

# DETECCIÓN PRECOZ Y CONTROL DE INCENDIOS EN MINAS SUBTERRÁNEAS DE CARBÓN

WILLIAM CASTRO

*Departamento de Recursos Minerales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín*

CLAUDIA PATRICIA MARTÍNEZ

*Centro del Carbón, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín*

Recibido para revisión 12 de Marzo de 2001, aceptado 19 de Octubre de 2001, versión final recibida 20 de Noviembre de 2001

**RESUMEN:** En este artículo se hace una descripción acerca de los efectos, sobre el ambiente subterráneo, de los gases desprendidos durante los incendios que ocurren en minas de carbón. Entre estos gases podemos destacar el  $CO$  que se comporta como trazador ya que su desprendimiento empieza aún desde las etapas iniciales del fenómeno a temperatura ambiente. Esto hace posible la detección precoz del calentamiento, lo cual permite tomar medidas preventivas y correctivas sin dejar que el fenómeno se acelere hasta llegar a un incendio declarado, ya que en esta etapa los medios de lucha se dificultan y en algunos casos se puede hacer imposible su extinción. Como medio de control y seguimiento se utiliza también el índice de Graham, en el cual se establece la relación entre el incremento de la concentración de  $CO$  en el ambiente y la disminución de oxígeno. Finalmente se hace una descripción detallada acerca de los medios de lucha más comúnmente utilizados para combatir los incendios en las minas subterráneas de carbón.

**PALABRAS CLAVES:** Índice de Graham, Límite de explosividad, Gas trazador, Detección precoz.

**ABSTRACT:** This article contains a description of the effects caused on the underground mine environment by the gasses released during fires in coal mines. The behavior of the carbon monoxide,  $CO$ , is of special interest since it can be used as a tracer. The  $CO$  starts being released at low temperature since the onset of the combustion process. This can be used to trace the heating permitting to take preventive and corrective measures before a fire builds up. The Graham index is another way to follow up and to control mine fires. This is a relationship between the rate of increment of  $CO$  in the environment and the rate of oxygen depletion. A detailed description of the most common methods to combat fire mines is presented.

**KEYWORDS:** Graham index, Explosivity limit, Tracer gas, Early detection.

## 1 INTRODUCCIÓN

El Centro de Investigaciones del Carbón de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, con el apoyo financiero de Colciencias y Ecocarbón y con la especial colaboración de La Regional No. 5 Amagá, realizó el proyecto "Condiciones ambientales de la minería subterránea del carbón en la cuenca Amagá-Angelópolis". Uno de los efectos más graves de los incendios en minas subterráneas de carbón es la contaminación de la atmósfera con los gases desprendidos durante las reacciones de combustión, entre estos podemos destacar el  $CO$  por ser altamente tóxico y porque se desprende en grandes cantidades aún en las etapas iniciales del incendio. Este gas se puede utilizar como indicador de los calentamientos, ya que desde las primeras etapas de la combustión espontánea se desprende en cantidades fácilmente detectables, por esta razón, se recomienda el control sistemático de la concentración de  $CO$  en el retorno general de las minas y en los retornos de aquellos

sectores en los cuales se sospecha que pueden ocurrir calentamientos, susceptibles de convertirse en incendios declarados si no se toman las medidas adecuadas para su control.

Un sistema que permite no sólo detectar precozmente los calentamientos si no hacer su seguimiento en el tiempo con el fin de ver su evolución y de establecer su tendencia hacia un incendio declarado o hacia la extinción del fenómeno, es la utilización del índice de Graham, el cual se calcula conociendo la composición de la atmósfera en lo relacionado con los gases fundamentales ( $O_2$  y  $N_2$ ) y los desprendidos en las reacciones de combustión ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ). Cuando es imposible controlar la aparición de un incendio se deben implementar medios de lucha que permitan su extinción, ya que si este se propaga se pueden consumir grandes porciones del yacimiento o quedar comprometidas de tal forma que se dificulte o en algunos casos, sea imposible su extracción.

## 2 EFECTOS DE LOS GASES DESPRENDIDOS DURANTE UN INCENDIO EN MINAS SUBTERRÁNEAS DE CARBÓN

A continuación se describen los efectos que pueden tener algunos de los gases que se generan durante el proceso de combustión del carbón cuando sus concentraciones superan los valores límites permisibles.

### 2.1 Monóxido de carbono

El CO es considerado uno de los gases más tóxicos. Dada su gravedad específica se mezcla fácilmente con la corriente de aire. El CO se produce como resultado de combustiones incompletas, como tantas que se producen en los ambientes subterráneos entre las cuales podemos mencionar las que ocurren en los motores de combustión interna, durante las voladuras con explosivos y como resultado de la combustión espontánea del carbón, la cual se inicia aún desde la temperatura ambiente.

El efecto directo del CO sobre las personas está dado por su afinidad con la hemoglobina que es 300 veces mayor que la afinidad de ésta con el oxígeno. La sustancia que se produce llamada carboxihemoglobina (CO-Hb) es relativamente estable y no se descompone fácilmente. En la Tabla 1 se presentan los efectos de diversas concentraciones de CO sobre un individuo efectuando un trabajo físico moderado, duplicando aproximadamente el volumen de aire aspirado (normalmente en reposo).

Tabla 1. Concentración de CO y sus efectos sobre un individuo

Concentración	Efectos
$5 \times 10^{-5}$ (50 ppm)	Ninguno. Excepto para trabajo muy fuerte.
$1 \times 10^{-4}$ (100 ppm)	Leve dolor de cabeza. Falta de aire luego de 2 o 3 horas.
$2 \times 10^{-4}$ (200 ppm)	Dolores de cabeza, falta de aire, vértigos, palpitaciones al cabo de 2 horas.
$5 \times 10^{-4}$ (0,05%)	Fuertes dolores de cabeza, vértigos, falta de aire, debilitamiento de la visión, vómitos eventuales y colapso luego de 45 min a 1 hora.
$1 \times 10^{-3}$ (0,1%)	Síntomas leves luego de 30 a 45 min, se vuelven graves luego de 45 min a 1 hora.
$1 \times 10^{-2}$ (1%)	Síntomas leves luego de 3 a 5 min, rápidamente se vuelven graves. Peligro de muerte.

### 2.2 Bióxido de carbono

El  $CO_2$  normalmente se presenta en el aire en una concentración de 0.03% y en las explotaciones subterráneas se produce a partir de una gran variedad de fuentes, como la emisión de los estratos, la oxidación de materiales carbonáceos, el desprendimiento de las locomotoras de combustión interna, las voladuras, las explosiones y la respiración. Es muy común encontrar este gas en áreas de trabajos viejos, particularmente durante un período de disminución o caída de la presión barométrica. En la Tabla 2 se presentan los efectos sobre el organismo humano producidos por un incremento de  $CO_2$  en el aire de la mina.

Tabla 2. Efectos sobre el organismo humano producidos por el incremento de  $CO_2$  en el aire de la mina

% en el aire	Efectos
0.03	Ninguno, concentración normal de $CO_2$ en el aire.
0.50	Incremento de la ventilación pulmonar en un 5%.
2.00	Incremento de la ventilación pulmonar en un 50%.
3.00	Se duplica la ventilación pulmonar; jadeo.
5.00 - 10.00	Jadeo más agudo que lleva a la fatiga; dolor de cabeza.
10.00 - 15.00	Jadeo intolerable, dolor de cabeza severo, colapso.

### 2.3 Metano

Es un gas no tóxico, pero es particularmente peligroso ya que es inflamable y puede formar mezclas explosivas con el aire. Los límites de explosividad del metano en el aire son del 5 al 15%.

### 2.4 Hidrógeno

Es el gas más explosivo de todos los gases que se generan en una mina de carbón. Tiene un rango de explosividad amplio (4-74.2%) en aire y puede incendiarse a temperaturas cercanas a los 580° C con una energía de ignición cercana a la mitad de la requerida por el  $CH_4$ . El hidrógeno se forma principalmente cuando se agrega agua al carbón incandescente, se mezcla con el CO, también producido en esta operación, y forma una mezcla conocida como gas pobre que es altamente explosiva.

### 2.5 Oxígeno

El oxígeno en contenidos inferiores al 16% puede ocasionar alteraciones en la respiración e incluso inconsciencia. Aunque es un gas no combustible resulta indispensable para la combustión de otros materiales. En la Tabla 3 se presenta los efectos producidos por la disminución del contenido de  $O_2$  en la atmósfera.

Tabla 3. Efectos sobre el organismo humano producidos por la disminución del contenido de  $O_2$  en el aire de una mina

% de oxígeno en el aire	Efectos
19	La llama de una lámpara de seguridad se reduce al 50%.
17	Aumento notable en el ritmo y profundidad de la respiración, pues se da un aumento en la concentración de $CO_2$ .
16	Extinción de la llama de la lámpara.
15	Mareo, aumento en la frecuencia de latidos del corazón.
13 - 9	Desorientación, debilidad, náusea, fatiga, dolor de cabeza, coma.
7	Coma, convulsiones y probablemente la muerte.
< 6	Muerte.

## 2.6 Nitrógeno

El nitrógeno es un gas inerte e inofensivo para la salud, pero altos contenidos de nitrógeno disminuyen la cantidad necesaria de oxígeno hasta crear una atmósfera asfixiante. Es un gas no combústible, su presencia influye favorablemente en la extinción de incendios.

## 2.7 Ácido sulfhídrico

El ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) es un gas que se detecta rápidamente por su olor a huevo podrido. Se forma por la descomposición bacterial o química de compuestos orgánicos. En la Tabla 4 se presentan los efectos de este gas sobre el organismo humano.

Tabla 4. Efectos fisiológicos del  $H_2S$  sobre el organismo humano

Concentración de $H_2S$ (ppm)	Efectos
0.1 - 1	Detectable por el olor.
5	Comienza a ser tóxico.
50 - 100	Leve irritación de los ojos y vías respiratorias, dolor de cabeza.
200	Se intensifica la irritación de la nariz y la garganta.
500	Inflamación aguda de los ojos, secreciones nasales, palpitaciones, fatiga y tos.
600	Puede ser fatal, dolor de pecho como consecuencia del daño en el sistema respiratorio.
700	Depresión, coma, muerte probable.
1000	Parálisis del sistema respiratorio, muerte muy rápida.

## 3 EFECTOS DE LOS INCENDIOS SOBRE EL SISTEMA DE VENTILACIÓN DE LA MINA

La aparición de un incendio minero tiene efectos directos sobre el sistema de ventilación de la mina, ya que se presentan de inmediato cambios en la corriente de aire y en la diferencia de presión aplicada, que incide, a su vez en la distribución de los productos del proceso de combustión y en el flujo de aire en otras partes de la mina.

La alteración del régimen de ventilación en la mina se debe básicamente al incremento de la temperatura durante el incendio, pues el aire busca salir en ambas direcciones a lo largo de la galería, lo que produce una reducción en su flujo. Este incremento en la temperatura del aire produce una disminución en su densidad lo que aumenta la flotabilidad situándose generalmente en el techo de las galerías. Es muy común que este aire tenga concentraciones altas de  $CO$  y que las altas temperaturas puedan originar, a su vez, incendios en el techo. La temperatura de los gases producidos por el incendio depende fundamentalmente del tipo de éste, oculto o abierto, de la distancia a la que se encuentren los gases con respecto al foco de incendio, de la velocidad del flujo de gases a través de las excavaciones mineras y del tipo de roca circundante, por la cual se evacúan los gases del incendio.

En el caso de un incendio de llama abierta, puede producirse un incremento significativo de la temperatura de los humos y, consecuentemente, del aire de la mina, generando además una rápida propagación del incendio en la excavación minera, comúnmente en sentido contrario a la del flujo del aire. Puede también ocurrir que se formen focos secundarios de incendio en sitios considerablemente alejados del foco principal y que se presenten depresiones térmicas adicionales que afecten el régimen de ventilación de la mina. Una depresión térmica actúa en el sistema de ventilación como un ventilador adicional de potencia definida instalado dentro de este sistema; su influencia depende del lugar de aparición y de la magnitud del incendio y, en algunos casos, puede originar una inversión en la dirección del flujo de aire, con la grave consecuencia de inundar toda la mina con los humos producto del incendio, especialmente en aquellos casos en que el flujo de aire asociado al sistema de ventilación no está forzado por un ventilador de alta depresión sino que responde a la depresión natural.

Si como consecuencia de la depresión térmica, se presenta en las corrientes de aire una inversión en la dirección del flujo del sistema de ventilación, lo cual sólo puede tener lugar en las corrientes de aire adyacentes, pero nunca en la corriente de aire principal, los gases del incendio contenidos en los humos del aire que entra a la mina se pueden dirigir nuevamente al foco de incendio, lo cual resulta una situación muy peligrosa. Con un incremento en la temperatura del aire (disminución de la densidad) puede ocurrir el retroceso de los humos del incendio; es decir, aunque se conserve la dirección original del flujo de aire del incendio, una parte de estos humos se traslada por la parte superior de la excavación en dirección contraria y pueden invadir zonas que no pertenecen al área directamente afectada. El retroceso de los humos puede deberse a la extinción de incendios por medio de agua; lo cual genera considerables

cantidades de vapor de agua, con un consecuente aumento del volumen de los humos, una disminución de la presión natural de la mina, un aumento de la resistencia de las excavaciones y una disminución de la depresión del ventilador instalado en el pozo de ventilación, asociada al incremento en la depresión térmica del incendio y a la inundación de las excavaciones, entre otras causas.

#### 4 EFECTOS DEL INCENDIO SOBRE EL YACIMIENTO

Cuando un incendio consume tales cantidades de carbón que se remueven los soportes de los estratos suprayacentes al manto, es posible que se genere subsidencia. Esto hace que los pilares fallen y el recubrimiento subsidia creando sistemas de grietas y fallas a través de las cuales los humos y gases penetran hacia el aire fresco. La subsidencia producida por un incendio puede afectar la superficie, de acuerdo con la profundidad del manto y la competencia de las unidades de roca que intervienen. Si el manto de carbón es relativamente superficial y el material suprayacente no está consolidado, es posible que la manifestación de la subsidencia se extienda desde la superficie de la mina hasta el vacío.

En muchas minas han ocurrido incendios con combustión sin llamas, involucrando considerables cantidades de carbón que se queman a concentraciones bajas de oxígeno (aun del 2%). Estos incendios son difíciles de extinguir y pueden continuar por largos períodos consumiendo cada vez más carbón, lo que obliga muchas veces a abandonar las áreas de explotación. Es importante anotar que el efecto de un incendio, tanto en la ventilación como en el yacimiento, o por los gases y humos tóxicos que producen, depende en gran parte de la práctica minera adoptada, de las medidas preventivas y de los medios empleados para combatirlo.

#### 5 DETECCIÓN PRECOZ Y SEGUIMIENTO DE LOS INCENDIOS

Desde el inicio de las explotaciones mineras en la cuenca Amagá-Angelópolis se han venido presentando una serie de autocalentamientos que han afectado grandes extensiones del yacimiento. En el estudio adelantado por el Centro del Carbón se seleccionaron 8 minas, de acuerdo con la frecuencia con que se ha presentado en cada una de ellas el fenómeno desde el inicio de su explotación, la disponibilidad de información, reservas carboníferas y su importancia dentro de la zona minera. Aunque no todas las minas seleccionadas han presentado una trayectoria de incendios, se han elegido con el fin de obtener una información que permita evaluar las condiciones que allí se dan y que hacen que sus mantos no se hayan incendiado.

##### 5.1 Métodos de detección

La detección de un incendio en su etapa inicial se considera de gran importancia, ya que esto facilita la toma de medidas a tiempo y permite contrarrestarlo con mayor rapidez y evitar

además grandes pérdidas tanto humanas como del yacimiento. Con la detección inicial se busca también ubicar el foco de calentamiento para bloquear la circulación del aire que lo alimenta y evitar que se escapen los humos. Se considera que la detección es el primer paso en el control y prevención de un incendio; y aunque la ubicación temprana por autocalentamiento es difícil, se sabe que sus características más usuales son la elevación de la temperatura y el desprendimiento de productos en un proceso de destilación-combustión. Existen esencialmente cuatro métodos para detectar un calentamiento espontáneo incipiente o activo: 1) observación de manifestaciones externas; 2) inspección térmica; 3) medición sistemática de la atmósfera minera y 4) seguimiento del desprendimiento de  $CO$ .

##### 5.1.1 Observación de manifestaciones externas.

Las manifestaciones externas de un incendio en su etapa inicial en una mina son principalmente, el aumento de la humedad del aire y la posterior formación de vapor de agua sobre las paredes de los avances o de la entibación. Sin embargo, esta manifestación no siempre es síntoma de un calentamiento, ya que algunas veces un incendio se puede presentar en lugares con corrientes de aire a diferentes temperaturas.

Otra manifestación externa de un calentamiento es el olor que se desprende de la destilación de algunos productos del carbón, como los hidrocarburos saturados, que liberan un olor a petróleo. Posteriormente, con el incremento de la temperatura y cuando se ha superado la temperatura de ignición, aparecen humos derivados de la combustión del carbón.

##### 5.1.2 Inspección térmica.

Es el indicador más convencional en la detección temprana de incendios; ya que mucho antes de que el incendio se desarrolle, la temperatura tiende a mostrar un aumento producido por el fenómeno de autocalentamiento. Por tanto se debe efectuar un monitoreo continuo que permita detectar los incrementos de temperatura, en especial en zonas susceptibles, como son las áreas de trabajos abandonados, zonas con pilares y los lugares de acumulación de carbón triturado, etc. La medición de la temperatura sirve también para delimitar zonas de incendio y para indicar cambios a largo plazo en la actividad de la combustión.

##### 5.1.3 Medición sistemática de la atmósfera minera

Es el método más conveniente para detectar la combustión espontánea del carbón y se realiza con el fin de determinar los gases que aparecen en las etapas iniciales de un incendio. Durante la aparición de un incendio se producen cambios en la composición normal de la atmósfera subterránea como: reducción brusca del contenido de oxígeno, aumento de los anhídridos, y emanación de gases como  $CO$  y  $CO_2$  y algunos hidrocarburos.

Es importante anotar que un cambio similar en la composición de la atmósfera minera puede suceder



temporalmente asociado a las condiciones de ventilación o a desprendimientos súbitos de gases ocluidos en las rocas, entre otros factores. Es por esto que un análisis de los cambios en la composición del aire de una mina de carbón puede ser muy útil, tanto para detectar autocalentamientos como para determinar el grado de evolución de los mismos; por tanto, es imprescindible conocer la composición del aire de la mina en condiciones normales.

La mayoría de los instrumentos empleados en el monitoreo de la atmósfera se basan en la detección de gases emanados como consecuencia del calentamiento; entre estos gases se encuentran el  $CO_2$ ,  $CO$  y algunos hidrocarburos no saturados. Otros detectan la disminución en la concentración de oxígeno y el incremento en la concentración de monóxido de carbono a medida que evoluciona el incendio; aunque pueden ocurrir incendios con niveles de oxígeno tan bajos como el 6%, e incluso un incendio muy activo puede persistir a niveles de 1-2% de oxígeno. Sin embargo, en las operaciones mineras, el monitoreo del dióxido de carbono, su utilización como indicador de incendios, no se considera conveniente, ya que este gas puede provenir de fuentes diferentes a las de los calentamientos espontáneos. Algunos fenómenos que modifican la concentración de  $CO_2$  en la atmósfera son:

- Las galerías de ventilación, que generalmente se encuentran húmedas, y los gases del autocalentamiento que comúnmente pasan por rellenos o por rocas húmedas disolviendo gran parte del  $CO_2$  originado por el incendio.
- Las rocas y estratos, la respiración humana (1.5 l de  $CO_2$ /min/persona), la descomposición de material orgánico, la actividad de máquinas de combustión interna y las voladuras.

#### 5.1.4 Seguimiento del desprendimiento de monóxido de carbono

Una forma más precisa de detectar un incendio es a través del seguimiento continuo de los desprendimientos del óxido de carbono, pues este gas se produce a bajas temperaturas y aumenta a medida que la temperatura se incrementa; además es poco soluble en el agua. En el estado inicial de los incendios en las minas pueden esperarse las siguientes cantidades de  $CO$ : en incendios abiertos, después de dos o tres minutos, más de 100 l de  $CO$ /min; en incendios o fuegos ocultos, de 10 a 20 l de  $CO$ /min. Las diferentes fuentes que pueden originar concentraciones detectables de  $CO$  son:

- El aire que entra a la mina, cuyas concentraciones pueden ser hasta de 10 ppm, en condiciones meteorológicas desfavorables o por aporte de máquinas de combustión, incendios, fábricas metalúrgicas y coquerías. Esta contaminación de origen externo a la mina no es permanente, pero se puede manifestar durante largos períodos, por lo cual es importante determinarla como "carga previa" de  $CO$ .
- El uso de explosivos y motores diesel donde el  $CO$  se encuentra asociado a gases nitrosos.

- Las oxidaciones a baja temperatura, que se producen generalmente en la mina sin que impliquen riesgo de incendio.

- La oxidación o la combustión anormal del carbón.

Una variación significativa en las concentraciones de  $CO$  no siempre se puede tomar como indicio de calentamiento. Errores en las medidas y los análisis, variaciones causadas por la presión barométrica, los derrumbes, etc., pueden llegar a explicar tales variaciones. Para que las concentraciones de  $CO$  sean más precisas y confiables, debe medirse en un punto fijo y de manera sistemática, de tal forma que se pueda apreciar en el tiempo una variación significativa. Al interpretar las concentraciones de  $CO$  debe tenerse en cuenta el caudal de aire, por ejemplo, no significa lo mismo una concentración de  $CO$  de 20 ppm en un retorno de aire de 7 m<sup>3</sup>/s que la misma concentración de  $CO$  en un caudal de aire de 20 m<sup>3</sup>/s. La concentración de  $CO$  en un punto de muestreo debe ser multiplicada por la cantidad de aire en el mismo punto para obtener así el volumen de  $CO$ .

En las atmósferas confinadas, donde no es posible medir la cantidad de aire que circula, no resulta confiable considerar como índice el valor absoluto de la concentración de  $CO$ , particularmente para concentraciones elevadas, por lo cual resulta necesario disponer de otros elementos de apreciación complementarios, como por ejemplo la circulación de  $CH_4$ . Al muestrear estas atmósferas estancadas pueden encontrarse de dos a tres centenares de ppm, lo que puede deberse al estancamiento del aire y no ser el indicio de un autocalentamiento peligroso.

#### 5.2 Mediciones de campo

En cada una de las minas seleccionadas se eligieron básicamente dos tipos de mediciones: El muestreo de la atmósfera minera y el muestreo de delante y detrás de los tapones. El muestreo de la atmósfera en cada una de las minas se realizó en áreas donde se identificaron con previo conocimiento del sistema de ventilación, los puntos de entrada y de retorno de aire para cada uno de los mantos en explotación. El número de muestreos realizados en cada mina, tanto de la atmósfera como de los tapones (Figura 1) fue de tres con una periodicidad de 15 días. El muestreo de gases se realiza por medio de tubos que se instalan en el momento de la construcción de los respectivos tapones y se hace con el fin de ver si es inminente que ocurra una explosión y para determinar a partir de los análisis químicos de las respectivas muestras, si la combustión ha cesado y el área antes sellada puede reabrirse o, caso contrario, adoptan las medidas necesarias.

La atmósfera en un área sellada puede estar expulsando o aspirando aire, de acuerdo con los cambios en la presión barométrica. Cuando se realiza el muestreo en la atmósfera detrás del tapón en un período en el cual este se encuentra aspirando aire, éste no es representativo ya que ha producido una dilución. Por tanto si las fluctuaciones de la presión en un tapón pueden reproducirse confiablemente, podrá entonces seleccionarse el momento adecuado para el muestreo. En el muestreo se deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

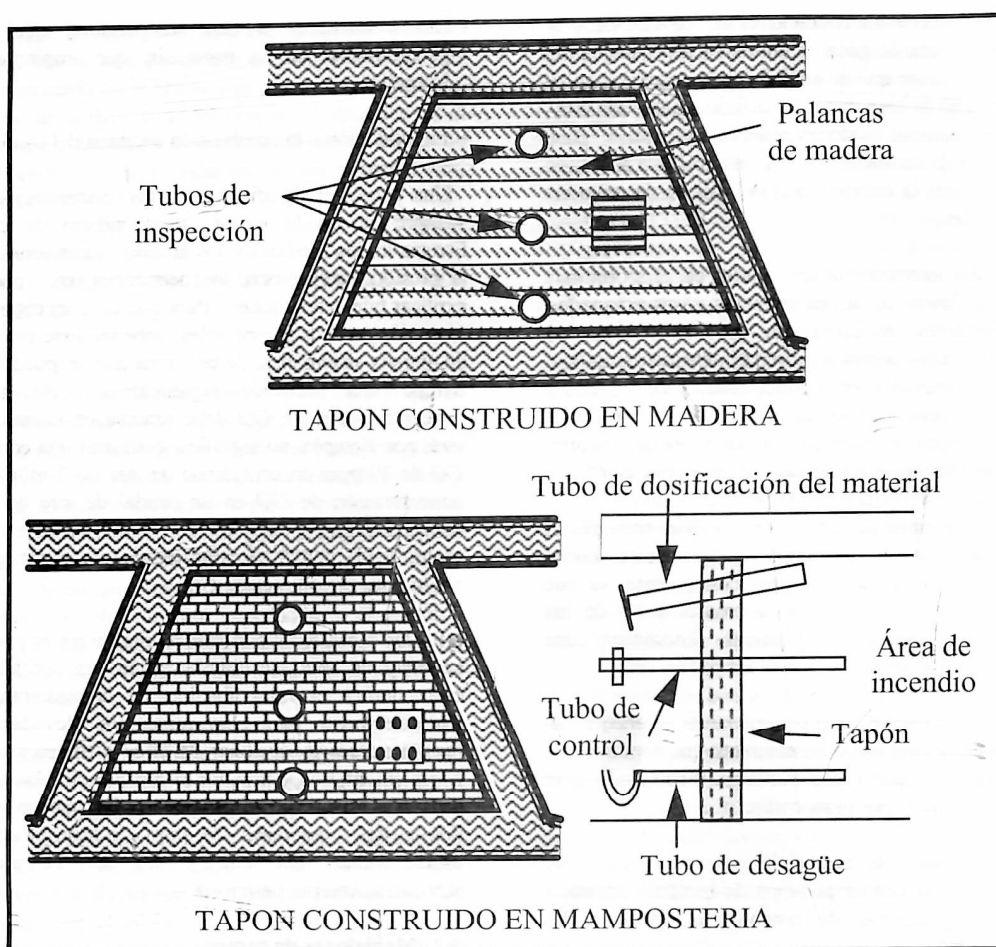


Figura 1. Tapón para el control de incendios

- Las muestras deben tomarse a intervalos frecuentes y siempre en el mismo punto.
- Procurar tomar las muestras directamente mientras no se corra ningún peligro.
- Las muestras de las áreas selladas deben tomarse sólo cuando la presión barométrica sea relativamente constante o haya disminuido.
- El muestreo de la atmósfera por medio de tubos deberá prolongarse en lo posible, hasta el punto más cercano a la zona de incendio.
- En áreas que tengan pendientes mayores del 6% deben muestrearse tres puntos cerca al centro, cerca al techo y cerca al piso para promediar luego los resultados.

Los datos obtenidos durante el trabajo de campo para cada una de las minas se presentan al final en las tablas 5 a 12.

En el caso de la mina 1 se encontraron valores de  $CO$  y  $CO_2$  que aumentan su concentración en el sentido del recorrido del

aire con una disminución en el contenido de  $O_2$ , encontrándose la menor concentración de  $O_2$  en el retorno general de la mina. No se encontró una variación significativa en los valores de la presión barométrica para un mismo punto de muestreo, lo mismo que para la humedad relativa y el caudal de aire.

En la mina 2 las condiciones ambientales en el punto de entrada de aire al manto 3 son críticas ya que el contenido de  $O_2$  está muy cercano al límite permisible; además, la temperatura es alta alrededor de los  $28^\circ C$ . En el aire de retorno el contenido de  $O_2$  es menor con respecto al de entrada y se da un aumento gradual en la concentración de  $CH_4$  y de  $CO$ . El tapón 2 Sur M2, no está actuando como barrera ya que no presenta variación en las concentraciones de los gases en la atmósfera existentes detrás y delante del tapón; a diferencia del tapón 5 norte del manto 1 y del tapón 6 norte del mismo manto en las que se tiene una diferencia apreciable entre los contenidos de oxígeno y  $CO_2$  a ambos lados del tapón. La temperatura ambiente de delante de los tapones es relativamente alta ( $27^\circ C$ ) pero la atmósfera de detrás de los 3 tapones registra concentraciones muy bajas de  $CO$  y mayores del 6% para el  $CO_2$ , lo cual indica que el incendio está controlado.

En la mina 3 (Tabla 7) se presentan porcentajes altos de  $CO$  en los retornos de los mantos 2 y 3 aunque con concentraciones adecuadas de  $O_2$  en la atmósfera. Además, el porcentaje de  $CH_4$  no supera el 0.4%, aunque los puntos de muestreo están muy cercanos a los frentes de explotación, donde es posible la liberación del metano. Los tapones 1 y 2 son tapones bien contruidos, lo cual está representado por la diferencia entre los porcentajes de  $O_2$  delante y detrás de ellos. Por otro lado, se registra allí una diferencia entre caudales de entrada y retorno de aire al manto 3; ello porque existe una entrada adicional de aire proveniente del manto 2. En cuanto a la temperatura ambiente, la mayor se registra en el nivel patio del manto 2, dada la proximidad del incendio a dicho manto.

En la mina 4 (Tabla 8) el retorno de aire que presenta bajos contenidos de  $O_2$  es el del manto b, pero no registra  $CO$  y el  $CO_2$  muestra una oxidación completa. El punto de retorno manto a es el más viciado por presentar los mayores contenidos de  $CO$  y los menores flujos de aire. El tapón 1 en el manto a muestra una diferencia considerable en cuanto a la concentración de  $CO$  delante y detrás del tapón, de ahí que se esté evitando la proyección del incendio hacia el exterior pero los contenidos de oxígeno favorecen la continua combustión; por tanto existe alguna entrada de aire que alimenta dicho incendio. El tapón 3 no presenta variación en la atmósfera delante y detrás de él, el cual no tiene ningún efecto sobre el incendio, además la atmósfera detrás del tapón no indica la presencia de incendio.

En la mina 5 (Tabla 9) tanto en la entrada como en la salida del aire se presentan condiciones muy favorables de ventilación con concentraciones aceptables de  $CO$  y  $CO_2$  aunque los contenidos de  $CH_4$  son mayores que los registrados en las demás minas. En la mina 6 (Tabla 10) no se aprecia un ambiente muy viciado de acuerdo con las mediciones realizadas para los diferentes gases. En la mina 7 (Tabla 11) se presentan condiciones favorables de ventilación y de calidad del aire. En la mina 8 (Tabla 12) el punto 3 corresponde al retorno de la mina y presenta los más altos porcentajes de  $CO$  y  $CO_2$  en la atmósfera, ya que este punto se encuentra cerca de una zona de incendio. En cuanto a los tapones muestreados, se observa una diferencia apreciable entre las concentraciones de los gases de delante de los tapones lo cual muestra un aire demasiado viciado e indica además que los tapones no están cumpliendo su objetivo pues presentan fugas. Por otro lado se registra una cantidad considerable de oxígeno detrás de cada tapón, lo que alimentaría continuamente el incendio.

## 6 ÍNDICE DE GRAHAM (K)

Este índice relaciona el contenido de  $CO$  generado en un foco de oxidación del carbón y el contenido de  $O_2$  absorbido por dicho foco. Varía con la temperatura del foco y con el tiempo de oxidación, como se ve en la Figura 2.

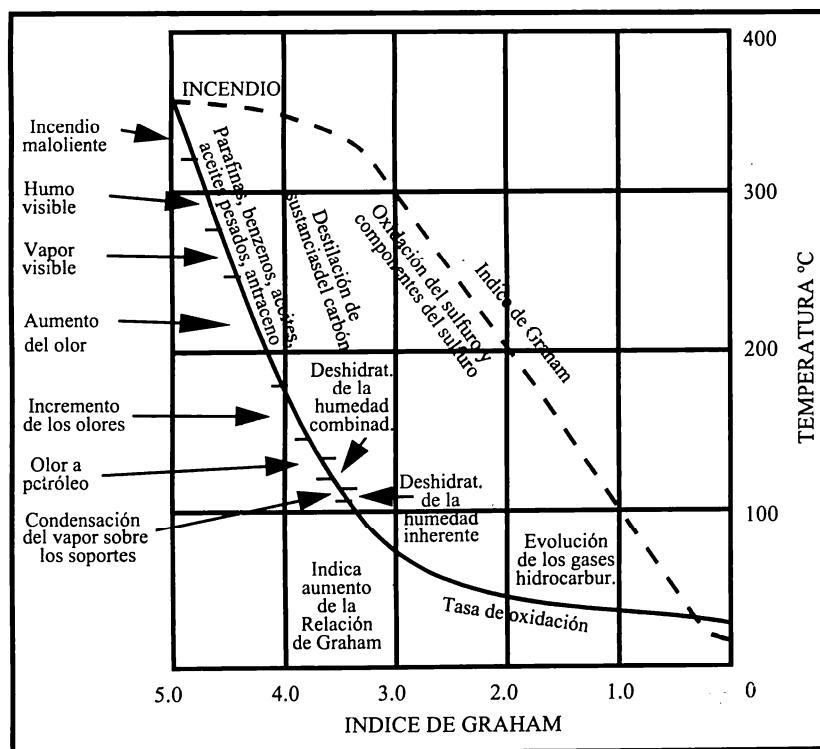


Figura 2. Productos de destilación de la oxidación

La pendiente de la línea de la relación de Graham es mayor cuando la tasa de oxidación es mínima; entonces, en esa región la relación de Graham es más sensible a un incremento en la oxidación. Pero cuando la oxidación se incrementa y el incendio alcanza un grado máximo, su temperatura es la máxima, la pendiente de la línea de la relación de Graham se reduce porque la producción de  $CO_2$  se incrementa con respecto al  $CO$ .

### 6.1 Cálculo del índice de Graham

Al monitorear la salida de un foco de oxidación se registra el porcentaje en volumen de los gases  $CO$ ,  $O_2$  y  $N_2$ . En el punto de entrada de aire fresco al foco se registra un porcentaje en volumen correspondiente a los gases  $CO'$ ,  $O'_2$  y  $N'_2$ . El cálculo del Índice de Graham ( $K$ ) se obtiene mediante la siguiente relación:

$$K = \frac{CO \frac{N'_2}{N_2} - CO'}{O'_2 - O_2 \frac{N'_2}{N_2}} * 100 \quad (1)$$

Dado que el  $N_2$  no participa en ninguna reacción química y que en la minería del carbón sólo se encuentra muy raramente como gas natural proveniente de las rocas, este gas se considera apropiado para efectuar los cálculos del proceso de expulsión de gas entre los puntos de entrada y salida del aire. Por esta razón, los valores de concentración de  $CO$  y  $O_2$  en el punto de salida del aire se han corregido mediante el factor  $N'_2/N_2$ ; suponiéndose además que  $CO' = 0$ , lo que en general debe ser cierto. Después de dividir tanto el numerador como el denominador de la ecuación anterior por el término  $N'_2/N_2$ , se obtiene:

$$K = \frac{CO}{\frac{O_2}{N_2} - O_2} * 100 \quad (2)$$

Si se considera, además, que la relación entre  $O'_2$  y  $N'_2$  ( $O'_2/N'_2$ ) en el punto de entrada de aire fresco al foco de oxidación corresponde a la proporción natural  $O_2/N_2$  (0.265); en cuyo caso el índice de Graham toma la siguiente forma:

$$K = \frac{CO}{0.265N_2 - O_2} * 100 \quad (3)$$

En esta fórmula,  $CO$ ,  $N_2$  y  $O_2$  corresponden a las concentraciones en porcentaje por volumen medidas en el punto de salida de aire del foco de oxidación. La relación usada en el cálculo de  $K$  puede aplicarse al aire seco, en cuyo caso el contenido de humedad debe ser sustraído antes de iniciar los cálculos. No obstante, en la práctica el valor de  $K$  puede verse afectado solamente cuando la humedad varía ampliamente. Cabe anotar que donde el contenido de  $O_2$  es alto, fluctuaciones pequeñas en el contenido de  $CO$  (cerca a 1ppm), pueden conducir a fluctuaciones exageradas en el índice de Graham; de ahí que deba tenerse especial cuidado en la interpretación de la Figura 2, que se aplica sólo cuando la

deficiencia de  $O_2$  es inferior al 0.3%.

### 6.2 Interpretación del Índice de Graham

El cálculo del Índice de Graham es de gran aplicación no sólo en la detección de incendios por autocombustión del carbón sino también en el estudio de la evolución de tales incendios. Al calcular el Índice de Graham base, es decir el valor por debajo del cual no se considera que se origina un incendio, se tienen diversas interpretaciones. En algunos países, se considera que el  $K$  base está comprendido entre 0.1 y 1.0, mientras que en otros se considera que este valor puede estar entre 0.5 y 0.6. Además, el  $K$  base es diferente según la mina y el manto, por lo cual sólo debe aplicarse cuando se tenga suficiente información sobre el punto de trabajo. Cuando el valor de  $K$  se sitúe por encima del  $K$  base y cuando se encuentren de modo sistemático valores de  $K$  con tendencia ascendente, deberán tomarse medidas que inhiban la oxidación o que combatan el incendio. Para efectos del presente trabajo, se considera un Índice de Graham base de 0.5 y el nitrógeno ( $N_2$ ) del denominador de la ecuación anterior se obtendrá de la siguiente expresión:

$$N_2 = 100 - (CH_4 + CO_2 + O_2 + CO) \quad (4)$$

de lo que resulta:

$$K = \frac{CO}{0.265[100 - (CH_4 + CO_2 + CO)] - O_2} * 100 \quad (5)$$

Para una mejor comprensión de la aplicación del Índice de Graham ( $K$ ) se presenta el siguiente ejemplo, a partir de un muestreo realizado en una de las minas, objeto del estudio, donde se obtuvieron los siguientes datos de concentración de gases:  $CO$ , 1 ppm;  $CO_2$ , 2.3%;  $O_2$ , 16.6%;  $CH_4$ , 0.0%;  $H_2$ , 0.0%. De donde se tiene:

1. Proporción de  $N_2$  en el aire:  $\frac{16.6}{20.93} * 79.04 = 62.69\% N_2$
2. Gases totales:  $(CO + CO_2 + O_2 + CH_4 + H_2) = 18.9\%$
3. Contenido de  $N_2$ . Remplazando el valor de (2) en la ecuación:  $N_2 = 100 - 18.9 = 81.10\% N_2$
4. Contenido de aire:  $O_2 + N_2 = 62.69 + 16.6 = 79.29\%$
5. Exceso de  $N_2$ :  $(81.10\% - 62.69\%) = 18.41\%$
6. Contenido de gases inertes:  $(CO_2 + N_2) = 2.3 + 18.41 = 20.71\%$
7. Combustibles:  $(CH_4 + H_2 + CO) = 0 + 0 + 0.0001 = 1 \text{ ppm}$
8. Aire + Inertes + Combustibles:  $(79.29 + 20.71 + 0.001) = 100\%$

Ahora, se calcula el Índice de Graham:

$$K = \frac{CO}{0.265N_2 - O_2} * 100 = \frac{0.0001}{4.88} * 100 = 0.002\%$$

El denominador de esta ecuación se calcula de la siguiente forma. Contenido de oxígeno correspondiente al nitrógeno:  $0.265 N_2 = 0.265 (81.10) = 21.48\%$ . Deficiencia de oxígeno:  $(21.48 - 16.6) = 4.88\%$

Este mismo procedimiento se realizó para cada una de las muestras tomadas de los distintos tapones de cada mina durante el trabajo de campo, al igual que para cada muestra de la atmósfera minera.

Es importante anotar que el Índice de Graham puede calcularse mediante la ecuación anterior, siempre y cuando el incendio aún se encuentre en su fase de formación y el porcentaje de productos de destilación como el hidrógeno y los hidrocarburos superiores sea todavía despreciable. Pero en incendios ya desarrollados, el Índice de Graham según esta ecuación se hace muy inexacto, ya que las proporciones de hidrógeno e hidrocarburos superiores (como  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_3H_6$ ,  $C_2H_2$ ) pueden ser muy altas. Otras consideraciones que se deben tener en cuenta en la interpretación del Índice de Graham son:

- Aunque se considera que el monóxido de carbono (CO) es el indicador más importante en la detección precoz de un proceso de oxidación, el Índice de Graham ofrece la posibilidad de un análisis más exacto en la detección de un incendio.
- Las muestras de gases deben tomarse lo más cerca posible a la corriente de aire que sale del foco de incendio, para lo cual debe seleccionarse un punto de toma de muestras constante.
- El cálculo de un único valor para el Índice de Graham no tiene validez, pues éste debe obtenerse por comparación de varios valores que, como ya se mencionó, deben determinarse en un punto de medición constante y en momentos diferentes, lo cual permitirá establecer la evolución del incendio.
- Cuando en la corriente de aire fresco la relación natural  $O_2/N_2$  esté alterada, deberá determinarse la relación real  $O_2/N_2$  por toma de muestras y calcularse el valor de  $K$  de acuerdo con la ecuación planteada anteriormente.
- Debe evitarse el monitoreo de la atmósfera después de una voladura o cuando se sepa que hay gases presentes de escape de locomotoras diesel.
- El  $K$  base caracteriza un manto dado en un ambiente dado; por tanto, su valor varía ampliamente en función de las condiciones locales.
- Cuando el Índice de Graham se sitúa por encima del  $K$  base y su tendencia es creciente, deben tomarse medidas que inhiban o prevengan la oxidación o el incendio ya declarado.
- El Índice de Graham aumenta con la temperatura; por tanto, se puede considerar que un  $K$  superior a dos veces el  $K$  base es señal de peligro.

- Una dilución de los gases del incendio con aire fresco no altera teóricamente el valor de  $K$ , pero una dilución creciente afecta los valores analíticos que se hacen cada vez más pequeños, limitando el valor definitivo de  $K$ .
- La utilización del Índice de Graham está limitada a áreas donde no se practique la inertización con nitrógeno, ya que ello no permite observar la evolución de la temperatura.
- Lo más efectivo es el análisis de la evolución de  $K$  en el tiempo, ya que da una idea más precisa de la evolución de la temperatura.
- El aumento continuo de  $K$  por encima del  $K$  base es señal de alerta, pero una disminución del Índice de Graham por debajo del  $K$  base limita la certeza acerca de si el incendio localizado detrás de los tabiques se ha apagado.

### 6.3 Análisis de resultados

En las Tablas 13 a 20 al final, se presentan los resultados del cálculo del índice  $K$  para las diferentes minas del estudio.

En la mina 8 (Tabla 13), se presentan valores muy altos de  $K$  (1.67-2.26%) en el punto 3, ya que por allí, además de los gases que se filtran a través de los tapones de la zona de incendio, fluye el aire viciado del frente de explotación. Este valor representa un evidente desarrollo de un incendio. Los registros tomados el día 22 de octubre de 1995 muestran un claro ascenso en las condiciones críticas del ambiente, como se aprecia en los puntos 1 y 3; así como en la atmósfera delante de los tapones, que está altamente contaminada. Ello porque los tapones permiten filtrar el aire viciado del incendio, que está activo y en proceso continuo de aceleración, como se deduce del valor de  $K$ , que en el tapón 15 alcanza el máximo de 3.86%. Aunque se presenten valores altos de  $K$ , ninguna mezcla allí muestreada puede catalogarse como explosiva, dada la ausencia de  $H_2$  y la baja cantidad de  $CH_4$ , cuyo contenido máximo es de 0.3%.

En la mina 5 (Tabla 14), los valores de  $K$  son muy bajos, hasta del 0.007%, y las condiciones ambientales son muy favorables, ya que el porcentaje de deficiencia de  $O_2$  no supera el 2.5%. Los valores máximos de  $K$  en la mina 4 (Tabla 15) se encontraron dentro del tapón 1 del manto  $\alpha$ . Estos valores están comprendidos entre un 1.343 y un 3.597%, pero se observó un incremento continuo de los mismos a medida que se fueron haciendo los respectivos muestreos. Esto puede indicar claramente que existe un incendio activo y en proceso continuo de aceleración. Los valores de  $K$  calculados para los demás puntos indican condiciones estables y controladas en los tapones, y en los sitios de muestreo de la atmósfera minera, como consecuencia de los bajos tenores de  $CO$ ,  $CH_4$  y  $H_2$ . Los valores calculados para  $K$  en la mina 2 (Tabla 16) indican que no hay ningún indicio de aceleración del fenómeno, por lo cual puede considerarse que la situación está controlada y es estable. Las mediciones de campo muestran bajos contenidos de  $CO$ ,  $CH_4$  y  $H_2$ , por lo tanto el análisis de la composición de la mezcla indica que la atmósfera no es explosiva en los sitios seleccionados para el muestreo.

En la mina 7 (Tabla 17), el valor más alto de  $K$  se presentó en el retorno del manto 2 el día 26 de julio de 1995, fecha en la cual se estaba superando un derrumbe en el manto 2 que afectaba las condiciones ambientales. Aunque no hubo descenso en el contenido de  $O_2$ , sí se registró el mayor contenido de  $CH_4$ .

En la mina 3 (Tabla 18), los valores calculados para  $K$  muestran que se está produciendo una oxidación lenta, dado que los valores en los puntos de retorno de aire de cada manto se muestran muy cercanos (0.434 a 0.804) al valor base de  $K$ , que es de 0.5, y aumentan sustancialmente con un leve incremento en la concentración de  $CO$  en la atmósfera. El valor de  $K$  igual a 1.129% corresponde a una medición realizada después de una voladura, por lo cual no es representativo de las condiciones normales del ambiente minero con respecto a los incendios. Los valores de  $K$  encontrados con el muestreo tanto delante como detrás de los tapones son inferiores al 0.5%. La atmósfera detrás de los tapones no registra la presencia de un incendio activo, según lo indican los bajos porcentajes de  $CO$ ; de tal modo que la situación es estable y está controlada.

En la mina 6 (Tabla 19), los más altos valores de  $K$  se presentan en el punto de retorno, pero en ningún momento superan el valor base (0.5%), presentándose, por tanto, buenas condiciones ambientales mineras. Los valores de  $K$  encontrados en la mina 1 (Tabla 20) son muy pequeños pues ninguno sobrepasa el valor base. Esto puede ser indicio de unas condiciones estables, que no comprometen la seguridad de la mina ya que no se presentan focos desarrollados o en gestación. Los valores más altos de  $K$  para esta mina se presentan en la cruzada del manto 1 al manto 2 ( $M1-M2$ ), ya que allí, se registran los porcentajes más altos de  $CO$  en una atmósfera rica en  $O_2$ . Al analizar gráficamente la composición de la mezcla, se encontró que, en ningún punto de muestreo, ésta indica que la atmósfera sea explosiva, pues los registros de  $H_2$  y  $CH_4$  fueron muy bajos y no se reportaron contenidos de  $O_2$  por debajo del valor límite permisible.

#### 6.4 Medios de control y extinción de los incendios

Los factores que inciden en el inicio y propagación de un incendio están relacionados básicamente con tres elementos: combustible, oxígeno y energía; por tanto, para extinguir o controlar un incendio en una mina de carbón es necesario que al menos uno de estos tres elementos sea removido. El combustible generalmente, sólo se remueve al ser consumido o cuando físicamente es separado. La eliminación del oxígeno puede lograrse con la introducción de una atmósfera inerte o mediante el aislamiento de la zona de incendio de cualquier fuente de aire fresco. La remoción de la energía y el enfriamiento de todo el combustible por debajo del punto de reignición, puede realizarse por medio de un agente que absorba calor, usualmente un gas inerte o el agua.

Básicamente, los métodos empleados en la extinción de incendios pueden dividirse en dos grupos: 1) los relacionados con la extinción activa del incendio y 2) los de localización o bloqueo. El primer grupo consiste en atacar directamente el incendio, en tanto sea posible, mediante el empleo de agua,

arena, polvo inerte, espuma, polvos extintores y gases inertes y de combustión derivados de los halógenos. Los métodos de localización o bloqueo consisten en aislar la zona afectada del acceso de aire, de tal modo que el foco del incendio se sofoque por falta de oxígeno. El aislamiento de la zona afectada se puede hacer mediante la construcción de muros en todos los avances que comunican con la superficie y rellenando las grietas y hundimientos que puedan facilitar el paso del aire.

Por normas de seguridad, la extinción de un incendio subterráneo debe llevarse a cabo mediante el uso de métodos activos. A los métodos de bloqueo debe recurrirse única y exclusivamente en caso de no ser posible la utilización de ningún método activo por la imposibilidad de actuar directamente sobre el foco de incendio. Los medios empleados en la extinción activa del incendio son:

##### 6.4.1 Extinción de incendios con agua.

Es el método más comúnmente empleado gracias a su sencillez, eficiencia y bajos costos. Su utilización exige medidas especiales con el fin de evitar el eventual retroceso del vapor y de los humos, el empozamiento del agua en la excavación y la acumulación de vapor. Entre las desventajas que presenta el agua como medio extintor se tiene:

- Facilidad para conducir la corriente eléctrica.
- La posibilidad de generar derrumbes en caso que moje rocas poco competentes.
- El vapor de agua puede dar lugar a la formación de gases explosivos al entrar en contacto con el material incandescente.

##### 6.4.2 Extinción de un incendio con espumas extintoras.

El principio de su efecto extintor se basa en la separación física del elemento combustible y el aire. Pueden clasificarse en:

- Espumas químicas. Se emplean muy poco ya que pueden producir corrosión a los equipos.
- Espumas físicas. Con ellas se logran efectos como aislamiento del calor, refrigeración al vaporizarse el agua que contiene, aislamiento del aire con respecto al fuego y dilución de la concentración de oxígeno.

##### 6.4.3 Extinción de un incendio con gases inertes.

Su objetivo principal es reducir el contenido de oxígeno del aire del foco de incendio con el propósito de prevenir o inhibir la combustión. Otros objetivos son:

- Reducir el riesgo de explosión durante la construcción de tapones o sellamientos.
- Prevenir calentamientos ocultos en zonas altamente susceptibles a la combustión espontánea.

- Controlar la propagación de un incendio abierto durante las operaciones de rescate, control del incendio y construcción de tapones.
- Acelerar el desarrollo de una atmósfera inerte en una zona recientemente sellada y prevenir la formación de una mezcla explosiva al ser reabierta un área.

Los gases mas comúnmente empleados en la aplicación de esta técnica son:

- Dióxido de carbono: Tiene varias desventajas de las cuales se destacan su gran solubilidad en el agua, lo que ocasiona grandes pérdidas cuando se trabaja en condiciones húmedas y que es absorbido fácilmente por el carbón y el material ya quemado. No se recomienda emplear este gas en casos en que aparezca incandescencia ya que puede ser reducido a  $CO$ . Además este gas es más costoso que el nitrógeno.
- Gases de combustión: La inertización con estos gases resulta una técnica altamente costosa y requiere personal calificado.
- Nitrógeno: Para la inertización, el nitrógeno se emplea en forma líquida y su aplicación debe llevarse a cabo teniendo siempre en cuenta el gradiente de presión del aire existente, desde el lado de entrada del aire.

#### 6.4.4 Extinción de un incendio con arena o con polvos inertes.

Consiste en cubrir las superficies incandescentes con una capa gruesa de tales materiales, para impedir así el acceso de aire. Su uso es muy amplio dado sus bajos costos, su efectividad y la facilidad para aplicarlos.

#### 6.4.5 Extinción de un incendio con la extracción del carbón.

Consiste en retirar el carbón incandescente del foco de incendio y en llenar los espacios dejados con material inerte, polvo de caliza o una solución de yeso.

#### 6.4.6 Extinción de un incendio con halógeno.

Actualmente los halógenos se encuentran en desuso ya que forman fácilmente gases tóxicos.

Finalmente, deben mencionarse los métodos de localización o bloqueo. En estos, el aislamiento del acceso del aire a la zona del incendio se realiza básicamente en dos etapas: Un aislamiento provisional del incendio y el aislamiento definitivo o permanente. En el aislamiento provisional, el objetivo es suspender rápidamente el acceso de aire al foco del incendio con el fin de contener la propagación de éste y crear condiciones aptas, tanto para el personal de salvamento como para quienes realizan los trabajos de construcción de los tapones definitivos. Por su parte, en los aislamientos definitivos o permanentes, el objetivo es eliminar completamente el flujo de aire a través de la zona de incendio

y, en algunos casos, impedir que dicho flujo llegue a los sectores explotados. En las minas donde se presentan problemas de gases, especialmente las grisutuosas, después de construir los tapones permanentes se acumulan muestras de gases explosivos detrás de éstos, las cuales, según su concentración y su grado de explosividad, pueden originar una explosión; por tanto se requieren tapones de una construcción tal que puedan resistir las explosiones.

## 7 CONCLUSIONES

La producción de  $CO$  está asociada a bajas temperaturas; de ahí que resulte muy eficiente en la detección temprana de un incendio efectuar el monitoreo continuo de este gas. Antes de que aparezcan manifestaciones externas, como el olor o el humo, la concentración de  $CO$  puede alcanzar valores que pueden detectarse incluso si la dilución ocasionada por la corriente de aire es elevada. El análisis de productos gaseosos de combustión es el método más usado en la detección de la combustión espontánea en minas subterráneas de carbón

El cálculo del Índice de Graham resulta de gran importancia no sólo en la detección de incendios por autocombustión del carbón sino también en el estudio de la evolución de un incendio. Aquellos incendios cuya extinción con los métodos activos es imposible, ocasionan el cierre de las excavaciones, lo cual a su vez genera áreas donde se hace difícil la extinción del incendio; aparte de que es imposible la explotación de partes considerables de la mina.

Los controles realizados en cada tapón permiten caracterizar un incendio en el momento del muestreo, pero no permiten hacer una evaluación de éste a largo plazo. Ningún tapón de los muestreados en el estudio, cumple con especificaciones que faciliten su muestreo. En algunas minas, en el lugar del muestreo se encontraron dos tapones contiguos; por tanto como no fue posible introducir un tubo que pasara las dos paredes, las atmósferas muestreadas no fueron las representativas de cada incendio. En todos los tapones muestreados se encontraron fugas; es decir, ningún tapón resultó totalmente hermético.

En general en todas las minas muestreadas se encontraron las zonas afectadas por el incendio bajo control y estables, a excepción de la mina 4 (tapón 1 manto a) y la mina 8 (manto 2) las cuales presentan, respectivamente, un incendio activo y un incendio en proceso continuo de aceleración.

## REFERENCIAS

Centro de Investigaciones del Carbón, *Condiciones ambientales de la minería subterránea de carbón en la cuenca Amagá-Angélopis*. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, 1996.

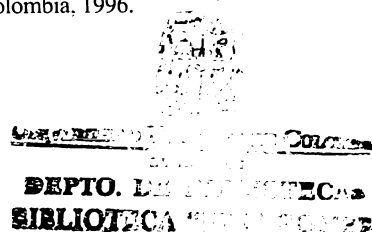


Tabla 5. Mediciones de campo en la mina 1, 1995

Lugar	Fecha	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	Ts (C°)	Hr (%)	Pb (mmHg)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Bocamina ppal (entrada de aire M1)	7/7/95	0.0000	0.01	20.6	0.0	0.0	79.39	24.5	74.0	672.59	5.41
	1/8/95	0.0000	0.02	20.8	0.0	0.0	79.18	21.0	91.0	672.59	7.06
	15/8/95	0.0001	0.02	20.7	0.0	0.0	79.18	24.5	88.0	670.56	6.92
Cruzada M1-M2 (ret M1 = entr. M2)	7/7/95	0.0003	0.09	20.6	0.0	0.0	79.31	25.5	85.0	681.99	4.24
	1/8/95	0.0006	0.16	20.3	0.0	0.0	79.54	24.5	88.0	681.25	5.89
	15/8/95	0.0005	0.16	20.5	0.1	0.0	79.24	24.5	91.0	683.26	5.75
Cruzada M2-M2 (ret M2 = entr. M3)	7/7/95	0.0004	0.27	20.1	0.0	0.0	79.63	26.5	90.0	675.64	3.69
	1/8/95	0.0003	0.40	20.5	0.0	0.0	79.10	26.5	96.0	675.13	4.24
	15/8/95	0.0003	0.30	20.3	0.1	0.0	79.30	26.5	90.0	677.67	4.10
Retorno Gen M1-M2- M3 (Nivel 9)	7/7/95	0.0008	0.60	19.6	0.0	0.0	79.80	29.0	96.0	671.07	2.22
	1/8/95	0.0008	0.60	19.6	0.0	0.0	79.80	28.5	96.0	670.56	2.47
	15/8/95	0.0004	0.40	20.0	0.1	0.0	79.50	29.0	89.0	669.04	2.03

Tabla 6. Mediciones de campo en la mina 2, 1995.

Lugar	Fecha	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	Ts (C°)	Hr (%)	Pb (mmHg)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Entrada de aire M3	14/7/95	0.0000	0.7	19.0	0.0	0.0	80.30	28.0	86.0	652.27	3.11
	27/7/95	0.0007	1.0	19.0	0.3	0.0	79.70	28.0	96.0	652.78	3.75
	2/8/95	0.0000	1.0	19.1	0.0	0.0	79.90	28.0	92.0	654.81	3.60
Retorno de aire M3	14/7/95	0.0008	0.7	18.0	0.2	0.0	81.10	31.0	93.0	649.22	4.08
	27/7/95	0.0005	1.5	17.8	0.3	0.0	80.40	29.0	93.0	647.70	4.82
	2/8/95	0.0007	1.1	17.9	0.2	0.0	80.80	30.0	93.0	648.46	4.51
Tapón 2 Sur M2 (delante)	14/7/95	0.0001	2.3	16.6	0.0	0.0	81.10	30.0	86.0	652.27	4.00
	27/7/95	0.0001	3.5	16.5	0.2	0.0	79.80	29.0	93.0	658.78	4.00
	2/8/95	0.0000	3.0	16.0	0.0	0.0	81.00	29.5	89.0	655.32	8.00
Tapón 2 Sur M2 (detrás)	14/7/95	0.0002	2.5	16.4	0.0	0.0	81.10				4.00
	27/7/95	0.0001	3.0	15.8	0.3	0.0	80.90				4.00
	2/8/95	0.0000	2.5	17.1	0.0	0.0	80.40				8.00
Tapón 5 Norte M1 (delante)	14/7/95	0.0001	0.6	19.9	0.0	0.0	79.50	27.0	89.0	651.76	2.00
	27/7/95	0.0000	2.0	20.0	0.2	0.0	77.80	28.0	86.0	653.29	4.00
	2/8/95	0.0000	0.5	20.8	0.0	0.0	78.70	26.5	96.0	655.32	4.00
Tapón 5 Norte M1 (detrás)	14/7/95	0.0001	6.0	12.0	0.0	0.0	82.00				2.00
	27/7/95	0.0001	6.0	12.1	0.2	0.0	81.70				4.00
	2/8/95	0.0000	6.0	12.4	0.0	0.0	81.60				4.00



Tabla 6. Continuación

Lugar	Fecha	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	Ts (C°)	Hr (%)	Pb (mmHg)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Tapón 6	14/7/95	0.0001	0.6	19.6	0.0	0.0	79.80	27.0	85.0	652.53	2.00
Norte	27/7/95	0.0001	0.5	20.1	0.2	0.0	79.20	27.0	93.0	653.80	4.00
M1 (delante)	2/8/95	0.0000	0.5	20.5	1.0	0.0	78.00	26.5	92.0	656.34	4.00
Tapón 6	14/7/95	0.0006	6.0	12.5	0.0	0.0	81.50				2.00
Norte	27/7/95	0.0001	6.0	12.5	0.1	0.0	81.40				4.00
M1 (detrás)	2/8/95	0.0000	6.0	13.1	0.0	0.0	80.90				4.00

Tabla 7. Mediciones de campo en la mina 3, 1995

Lugar	Fecha	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	Ts (C°)	Hr (%)	Pb (mmHg)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Entrada de aire	5/7/95	0.0004	0.20	20.4	0.2	0.0	79.20	26.0	85.0	669.04	3.22
	19/7/95	0.0002	0.50	20.4	0.3	0.0	78.80	25.0	84.0	669.54	2.55
Nivel 4°, Cabeecera M2	2/8/95	0.0003	0.08	20.8	0.0	0.0	79.12	24.0	91.0	671.07	2.93
Rétorno de aire	5/7/95	0.0038	0.20	20.5	0.0	0.0	79.30	27.5	92.0	673.10	6.12
	19/7/95	0.0027	0.10	20.5	0.3	0.0	79.10	27.0	92.0	673.10	4.95
Nivel 5° M2	2/8/95	0.0030	0.16	20.4	0.0	0.0	79.44	27.5	92.0	675.13	5.42
Entrada de aire	5/7/95	0.0000	0.10	20.5	0.0	0.0	79.40	24.5	96.0	668.02	4.30
	19/7/95	0.0002	0.20	20.8	0.2	0.0	78.80	25.5	85.0	664.46	4.89
M3	2/8/95	0.0001	0.16	20.8	0.0	0.0	79.04	25.0	84.0	667.51	4.60
Retorno de aire	5/7/95	0.0023	0.10	20.5	0.0	0.0	79.40	28.0	93.0	670.56	7.90
	19/7/95	0.0070	0.30	20.3	0.4	0.0	78.99	28.0	93.0	668.02	8.61
M3	2/8/95	0.0030	0.28	20.5	0.1	0.0	79.12	27.5	92.0	670.56	8.26
Nivel Patio M2	5/7/95	0.0018	0.60	19.1	0.0	0.0	80.30	31.5	90.0	658.88	4.59
	19/7/95	0.0007	1.20	19.2	0.2	0.0	79.40	30.5	96.0	685.29	4.59
	2/8/95	0.0005	1.20	19.5	0.4	0.0	78.90	31.0	93.0	657.86	3.62
Tapón apique M1 (delante)	5/7/95	0.0001	3.00	19.4	0.3	0.0	77.30	30.0	86.0	649.22	4.00
	19/7/95	0.0000	3.00	20.1	0.1	0.0	76.80	30.0	86.0	677.93	4.00
	2/8/95	0.0001	3.00	19.6	0.2	0.0	77.20	30.0	86.0	666.58	4.00
Tapón apique M1 (detrás)	5/7/95	0.0000	6.00	4.60	0.4	0.0	89.00				4.00
	19/7/95	0.0001	6.00	4.30	0.1	0.0	89.60				4.00
	2/8/95	0.0001	6.00	4.50	0.3	0.0	89.20				4.00
Tapón M2 (delante)	5/7/95	0.0009	1.00	19.6	0.3	0.0	79.10	31.0	87.0	659.38	36.0
	19/7/95	0.0004	0.50	19.7	0.0	0.0	79.80	29.0	93.0	662.18	36.0
	2/8/95	0.0007	0.80	19.7	0.2	0.0	79.30	30.0	90.0	660.68	36.0
Tapón M2 (detrás)	5/7/95	0.0001	6.00	3.30	0.4	0.0	90.30				36.0
	19/7/95	0.0006	6.00	3.30	0.0	0.0	90.70				36.0
	2/8/95	0.0004	6.00	3.30	0.3	0.0	90.40				36.0

Tabla 8. Mediciones de campo en la mina 4, 1995

Lugar	Fecha	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	Ts (C°)	Hr (%)	Pb (mmHg)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Entr. aire (Bocamina)	28/8/95	0.0000	0.02	20.6	0.1	0.0	79.28	21.5	89.0	656.54	0.75
	15/9/95	0.0000	0.02	20.7	0.0	0.0	79.28	21.0	91.0	655.83	0.90
	29/9/95	0.0000	0.01	20.4	0.1	0.0	79.49	21.0	90.0	657.35	0.80
Ret. aire (cruzada Principal)	28/8/95	0.0000	0.11	18.3	0.2	0.0	81.39	25.0	90.0	653.29	1.15
	15/9/95	0.0000	0.12	18.7	0.2	0.0	80.98	25.5	88.0	652.27	1.02
	29/9/95	0.0001	0.10	17.9	0.2	0.0	81.80	25.5	92.0	654.30	1.27
Entr. aire Manto b	28/8/95	0.0000	0.22	19.0	0.1	0.0	80.68	26.0	92.0	654.81	1.18
	15/9/95	0.0000	0.20	19.1	0.1	0.0	80.60	25.0	92.0	656.34	0.99
	29/9/95	0.0000	0.15	18.6	0.2	0.0	81.05	24.0	92.0	657.35	1.51
Ret. aire Manto b	28/8/95	0.0000	1.50	16.0	0.0	0.0	82.50	30.0	96.0	648.21	0.15
	15/9/95	0.0000	1.30	17.5	0.1	0.0	81.10	28.0	96.0	652.27	0.23
	29/9/95	0.0000	1.50	17.4	0.2	0.0	80.90	29.5	96.0	653.80	0.19
Entr. aire Manto c	28/8/95	0.0000	0.10	20.5	0.0	0.0	79.40	21.5	91.0	655.32	0.59
	15/9/95	0.0000	0.10	20.3	0.1	0.0	79.50	21.5	87.0	657.86	0.64
	29/9/95	0.0001	0.10	20.4	0.1	0.0	79.40	21.0	91.0	657.86	0.77
Ret. aire Manto c	28/8/95	0.0000	0.10	20.0	0.0	0.0	79.90	23.0	92.0	653.29	0.72
	15/9/95	0.0000	0.20	20.0	0.1	0.0	79.70	24.0	92.0	656.34	0.78
	29/9/95	0.0001	0.12	19.9	0.1	0.0	79.88	23.5	91.0	656.84	0.80
Entr. aire Manto a	28/8/95	0.0000	0.10	19.9	0.0	0.0	80.00	23.0	92.0	653.29	0.69
	15/9/95	0.0000	0.04	19.9	0.1	0.0	79.96	24.0	92.0	655.32	0.86
	29/9/95	0.0000	0.10	19.9	0.1	0.0	79.90	23.5	96.0	656.34	0.75
Ret. aire Manto a	28/8/95	0.0001	0.70	18.5	0.0	0.0	80.80	29.5	96.0	648.71	0.34
	15/9/95	0.0005	0.40	18.6	0.1	0.0	80.90	30.0	96.0	651.26	0.59
	29/9/95	0.0004	0.50	18.4	0.1	0.0	81.00	29.5	96.0	653.29	0.54
Tapón 1 manto a (delante)	28/8/95	0.0005	0.20	18.3	0.4	0.0	81.10	30.0	96.0	650.74	4.0
	15/9/95	0.0027	0.30	18.8	0.0	0.0	80.90	30.5	93.0	647.70	8.0
	29/9/95	0.0038	0.40	18.4	0.2	0.0	81.00	30.5	96.0	651.51	8.0
Tapón 1 manto a (detrás)	28/8/95	0.1023	0.50	14.7	0.4	0.0	84.30				4.0
	15/9/95	0.1500	3.00	14.3	0.0	0.0	82.55				8.0
	29/9/95	0.3000	4.00	13.4	0.2	0.0	82.10				8.0
Tapón 3 manto a (delante)	28/8/95	0.0003	0.50	18.1	0.4	0.0	81.00	30.5	90.0	651.26	4.0
	15/9/95	0.0000	0.50	18.8	0.0	0.0	80.70	30.5	90.0	648.72	2.0
	29/9/95	0.0000	0.50	18.7	0.1	0.0	80.70	30.5	94.0	652.78	2.0
Tapón 3 manto a (detrás)	28/8/95	0.0006	0.50	18.3	0.4	0.0	80.80				4.0
	15/9/95	0.0001	0.50	18.8	0.0	0.0	80.70				2.0
	29/9/95	0.0003	1.00	18.5	0.1	0.0	80.40				2.0

Tabla 9. Mediciones de campo en la mina 5

Lugar	Fecha	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	Ts (C°)	Hr (%)	Pb (mmHg)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Entr. Aire Bocamina C. Honduras	22/8/95	0.0001	0.05	19.7	0.30	0.0	79.95	22.0	92	647.70	0.19
	5/9/95	0.0000	0.05	20.4	0.30	0.0	79.25	22.0	84	645.67	0.22
	20/9/95	0.0001	0.1	20.1	0.20	0.0	79.60	21.5	90	646.73	0.21
Ret. Aire Bocamina San Luis	22/8/95	0.0001	0.28	18.9	0.30	0.0	80.52	23.0	95	644.65	0.22
	5/9/95	0.0000	0.30	20.0	0.40	0.0	79.30	24.0	88	643.13	0.34
	20/9/95	0.0001	0.32	19.2	0.30	0.0	80.18	23.0	92	645.44	0.31

Tabla 10. Mediciones de campo en la mina 6

Lugar	Fecha	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	Ts (C°)	Hr (%)	Pb (mmHg)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Bocamina Principal	13/7/95	0.0000	0.06	20.8	0.0	0.0	79.14	23.5	80	675.13	1.17
	28/7/95	0.0000	0.03	20.8	0.2	0.0	78.97	22.0	84	677.67	1.47
	14/8/95	0.0000	0.05	20.8	0.2	0.0	78.95	22.5	84	676.66	1.32
Bocaviento 1	13/7/95	0.0000	0.14	20.4	0.2	0.0	79.26	23.0	84	674.12	0.69
	28/7/95	0.0000	0.04	20.3	0.1	0.0	79.56	21.5	91	675.64	0.34
	14/8/95	0.0000	0.09	20.4	0.2	0.0	79.31	22.4	91	675.13	0.51
Bocaviento 4	13/7/95	0.0003	0.20	20.4	0.0	0.0	79.40	26.0	93	673.61	0.53
	28/7/95	0.0002	0.08	20.2	0.2	0.0	79.5 2	23.5	96	675.13	0.62
	14/8/95	0.0003	0.14	20.3	0.2	0.0	79.36	24.8	93	674.37	0.57

Tabla 11. Mediciones de campo en la mina 7, 1995.

Lugar	Fecha	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	Ts (C°)	Hr (%)	Pb (mmHg)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Bocamina Principal Entr. aire M1	12/7/95	0.0001	0.30	20.5	0.0	0.0	79.20	26.0	71	662.43	2.03
	26/95	0.0000	0.10	20.8	0.2	0.0	78.90	25.0	77	665.99	1.57
	15/8/95	0.0000	0.12	20.8	0.1	0.0	78.98	24.0	76	669.54	2.49
Retorno de aire M1	12/7/95	0.0001	0.08	20.6	0.1	0.0	79.22	23.1	84	664.97	2.15
	26/95	0.0000	0.30	20.1	0.2	0.0	79.40	23.3	88	627.38	1.69
	15/8/95	0.0000	0.50	20.3	0.1	0.0	79.10	23.5	91	590.30	1.93
Bocamina Principal Entr. aire M2	12/7/95	0.0001	0.02	20.7	0.0	0.0	79.28	23.5	74	665.99	1.71
	26/95	0.0000	0.10	20.8	0.2	0.0	78.90	23.5	77	668.02	2.18
	15/8/95	0.0000	0.10	20.7	0.0	0.0	79.20	24.0	77	670.05	1.94
Retorno de aire M2	12/7/95	0.0001	0.40	20.7	0.2	0.0	78.70	24.5	92	665.99	2.41
	26/95	0.0000	0.20	20.8	0.3	0.0	78.70	25.0	92	665.48	2.88
	15/8/95	0.0000	0.60	20.6	0.0	0.0	78.80	23.5	95	666.50	1.93

Tabla 12. Mediciones de campo en la mina 8, 1995.

Lugar	Fecha	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	Ts (C°)	Hr (%)	Pb (mmHg)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Punto 1	6/9/95	0.0001	0.1	20.7	0.0	0.0	79.20	24.5	74	673.10	1.89
	22/9/95	0.0003	0.1	20.7	0.0	0.0	79.20	25.0	91	675.13	1.50
	5/10/95	0.0002	0.1	20.6	0.1	0.0	79.30	25.0	88	674.18	1.65
Punto 2	6/9/95	0.0000	0.1	20.8	0.1	0.0	79.00	23.5	84	673.10	0.63
	22/9/95	0.0000	0.05	20.4	0.1	0.0	79.45	23.5	87	675.64	0.72
	5/10/95	0.0000	0.1	20.6	0.1	0.0	79.20	24.0	90	675.37	0.68
Punto 3	6/9/95	0.0218	1.5	19.3	0.0	0.0	79.18	23.0	84	675.13	0.96
	22/9/95	0.0300	2.0	18.7	0.1	0.0	79.17	22.5	91	676.15	0.78
	5/10/95	0.0270	1.8	19.0	0.1	0.0	79.07	23.5	86	675.64	1.07
Tapón 2 (Delante)	6/9/95	0.0167	0.5	19.5	0.0	0.0	79.98	27.8	92	672.59	4.0
	22/9/95	0.0531	2.5	17.6	0.0	0.0	79.85	27.0	93	672.08	4.0
	5/10/95	0.0343	0.5	18.7	0.1	0.0	80.67	26.0	92	675.13	4.0

Tabla 12. Continuación

Lugar	Fecha	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	Ts (C°)	Hr (%)	Pb (mmHg)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Tapón 2 (Detrás)	6/9/95	0.3000	6.0	11.5	0.3	0.0	81.90				4.0
	22/9/95	0.3000	6.0	10.6	0.0	0.0	83.10				4.0
	5/10/95	0.3000	6.0	7.2	0.1	0.0	86.40				4.0
Tapón 5 (Delante)	6/9/95	0.0045	0.5	20.2	0.0	0.0	79.30	24.5	78	671.07	4.0
	22/9/95	0.0430	2.8	17.3	0.0	0.0	79.86	23.0	83	672.59	4.0
	5/10/95	0.0042	0.5	20.2	0.1	0.0	79.30	25.0	87	675.13	4.0
Tapón 5 (Detrás)	6/9/95	0.2500	6.0	8.3	0.3	0.0	85.15				4.0
	22/9/95	0.3000	6.0	8.3	0.3	0.0	85.10				4.0
	5/10/95	0.3000	6.0	7.8	0.2	0.0	85.70				4.0
Tapón 15 (Delante)	6/9/95	0.0004	3.0	20.3	0.0	0.0	76.70	24.0	96	673.10	2.0
	22/9/95	0.0327	2.5	17.6	0.0	0.0	79.87	24.5	92	673.10	2.0
	5/10/95	0.0014	1.5	20.5	0.1	0.0	77.90	24.0	92	676.15	2.0
Tapón 15 (Detrás)	6/9/95	0.0840	6.0	9.9	0.0	0.0	84.02				2.0
	22/9/95	0.0473	6.0	10.3	0.0	0.0	83.65				2.0
	5/10/95	0.0750	6.0	9.8	0.1	0.0	84.03				2.0

Tabla 13. Resultados de campo en la mina 8, 1995.

Lugar	Fecha	N <sub>2</sub> (%)	Def O <sub>2</sub> (%)	K (%)	N <sub>2</sub> + (%)	R	Coord. X	Coord. Y	Mezcla Explosiva
Punto 1	6/9/95	79.20	0.29	0.035	1.03	0.00	1.18	0.0001	No
	22/9/95	79.20	0.27	0.111	1.03	0.00	1.18	0.0001	No
	5/10/95	79.30	0.37	0.054	1.41	0.99	1.56	0.1000	No
Punto 2	6/9/95	79.00	0.38	0.000	1.45	1.00	1.60	0.1000	No
	22/9/95	79.45	0.64	0.000	2.41	1.00	2.49	0.1000	No
	5/10/95	79.20	0.37	0.000	1.41	1.00	1.56	0.1000	No
Punto 3	6/9/95	79.18	1.67	1.305	6.30	0.00	8.55	0.0090	No
	22/9/95	79.17	2.26	1.327	8.55	0.79	11.55	0.1120	No
	5/10/95	79.07	1.94	1.392	7.32	0.79	10.02	0.1110	No
Tapón 2 (Delante)	6/9/95	0.0167	1.68	0.994	6.34	0.00	7.09	0.0070	No
	22/9/95	0.0531	3.54	1.500	13.39	0.00	17.14	0.0210	No
	5/10/95	0.0343	2.42	1.417	9.15	0.74	9.90	0.1140	No
Tapón 2 (Detrás)	6/9/95	81.90	10.19	2.944	38.47	0.50	47.47	0.4200	No
	22/9/95	83.10	11.41	2.629	43.07	0.00	52.07	0.1200	No
	5/10/95	86.40	15.68	1.913	59.20	0.25	68.20	0.2200	No
Tapón 5 (Delante)	6/9/95	79.30	0.80	0.563	3.02	0.00	3.77	0.0020	No
	22/9/95	79.86	3.85	1.117	14.53	0.00	18.73	0.0170	No
	5/10/95	79.30	0.77	0.545	2.92	0.96	3.67	0.1020	No
Tapón 5 (Detrás)	6/9/95	85.15	14.25	1.754	53.81	0.55	62.81	0.3250	No
	22/9/95	85.10	14.23	2.108	53.76	0.50	62.76	0.4200	No
	5/10/95	85.70	14.89	2.015	56.24	0.40	65.24	0.3200	No
Tapón 15 (Delante)	6/9/95	76.70	0.01	3.860	0.04	0.00	4.54	0.0002	No
	22/9/95	79.87	3.55	0.921	13.41	0.00	17.16	0.0130	No
	5/10/95	77.90	0.13	1.077	0.48	0.99	2.73	0.1010	No
Tapón 15 (Detrás)	6/9/95	84.02	12.35	0.680	46.63	0.00	55.63	0.0340	No
	22/9/95	83.65	11.85	0.399	44.75	0.00	53.75	0.0190	No
	5/10/95	84.03	12.45	0.602	47.02	0.57	56.02	0.1300	No

Tabla 14. Resultados de campo en la mina 5, 1995.

Lugar	Fecha	N <sub>2</sub> (%)	Def O <sub>2</sub> (%)	K (%)	N <sub>2</sub> + (%)	R	Coord. X	Coord. Y	Mezcla Explosiva.
Entr. Aire	22/8/95	79.95	1.47	0.007	5.55	0.99	5.63	0.300	No
Bocamina	5/9/95	79.25	0.59	0.000	2.21	1.00	2.29	0.300	No
C. Honduras	20/9/95	79.60	0.98	0.010	3.69	0.99	3.84	0.200	No
Ret. Aire	22/8/95	80.52	2.42	0.004	9.15	0.99	9.57	0.300	No
Bocamina	5/9/95	79.30	0.99	0.000	3.77	1.00	4.22	0.400	No
San Luis	20/9/95	80.18	2.03	0.005	7.67	0.99	8.15	0.300	No

Tabla 15. Resultados de campo en la mina 4, 1995.

Lugar	Fecha	N <sub>2</sub> (%)	Def O <sub>2</sub> (%)	K (%)	N <sub>2</sub> + (%)	R	Coord. X	Coord. Y	Mezcla Explosiva
Entr. aire (Bocamina)	28/8/95	79.28	0.39	0.000	1.49	1.0	1.52	0.10000	No
	15/9/95	79.28	0.29	0.000	1.11	0.0	1.14	0.00000	No
	29/9/95	79.49	0.65	0.000	2.45	1.0	2.47	0.10000	No
Ret. aire (cruzada Principal)	28/8/95	81.39	3.25	0.000	12.28	1.0	12.45	0.20000	No
	15/9/95	80.98	2.74	0.000	10.36	1.0	10.54	0.20000	No
	29/9/95	81.80	3.76	0.003	14.20	1.0	14.35	0.20000	No
Entr. aire Manto b	28/8/95	80.68	2.36	0.000	8.93	1.0	9.26	0.10000	No
	15/9/95	80.60	2.24	0.000	8.47	1.0	8.77	0.10000	No
	29/9/95	81.05	2.86	0.000	10.81	1.0	11.04	0.20000	No
Ret. aire Manto b	28/8/95	82.50	5.85	0.000	22.08	0.0	24.33	0.00000	No
	15/9/95	81.10	3.98	0.000	15.01	1.0	16.96	0.10000	No
	29/9/95	80.90	4.02	0.000	15.19	1.0	17.44	0.20000	No
Entr. aire Manto c	28/8/95	79.40	0.53	0.000	1.98	0.0	2.13	0.00000	No
	15/9/95	79.50	0.75	0.000	2.84	1.0	2.99	0.10000	No
	29/9/95	79.40	0.63	0.016	2.36	1.0	2.51	0.10000	No
Ret. aire Manto c	28/8/95	79.90	1.16	0.000	4.37	0.0	4.52	0.00000	No
	15/9/95	79.70	1.10	0.000	4.17	1.0	4.47	0.10000	No
	29/9/95	79.88	1.25	0.008	4.73	1.0	4.91	0.10000	No
Entr. aire Manto a	28/8/95	80.00	1.28	0.000	4.85	0.0	5.00	0.00000	No
	15/9/95	79.96	1.27	0.000	4.81	1.0	4.87	0.10000	No
	29/9/95	79.90	1.26	0.000	4.75	1.0	4.90	0.10000	No
Ret. aire Manto a	28/8/95	80.80	2.90	0.003	10.94	0.0	11.99	0.00004	No
	15/9/95	80.90	2.82	0.018	10.66	1.0	11.26	0.10000	No
	29/9/95	81.00	3.05	0.013	11.51	1.0	12.26	0.10000	No
Tapón 1 manto a (delante)	28/8/95	81.10	3.18	0.016	11.99	1.0	12.29	0.40000	No
	15/9/95	80.90	2.62	0.103	9.90	0.0	10.35	0.00100	No
	29/9/95	81.00	3.05	0.125	11.51	0.98	12.11	0.20200	No
Tapón 1 manto a (detrás)	28/8/95	84.30	7.62	1.343	28.79	0.80	29.54	0.44100	No
	15/9/95	82.55	7.56	1.984	28.55	0.0	33.05	0.06000	No
	29/9/95	82.10	8.34	3.597	31.50	0.40	37.50	0.32000	No
Tapón 3 manto a (delante)	28/8/95	81.00	3.35	0.009	12.65	1.0	13.40	0.40000	No
	15/9/95	80.70	2.57	0.000	9.70	0.0	10.45	0.00000	No
	29/9/95	80.70	2.67	0.000	10.08	1.0	10.83	0.10000	No
Tapón 3 manto a (detrás)	28/8/95	80.80	3.10	0.019	11.69	1.0	12.44	0.40000	No
	15/9/95	80.70	2.57	0.004	9.70	0.0	10.45	0.00004	No
	29/9/95	80.40	2.79	0.011	10.54	1.0	12.04	0.10000	No

Tabla 16. Resultados de campo en la mina 2.

Lugar	Fecha	N <sub>2</sub> (%)	Def O <sub>2</sub> (%)	K (%)	N <sub>2</sub> + (%)	R	Coord. X	Coord. Y	Mezcla Explos.
Tapón 2 Sur M2 (delante)	14/7/95	81.10	4.88	0.002	18.41	0.0	21.86	0.00004	No
	27/7/95	79.80	4.63	0.002	17.49	1.0	22.74	0.20000	No
	2/8/95	81.00	5.45	0.000	20.58	0.0	25.08	0.00000	No
Tapón 2 Sur M2 (detrás)	14/7/95	81.10	5.08	0.004	19.17	0.0	22.92	0.00010	No
	27/7/95	80.90	5.62	0.002	21.23	1.0	25.73	0.30000	No
	2/8/95	80.40	4.19	0.000	15.82	0.0	19.57	0.00000	No
Tapón 5 Norte M1 (delante)	14/7/95	79.50	1.15	0.009	4.35	0.0	5.25	0.00004	No
	27/7/95	77.80	0.60	0.000	2.27	1.0	5.27	0.20000	No
	2/8/95	78.70	0.04	0.000	0.15	0.0	0.90	0.00000	No
Tapón 5 Norte M1 (detrás)	14/7/95	82.00	9.71	0.001	36.68	0.0	45.68	0.00004	No
	27/7/95	81.70	9.53	0.001	36.01	1.0	45.01	0.20000	No
	2/8/95	81.60	9.21	0.000	34.77	0.0	43.77	0.00000	No
Tapón 6 Norte M1 (delante)	14/7/95	79.80	1.53	0.007	5.78	0.0	6.68	0.00004	No
	27/7/95	79.20	0.87	0.011	3.29	1.0	4.04	0.20000	No
	2/8/95	78.00	0.39	0.000	1.48	1.0	2.23	0.10000	No
Tapón 6 Norte M1 (detrás)	14/7/95	81.50	9.08	0.007	34.30	0.0	43.30	0.00020	No
	27/7/95	81.40	9.05	0.001	34.20	1.0	43.20	0.10000	No
	2/8/95	80.90	8.32	0.000	31.43	0.0	40.43	0.00000	No
Entrada de aire M3	14/7/95	80.30	2.26	0.000	8.55	0.0	9.60	0.00000	No
	27/7/95	79.70	2.10	0.033	7.95	1.0	9.45	0.30000	No
	2/8/95	79.90	2.06	0.000	7.77	0.0	9.27	0.00000	No
Retorno de aire M3	14/7/95	81.10	3.48	0.023	13.12	1.0	14.17	0.20000	No
	27/7/95	80.40	3.49	0.014	13.18	1.0	15.43	0.30000	No
	2/8/95	80.80	3.50	0.020	13.20	1.0	14.85	0.20000	No

Tabla 17. Resultados de campo en la mina 7.

Lugar	Fecha	N <sub>2</sub> (%)	Def O <sub>2</sub> (%)	K (%)	N <sub>2</sub> + (%)	R	Coord. x	Coord. Y	Mezcla Explos
Bocamina Principal Entr. aire M1	12/7/95	79.20	0.47	0.021	1.78	0.00	2.23	0.000	No
	26/95	78.90	0.89	0.000	0.35	1.00	0.50	0.200	No
	15/8/95	78.98	0.12	0.000	0.44	1.00	0.62	0.100	No
Retorno de aire M1	12/7/95	79.22	0.38	0.000	1.43	1.00	1.55	0.100	No
	26/95	79.40	0.93	0.001	3.49	0.99	3.94	0.200	No
	15/8/95	79.10	0.65	0.000	2.44	1.00	3.19	0.100	No
Bocamina Principal Entr. aire M2	12/7/95	79.28	0.29	0.000	1.11	0.00	1.14	0.000	No
	26/95	78.90	0.09	0.000	0.35	1.00	0.50	0.200	No
	15/8/95	79.20	0.27	0.000	1.03	0.00	1.18	0.000	No
Retorno de aire M2	12/7/95	78.70	0.14	0.071	0.53	0.99	1.13	0.200	No
	26/95	78.70	0.04	0.250	0.15	0.99	0.45	0.300	No
	15/8/95	78.80	0.27	0.000	1.01	0.00	1.91	0.000	No

Tabla 18. Resultados de campo en la mina 3

Lugar	Fecha	N <sub>2</sub> (%)	Def. O <sub>2</sub> (%)	K (%)	N <sub>2</sub> + (%)	R	Coord. X	Coord. Y	Mezcla Expl
Entrada de aire nivel 4°, Cabecera M2	5/7/95	79.20	0.57	0.070	2.16	1.0	2.46	0.20000	No
	19/7/95	78.80	0.47	0.043	1.76	1.0	2.51	0.30000	No
	2/8/95	79.12	0.15	0.198	0.57	0.0	0.69	0.00010	No
Retorno de aire nivel 5° M2	5/7/95	79.30	0.47	0.804	1.78	0.0	2.08	0.10200	No
	19/7/95	79.10	0.45	0.606	1.68	0.99	1.83	0.30100	No
	2/8/95	79.44	0.64	0.469	2.40	0.0	2.64	0.00100	No
Entrada de aire M3	5/7/95	79.40	0.53	0.000	1.98	0.0	2.13	0.00000	No
	19/7/95	78.80	0.07	0.286	0.25	1.0	0.55	0.20000	No
	2/8/95	79.04	0.13	0.077	0.49	0.0	0.73	0.00004	No
Retorno de aire M3	5/7/95	79.40	0.53	0.434	1.98	0.0	2.13	0.00100	No
	19/7/95	78.99	0.62	1.129	2.33	0.98	2.78	0.40300	No
	2/8/95	79.12	0.45	0.667	1.70	0.97	2.12	0.10100	No
Nivel Patio M2	5/7/95	80.30	2.16	0.083	8.17	0.0	9.07	0.00100	No
	19/7/95	79.40	1.83	0.038	6.89	1.0	8.69	0.20000	No
	2/8/95	78.90	1.39	0.036	5.26	1.0	7.06	0.40000	No
Tapón apique M1 (delante)	5/7/95	77.30	1.07	0.009	4.04	1.0	8.54	0.30000	No
	19/7/95	76.80	0.24	0.000	0.89	1.0	5.39	0.10000	No
	2/8/95	77.20	0.84	0.012	3.18	1.0	7.68	0.20000	No
Tapón apique M1 (detrás)	5/7/95	89.00	18.97	0.000	71.63	1.0	80.63	0.40000	No
	19/7/95	89.60	19.43	0.001	73.36	1.0	82.36	0.10000	No
	2/8/95	89.20	19.12	0.001	72.21	1.0	81.21	0.30000	No
Tapón M2 (delante)	5/7/95	79.10	1.35	0.067	5.08	1.0	6.58	0.30000	No
	19/7/95	79.80	1.43	0.028	5.40	0.0	6.15	0.00020	No
	2/8/95	79.30	1.30	0.054	4.90	1.0	6.10	0.20000	No
Tapón M2 (detrás)	5/7/95	90.30	20.61	0.001	77.84	1.0	86.84	0.40000	No
	19/7/95	90.70	20.72	0.003	78.24	0.0	87.24	0.00020	No
	2/8/95	90.40	20.64	0.002	77.94	1.0	86.94	0.30000	No

Tabla 19. Resultados de campo Mina 6

Lugar	Fecha	N <sub>2</sub> (%)	Def O <sub>2</sub> (%)	K (%)	N <sub>2</sub> + (%)	R	Coord. X	Coord. Y	Mezcla Explos.
Bocamina Principal	13/7/95	79.14	0.16	0.000	0.59	0.00	0.68	0.0000	No
	28/7/95	78.97	0.11	0.000	0.42	1.00	0.47	0.2000	No
	14/8/95	78.95	0.11	0.000	0.40	1.00	0.48	0.2000	No
Bocaviento 1	13/7/95	79.26	0.59	0.000	2.22	1.00	2.43	0.2000	No
	28/7/95	79.56	0.77	0.000	2.90	1.00	2.96	0.1000	No
	14/8/95	79.31	0.60	0.000	2.27	1.00	2.41	0.2000	No
Bocaviento 4	13/7/95	79.40	0.63	0.048	2.36	0.00	2.66	0.0001	No
	28/7/95	79.52	0.86	0.023	3.24	0.99	3.36	0.2000	No
	14/8/95	79.36	0.71	0.042	2.70	0.99	2.91	0.2000	No

Tabla 20. Resultados de Mediciones de campo Mina 1

<i>Lugar</i>	<i>Fecha</i>	<i>N<sub>2</sub></i> (%)	<i>Def O<sub>2</sub></i> (%)	<i>K</i> (%)	<i>N<sub>2</sub>+</i> (%)	<i>R</i>	<i>Coord</i> <i>X</i>	<i>Coord.</i> <i>Y</i>	<i>Mezcla Explos.</i>
Bocamina ppal (entr de aire M1)	7/7/95	79.39	0.42	0.000	1.60	0.0	1.62	0.0000	No
	1/8/95	79.18	0.17	0.000	0.63	0.0	0.66	0.0000	No
	15/8/95	79.18	0.29	0.034	1.11	0.0	1.14	0.0001	No
Cruzada M1-M2 (ret M1 = entr. M2)	7/7/95	79.31	0.40	0.075	1.52	0.0	1.66	0.0001	No
	1/8/95	79.54	0.76	0.079	2.88	0.0	3.12	0.0002	No
	15/8/95	79.24	0.48	0.104	1.82	1.0	2.06	0.1002	No
Cruzada M2-M2 (ret M2 = entr. M3)	7/7/95	79.63	0.99	0.041	3.72	0.0	4.13	0.0002	No
	1/8/95	79.10	0.45	0.067	1.68	0.0	2.28	0.0001	No
	15/8/95	79.30	0.70	0.043	2.64	1.0	3.09	0.1001	No
Retorno Gen M1-M2-M3 (Nivel 9)	7/7/95	79.80	1.53	0.052	5.78	0.0	6.68	0.0003	No
	1/8/95	79.80	1.53	0.052	5.78	0.0	6.68	0.0003	No
	15/8/95	79.50	0.05	0.038	3.97	1.0	4.57	0.1002	No