	0,1
O ₂ : oxígeno	3,8	0,5	0,5	17,0	3,1

Tabla 4. Productos gaseosos de una explosión de metano y de una de polvo de carbón. Fuente: NSW.

³Concentración Mínima Explosiva (CME): es la concentración 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.

⁴Rango de explosividad: intervalo de concentración de una sustancia presente en el aire dentro del cual esta puede ser explosiva.

- **Explosiones híbridas de metano y polvo de carbón:**

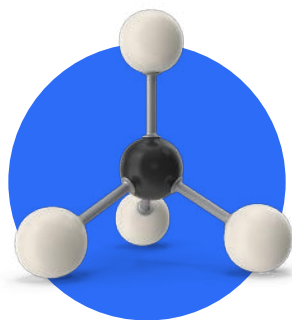
son eventos en los cuales se forma una atmósfera explosiva con metano en concentraciones por debajo del límite inferior de explosividad y polvo fino de carbón con concentraciones adecuadas. Es por ello que cuando sean superadas las concentraciones de metano en 1,5 %, se debe evacuar la mina, puesto que esto es evidencia de que en otro punto puede existir una atmósfera potencialmente explosiva, debido a la presencia de polvo de carbón y metano en concentraciones solo del 3 %.

- **Explosión primaria de metano y secundaria de polvo de carbón:**

se trata de una reacción en cadena. En la explosión primaria de metano la temperatura aumenta rápidamente a los 2.000 oC causando expansión en el volumen de los gases, esta rápida expansión genera una onda de choque que se propaga a través de las labores mineras. Estas ondas de choque interactúan con capas dispersas de polvo de carbón que en suspensión pueden explotar en el ambiente comprimido y caliente. La ignición de las partículas dispersas podría entonces liderar una segunda explosión, la cual puede ser más destructiva que la primera. Generalmente, la distribución de temperaturas de las partículas que explotan no permite que se desarrolle una detonación, y la onda espontánea produce un frente de llama y choque desacoplado, aunque sigue siendo una explosión muy destructiva que seguirá propagándose si cuenta con suficiente combustible y oxígeno.



Consideraciones sobre el tipo de explosiones



Ahora bien, de la inmensa mayoría de eventos que se han presentado, en alrededor de 159 de 179 explosiones registradas en los últimos 19 años, podrían catalogarse como deflagraciones por metano con efectos muy locales, aunque también causaron muchos daños en términos de pérdidas de vidas y heridos graves. De otro lado de la evidencia de las investigaciones, se ha encontrado, con muy pocas excepciones, que en todos los eventos con más de siete víctimas mortales se trataron de explosiones primarias de metano y secundarias de polvo de carbón, que, aunque fueron muy graves y en algunos casos afectaron varias minas, no fueron detonaciones.

De algunas investigaciones que ha realizado la autoridad minera y de los reportes de las emergencias mineras atendidas por la ANM, se deduce que es poco probable que alguna de las 175 explosiones que se han registrado haya sido una detonación. Pese a que han ocurrido explosiones muy destructivas y trágicas como la del 2010 en Amagá, con 73 víctimas mortales, o las que tuvieron lugar en el 2022 y 2023, los efectos destructivos de estos eventos no se explican solo por las presiones generadas, sino por la debilidad en la infraestructura de las minas para reducir los efectos. En muchos casos, por ejemplo, había ausencia de sostenimiento o el existente era solo en madera.

Entonces, la pregunta es:

¿la prioridad debe estar en el control del metano?,

dado que es posible que en más de un 98 % de las explosiones haya participado este gas, o ¿debe ser la prioridad el control del polvo de carbón?, debido a que por la participación de este combustible las explosiones se han propagado con consecuencias catastróficas. Por ejemplo, en solo 20 eventos han perdido la vida 299 trabajadores. La lectura de este autor es que ambos peligros deben controlarse con la misma prioridad, dada la frecuencia de explosiones de metano y debido a que han sido el inicio de eventos más catastróficos, del mismo modo, el polvo de carbón puede generar una explosión sin necesidad de una previa de metano y puede propagarla por toda la mina y otras con las que se comunique.

2.2 Variables que influyen en la severidad de las explosiones

2.2.1 | Combustibles: metano y polvo de carbón

En la Tabla 5 se presentan variables a considerar del metano y polvo de carbón en cuanto a su potencial de ignición. Conocer esta información nos permite tomar mejores decisiones con respecto a las medidas de prevención.

VARIABLE	METANO (CH ₄)	POLVO DE CARBÓN
Densidad	0,66 kg/m ³ a 20 oC y 100 kPa.	1330 kg/m ³ (depende de las características del carbón).
Origen	El metano existe en el manto de carbón en dos formas: Gas libre: moléculas que se pueden mover entre los poros y la red de fracturas. Gas absorbido: moléculas que son retenidas en la estructura del carbón; alrededor del 95 % del gas se presenta de esta forma.	Se origina polvo de carbón en el arranque, transporte, cargue y descargue del carbón. Mientras más mecanizado el método de explotación, mayor polvo fino puede generarse; también se genera en el recorrido de las bandas transportadoras.
Energía Mínima de Ignición (EMI) ⁵	0,3mJ	3mJ
Temperatura Mínima de Ignición (TMI)	537 oC (temperatura de autoignición)	⁶ TMI _n >450oC
		⁷ TMI _c <150oC
Límites de explosividad ⁸	A 20 OC: LEL: 5 %, UEL: 15 % A 50 OC: LEL: 4,5 %, UEL: 16 %	(10 - 500 kg/m ³). Granulometría de 0,038 a 0,85 mm.

⁵Energía Mínima de Ignición (EMI): energía eléctrica mínima acumulada en un condensador, que al momento de liberarse es suficiente para generar la ignición.

⁶Temperatura Mínima de Ignición en nube (TMI_n): es la temperatura más baja a la cual una suspensión de polvo en aire produce espontáneamente la ignición y puede propagar la llama.

Valor límite permisible (Dec. 1886/2015)	1 %: evacuar del frente. 1,5 %: evacuar la mina.	Se deben adoptar medidas para evitar acumulaciones de polvo de carbón con tamaño inferior a 0,5 mm.
Clasificación de las minas (Dec. 1886 de 2015)	Categorías por concentración de metano: I. Minas o frentes de trabajo no grisutuosos = 0 % II. Minas o frentes débilmente grisutuosos ≤ 0,3 % III. Minas o frentes fuertemente grisutuosos > 0,3 %	Pulverulenta inflamable si cumple alguna de las siguientes condiciones: 1) Categoría I por CH ₄ : si el polvo de carbón tiene un contenido de MV>16%. 2) Categoría II o III por CH ₄ : si el polvo de carbón tiene un contenido de MV>14%.

Tabla 5. Variables a considerar del metano y polvo de carbón.

Consideraciones de las variables que influyen en la explosividad del metano y el polvo de carbón:

1

La desorción del metano producirá que se estratifique en el techo y las partes altas de la mina, debido a que es un gas más ligero que el aire. Sin embargo, por la difusividad de los gases, el metano se difundirá a favor del gradiente de concentraciones y migrará de aquellas mayores a menores; si asumimos que la concentración de metano que sale del manto está entre el 90 % y el 99 % en el proceso de difusividad, pasará por concentraciones del 15 % al 5 %, en el rango de explosividad. El objetivo, entonces, es **reducir el tiempo** en el cual el metano transita por concentraciones explosivas y llegue rápidamente a valores seguros del 1%, y esto se logra con una **velocidad de ventilación** que prevenga la estratificación del metano.

Temperatura Mínima de Ignición en capa (TMIC): es 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.

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.

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.

Material Volátil – MV: es el porcentaje de productos gaseosos del carbón.

2

El rango de explosividad del metano se amplía con el incremento de la temperatura y la presencia del polvo de carbón. Por ello, controlar la temperatura en equipos y las concentraciones de polvo de carbón es necesario para prevenir las explosiones; adicionalmente, se debe considerar que a partir del 2 % de metano ya hay condiciones muy peligrosas en la mina.

3

El polvo de carbón requiere diez veces más de energía que el metano para la ignición, no obstante, el valor necesario, 3 mJ, también es pequeño, por lo cual no es difícil tener una fuente de energía disponible para una explosión por este factor.



4

Las siguientes son variables que influyen en la explosividad del polvo de carbón:

Concentración del polvo de carbón: ello debido a que están estrechas las distancias entre las partículas. Li, Q. et al, encontraron lo siguiente:

- La velocidad de propagación de la llama se incrementa linealmente con el aumento de la concentración del polvo de carbón.
- Los parámetros de severidad de la explosión P_{max} y dP/dt_{max} , presentan una distribución en forma de U invertida.
- El rango de concentraciones en el cual se alcanzaron valores de $P_{máx}$ y dP/dt_{max} más alto fue de 250 a 500 g/m³.

Por estas razones, las medidas orientadas a reducir a la generación de polvo de carbón son muy recomendadas.



Contenido de material volátil:

- en investigaciones realizadas por diferentes autores se ha reportado que parámetros como la TMI, el LEL y la EMI, disminuyen cuando el carbón tiene mayor contenido de volátiles, sin importar si el ensayo de explosividad del polvo de carbón se realiza en capa o en nube. Ello se debe a que el material volátil en esencia es "gas" aglomerado en carbón, y es más fácil inflamar un gas que un sólido. Sin embargo, también se han presentado explosiones catastróficas en minas con carbones con bajos contenidos de material volátil.



Contenido de cenizas y de humedad:

- son atenuantes en los valores de presión máxima de explosión. Por lo general, contenidos altos de estos factores ocasionan que sean necesarias temperaturas, concentraciones y EMI más altas. En este caso, se debe considerar la inyección de agua como una medida de control.

2.2.2 | Fuentes de ignición

Las siguientes son las fuentes de ignición más comunes en minería:

Chispa incendiaria:

es aquella en la cual la combustión y producción de calor tiene lugar en la medida que la partícula es consumida, tiene origen químico y, usualmente, se obtiene por golpes de una pieza de hierro oxidado que contiene aluminio o magnesio.

Chispa por fricción:

puede ocurrir por el impacto de los equipos de arranque en minerales con altos contenidos de cuarzo o pirita. Para rocas con un contenido de cuarzo y pirita mayor a 50 %, el potencial de temperatura incendiaria es intermedio. Se recomienda reducir la velocidad de los equipos y utilizar aspersores de agua por detrás para bajar la probabilidad de chispas por fricción.

Chispas eléctricas:

son el medio más eficiente para la ignición de mezclas explosivas de metano debido a que superan temperaturas de 1100 °C. Las fuentes comunes son cables eléctricos, electrobombas, ventiladores, tableros eléctricos, lámparas mineras, transformadores, entre otros. En Colombia las chispas eléctricas provenientes de equipos no protegidos han sido la fuente de ignición más frecuente de explosiones. Posteriormente, se discutirán los modos de protección recomendados.

Explosivos:

los explosivos no permitidos, las sustancias pirotécnicas o aquellos fabricados de manera artesanal, pueden fácilmente aportar la energía necesaria para la ignición, inclusive de polvo de carbón, sin necesidad de una explosión previa de metano. En muchas de las explosiones catastróficas en Colombia se ha determinado que la fuente ignición fue una voladura.

Así se trate de explosivos permitidos, podrían crear una ignición si el barreno es sobrecargado con explosivo, si no queda bien retacado o si se hace con un material inadecuado. Es por ello por lo que debe garantizarse es que las voladuras se realicen con agentes explosivos que cuenten con certificación para operar en atmósferas explosivas; además, es indispensable realizarlas con estrictos protocolos de seguridad y por parte de personal competente.

Chispas electrostáticas:

la electricidad estática es un fenómeno de superficies que da lugar a la transferencia de electrones de un átomo a otro, se puede generar cuando algunos cuerpos se cargan después de ser frotados unos contra otros. Por tanto, las bandas transportadoras deben ser en material antiestático, así como los ductos de ventilación secundaria.

Llama abierta y contrabando:

se dan como producto del uso de cigarrillo y otras sustancias alucinógenas. También, el ingreso de teléfonos, cámaras fotográficas, relojes y demás dispositivos electrónicos que no cuenten con seguridad para operar en atmósferas explosivas. Las películas de polvo de carbón que se acumulan en los equipos, cuando estos se calientan, podrían generar combustión del polvillo, por lo cual es necesario hacerles un mantenimiento adecuado para evitar sobrecalentamientos y lavarlos frecuentemente para eliminar las acumulaciones.

Combustión espontánea:

la oxidación del carbón puede ser una fuente para su autocalentamiento y derivar en su combustión. Estos procesos pueden ser una fuente de ignición debido al incremento de temperatura por autocalentamiento del carbón o combustión que genere una llama abierta.

Tabla 6. Fuentes de ignición frecuentes en minería

3

MODELO EN LA PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE EXPLOSIONES DE METANO Y POLVO DE CARBÓN

Preguntas que se discutirán en el capítulo:

¿Qué es esencial
para lograr
prevenir que
ocurra una
explosión?



En la evaluación del
riesgo de explosión,
¿lo más importante es
medirlo o entender su
naturaleza y efectos?



Además de los controles
de ingeniería, ¿qué otras
medidas son necesarias
para prevenir y mitigar
explosiones?



3.1 | La gestión del riesgo de explosiones

¿Es posible prevenir que ocurra una explosión y mitigar sus efectos como pérdidas de vidas humanas, heridos y daños en la infraestructura? Sí, es posible ya que podemos intervenir en las causas que la generan.

Exploremos los siguientes conceptos para entender mejor el proceso:



Peligro

Es una fuente potencial de daño o de energía que puede desplegarse (Viner, 1991). Para reconocer un peligro, Pryor P. (2019) propone: “algo es un peligro si al eliminarlo no hay riesgo”. El peligro no debe confundirse con fallas en el control, por ejemplo, ventilación deficiente.



Riesgo

Es la consecuencia o efecto, los cuales tienen algún grado de incertidumbre (Pryor P., 2019). Un riesgo puede requerir la interacción de varios peligros y un peligro producir diferentes consecuencias. El riesgo, definido como la consecuencia por la probabilidad, corresponde al nivel del riesgo.



Gestión de SST:

“el objetivo de la gestión de SST es tener bajo control los peligros que puede contener la organización, para así minimizar los riesgos. Esto puede lograrse entendiendo los modelos de causalidad, lo cual resultará en el mejoramiento de la seguridad y salud de las personas en el trabajo” - AIHS, 2019.

Gráfica 3. Conceptos de peligro, riesgo y gestión de SST.



Gráfica 4. Peligros, riesgos y efectos asociados a una explosión primaria de metano y secundaria de polvo de carbón.

De las Gráficas 3 y 4 podemos concluir que lo esencial para prevenir una explosión es tener los peligros bajo control, dicho de otra forma, evitar que la energía se despliegue. También, buscamos mitigar los efectos de la explosión en caso de que esta se genere, entre ellos, evitar muertes de trabajadores, heridos y daños a la infraestructura. En el caso de las explosiones, los peligros se dividen en tres categorías principales: primero, la formación de atmósferas explosivas debido al metano; segundo, los aportes energéticos debido a equipos eléctricos, voladuras u otras fuentes de ignición; y tercero, atmósferas explosivas debidas al polvo de carbón.

Un ejemplo simplificado de los controles sería el siguiente: un peligro como la formación de una atmósfera explosiva de metano lo podemos controlar mediante una ventilación forzada que prevenga la estratificación del gas, equipos eléctricos protegidos que prevengan el aporte energético (envolvente antideflagrante, seguridad intrínseca, entre otros modos de protección eléctrica) y un control del polvo de carbón mediante aspersores de agua para reducir su generación y la inertización con carbonato de calcio. Además, para mitigar los efectos de una explosión, puede considerarse:

instalar barreras pasivas para evitar que esta se propague, instalar un sostenimiento propio que garantice que no se produzca un derrumbe, disponer de adecuadas rutas de evacuación y provisionar con autorrescatadores a los trabajadores; con estas medidas se podrá facilitar que aquellos que no fueron alcanzados por el frente de llama y presión no sean afectados por el monóxido de carbono y puedan evacuar. Existen otros controles administrativos indispensables como el monitoreo de gases y la capacitación, sin embargo el objetivo de este ejercicio era ilustrar el proceso.

Aunque una situación deseada sea eliminar el peligro, ello no siempre es posible ya que la solución no es viable técnica y económicamente con las opciones tecnológicas disponibles, por ejemplo, un proceso de arranque, cargue, descargue y transporte del carbón 100 % “limpio”, es decir, que no se genere polvo de carbón. Por lo tanto, se debe buscar gestionar el riesgo. Entendemos que el sistema (la mina), tiene peligros que debemos tener bajo control y lo haremos adoptando medidas de intervención y priorizando controles de eliminación, aislamiento, sustitución y controles de ingeniería, sin embargo también deben implementarse controles administrativos y en el individuo.

¹²**Autorrescatador:** es un aparato o equipo personal de protección respiratoria, diseñado para escapar de atmósferas contaminadas o con deficiencia de oxígeno (Dec. 1888 de 2015).

Las intervenciones del nivel I y II, de la Gráfica 5, son efectivas en prevenir y mitigar el riesgo y las del III son el soporte para las primeras, por lo cual son indispensables. Ejemplo de ello es que un trabajador adecuadamente entrenado puede tomar decisiones acertadas en un evento en el cual se produzca falla de un control de ingeniería, pero, a su vez, el monitoreo de gases será esencial para determinar si la ventilación está cumpliendo su objetivo.



Gráfica 5. Jerarquía de controles. Fuente: SWA, 2011

En síntesis, el propósito esencial es proteger la vida e integridad de los colaboradores, para lo cual debemos prevenir la ocurrencia de la explosión y mitigar sus efectos si esta se materializa. En la **Gráfica 6** se presenta el modelo de gestión del riesgo de explosiones, cada una de las etapas se abordarán en las secciones subsiguientes.



Gráfica 6. Modelo de gestión del riesgo de explosiones de metano y polvo de carbón

3.1 | **Etapas 1:** caracterización del proceso

Objetivo:

identificar las tareas específicas, las personas que lo ejecutan o se pueden ver afectadas, el cómo se relaciona con otros procesos, los equipos y las tecnologías que se utilizan. Si se desea controlar los peligros asociados a un proceso, lo primero que debe hacerse es entenderlo.

- 1



Características del depósito minero.
- 2



Método de explotación, de arranque, cargue y descargue, transporte, almacenamiento y procesos de conminución del mineral que se realicen. Se incluyen los equipos, los insumos como explosivos, los sistemas utilizados para cada proceso y las personas involucradas.
- 3



Los diferentes servicios y sistemas con los que cuenta la mina, como ventilación, bombeo y red de agua, electrificación, fortificación, iluminación, entre otros; así como las personas encargadas de estos.
- 4



La infraestructura y los equipos con los que cuenta para la respuesta a emergencias, las rutas de evacuación, la red de aspersión de agua, los botiquines, los equipos de rescate minero, el refugio minero, la cantidad de brigadistas y su nivel de entrenamiento.
- 5



La vulnerabilidad de la mina debido a la operación de otras y las comunicaciones con estas.

Consideraciones sobre la etapa 1

Para realizar intervenciones que conduzcan a reducir el riesgo de explosión, es fundamental basarse en la realidad de la mina. Por ejemplo, en una mina en la cual se explotan mantos con contenidos de metano superiores a 2,8 m³/t, es recomendable realizar perforaciones horizontales del manto de carbón para permitir el drenaje previo del metano. Otro ejemplo sería que, si la altura de las vías en la mina no supera los dos metros, es probable que no haya espacio para instalar barreras de agua o caliza, por lo que se debería considerar alternativas como el uso de aspersores de agua. En conclusión, el diseño del sistema de control debe estar en sintonía con las características específicas de la operación minera.

3.3 | **Etapa 2:** identificación de los peligros asociados a explosiones

Objetivo:

entender cómo se manifiestan los peligros (metano, fuentes de ignición y polvo de carbón) que pueden desencadenar una explosión y recoger información de ciertos estándares con los cuales estos se caracterizan para compararlos con los valores de referencia.

3.3.1 | *Metano*

Son tres los elementos requeridos para poder evaluar los riesgos asociados al metano:



Estudio de desorción del gas metano para determinar su contenido en m³/ton en cada uno de los mantos y bloques de carbón explotados.



Estudio geológico para identificar zonas susceptibles de desprendimientos de gas.



Registros históricos de mediciones de metano y otros gases en diferentes sectores.

3.3.2 | *Polvo de carbón*

Se podría indicar que se requiere el estudio de explosividad del polvo de carbón, pero ¿a qué se refiere este? Se refiere a una línea base que comprende varios aspectos: zonificar la mina para identificar la distribución de concentraciones de polvo de carbón con granulometría inferior a los 0,85 mm, hacer análisis próximos, realizar un ensayo para determinar el porcentaje de carbonato de calcio necesario para inertizarlo y ensayos más especializados como la CME. Sin embargo, este estudio es solo una línea base, es decir, es una fotografía que permite mapear la mina, pero si no se controla adecuadamente la acumulación de polvo de carbón, las zonas que eran consideradas de bajo riesgo, semanas

podrían ser de alto. Por lo tanto, la recomendación es: no contrate estudios de explosividad de polvo de carbón; es más estratégico diseñar un procedimiento para realizar los muestreos y análisis mínimos requeridos, dado que debe realizarse periódicamente.

A continuación, se presenta una secuencia de pasos mínimos que se deben tener en cuenta y pueden servir de base para que las organizaciones estructuren su procedimiento. Es necesario que entrenen a las personas que estarán a cargo del proceso de muestreo y del análisis de los datos:

PASO 1

determinar
los puntos
de muestreo

Muestreos del polvo de carbón

- Frentes de explotación.
- Puntos de cargue y descargue de material (tecla, tolvas, pilas, entre otros).
- Zonas en las que se transporta el carbón (recorrido de coches y locomotoras, bandas transportadoras, entre otros).
- Puntos de transferencias (tolvas y pilas).
- Zonas donde exista recirculación del aire.
- Zonas donde existan potenciales fuentes de ignición.
- Otras zonas donde se observe acumulación de polvo de carbón.

PASO 2

alistar los
elementos
necesarios para
el muestreo



Foto 1. Elementos mínimos requeridos para la realización del muestreo.

En la Foto 1 se muestra los elementos requeridos para el muestreo. Como puede apreciarse, son elementos muy básicos.

- **EPP completos:** casco con barbuquejo, gafas de seguridad, respirador de media cara con filtros para polvo N95, lámpara minera con seguridad intrínseca, overol con cintas reflectivas, cinturón minero, autorrescatador, botas con puntera de seguridad y guantes.
- Elementos básicos para el muestreo: brocha de tres pulgadas, recogedor de pala, cinta métrica, bolsas con cierre, pintura en aerosol para demarcar zona muestreada, marcadores, libreta y lapicero.
- Otros equipos: multidetector de gases.

PASO 3

realizar el
muestreo

Muestreos del polvo de carbón

- A. Verificar que las condiciones de seguridad en el sitio a muestrear sean adecuadas en cuanto a gases, estabilidad en techos, pisos y paredes.
- B. Verificar que no haya humedad en la zona a muestrear.
- C. Señalizar la zona de muestreo con el fin de realizar un segundo ejercicio para conocer la tasa de depósito del polvo de carbón en la mina.
- D. Demarcar la zona de muestreo, es decir, acotar mediante dos franjas la longitud que se planea barrer.
- E. Hacer un barrido en paredes, techo y piso, con la brocha de tres pulgadas y un recogedor, siempre y cuando se encuentren secos. Se deben recolectar, como mínimo, 100 g de polvo de carbón. Se considera polvo de carbón a los finos pasante de malla #20, menor a 0,85 mm.
- F. Almacenar las muestras en las bolsas plásticas y marcarlas para posteriormente hacer el análisis en el laboratorio; verificar que estas queden completamente cerradas.
- G. Realizar la medición del área transversal en cada zona de muestreo y la medida de longitud barrida.

PASO 4

determinar la
concentración
de polvo de
carbón

- Se calcula la concentración de polvo presente por cada sitio de muestreo con la Ecuación 1. El análisis debe realizarse con el material pasante malla #20 (0,850 mm).

$$C_{pc} = \frac{Masa}{Área * Longitud}$$

Ecuación 1. Concentración de polvo de carbón.

Donde:

C_{pc}: concentración aproximada de polvo de carbón (g/m³).

Masa: masa de polvo de carbón recolectado (g).

Área: área transversal de la galería (m²).

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

PASO 5

determinar la tasa de depósito del polvo de carbón

Cálculos

- El cálculo de la tasa de depósito del polvo de carbón se realiza con la información recolectada en el segundo muestreo, el cual se puede realizar 20 días después del primero. Se hace en las mismas estaciones escogidas para la primera recolección. La masa de polvo de carbón recolectada es tamizada (pasante malla #2 o 0,850 mm). La Ecuación 2 determina la tasa de depósito del polvo de carbón.

$$TD_{pc} = \frac{M'}{\text{Área}' * \text{Tiempo}}$$

Ecuación 2. Tasa de depósito del polvo de carbón.

Donde:

TD_{pc}: tasa de depósito de polvo de carbón (g/d/m²).

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 (m²).

PASO 6

análisis

Análisis y ensayos

- Granulométricos, próximos, petrográficos y porcentaje de inertización¹³.

PASO 7

ensayos ATEX

- Concentración mínima explosiva, temperatura mínima de ignición en nube, temperatura mínima de ignición en capa y presión máxima de la explosión.

Tabla 7. Elementos requeridos para realizar muestreos de polvo de carbón y análisis sobre su sensibilidad a la explosión.

¹³ Porcentaje de inertización: con este ensayo se determina el porcentaje de material inerte necesario para neutralizar el polvo de carbón.

Recursos:

 > conoce sobre el protocolo para realizar muestreos de polvo de carbón en el **siguiente video** realizado por la ANM y la Universidad Nacional de Colombia

[CLIC AQUÍ](#)

3.3.3 | Fuentes de ignición

Se deben identificar los equipos eléctricos, los modos de protección y el mantenimiento preventivo que reciben; los explosivos y accesorios de voladuras utilizados y las deficiencias en la realización del protocolo de voladura; los procesos de combustión espontánea y otras fuentes asociadas a energías, como riesgo de chispa por equipo mecánico en movimiento, llamas abiertas, entre otros. Ver la **Tabla 6** en la que se presenta una descripción de las principales fuentes de ignición.

Consideraciones sobre la etapa 2

Es importante entender que la etapa “Identificación de peligros” no es solo una actividad que se realiza como insumo para el diseño de los planes de control. En un ciclo PHVA (Planear, Hacer, Ejecutar y Actuar), de manera permanente se identifican los peligros, por ejemplo, al inicio de cada turno se deben monitorear los gases para comprobar si las condiciones atmosféricas son convenientes para el trabajo.

lugar; sin embargo, si no se toman medidas para que la situación de riesgo no se presente frecuentemente, el control administrativo será

insuficiente (medir y suspender), ya que no controla el peligro.

Además, la respuesta no debería ser suspender indefinidamente la producción, con el tiempo la organización comienza a ser tolerante con las condiciones de riesgo inminente recurrentes; es decir, que los controles administrativos solo evitan que el evento se presente en un momento determinado, pero no reducen el riesgo, aunque, por supuesto, son también necesarios. En conclusión, las tendencias peligrosas deben conducir a realizar mejoras.

3.4 | **Etapla 3:** evaluación del riesgo de explosión de la mina

Objetivo:

zonificar la mina en función del riesgo de explosión debido a los flujos de metano, las concentraciones de polvo de carbón y las posibles fuentes de ignición. Esta información es la base para determinar las medidas de control más apropiadas.

3.4.1 | Determinación del nivel de riesgo de explosión

En la *Guía Técnica de Prevención de Explosiones de Metano y Polvo de Carbón* desarrollada por la ANM y la UNAL, se propone una metodología para determinar el nivel de riesgo de explosión en la mina, para lo cual se utiliza la expresión de la Ecuación 3. Esta guía presenta los valores de referencia para calificar cada término de la ecuación. La medida del nivel de riesgo debe realizarse por sectores para en un plano de la mina identificar por colores tales zonas.

$$NR = ND * NE * NC$$

Ecuación 3. Nivel de riesgo de explosión.

Donde:

NR: nivel de riesgo.

ND: nivel de deficiencia, el cual es función de la presencia de metano y polvo de carbón y los controles existentes.

NE: nivel de exposición, el cual es función de los equipos que pueden ser fuente de ignición.

NC: nivel de consecuencia, comprende los resultados negativos.

Sin embargo, no debe reducirse la evaluación del riesgo a asignársele un valor cualitativo, esta no es la parte más importante. La evaluación del riesgo de explosión comprende entender los peligros que en la mina podrían dar lugar a esta, qué tan bien están controlados y decidir cómo podemos mejorarlos. A continuación, se presentan algunos elementos que deben tenerse en cuenta para evaluar el riesgo de explosión.

Recursos:

 > conoce sobre la metodología de evaluación cualitativa del riesgo de explosión en el siguiente video realizado por la ANM y la UNAL.

[CLIC AQUÍ](#)

3.4.2 | Evaluación de riesgos asociados al metano

En la sección anterior se indicó que dos de los insumos necesarios para evaluar el riesgo asociado al metano son los registros históricos de mediciones y los datos de contenido de gas metano en metros cúbicos por tonelada de carbón, por cada uno de los mantos y bloques. Con esta información se puede calcular el flujo de gas metano en cada uno de los frentes de explotación. Para ello, primero aclaremos el siguiente concepto:

Liberación del gas metano en los mantos de carbón:

como se explicó previamente, el metano se presenta en el carbón de dos formas: gas libre y gas absorbido (95 %). Cuando el manto de carbón es interceptado o perturbado por los trabajos mineros, el gradiente de presión que se crea va a resultar en el flujo a través de fracturas naturales o inducidas; es decir que, **así la mina no esté siendo explotada, el metano está continuamente liberándose**, y las emisiones más altas serán durante el arranque del carbón, tanto en explotaciones por cámaras y pilares como en el tajo largo. Sin embargo, en los tajos las emisiones son mucho más altas debido a la rápida fragmentación cuando se usa rozadora.

Las emisiones de gas dependen básicamente de las siguientes cuatro variables:



Teniendo claro estos conceptos, se propone la siguiente ecuación para determinar el flujo de gas metano por cada frente de explotación:

$$Q_g = Q_o + w (A-B)$$

Ecuación 4. Flujo de gas metano.

Donde:

Q_g : flujo total del gas metano (m^3/min).

Q_o : flujo de metano emitido cuando no se hace minería (m^3/min).

w : tasa promedio de producción (t/min).

A : contenido de gas metano antes de la desgasificación (m^3/t).

B : contenido de gas metano después de la desgasificación, si la hubo (m^3/t).

Se puede calcular el flujo de metano cuando no se hace minería (Q_0) a partir de sus concentraciones medias, medidas en días en los que no se explota carbón.

$$\text{Concentración de metano} = \frac{\text{Caudal metano}}{\text{Caudal metano} + \text{Caudal aire}}$$

Ecuación 5. Relación de dilución de los gases.

Realizamos este cálculo para conocer el flujo de gas en cada uno de los frentes de la mina, este insumo permite:



Determinar la velocidad del aire necesaria en la ventilación para prevenir la estratificación del gas.

•
•
•
•
•
•
•
•
•
•



Predecir las concentraciones de metano que se alcanzarán en los diferentes sectores de la mina en un rango de tiempo determinado. Para ello, es necesario utilizar herramientas como la dinámica de fluidos computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*). Además, se debe involucrar variables como la velocidad del aire, la topografía, la temperatura, la humedad, las concentraciones de otros gases, entre otras.

3.4.3 | Evaluación de riesgos asociados al metano

Sobre el estudio de explosividad del polvo de carbón nos interesa, en esencia, contestar dos preguntas: ¿qué tan explosivo es el polvo de carbón de nuestra mina? y ¿en qué zonas se acumula más frecuentemente en concentraciones explosivas? Para responder la primera pregunta, en la **Tabla 7** se indicaron los análisis y ensayos necesarios, la CME es un ensayo muy especializado que a la fecha no se realiza en ningún laboratorio en Colombia, una opción es el Laboratorio Oficial de Madariaga (LOM)¹⁴. En algunas muestras de polvo de carbón a las que se les practicó este ensayo en Colombia, se registraron valores de CME entre 20 a 30 g/m³; además, se ha encontrado que para inertizarlo se requiere concentraciones superiores a 90 % de caliza. Los resultados anteriores nos deben llevar a considerar que, si no se tienen resultados precisos de la mina que se explota, concentraciones entre 20 a 50 g/m³ son suficientes para explosionar. Cuando se tiene la información para responder las dos preguntas anteriores, podemos establecer controles apropiados para cada zona.

¹⁴Laboratorio Oficial de Madariaga (LOM): organismo notificado para la directiva ATEX (2014/34/UE) y certificador del esquema IECEx, norma de referencia para Colombia.

Tomemos el siguiente ejemplo: en una vía por la cual se evacua el carbón por coche, se encontró que en un lapso de tres meses se alcanza la CME, una alternativa de control viable sería inertizar con caliza todas las labores mineras. Sin embargo, también se determinó que en el sitio en el cual se hace el descargue de carbón a la tolva interna la CME se alcanza en solo dos días. Por tanto, la alternativa más práctica de control sería inyectar diariamente la zona con agua, bien sea manualmente o con aspersores. Se deduce, entonces, que el deber ser es que la organización conozca su mina con respecto a la generación de polvo de carbón y evalúe regularmente las medidas de intervención más eficientes.

3.4.4 | Evaluación de riesgos de fuentes de ignición

Evaluar las fuentes de ignición no significa identificar todas las posibles, sino evaluar el riesgo que representa cada una de ellas. A continuación, se listan algunos de los registros que deben considerarse para valorar el riesgo de las fuentes de ignición:

1

Chispas eléctricas: fichas técnicas de los equipos eléctricos para identificar el grupo al cual pertenecen, I o II, los modos de protección con los que cuentan, la temperatura máxima de funcionamiento, la temperatura máxima superficial, las indicaciones sobre mantenimiento preventivo e indicaciones de uso, entre otros aspectos.

2

Hoja de vida de los equipos: se usan estas con el objetivo de identificar ciclos de mantenimiento que se han realizado.

3

Registros históricos de gases: revisar concentraciones de monóxido de carbono para determinar zonas susceptibles a combustión espontánea.

4

Hojas de seguridad de los agentes explosivos, accesorios de voladura utilizados y procedimientos para la realización de estas.

5

Análisis mineralógicos del carbón para determinar contenido de pirita y cuarzo.

6

Registros de deflagraciones previas.

Consideraciones sobre la etapa 3

Si bien esta medida del nivel del riesgo proporciona una línea base, que sirve de referencia para verificar si se está reduciendo el riesgo en la medida en la que se van introduciendo mejoras en los controles, debe tenerse en cuenta que, en esencia, la fórmula propuesta es una multiplicación de la probabilidad, basada en qué tan bien están controlados los peligros, por la consecuencia. Entonces, si los valores del ND y del NE son pequeños porque se ha establecido que los peligros están bajo control, obtendremos un nivel de riesgo aceptable pese a que las consecuencias de una explosión siempre son muy graves, es decir, estaremos minimizando los efectos.

En riesgos con consecuencias catastróficas, como incendio o explosión, no es conveniente asignar un valor al nivel de riesgo como resultado de multiplicar la consecuencia por la probabilidad, porque en esta operación se asigna el mismo peso a cada término de la ecuación y no tiene fundamento igualar probabilidad y consecuencias.

Además, si no se cuenta con información precisa para calcular cada uno de los términos se introducen errores y al multiplicarlos magnificamos el error. Una razón más es que este cálculo solo toma en cuenta como fuentes de ignición las asociadas a equipos.

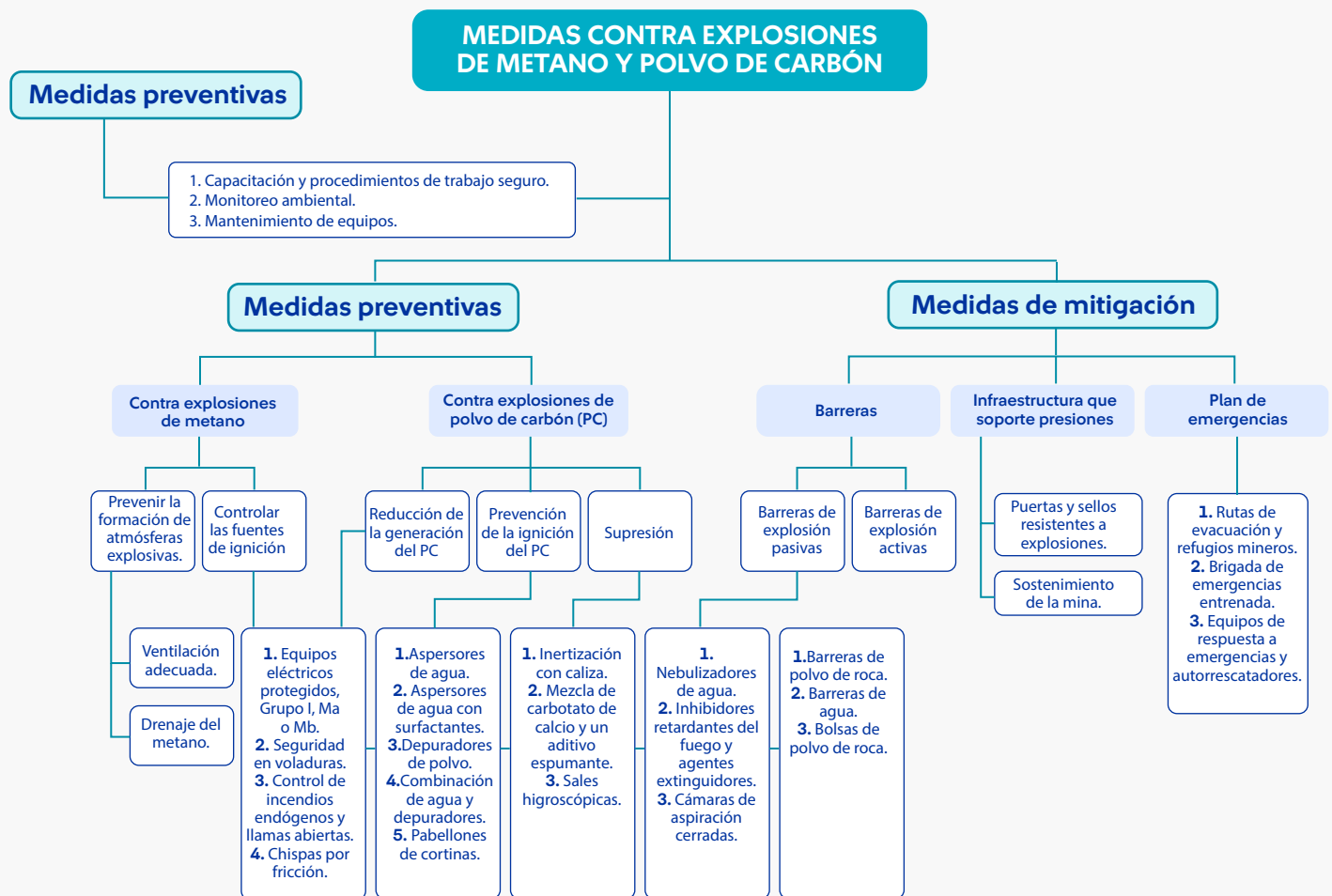
En conclusión, si bien calcular el nivel de riesgo es un indicador para medir la reducción del riesgo de explosión, “la parte más importante de los riesgos no es medirlos cualitativa y cuantitativamente, es entender su naturaleza, sus causas y sus consecuencias, y usar esta información para decidir sobre los controles” (Cross, J, 2019). Es decir, entender el riesgo de explosión comprende establecer cómo se dispersa el metano, las zonas susceptibles de desprendimientos de gas, evaluar las fuentes de ignición, zonificar la mina con respecto al polvo de carbón, determinar si los controles actuales son adecuados y establecer las medidas que deben adoptarse para controlar mejor los peligros.

3.5 | Etapa 4: identificar e implementar los controles más apropiados

Objetivo:

a partir de la evaluación del riesgo, determinar los controles más apropiados para prevenir y mitigar explosiones en la mina, además definir las medidas de soporte necesarias para garantizar su efectividad.

En la **Gráfica 7** se presenta un esquema con la relación de las principales medidas de control de explosiones de metano y polvo de carbón. En el desarrollo de esta sección se ampliará la información de las que se consideran que tienen la mejor relación costo-beneficio.



Gráfica 7. Medidas contra explosiones de metano y polvo de carbón. Adaptado y complementado de Ray, S. K et al, 2022.

3.5.1 | Medidas preventivas

3.5.1.1 Prevención de la formación de atmósferas explosivas

Ventilación forzada:

es el control más importante para prevenir la formación de atmósferas explosivas, consiste en ventilación principal forzada apoyada por ventilación auxiliar. El indicador para concluir que la ventilación de la mina es la adecuada es que se garantice que en todo momento no se superan los valores del 1 % de metano en las labores mineras y del 1,5 % en las vías de retorno.

Parámetros en la ejecución de la medida

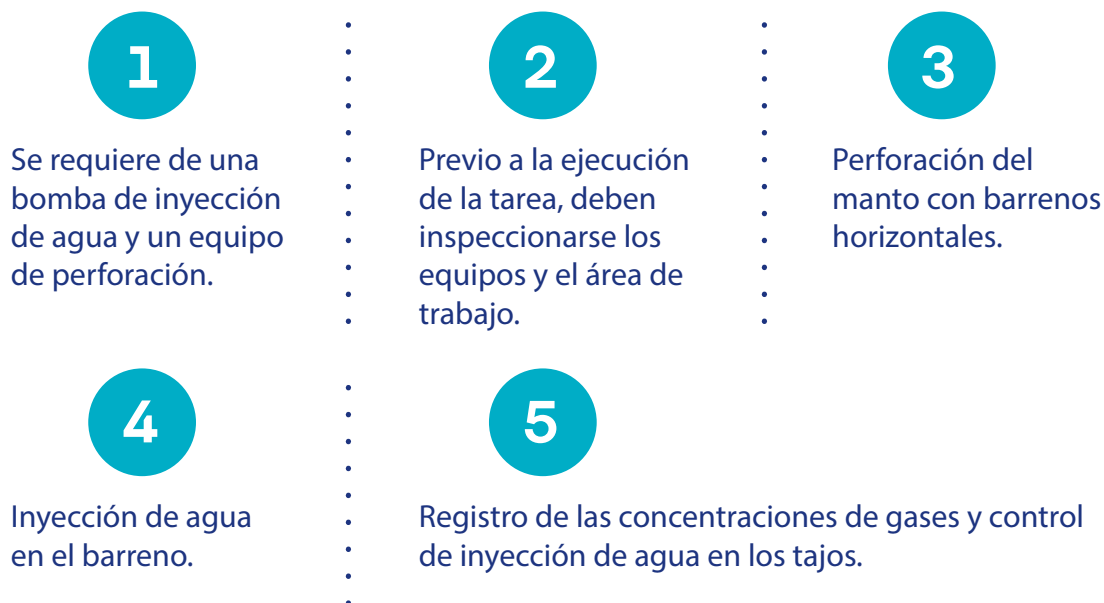
- ✓ Hay normas inexorables como que la mina debe tener una entrada y una salida y que todos los frentes de explotación deben contar con una galería base y otra de cabeza.
- ✓ La ventilación por tiro natural es insuficiente para suplir las necesidades de ventilación de una mina, es indispensable contar con un ventilador principal, de preferencia ubicado en superficie (no bajo tierra), para protegerlo en el evento de una explosión; este debe poder vencer la caída de presión de la mina y suministrar el caudal para suplir todas las necesidades.
- ✓ Desde el punto de vista de control de gases es más favorable la ventilación principal aspirante que soplante, dado que la mina está a depresión y en el evento de la parada del ventilador aumentará la presión barométrica y los gases se comprimirán, por lo tanto, no se presentarán picos de gas metano.
- ✓ Es indispensable instalar ventiladores auxiliares para direccionar el aire fresco a través de ductos y ventilar las labores ciegas. Para ello, se ha identificado que es más eficiente evitar la estratificación del gas utilizando un sistema soplante, para lo cual se debe garantizar que a la salida del ducto el flujo de aire tenga una velocidad alta y que esté lo más cerca del avance del frente posible, con el objetivo de que no se creen zonas muertas.
- ✓ Es indispensable instalar ventiladores auxiliares para direccionar el aire fresco a través de ductos y ventilar las labores ciegas. Para ello, se ha identificado que es más eficiente evitar la estratificación del gas utilizando un sistema soplante, para lo cual se debe garantizar que a la salida del ducto el flujo de aire tenga una velocidad alta y que esté lo más cerca del avance del frente posible, con el objetivo de que no se creen zonas muertas.
- ✓ El metano emitido desde el manto de carbón tiene concentraciones que van del 90 % al 99 %. El gas se estratificará en el techo debido a que es menos denso que el aire, sin embargo, aunque la velocidad de este sea cero, el gas terminará mezclándose con el aire de la mina debido a que por gradiente de concentraciones migrará de las más altas a las menores. En consecuencia, mientras el metano se diluye, pasará por concentraciones entre el 15 % y el 5 % (rango de explosividad del gas), por lo que se concluye que la ventilación debe proveer velocidades turbulentas para prevenir la estratificación del gas y reducir el tiempo en el cual el metano pasa por atmósferas explosivas. En la guía técnica Diseño y gestión de la ventilación realizada por Sura, se presenta una metodología para el cálculo del caudal a partir del conocimiento del flujo de gas.
- ✓ Es indispensable realizar semanalmente monitoreo de la velocidad, presión, humedad y temperatura; y continuamente un monitoreo de gases.



Drenaje del gas:

se debe considerar realizar perforaciones horizontales e inyección de agua en los mantos de carbón, especialmente en aquellos en los que se encuentren contenidos de gas metano superiores a los tres metros cúbicos por tonelada de carbón. Este método permite una desgasificación parcial y controlada de los mantos, con lo cual la ventilación será más efectiva y también se reducirá la generación de material particulado.

Parámetros en la ejecución de la medida



3.5.1.2 | Controles para prevenir las manifestaciones energéticas

Equipos eléctricos protegidos: todos los equipos eléctricos utilizados en el interior de las minas (ventiladores, lámparas mineras, equipos de bombeo, de perforación, de arranque, de medición de condiciones ambientales, de comunicación, entre otros) y sus respectivas instalaciones deben estar clasificados en el Grupo I y en la categoría Mb, de acuerdo con las normas expedidas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)¹⁵ o equivalentes como las EN u otras. Cuando se superen los límites reglamentarios de metano, solo deben permanecer en uso equipos que sean del Grupo I y de Categoría Ma.

¹⁵Normas expedidas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). Colombia hace parte de este acuerdo.

Parámetros en la ejecución de la medida

1

Los equipos deben ser conformes con los “Requisitos generales” de la norma IEC 60079-0¹⁶ o alguna equivalente, y deben contar con alguno de los siguientes modos de protección establecidos en las normas IEC:

- ✓ IEC 60079-1 Envolventes antideflagrantes "d".
- ✓ IEC 60079-2 Envolventes presurizadas "p".
- ✓ IEC 60079-5 Relleno pulverulento "q".
- ✓ IEC 60079-6 Inmersión líquida "o".
- ✓ IEC 60079-7 Seguridad aumentada "e".
- ✓ IEC 60079-11 Seguridad intrínseca "i".
- ✓ IEC 60079-13 Salas presurizadas "p" y Salas ventiladas artificialmente "v".
- ✓ IEC 60079-15 Modo de protección "n".
- ✓ IEC 60079-18 Encapsulado "m".
- ✓ IEC 60079-28 Material y sistemas de transmisión que utilizan radiación óptica.
- ✓ IEC 60079-33 Protección especial "s".

Además, cuando se adquiera un equipo eléctrico debe solicitarse su ficha técnica y el certificado de conformidad sobre el modo de protección con el que cuenta. También se debe verificar en la placa del equipo el grupo al que pertenece y el modo de protección eléctrica.

¹⁶Alineado con lo establecido en el artículo 28.3.1 “Instalaciones eléctricas en lugares clasificados como peligrosos”, del Anexo General del RETIE, Resolución 90708 de agosto 30 de 2013 con sus ajustes.

2

Los **sistemas de seguridad intrínseca** deben ser evaluados siguiendo la norma IEC 60079-25 "Sistemas eléctricos de seguridad intrínseca" o con otra norma equivalente, y disponer del documento descriptivo del sistema.

Seguridad en la sustancia y accesorios utilizados para voladuras: las empresas deben diseñar estrictos y detallados procedimientos para la realización de las voladuras en los cuales se establezcan los protocolos de seguridad en cada etapa del proceso (adquisición, transporte, almacenamiento, diseño de malla de perforación, cargue y procedimientos para tiros fallidos). Además, deben atenderse las disposiciones de la industria militar, a continuación se presentan algunas recomendaciones extraídas de la Circular No. 01/2022 de la ANM.

Parámetros en la ejecución de la medida

- ✓ Todos los colaboradores que intervienen en el desarrollo de una voladura, deben contar con la competencia para ello, por tanto, es indispensable tener el entrenamiento correspondiente y la certificación de la industria militar. Un adecuado entrenamiento reduce la probabilidad de errores por parte del operario.
- ✓ Debe garantizarse una distancia de seguridad suficiente que reduzca el riesgo de afectación a las personas que inician la voladura. Todos los trabajadores que no intervengan en el proceso, deben haber sido evacuados a superficie y, preferiblemente, se debe evaluar la posibilidad de iniciar la voladura sin personal bajo tierra.
- ✓ Realizar una verificación estricta para garantizar que durante la perforación, cargue del explosivo y realización de la voladura en un radio de influencia definido con respecto al sitio de esta, las concentraciones de gas metano serán inferiores al 0.5 %.
- ✓ Se debe realizar la humectación de los frentes, para reducir el polvo de carbón en un radio no menor a 15 metros al sitio en que se realiza la voladura, o inertizarlos con caliza.
- ✓ Si se considera el uso de otros agentes explosivos catalogados como pirotécnicos, se debe solicitar al fabricante o al importador una certificación emitida por una entidad acreditada como entidad de certificación sobre ensayos, que demuestren su seguridad en el Grupo I, es decir, en presencia de atmósferas con presencia de gas metano y polvo de carbón. La certificación respectiva debe indicar la norma con la cual se realiza el ensayo. Ejemplo: UNE 31.310 "Explosivos de Seguridad" y UNE 31.631 "Detonadores de Seguridad".
- ✓ La certificación y los ensayos deben ser para la sustancia que se utilizará, no son válidos para una diferente; igualmente, se debe revisar su Ficha de Seguridad (FDS). Aquellas sustancias en las que se indique que se restringe su uso para ambientes que contengan gases inflamables o polvos combustibles, no deben ser usadas en minería de carbón.

3.5.1.3 | Reducción de generación de polvo de carbón

Aspersores de agua: una de las principales medidas de prevención es reducir la producción de polvo de carbón, una alternativa para ello es la instalación de aspersores de agua acoplados a los equipos de arranque o en el recorrido de bandas transportadoras, vías de transporte mineral, zonas de descargue como tolvas, entre otras. Los aspersores de agua incrementan el contenido de humedad en el carbón y previenen que este emita polvo, además tienen la ventaja de reducir la temperatura de los equipos, las bandas transportadas y, con ello, la posibilidad de una chispa por fricción (Ray, et al, 2022).

Parámetros en la ejecución de la medida

- ✓ Los aspersores deben proporcionar un volumen alto de agua y operar con bajas presiones.
- ✓ En aquellas áreas de la mina en las cuales la tasa de depósito de polvo de carbón sea muy alta, es muy práctico instalar aspersores de agua o, al menos, inyectarla con una manguera.
- ✓ Para aumentar la eficiencia y evitar que la mina esté muy húmeda, se puede considerar aplicar un surfactante al agua, lo cual reduce la tensión superficial y aumenta la capacidad de difundirse en el carbón.
- ✓ El mantenimiento de los equipos bajo tierra debe contemplar su lavado para eliminar las capas finas de polvo de carbón que se forman, ya que estas pueden calentarse, inflamarse y convertirse en una fuente de ignición para una explosión de metano.

Nota: realizar jornadas de limpieza de polvo de carbón puede ser una alternativa en algunos casos, pero tiene la desventaja de exponer a los colaboradores a altas concentraciones de polvo respirable. Aunque se debe usar protección respiratoria, esta no tiene una fiabilidad del 100 %.

3.5.1.4 | Prevención de la ignición del polvo de carbón

Inertización del polvo de carbón con caliza: la caliza actúa como un inhibidor termal, disipador de calor y previene la propagación de la llama (Man y Teacoach, 2009).

Parámetros en la ejecución de la medida

- ✓ Si bien en el Decreto 1886 de 2015 se establece que la neutralización del polvo de carbón con caliza se debe hacer con un porcentaje mínimo del 80 %, que sea pasante malla 400 y con un porcentaje máximo de 3 % de sílice cristalina, se deben realizar ensayos que certifiquen su efectividad ya que podría requerirse un porcentaje mayor.

- ✓ **Resultados de experimentos para evaluar la dispersión de capas estratificadas de polvo de carbón y polvo de roca, realizados por Lai, Houim & Oran, 2019, arrojaron lo siguiente:**

1

Las partículas más grandes son levantadas más alto, por tanto, la capa de caliza que se aplique sobre el polvo de carbón debería tener una distribución de diferentes tamaños, con partículas que sean más grandes o parecidas al tamaño de las del polvo de carbón, para asegurar que las partículas de roca se dispersen a una altura mayor que las del polvo de carbón e inhiben la propagación de la explosión.

2

Para inertizar una muestra de polvo de carbón con un porcentaje de polvo de roca del 80 %, dado que ambos materiales tienen densidades diferentes, se requeriría de una capa de 3 mm de polvo de roca por una capa de 4 mm de polvo de carbón.

3

En la medida que aumente el espesor de la capa de roca habrá más efectividad en evitar que se levanten las partículas de polvo de carbón durante una onda de choque.

4

La acumulación de polvo de carbón sobre la capa de polvo de roca ya aplicada, reduce la efectividad para evitar la propagación, por lo cual la aplicación de la caliza debe realizarse periódicamente.



3.5.2 | Medidas de mitigación

3.5.2.1 Barreras

Barreras de explosión pasivas: se basan en el principio en el cual la onda de presión viaja delante del frente de llama, por lo tanto, la onda de choque dispersa el polvo de roca o el agua para detener la propagación de la explosión (Ray, et al, 2022). Se distinguen tres tipos: estantes de caliza, bolsas de agua y bolsas de caliza. Algunas pruebas han indicado que si la presión de la explosión es muy fuerte o débil, podría no desalojar las barreras y continuar prologándose, por ello se ha migrado a barreras activas, las cuales tienen sensores y otros agentes de extinción que permiten activar en un amplio rango de presiones.

Parámetros en la ejecución de la medida

- ✓ Se ha probado la efectividad de los estantes de caliza, pero requieren mantenimiento debido a que su endurecimiento puede suponer riesgo de caída. Las barreras de bolsas de caliza y de agua reducen el inconveniente del mantenimiento.
- ✓ En algunas minas las barreras están instaladas solo en algunos tramos de las galerías de ingreso y retorno de la ventilación, si ocurre una explosión en un frente de explotación, la explosión recorrería una gran distancia antes de ser detenida por la barrera, por lo tanto, se deberían instalar barreras en todas las labores mineras que sea posible.
- ✓ Un limitante de la instalación de las barreras en las minas de Colombia es el hecho de que la altura de las vías, en la mayoría de casos, difícilmente superan los dos metros, por lo cual no se cuenta con espacio para instalarlas. Es muy importante que las labores mineras de preparación y desarrollo tengan alturas y secciones más amplias que permitan la instalación no solo de barreras, sino de arcos de acero; para ello es necesario ampliar el sistema de transporte de minería, el espacio para el tránsito de peatones y, en general, mejorar la ergonomía y contar con menor resistencia al flujo del aire.

3.5.2.2 | Plan de emergencias

Una adecuada planificación para la respuesta ante emergencias no evitará que se produzca una explosión, pero sí podrían salvarse vidas. Los trabajadores que logren sobrevivir después del evento, estarán en un escenario en el cual la visibilidad es muy baja debido a la dispersión del polvo de carbón, con derrumbes, altas temperaturas y concentraciones peligrosas de gases como el monóxido de carbono; posiblemente, también estén heridos y desorientados debido al sonido y presión de la explosión. Por lo tanto, planificar la respuesta a la emergencia facilitará que en un evento de esta naturaleza los colaboradores puedan ser rescatados o ellos puedan evacuar por sus propios medios. A continuación, se presentarán tres elementos muy importantes en la preparación ante emergencias en minería: .

Parámetros en la ejecución de la medida

Infraestructura:

Rutas de evacuación:

la norma de seguridad inexorable en minería es la siguiente: “se debe contar con un mínimo de dos rutas de evacuación independientes y en óptimo estado”. Por tanto, las rutas de evacuación deben tener las siguientes características:

- ✓ Secciones adecuadas, mínimo de 3 m² y 1,8 m de altura.
- ✓ Buen estado con respeto al sostenimiento. Óptimas condiciones en calidad y cantidad de flujo de aire.
- ✓ Contar con ayudas para el desplazamiento si son planos inclinados, como escalones y manilas.
- ✓ Señalización con código de colores y táctil para facilitar evacuación del personal.
- ✓ Nichos, autorrescatadores adicionales y otros elementos.



Refugio minero:

debe tener la mayor seguridad posible, contar con sostenimiento de arcos de acero, ser lo suficientemente amplio, estar inertizado, contar con barreras de agua o caliza y con los elementos que ya establece el decreto de seguridad minera, como alimentos, agua, autorrescatadores, letrina y equipos de comunicación. Lo ideal es que sea un sitio hermético y que provea oxígeno.



Competencias de brigadas de emergencias y líderes de la organización:



- ✓ Es fundamental que la brigada de emergencia cuente con un número suficiente de brigadistas y tenga entrenamiento regular mínimo una vez al mes. Deben realizarse ejercicios prácticos y teóricos por medio de los cuales se asimile muy bien las competencias, para que durante una emergencia la repuesta sea la adecuada.
- ✓ En minería subterránea es obligatorio contar con socorredores mineros, cuyo número debe ser mínimo del 10 % de los trabajadores y deben contar con los estándares de formación fijados por la ANM.
- ✓ La gestión de un incidente de emergencia requiere habilidades de toma de decisiones, liderazgo y comunicación, por lo cual es indispensable que también se formen en este aspecto.
- ✓ **Simulacros:** es una actividad controlada y orientada a objetivos que se utiliza para probar, practicar o evaluar procesos y capacidades. Debe realizarse uno mínimo cada año. Cuanto más realista sea el ejercicio, más valor se obtendrá. Sin embargo, debe ser una situación controlada con respecto a los riesgos.

Equipamiento mínimo:

- ✓ **Equipos de respuesta ante emergencias y sistemas de protección:** se debe contar con un número suficiente de equipos, como camillas, botiquines con inmovilizadores, mantas térmicas, dispositivos para realización de reanimación cardipulmonar (RCP), botella de oxígeno y vehículo para traslado de víctimas.
- ✓ Equipos de circuito cerrado de respiración autónoma: facilitan hacer una intervención segura y oportuna en caso de una atmósfera tóxica.



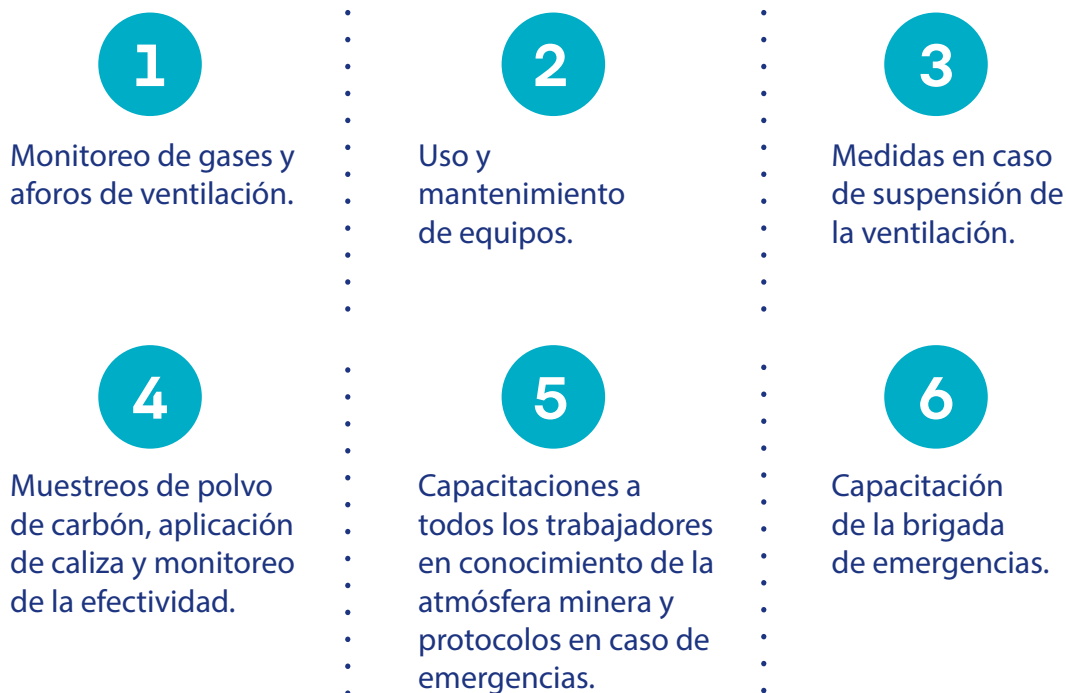
3.5.2.3 | Infraestructura

Plan de sostenimiento: contar con un adecuado sostenimiento garantizará que la infraestructura de la mina no se vea significativamente afectada después de una explosión, y como resultado los colaboradores tendrán menos riesgo de morir debido a derrumbes. Es importante, en la gestión del control geomecánico, tener en cuenta el modelo propuesto por la NTC 6620 “Requisitos para la elaboración de planes de sostenimiento para operaciones mineras y obras civiles subterráneas” (ICONTEC, 2022).

3.5.3 | Medidas de soporte

3.5.3.1 Capacitación y procedimientos de trabajo seguro

Siempre debe operarse bajo procedimientos de trabajo seguros y los colaboradores deben ser debidamente entrenados, entre los procedimientos y capacitaciones esenciales se tiene:



3.5.3.2 | Monitoreo ambiental

La gestión de la ventilación es esencial para verificar que se está cumpliendo el objetivo de garantizar una atmósfera segura para la vida. Esta incluye: el monitoreo semanal de las velocidades, presiones, humedad y temperatura; el monitoreo continuo de los gases y los muestreos de polvo de carbón.

Con respecto al monitoreo de gases, podría presentarse alguna de las siguientes situaciones:

- a Los valores regularmente están dentro de los límites permisibles: es un indicador de que los controles actuales funcionan bien, se deben mantener, continuar monitoreando y hacer mejoras en los controles cuando haya cambios en la operación o resultados.
- b Se detectan valores recurrentes muy cercanos a los valores límites permisibles o por encima de estos: es necesario revisar los controles existentes y realizar las mejoras para evitar tendencias peligrosas.

- C** a) Se detectan situaciones de riesgo inminente, por ejemplo, concentraciones de metano por encima del 2 %, lo cual requiere que se evacuen la personas a superficie, se evalúen las causas para ello y se adopten las mejoras necesarias.

3.5.3.3 | Mantenimiento de equipos

El plan de mantenimiento es necesario para evitar las manifestaciones energéticas provenientes de chispas eléctricas o por fricción, y para garantizar el funcionamiento adecuado de equipos requeridos en el control de la atmósfera minera como ventiladores y monitores de gases. El mantenimiento debe ser realizado por personal competente.

Consideraciones sobre la etapa 4

1

En la gestión del riesgo de explosiones la prioridad debe estar en las medidas de prevención, por ejemplo, en controles como la ventilación, el cual es indispensable para prevenir la formación de una atmósfera explosiva o en la ventilación que, también, tiene limitantes como lograr diluir grandes cantidades de gas provenientes de un desprendimiento súbito de metano. Además, también son necesarias las medidas de mitigación, para minimizar las consecuencias de no lograr prevenir la explosión, y las medidas de soporte para que funcionen los controles de ingeniería; por ejemplo, sin el mantenimiento adecuado de los equipos no se puede garantizar que estos funcionen de manera óptima y si no se monitorea la atmósfera minera, no se puede determinar si la ventilación funciona bien o no.

2

En esta sección se brindó información de algunos controles que han demostrado efectividad para tener los peligros bajo control, sin embargo las organizaciones son quienes conocen su operación y procesos, por tanto deben procurar identificar las mejoras prácticas y estar en sintonía con los avances tecnológicos que les permita una buena relación costo-beneficio en la reducción del riesgo. También, es necesario estar al tanto de cambios normativos y requerimientos de autoridades competentes.

3.6 | **Etapla 5:** monitoreo de la efectividad y mejora continua

Objetivo:

evaluar las medidas de intervención y realizar las mejoras en función del desempeño y los resultados obtenidos.

3.6.1 | Evaluación de tendencias en las concentraciones de gases

El monitoreo de cualquier variable tiene el propósito de verificar que los valores estén bajo el estándar esperado, en este caso que las concentraciones de gases estén dentro de los VLP. En ocasiones, las organizaciones son tolerantes a operar en condiciones que no se consideran “seguras” y no se toman medidas para revertir tendencias peligrosas. Es fundamental que se adopte una política de “cero tolerancia” a operar en una atmósfera minera peligrosa, que tenga en cuenta prácticas como apagar los equipos de monitoreo de gases o ajustar las alarmas a valores más altos; también que se atiendan las causas para que se registren de manera recurrente. La solución de detectar el peligro y parar, no es sostenible en el tiempo. Algunos de los temas a revisar son los siguientes:

- ✓ Interrupciones frecuentes del fluido eléctrico y como resultado paradas del ventilador.
- ✓ Equipos de ventilación con problemas en la operación, fenómeno de bombeo, entre otros.
- ✓ Sistema de ventilación no adecuado para garantizar el caudal necesario y las fugas.
- ✓ Se suspende la ventilación en los horarios no laborales.
- ✓ No se están controlando las emanaciones de metano provenientes de fallas.

3.6.2 | Efectividad en la inertización del polvo de carbón

La recomendación es establecer un procedimiento sistemático para realizar muestreos de polvo que hayan sido inertizados previamente con caliza, y con el apoyo del equipo *Coal Dust Explosibility Meter Evaluation* (CDEM) verificar si la mezcla aún es inerte. La inspección visual también es importante para identificar si sobre la capa de caliza, que ha sido aplicada previamente, se ha formado otra capa de polvo de carbón, lo cual requeriría inertizar de nuevo.

Recursos:



> Video del **uso del equipo CDEM** realizado por la ANM y la UNAL.

[CLIC AQUÍ](#)

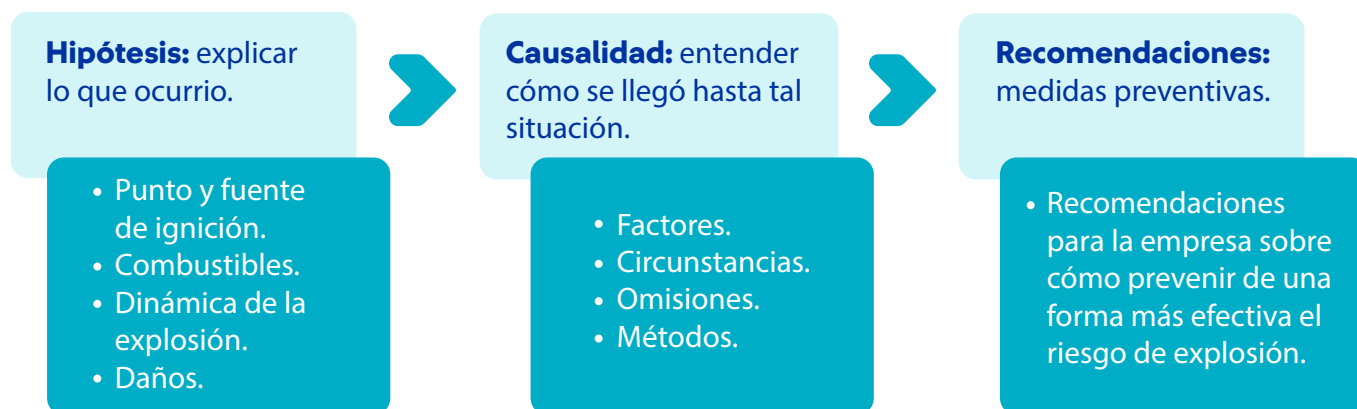


> **Circular 9529 de 2012** realizada por el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH-), contiene una evaluación y recomendaciones del uso del CDEM.

[CLIC AQUÍ](#)

3.6.3 | Investigación de explosiones

Objetivos de una investigación de explosiones:



Gráfica 8. Objetivos de una investigación de explosiones.

3.6.3.1 | Principios

En la NFPA 921 de 2021 “Guía para las investigaciones de incendios y explosiones”, se indican los siguientes principios que deben observarse en las investigaciones:

- ✓ **Evitar presunción:** hasta que las evidencias no hayan sido analizadas, no deben formularse hipótesis.
- ✓ **Evitar sesgo de expectativa:** no emitir conclusiones sin haber examinado todos los datos.
- ✓ **Evitar sesgo de confirmación:** solo considerar las evidencias que soportan la hipótesis y no la que la contradice.

3.6.3.2 | Protocolo de 20 pasos en la investigación de explosiones.



Gráfica 9. Protocolo de 20 pasos en la investigación de explosiones de metano y polvo de carbón. Fuente: Gheorghe, GC, 2023

Consideraciones sobre la etapa 5

1

El principio de realizar mediciones de los gases, o cualquier otra variable, bien sea con monitores continuos o portátiles, no es demostrar cumplimiento de un requisito legal, es comprobar si el peligro está controlado y tomar decisiones para mejorar el control.

2

El propósito de realizar una investigación es entender cómo se llegó a ese punto y qué cambios significativos deben realizarse en el proceso y en la organización, para evitar que se repitan situaciones similares.



4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1

La gestión de SST se mide en función de obtener los resultados deseados, en este caso evitar explosiones que pueden afectar personas e infraestructura; y, también, en función de lograr que los peligros que pueden ocasionar una explosión (atmósferas explosivas debido al metano, al polvo de carbón o fuentes de ignición) estén bajo control. Si solo medimos la gestión en términos del resultado, “no hubo explosiones”, pero no prestamos atención a los signos de alarma que indican que los peligros no están adecuadamente controlados, como tendencias peligrosas en mediciones atmosféricas o acumulaciones de polvo de carbón depositado sin inertizar en puertas y parades, la explosión podría ocurrir en cualquier momento. Por lo cual, es necesario entender los peligros que en la mina podrían dar lugar a una explosión, qué tan bien están controlados, decidir cómo podemos mejorarlos, implementar las medidas de intervención y evaluar su efectividad. Además, no debe reducirse la evaluación del riesgo solo al hecho de asignarle un valor cualitativo, esta no es la parte más importante.

2

El objetivo primario es prevenir que ocurra una explosión, cuyos controles más importantes son la ventilación forzada, la operación de equipos eléctricos protegidos y con un adecuado mantenimiento, las voladuras seguras, la inyección de agua y la inertización con caliza del polvo de carbón. Sin embargo, también deben implementarse medidas para mitigar sus efectos, como la instalación de barreras de caliza o agua, el plan de emergencias y las medidas de soporte, como la capacitación, los procedimientos de trabajo seguros, el monitoreo de atmósfera minera y el mantenimiento de equipos. Más allá del grupo de medidas de intervención disponibles, las organizaciones deben buscar comprender cada vez mejor sus riesgos, mejorar sus prácticas y desarrollar la sinergia para que cada vez le resulte más fácil tener los peligros asociados a explosiones bajo control. No existen fórmulas mágicas, se trata de tener como política la mejora continua.

3

Independientemente de la profundidad de los estudios o la pertinencia del plan de ventilación, una mina es una entidad dinámica, que cambia continuamente debido al avance en la explotación, la conexión de trabajos, los cambios en las secciones de las vías y los cambios en los equipos. Por tanto, el monitoreo del desempeño de los controles es indispensable para tener información que permita evaluar la efectividad de los controles e ir haciendo las mejoras y cambios respectivos.

4

Debemos convencernos de que sí es posible prevenir estos eventos, trabajando con diligencia y constancia en dicho objetivo, para lo cual cada parte interesada (Ministerio de Minas, ANM, Ministerio del Trabajo, operadores mineros, Aseguradoras de Riesgos Laborales, academia y profesionales del sector minero) debe asumir las responsabilidades que le corresponden.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Nacional de Minería. (2021). Guía técnica para el diseño de planes de prevención de explosiones de metano y polvo de carbón. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/guia_prevenccion_mitigacion.pdf
- Agencia Nacional de Minería. (2022). Circular No. 01 del 06.15.2022: Recomendaciones con respecto a la prevención de explosiones de grisú y a la limitación de sus efectos por la participación del polvo de carbón. <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/Circular%20No.%2001%20del%2015%20de%20Junio%20de%202022.pdf>
- Agencia Nacional de Minería. (2024). Cuadro de Control de Emergencias Mineras.
- Agencia Nacional de Minería. Lecciones aprendidas. <https://www.anm.gov.co/?q=lecciones-aprendidas>.
- Australian Institute of Health and Safety (AIHS). (2019). The Core Body of Knowledge for Generalist OHS Professionals. 2nd Ed. Tullamarine, VIC: Australian Institute of Health and Safety (AIHS).
- Azam S. & Mishra D. P. (2019). Effects of particle size, dust concentration and dust-dispersion-air pressure on rock dust inert ant requirement for coal dust explosion suppression in underground coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*, 126, 35-43.
- Carrasco G. J., Alarcón R. D., Albuérne P. J., Fernández B. E., Fernández V. E., García G. L. & Madera G. J. (2011). Manual de ventilación de minas y obras subterráneas. Asociación para la Investigación y Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales (AITEMIN). Madrid, España.
- Cross, J. (2019). Risk. In *The Core Body of Knowledge for Generalist OHS*.
- Freitas, R. A. & Rodrigues, J. P. C. (2022). A fire investigation methodology for buildings. *Architecture, Structures and Construction*, 2(2), 269-290.
- Generalist OHS Professionals. 2nd Ed. Tullamarine, VIC: (AIHS).
- Gheorghe G. C. (2020). Emergencias mineras mortales en Colombia 2005 - 2020: investigación con modelo jerárquico de causalidad de 100 eventos. Universidad del Rosario. Bogotá, Colombia. <https://repository.urosario.edu.co/handle/10336/30813>
- Gheorghe G. C. (2023). Guía técnica: diseño y gestión de la ventilación en minería subterránea. ARL SURA.
- Gheorghe G. C. (2023). Guía técnica: lo esencial en la gestión de seguridad y salud en minería. ARL SURA.
- Harris, M. L., Sapko, M. J., Varley, F. & Weiss, E. S. (2012). Coal Dust Explosibility Meter evaluation and recommendations for application. <https://www.cdc.gov/niosh/mining%5C/UserFiles/works/pdfs/ic9529.pdf>
- Jing, G., Peng, L. & Mu, L. (2022). Research on the propagation of pressure and CO gas of methane and coal dust coupled explosion. *Thermal Science*, 26(5 Part A), 3859-3867.

BIBLIOGRAFÍA

- Laboratorio Oficial 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-subterranee.pdf>
- Lai, S., Houim, R. W. & Oran, E. S. (2019). Dispersion of stratified dust layers by a moving shock wave. *International Journal of Multiphase Flow*, 118, 87-96.
- Li, Q., Yuan, C., Tao, Q., Zheng, Y. & Zhao, Y. (2018). Experimental analysis on post-explosion residues for evaluating coal dust explosion severity and flame propagation behaviors. *Fuel*, 215, 417-428.
- Man, C. K. & Teacoach, K. A. (2009). How does limestone rock dust prevent coal dust explosions in coal mines?. *Mining Engineering*, 61(9), 69.
- McPherson M. J. (2012). *Subsurface ventilation and environmental engineering*. Springer Science & Business Media.
- Ministerio de Minas y Energía. Decreto 1886 de 2015. Reglamento de seguridad en las labores subterráneas.
- Ministerio de Minas y Energía. Decreto 539 de 2022. Reglamento de seguridad en las labores mineras a cielo abierto.
- National Fire Protection Association. Technical Committee on Fire Investigations. (2021). NFPA 921, Guide for fire and explosion investigations.
- Oran, E. S. & Gamezo, V. N. (2007). Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion. *Combustion and flame*, 148(1-2), 4-47.
- Professionals. 2nd Ed. Tullamarine, VIC: AIHS.

Prostański, D. (2018). Development of research work in the air-water spraying area for reduction of methane and coal dust explosion hazard as well as for dust control in the Polish mining industry. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 427, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.
- Pryor, P. (2019). Hazard as a Concept. In *The Core Body of Knowledge*.
- Ray, S. K., Khan, A. M., Mohalik, N. K., Mishra, D., Mandal, S. & Pandey, J. K. (2022). Review of preventive and constructive measures for coal mine explosions: An Indian perspective. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(3), 471-485.

Thakur, P. (2018). *Advanced mine ventilation: respirable coal dust, combustible gas and mine fire control*. Woodhead Publishing.
- Universidad Nacional de Colombia y Agencia Nacional de Minería. (2021). Implementación de la metodología de gestión del riesgo de explosión. Archivo de video. Youtube. <https://youtu.be/PcuIRDJy1w>
- Universidad Nacional de Colombia y Agencia Nacional de Minería. (2021). Muestreo de polvo de carbón. Archivo de video. YouTube. <https://youtu.be/vlhTJo9nw4Y>

BIBLIOGRAFÍA

- Universidad Nacional de Colombia y Agencia Nacional de Minería. (2021). Muestreo de polvo de carbón. Archivo de video. YouTube. <https://youtu.be/vlHTJo9nw4Y>
- Universidad Nacional de Colombia y Agencia Nacional de Minería. (2021). Uso del equipo CEDEM 1000. Archivo de video. YouTube. <https://youtu.be/Tz5VAFhaR28>
- Viner, D. (1991). Accident analysis and risk control. Melbourne VRJ Delphi.
- Zhou, Q. & Qin, B. (2021). Coal dust suppression based on water mediums: A review of technologies and influencing factors. Fuel, 302, 121196.

