

# EXPLOSIVIDAD DE GASES DESPRENDIDOS EN LOS INCENDIOS SUBTERRÁNEOS EN MINAS DE CARBÓN

WILLIAM CASTRO MARÍN

Profesor Asociado, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

CLAUDIA P. MARTÍNEZ G.

Ingeniera de Minas y Metalurgia, Investigadora - Centro del Carbón, Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.



**RESUMEN.** En este artículo se desarrolla el tratamiento de los gases esfuentes de una zona de incendio y el estudio preventivo de su explosividad cuando se ponen en contacto con el aire en un ambiente subterráneo. Universalmente se utilizan con este propósito los triángulos de Coward y un diagrama desarrollado por el USBM (United States Bureau of Mines) que permite un análisis rápido y seguro de las mezclas gaseosas producidas por los incendios en los macizos de carbón.

**PALABRAS CLAVES.** Gases de incendio, explosividad de los gases de incendio, Triángulo de Coward, Diagrama de explosividad.

**ABSTRACT.** The composition of the mine atmosphere at places of pending fires is examined in this article so as to determine if the mixtures of gases present there are of explosive character. The well known Coward triangles and the diagram developed by the United States Bureau of Mines (USBM) were used since they permit a quick and reliable analysis of the gases produced by fires in coal seams. The use of these diagrams is highly recommended at places where heating is developing and a danger of fire exists.

**KEY WORDS.** Fire gases, explosivity of fire gases, Coward triangle, explosivity diagram.

## 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 objetivos de este proyecto es la divulgación de modelos teóricos y experimentales que se aplican a nivel mundial para el manejo de las situaciones de riesgo que se analizan en el estudio. Un aspecto importante es el riesgo potencial que surge cuando se presenta un incendio en un macizo de carbón.

En el momento de aislar una zona incendiada mediante una barrera o cuando se hace la reapertura de ésta, se presenta un riesgo grave de explosión porque los gases presentes pueden formar mezclas peligrosas al disminuir la concentración de oxígeno y posiblemente incrementarse la de metano, en el primer caso, o al aumentar el tenor de oxígeno por aporte de aire en el segundo caso.

Como primera etapa, se hace un desarrollo teórico de los métodos utilizados universalmente para efectuar los cálculos previsionales, necesarios en la determinación de la explosividad de un gas individual o de una mezcla gaseosa y luego mediante ejemplos reales, se ilustra la construcción y el manejo tanto de los triángulos de Coward como del diagrama del USBM.

## 2. EXPLOSIVIDAD DE LOS GASES DE INCENDIO

Una explosión puede ser definida como un proceso en el cual las tasas de generación de calor son tales que ocasionan un aumento de temperatura y de la presión que, según sea la velocidad de la combustión a través de la mezcla, pueden llegar a ser muy grandes, si bien en parte pueden también ser mitigados por la expansión del aire. Esto produce una onda explosiva que se propaga en todas las direcciones disponibles y que en una mina es comprimida por las paredes de las galerías, originando un incremento en la velocidad de la propagación.

Una explosión de gases producida por incendio puede ocurrir sólo bajo las siguientes condiciones:

- Cuando los gases explosivos forman una mezcla cuya concentración resulta peligrosa.
- Cuando el contenido de oxígeno en la atmósfera es el requerido por los gases explosivos presentes.
- Cuando la temperatura, la llama o la chispa son suficientes para encender la mezcla de gases.

Si no se presenta alguno de los tres factores mencionados, la explosión no ocurre. En la tabla 1 se presentan los gases que pueden aparecer en la atmósfera minera en caso de incendio.

Se deben considerar los límites de explosividad, tanto el límite inferior, o concentración mínima de un gas combustible que mezclada con el del aire puede ocasionar una explosión, como el superior, o concentración máxima de un gas combustible por encima de la cual éste no explota ya que el contenido de oxígeno es demasiado pequeño. Ambos límites varían con la presión y la temperatura (Tabla 2).

**Tabla 1.** Concentración de gases en una atmósfera minera en caso de un incendio.

Gas	Símbolo químico	Cantidades promedio encontradas en las minas (%)
Oxígeno	O <sub>2</sub>	1.0 - 20
Metano	CH <sub>4</sub>	0.2 - 80
Monóxido de carbono	CO	0.001 - 7
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	0 - 2
Hidrocarburos	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	0 - 2
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0.4 - 20
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.2 - 7

**Tabla 2.** Límites de explosividad de gases combustibles

Gas	Límite de explosividad	
	Inferior (%)	Superior (%)
Metano	5.0	14.0
Monóxido de carbono	12.5	74.2
Hidrógeno	4.0	74.2
Sulfuro de hidrógeno	4.3	45.5
Etano	3.0	12.4
Etileno	2.7	36.0
Propano	2.1	9.5

Los gases cuya concentración está comprendida entre los límites de explosividad inferior y superior constituyen una mezcla explosiva.

Toda explosión viene acompañada de fenómenos específicos que representan una amenaza. Algunos de estos son:

- Una elevación temporal de la presión del aire originada por la onda y la temperatura de explosión, lo cual afecta al personal y deteriora las excavaciones mineras.
- El estrépito que acompaña a la explosión.

- Temperaturas muy altas que pueden ocasionar un incendio.
- La onda explosiva del aire, que puede causar deterioro al sostenimiento de las explotaciones, lesiones al personal y nubes de polvo de carbón con posibilidad de estallar, para originar una explosión secundaria causada por la llama de la explosión de los gases.
- La contaminación de la atmósfera con los gases desprendidos en la explosión.

## 2.1 DETERMINACIÓN DE LA EXPLOSIVIDAD DE LOS GASES PRODUCIDOS POR INCENDIO

Para evaluar la explosividad de una mezcla de gases en una atmósfera minera, se han desarrollado varios métodos que permiten calcular el máximo contenido de oxígeno permisible y determinar la composición de la mezcla en un diagrama de explosividad.

### Diagrama de Coward (Triángulo de Coward)

Cuando ocurre un incendio, las mezclas de los gases explosivos se pueden propagar lejos de las zonas inmediatas a éste, con un aumento en la concentración de los gases combustibles y una disminución en la concentración de oxígeno, hasta alcanzar un rango en que éste es explosivo. Pero también cuando se presenta una dilución de gases como consecuencia de

la reapertura de un área antes incendiada y la mezcla de gases puede alcanzar un rango explosivo.

Por estas razones, es necesario que tales situaciones se prevean y controlen mediante análisis de los límites de explosividad de los gases y las mezclas gaseosas.

De acuerdo con las proporciones de los gases, una atmósfera puede resultar explosiva o no. En general, los gases contenidos en una muestra son gases combustibles ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ , CO), gases inertes (exceso de  $\text{N}_2$  y exceso de  $\text{CO}_2$ ) y aire.

En la figura 1 se muestran en forma individual los triángulos de explosividad de Coward para el  $\text{CH}_4$ , el CO y el  $\text{H}_2$ , gases más comunes desprendidos en los incendios, y en la tabla 3 se presentan las coordenadas de esos puntos.

Tabla 3. Coordenadas de los vértices de los triángulos de explosividad de Coward.

Gas	Límites de explosividad		Valor estequiométrico	
	Inferior	Superior	Gas	Oxígeno
Metano	5.0	14.0	5.9	12.2
Monóxido de carbono	12.5	74.2	13.8	6.1
Hidrógeno	4.0	74.2	4.3	5.1

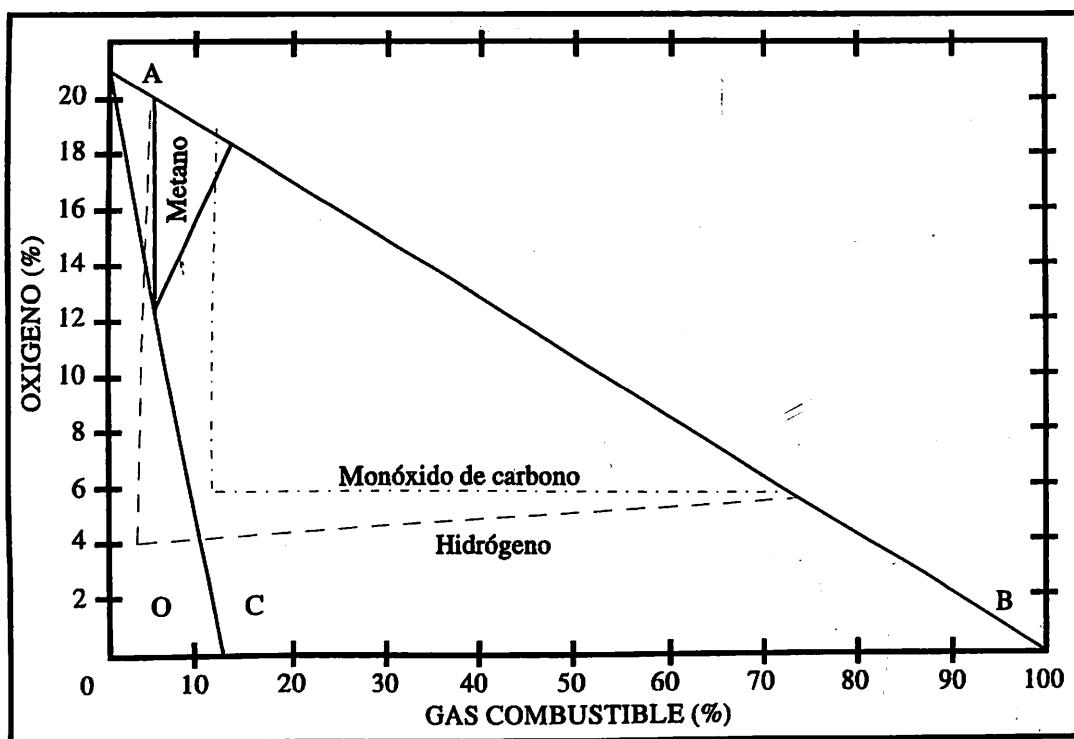


Figura 1. Triángulo de Coward para el  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  y CO

Fuente: McPherson, 1993

Si se considera que los gases mencionados en la figura 1 tienen una concentración (en %) de  $p_1$ ,  $p_2$  y  $p_3$ , para el  $\text{CH}_4$ , el  $\text{CO}$  y el  $\text{H}_2$ , respectivamente, y que, además, ellos no reaccionan químicamente entre sí, se obtiene la concentración total de combustibles ( $p_t$ ) mediante la suma de la concentración de cada uno de los gases, así:

$$p_t = p_1 + p_2 + p_3 \quad (1)$$

Además, el principio de Le Chatelier permite determinar que a los límites de explosividad de los gases,  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  (límites superior, inferior y cumbre), les corresponde un límite de explosividad de la mezcla ( $L_t$ ), dado por:

$$\frac{p_t}{L_t} = \frac{p_1}{L_1} + \frac{p_2}{L_2} + \frac{p_3}{L_3} \quad (2)$$

En la figura 1, sobre la línea AB, están situados los límites de explosividad tanto superior como inferior de los respectivos gases. Sin embargo, el contenido mínimo de oxígeno para que la mezcla sea explosiva puede determinarse calculando el exceso de gases,

Tabla 4. Volumen de nitrógeno ( $N_2$ ) que debe ser adicionado para que los gases no sean explosivos.

Gas combustible	$m^3(\text{nitrógeno}) / m^3(\text{gas combustible})$
Metano	6.07
Monóxido de carbono	4.13
Hidrógeno	16.59

En el caso de una mezcla de gases combustibles, el exceso de  $N_2$  requerido se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$N_{\text{ex}} = \frac{L_c}{p_t} (N_1^+ p_1 + N_2^+ p_2 + N_3^+ p_3) \% \quad (3)$$

Donde  $L_c$  es el porcentaje de mezcla combustible (calculado de la ec. 2) y  $p_t$  es la concentración total de combustible (%).

El mínimo contenido de oxígeno se obtiene así:

$$O_2(\text{min}) = 0.2093 \{100 - N_2(\text{ex}) - L_c\} \% \quad (4)$$

Si se tiene una mezcla con un contenido de 9%  $\text{CH}_4$ , un 6% de  $\text{CO}$ , un 4% de  $\text{H}_2$ , un 7% de  $O_2$  y un 74% de gases inertes,  $p_t$  ( $\text{CH}_4 + \text{CO} + \text{H}_2$ ) es igual a 19% y el Triángulo de Coward se construye de la siguiente manera:

como el nitrógeno, que tienen que adicionarse para alcanzar dicho valor.

En el caso del  $\text{CH}_4$ , si se parte de algún punto situado sobre la línea AB y se adiciona  $N_2$ , el punto se moverá en línea recta hacia el origen (O). La mezcla resulta no explosiva cuando el punto cruza la línea AC. En este momento tendrá que adicionarse una cantidad determinada de  $N_2$ , la cual, cuando es expresada por unidad de volumen de  $\text{CH}_4$ , es una constante.

Al seleccionar el punto B sobre la línea AB y adicionar  $N_2$ , el punto se moverá hacia el origen (O) y atravesará la línea no explosiva en el punto C, donde la concentración de  $\text{CH}_4$  es del 14.14%; la parte restante (100 - 14.14%) corresponde a un contenido de  $N_2$  del 85.86%. Esto significa que se debe adicionar,  $85.86/14.14 \text{ m}^3$  de  $N_2$  por cada metro cúbico de  $\text{CH}_4$ .

En forma similar, se calculan los respectivos valores para el  $\text{CO}$  y el  $\text{H}_2$  (Tabla 4).

De la ecuación 2, se calcula el límite de explosividad inferior ( $L_{\text{inf}}$ ):

$$\frac{19}{L_{\text{inf}}} = \frac{9}{5} + \frac{6}{12.5} + \frac{4}{4}, \quad L_{\text{inf}} = 5.79\% \text{ (combustible)}$$

El valor límite superior ( $L_{\text{sup}}$ ):

$$\frac{19}{L_{\text{sup}}} = \frac{9}{14.0} + \frac{6}{74.2} + \frac{4}{74.2}, \quad L_{\text{sup}} = 24.68\% \text{ (combustible)}$$

El límite de explosividad de la mezcla ( $L_m$ ):

$$\frac{19}{L_m} = \frac{9}{5.9} + \frac{6}{13.8} + \frac{4}{4.3}, \quad L_m = 6.57\% \text{ (combustible)}$$

Los valores del lado derecho de la igualdad se toman de la tabla 3.

- De la ecuación 3 y la tabla 2, se calcula el exceso de  $N_2$  requerido para una atmósfera explosiva:

$$N_{ex} = \frac{6.57}{19} (6.07x9 + 4.13x6 + 16.59x4)$$

$$N_{ex} = 50.41\%$$

Ahora, el contenido mínimo de  $O_2$  está dado por la ecuación 4:

$$O_2(\text{mín}) = 0.2093 (100 - N_{ex} - L_m) \% \\ O_2(\text{mín}) = 9\%$$

Una vez completamente definidos los tres vértices del Triángulo de explosividad se llevan al diagrama de Coward (Figura 2). El punto que representa la muestra no es explosivo, pero puede llegar a serlo si se mezcla con aire.

El Triángulo de Coward es útil en el seguimiento de las mezclas de gases, aunque para esto se requiere graficar los análisis de cada una de las muestras, ya que cada vez el respectivo Triángulo cambia de forma y de posición, lo mismo que el punto que representa la mezcla.

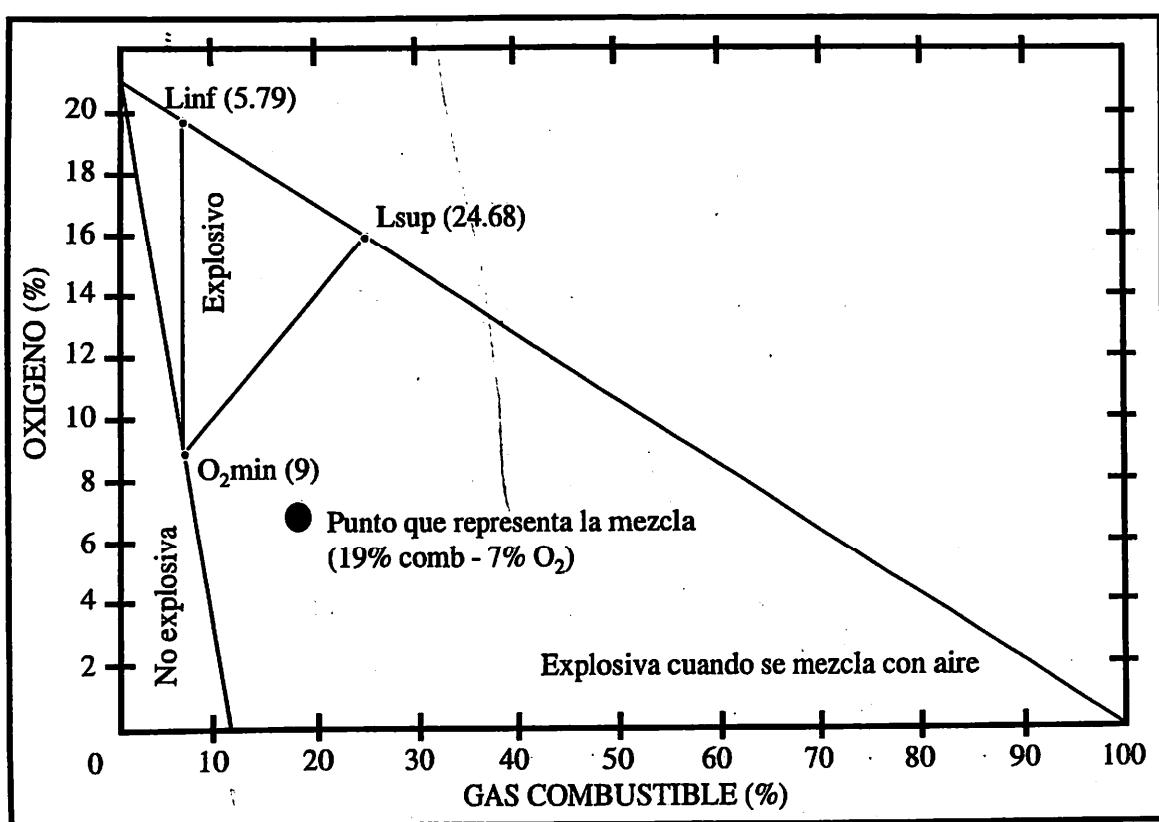


Figura 2. Triángulo de Coward que representa la mezcla dada en el ejemplo

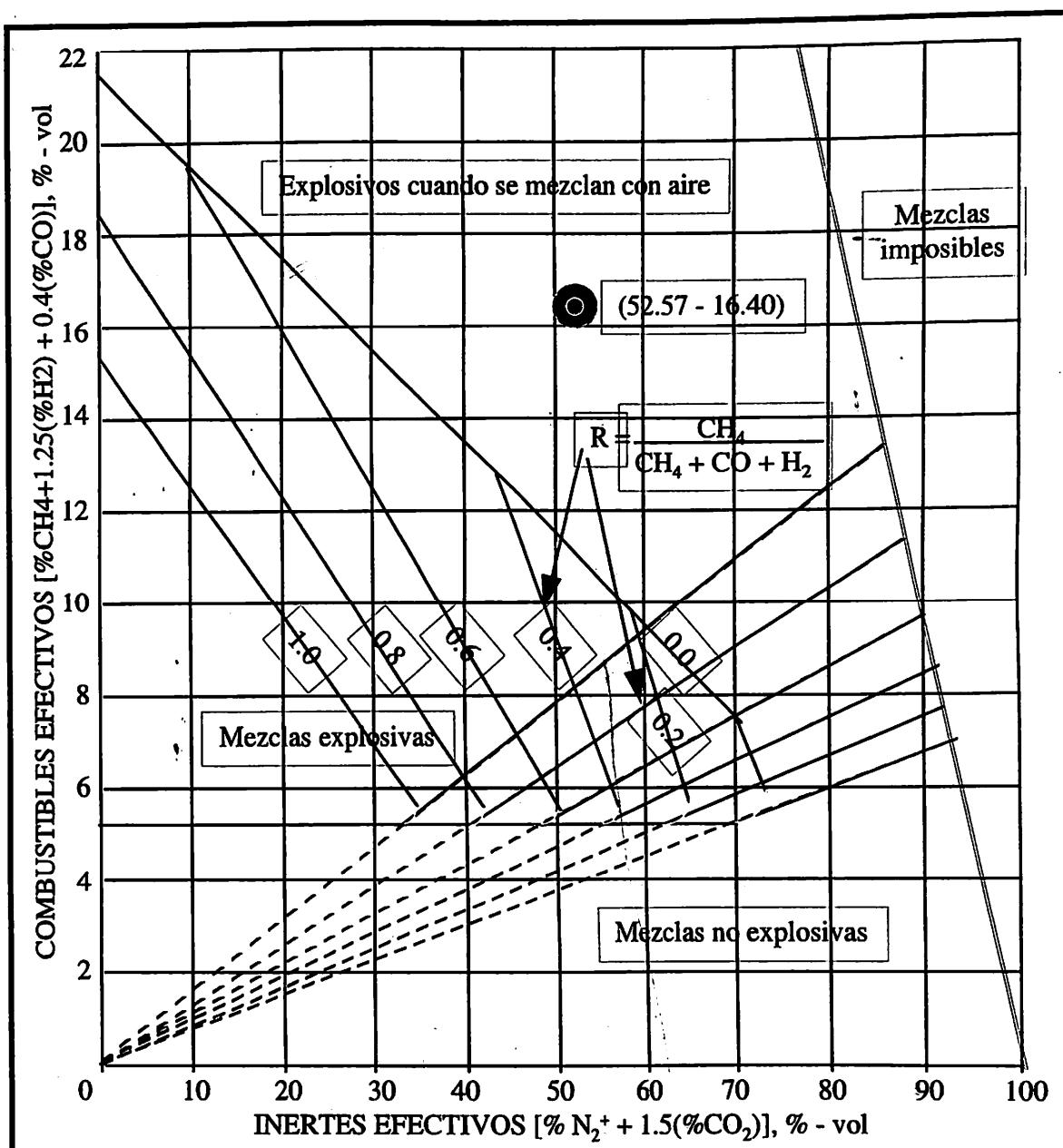
#### Diagrama de explosividad del U.S. Bureau of Mines

Este método requiere el cálculo de los contenidos de gases combustibles en un incendio. En el eje y del diagrama (Figura 3) se ubican los "combustibles efectivos", representados por los porcentajes volumétricos de los gases combustibles calculados de la siguiente ecuación:

$$\text{Eje y: } [\% CH_4 + 1.25(\% H_2) + 0.4(\% CO)] \% - \text{vol} \quad (5)$$

Sobre el eje x se expresa la combinación del exceso de  $N_2$  con 1.5 veces la concentración de  $CO_2$ , así:

$$x = N_2^+ + 1.5CO_2 \quad (6)$$



**Figura 3.** Diagrama de explosividad del Bureau de Minas

El  $N_2^+$  requerido es el porcentaje de  $N_2$  en exceso debido al oxígeno presente:

$$N_2^+ = N_2(\text{actual}) - [O_2] \times \frac{79.04}{20.93} \quad (7)$$

Los triángulos explosivos representados en la figura 3 se basan en el CH<sub>4</sub>, pero son ajustados para adiciones combinadas de H<sub>2</sub> y CO.

Si se parte de los resultados del análisis de la muestra anterior, se tiene un 9% de CH<sub>4</sub>, un 6% de CO, un 4% de H<sub>2</sub>, un 7% de O<sub>2</sub>, un 64% de N<sub>2</sub> y un 10% de CO<sub>2</sub>. El total de combustibles es: pt=9 + 6 + 4 = 19%

La relación ( $R$ ) entre el metano  $\text{CH}_4$  y el total de combustibles es:

$$R = \frac{[\text{metano}]}{\text{pt}} = \frac{9}{19} = 0.47\%$$

El exceso de nitrógeno es:

$$N_2^+ : 64 - 7x \frac{79.04}{20.93} = 37.57\%$$

El porcentaje de gases inertes efectivos es:

$$X = 37.57 + 1.5 (10) = 52.57\%$$

El porcentaje de combustibles efectivos es:

$$Y = 9 + 1.25 (4) + 0.4(6) = 16.40\%$$

Graficando este punto en la figura 3 se ve cómo éste está situado por fuera del triángulo  $R = 0.47$ , lo que corrobora lo calculado en el Diagrama de Coward, es decir, la muestra no es explosiva, pero puede llegar a serlo cuando se mezcla con el aire. El resultado obtenido es independiente del método gráfico empleado.

En general, se considera que si cualquier punto calculado y ubicado posteriormente en la figura 3 se sitúa dentro de un determinado triángulo, basado en el valor de  $R$ , la atmósfera del punto de muestreo es explosiva.

Además, la fórmula de combustibles efectivos (ec. 5) tiene en cuenta el hecho de que la contribución del  $H_2$  a la combustibilidad es un 25% mayor que la del  $CH_4$  y que la contribución del  $CO$  es un 60% menor que la del  $CH_4$ . Para los gases inertes efectivos (ec. 6), la contribución del  $CO_2$  a la combustibilidad es del 50% más que la del  $N_2$ .

Los diagramas de explosividad son de gran utilidad en el momento de determinar la explosividad de una atmósfera, pero presentan ciertos inconvenientes:

1. Su conveniencia y precisión decrecen con el aumento de la dilución de las muestras.
2. Los límites de explosividad para uno o varios puntos específicos de muestreo pueden cambiar inicialmente en el área de incendio.
3. Las cantidades de gases combustibles que se estén produciendo pueden cambiar bruscamente
4. Un diagrama de explosividad representa unas condiciones específicas, pero no una evolución del incendio a largo plazo.

5. Los valores graficados en los diferentes triángulos de explosividad están sujetos al muestreo y a los análisis de laboratorio de dichas muestras.

Cuando una primera muestra de gases cae fuera del triángulo de explosividad y las siguientes tienden a ubicarse dentro, se confirma un aumento en la concentración de  $O_2$  que puede causar su explosividad. En este caso, debe disminuirse la cantidad de aire que llega a la zona de incendio; cuando ello no es posible, lo más común es que se trate de una afluencia adicional de aire al incendio, bien sea a través de zonas de trabajos antiguos, galerías abandonadas o grietas del terreno que se comunican a superficie.

Si, por el contrario, los puntos característicos de ciertas muestras de gases caen continuamente dentro del triángulo, en cuyo caso la mezcla es explosiva, el incendio se está desarrollando con un aumento de la cantidad de gases combustibles en presencia de un alto contenido de  $O_2$ . Es necesario, entonces, diluir los gases del incendio, bien sea inyectando gases inertes a la zona de incendio o bien sea frenando la generación de gases mediante la dilución de éstos con aire.

### 3. CONCLUSIONES

Los diagramas en los cuales se trazan los resultados de los análisis y el tiempo de muestreo, permiten observar la situación de riesgo y su evaluación para de esta forma, iniciar las actividades tendientes a suprimir el foco de incendio antes de su desarrollo.

Tanto el límite superior como el límite inferior de explosividad de los gases combustibles pueden variar bajo la influencia de la presión y, en particular, de la temperatura.

Se debe determinar la explosividad de la mezcla gaseosa en el momento de aislar un incendio mediante una barrera, cuando se piensa reabrir la zona y en aquellos sitios donde hay efluentes gaseosos a partir de una zona incendiada.

### REFERENCIAS

Condiciones ambientales de la minería subterránea de carbón en la cuenca Amagá-Angelópolis. Centro del carbón, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1996.

McPherson, Malcom J. Subsurface ventilation and Environmental Engineering. Chapman and Hall, London, 1993.

The Mine Ventilation Society of South Africa. Environmental Engineering in South African Mines. Cape, 1989.

The Mine Ventilation Society of South Africa. Le Roux's Notes on Mine Environmental Control. Cape, 1990.