

GRISUTOSIDAD DE LOS MANTOS DE CARBÓN EN LA ZONA AMAGÁ-ANGELÓPOLIS

WILLIAM CASTRO MARÍN

Profesor Asociado

Facultad de Minas - Universidad Nacional de Colombia.

CLAUDIA P. MARTÍNEZ G.

Ingeniera de Minas y Metalurgia

Investigadora - Centro del Carbón

RESUMEN

Una de las situaciones de riesgo más importante que compromete seriamente la seguridad en los ambientes subterráneos, se debe a la ocurrencia de grisú en la atmósfera, ya que éste forma mezclas con el aire las cuales en presencia de un factor iniciador ocasionan inflamaciones explosivas cuyos efectos son catastróficos en la mayoría de las veces.

La cantidad de grisú en la atmósfera subterránea depende principalmente del contenido original de gas en el yacimiento, por esta razón es importante hacer cálculos previsionales antes de iniciar la explotación de los mantos de carbón.

A nivel mundial se han propuesto varios métodos para determinar el contenido in situ de gas en el carbón, en esta parte del estudio se ha seleccionado uno de los métodos que se considera suficientemente preciso y de rápida ejecución. Se ha hecho un desarrollo completo de la fundamentación teórica del método y finalmente se ha confrontado con una etapa experimental, durante la cual se hicieron muestreos en siete minas de la región Amagá - Angelópolis, y se determinó la grisutosidad de los mantos en explotación.

PALABRAS CLAVE

Grisú, desprendimiento específico, desprendimiento instantáneo, adsorción, desorción, migración, captación, drenaje, inflamación explosiva, límites de explosividad.

ABSTRACT

The rationale of a simple, accurate and world-wide known method to determine the methane content in coal seams is developed in this article and the results obtained by its use at seven active coal mines in the Amaga-Angelópolis basin are presented.

These results seem to confirm the long time held idea of the low content of methane in the seams of the basin. With the exception of the seam No. 4, the methane content of the seams was around which showed higher results the content of the others was around 1m³/t. It is likely, that during its exploitation, the seam No. 4 show a higher methane content, since it was sampled on a surface exposed for months.

KEY WORDS

Methane, fire damp, specific release, adsorption, desorption, migration, pick-up, drainage, explosive ignition, limits of explosivity.

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".

El grisú está compuesto esencialmente de metano (CH₄), en más del 95%, acompañado de otros hidrocarburos parafínicos y en algunas oportunidades de CO₂ y se forma durante el proceso de carbonización

de la materia orgánica que da lugar a los distintos tipos de carbón, desde la turba hasta las antracitas más evolucionadas. En el yacimiento se encuentra asociado no sólo al carbón sino también a los materiales estériles de las rocas encajantes y de las intercalaciones presentes en el manto.

La perturbación del yacimiento, debida a los espacios vacíos creados durante el proceso de explotación, ocasiona la descompresión de los terrenos y la generación de grietas que comunican el macizo virgen con los mismos vacíos, originando un gradiente de presión que sirve como efecto motor tanto para el desprendimiento del grisú como para su migración a través de las grietas y fracturas, hasta integrarse a la corriente de aire de ventilación generando graves riesgos potenciales.

Para caracterizar un yacimiento desde el punto de vista de su grisutosidad es conveniente definir, antes de iniciar la explotación, el desprendimiento específico, representado por el volumen de gas desprendido por cada tonelada de carbón extraída. Este desprendimiento específico depende principalmente del contenido de gas en el carbón, de la forma y extensión de la zona de desgasificación, de las características petrográficas de los estratos ubicados hacia el techo y hacia el piso del manto en explotación, del sistema de explotación y de la velocidad de avance de los frentes.

El conocimiento del desprendimiento específico de grisú permite efectuar cálculos previsionales acerca de los requerimientos de aire para el saneamiento de los frentes de trabajo. Cuando la ventilación no es suficiente como medio de lucha para controlar estas situaciones de riesgo, se debe recurrir a las técnicas de captación que permiten recoger parte del gas presente en el yacimiento sin dejar que se integre totalmente a la atmósfera subterránea.

2. FORMAS DE PRESENTACIÓN DEL GRISÚ EN UN YACIMIENTO

La composición y estructura interna del grisú, depende de la naturaleza de la vegetación que le dio origen a los mantos, de los flujos de agua involucrados en los procesos de sedimentación y de los efectos

metamórficos asociados a la presión, la temperatura y los esfuerzos tectónicos.

El grisú se presenta de dos formas las cuales están en permanente equilibrio debido al intercambio de moléculas entre ellas. Estas dos formas de presentación son: grisú como gas libre y grisú como gas adsorbido.

- El grisú como gas libre

Es aquel que se presenta en las grietas, fisuras y poros de la masa de carbón. Constituye una fracción muy pequeña (10%) debido a la baja porosidad in situ del carbón.

- El grisú como gas adsorbido

La adsorción es el fenómeno físico de fijación de una sustancia a la superficie de separación entre dos fases. Es un fenómeno reversible y reproducible, pues el gas adsorbido puede ser liberado por desorción.

La mayor cantidad de grisú contenido en el carbón se encuentra adsorbido debido a la enorme superficie específica de éste, que puede alcanzar una centena de m^2 por gramo (para el carbón activado artificialmente se puede llegar a una superficie específica mayor de 1000 m^2/g).

La cantidad de gas adsorbido depende de diversos factores así:

- * **Humedad.** A mayor contenido de humedad, menor cantidad de gas adsorbido.
- * **Cenizas.** Dada su composición inerte, son esencialmente no adsorptivas. A mayor cantidad de cenizas, menos cantidad de gas adsorbido.
- * **Rango del carbón.** A mayor rango, mayor capacidad adsorptiva.
- * **Tipo de gas.** Está relacionado tanto con la forma y el tamaño de la molécula del fluido como con la estructura de microporos del carbón, por tanto, el CO_2 presenta más afinidad al carbón que el grisú y éste es más adsorptivo que el nitrógeno.
- * **Profundidad.** A mayor profundidad, mayor capacidad adsorptiva por encontrarse el carbón a mayor presión de confinamiento.

- * Temperatura. A mayor temperatura, menor capacidad adsorbtiva del carbón.
- * Presión. A mayor presión, mayor capacidad adsorbtiva.

3. MIGRACIÓN DEL GRISÚ EN CARBÓN Y ESTRATOS ADYACENTES

Tanto en los mantos de carbón como en los estratos adyacentes, existe, en condiciones normales, un equilibrio entre el gas libre y el adsorbido. No obstante, si los mantos son perturbados ya sea por perforaciones o por actividad minera, se creará un gradiente de presión de gas que ocasionará un flujo a través de las fracturas.

4. RIESGOS POTENCIALES DEBIDOS A LA PRESENCIA DEL GRISÚ EN EL AMBIENTE SUBTERRÁNEO

4.1 EFECTOS DEL GRISÚ SOBRE EL ORGANISMO HUMANO

El grisú es clasificado como un gas asfixiante, no tiene efectos tóxicos pero suprime el oxígeno en los pulmones.

El primer síntoma es una respiración rápida acompañada de pérdida de la atención y falta de coordinación muscular. Después el gas produce inestabilidad emocional, con sensaciones depresivas y fatiga.

Como la asfixia es progresiva puede originar náusea, vómito, postración y pérdida de la conciencia y, finalmente convulsiones, estado de coma y la muerte. A grandes concentraciones, 20 a 30%, este gas puede actuar como anestésico.

4.2 RIESGO DE EXPLOSIÓN

Los límites de explosividad para el grisú en el aire son del 5 al 15%. La mezcla estequiométrica, donde se libera la máxima cantidad de energía, es del 9.8%.

5. FORMAS DE DESPRENDIMIENTO

El grisú se puede integrar a la corriente de aire en forma regular, a medida que avanza el proceso de explotación del carbón, siendo en este caso la cantidad de gas desprendido directamente proporcional a la tasa de explotación, la cual depende a su vez de la velocidad de avance de los frentes y de los métodos de arranque. En algunos casos, el grisú se desprende en forma instantánea, en grandes volúmenes y acompañado de material sólido, se produce un verdadero transporte neumático de carbón y estéril ocasionando derrumbes y perturbando seriamente las actividades mineras. La característica común de este desprendimiento es la existencia de un mecanismo de debilitamiento de cavidades de mineral dentro del manto y que además contienen gas a alta presión. Afortunadamente este tipo de desprendimiento se produce en muy pocas ocasiones y no siempre está relacionado con el grisú (en el centro de Francia se han producido desprendimientos instantáneos asociados al contenido de CO_2 en el yacimiento).

En la tabla 1 se muestran las máximas concentraciones de grisú permitidas según la reglamentación colombiana (Decreto 1335 de 1987)

Tabla 1 Máximas concentraciones de grisú permisibles

Sitio	Porcentaje máximo CH ₄
Labores o frentes de explotación	1.0
Retornos principales de aire	1.0
Retornos de aire de los tajos	1.5
Retornos de aire de los frentes de preparación y desarrollo	1.5

En frentes donde se presente una concentración igual o superior al 2%, se deberá evacuar de inmediato al personal que en el momento esté laborando allí y las labores no deberán reiniciarse hasta tanto no se haya diluido la concentración.

5.1 DESPRENDIMIENTO ESPECÍFICO

En la práctica, el carácter grisutoso de un frente se expresa en función del desprendimiento específico, es

decir, del volumen promedio de grisú desprendido por tonelada neta de carbón explotado. Tal parámetro corresponde al cociente del volumen total de grisú desprendido en un frente que haya alcanzado su régimen estable sobre el tonelaje neto extraído. En general, en condiciones ambientales y de explotación constantes, el desprendimiento específico se alcanza al cabo de dos o tres meses.

Es importante aclarar la diferencia entre el desprendimiento específico y la concentración de gas correspondiente a la cantidad de grisú fijado por unidad de peso de carbón, la cual raramente sobrepasa los 20 m³/t. El desprendimiento específico comprende no sólo el gas liberado por la capa explotada, sino también el gas emanado de la zona de influencia, en la mayoría de los casos alcanza valores superiores al de la concentración in situ pudiendo superar los 100 m³/t.

5.1.1 Cálculo del desprendimiento específico

Un modelo para el cálculo del desprendimiento específico de grisú en mantos de poco buzamiento fue desarrollado en Francia por el Centro de investigaciones de los carbones de Francia, Cerchar. El dominio de aplicación del modelo se limita a mantos con potencias de 1 a 1.5m, para tajos con derrumbe dirigido, y de 2 a 3m, para tajos con relleno neumático, y sus principales parámetros son tres: 1) la estratigrafía; 2) la concentración en gas del carbón, y 3) el esquema de cálculo.

La estratigrafía y la concentración en gas del carbón caracterizan el yacimiento que se va a explotar, de ahí que el conocimiento de estos dos parámetros sea indispensable para una correcta determinación del desprendimiento específico de grisú para un manto dado. Con tal fin, deben hacerse todas las medidas de concentración que sea posible en la zona de estudio. Para efecto de los cálculos se admite en la actualidad que cuando se trata de la explotación de un manto de poco buzamiento, la cantidad de grisú desprendido comprende:

En el techo, el grisú contenido en los mantos y respaldos del material estéril comprendido dentro de un paralelogramo cuya base es la longitud del tajo y cuya altura son 120m. El coeficiente de

desgasificación es función de la altura por encima del manto explotado.

- Una parte del grisú contenido en el carbón arrancado. Se estima este valor en un 50%.
- Hacia el piso, el grisú de los mantos y respaldos del material estéril comprendido dentro de un paralelogramo que tiene por base el tajo y por altura 55m. Por debajo del manto explotado, el coeficiente de desgasificación varía con la profundidad.

Cuando el buzamiento no es nulo, e incluso cuando su valor es de 20 o 25°, los 120m de altura del paralelogramo del techo se toman verticalmente y no en sentido perpendicular al buzamiento; lo mismo en el piso, cuando se miden los 55m.

El cálculo de desprendimiento específico comprende no solamente el grisú liberado por el carbón sino también aquel proveniente de las capas de estéril. Según mediciones realizadas por el Cerchar sobre muestras de roca, se admite que desde el punto de vista de la concentración, cada capa de estéril tiene un espesor equivalente en carbón el cual depende de la naturaleza de la roca. De tal forma tenemos que:

Para esquistos no carbonosos y areniscas de grano fino, $he = 1h/100$; para areniscas porosas con inclusiones de carbón, o pegadas a los mantos de carbón, $he = 1h / 20$; para esquistos carbonosos, $he = 1h / 20$, excepto si su contenido de carbón es importante, caso en el cual se pueden adoptar espesores equivalentes de hasta $1h / 2$.

Es importante anotar que la determinación del desprendimiento específico es necesaria para prever, en función del nivel de producción deseado, la ventilación requerida para diluir el grisú hasta alcanzar una concentración permisible.

6. INFLUENCIA DE LOS FACTORES GEOLÓGICOS EN LA DESORCIÓN DEL GRISÚ

Fallas, pinchamientos y, en general, todas aquellas alteraciones en la continuidad de los mantos de carbón y estratos adyacentes, producto de los movimientos tectónicos, intervienen en la desorción del grisú.

Tanto en los mantos de carbón como en los estratos circundantes existe un equilibrio entre el gas adsorbido y el gas en estado libre presente en la red de fracturas y macroporos. Pero al romperse ese equilibrio se crea en el sistema un gradiente de presión que favorece o no la desorción del grisú, de acuerdo con el aumento o la disminución en la presión de gas.

En tal sentido, los factores geológicos producto de la actividad tectónica se constituyen en elementos dinamizadores del flujo de grisú en tanto propician cambios en el equilibrio existente.

Por tanto, los factores geológicos producto de la actividad tectónica son formas de desgasificación natural, tanto de los mantos de carbón, como de los estratos subyacentes y suprayacentes a los mismos (Cybulski, W., y Kozlowski, B.; 1973).

Pero, como se verá a continuación, otro de los elementos que explican la manera como las alteraciones de tipo geológico intervienen en la desorción del grisú y, por tanto, en la desgasificación de la zona de influencia es el incremento de la temperatura dentro del área involucrada.

6.1. EFECTO DE LAS DISCONTINUIDADES GEOLÓGICAS

La presencia de las discontinuidades en un manto o sobre un manto de carbón es importante con respecto al contenido de gas, ya que:

- Las discontinuidades originadas durante un período de levantamiento o de erosión reducen la profundidad y la temperatura del manto, deteniendo así las reacciones de carbonización generadoras del carbón.
- Cuando un manto de carbón aflora, libera gas a la atmósfera a una tasa que depende de la permeabilidad del manto, la cual, a su vez, es función de la madurez del mismo. Antes de que ocurra un primer hundimiento, el contenido de gas en el límite de la discontinuidad puede ser cero, pues sólo puede presentarse allí un incremento en este contenido si la profundidad y la temperatura son suficientes para promover la carbonización adicional o en caso de que

se presente una migración de gas a lo largo del manto hacia el afloramiento.

En algunos casos, el hecho de que no exista una diferencia apreciable entre el contenido de gas de un afloramiento con respecto a la profundidad vertical del manto puede ser indicio de que éste no será lo suficientemente impermeable como para retener el gas de carbonificación liberado por un hundimiento posterior que incremente el espesor de los sedimentos.

6.2. EFECTO DEL PLEGAMIENTO GEOLÓGICO

Antes de que ocurra el trastorno de un estrato circundante como consecuencia de las fuerzas tectónicas, el contenido de gas del manto puede cambiar ligeramente en algún sitio, según como varie el rango.

El contenido de gas en un manto plegado puede variar de acuerdo con:

- La cercanía de una cresta o anticlinal, lo que hace que el contenido de gas disminuya. De tal modo que si el plegamiento y la carbonización fueron contemporáneos, resulta lógico suponer que el manto ha estado expuesto a etapas de erosión que han reducido su contenido de gas.
- La migración del gas durante distintos períodos de levantamiento tectónico en que se reducen los esfuerzos de confinamiento, probablemente por la formación de una red abierta de fluidos dentro del manto, que posteriormente será cerrada por las mineralizaciones.

6.3. EFECTO DE LAS FALLAS GEOLÓGICAS

Se ha encontrado que áreas afectadas por pequeños trastornos tectónicos a menudo poseen mayores contenidos de gas y se desgasifican más rápidamente que zonas no perturbadas.

Las fallas transforman el carbón en cuanto a su porosidad y permeabilidad, ya que obligan al material a un reacomodamiento dentro del volumen fallado.

La compresión tectónica disminuye el volumen de material y hace que la presión de poros dentro de los mantos de carbón aumente a tal punto que el contenido de gas busca canales de migración a través del manto.

Al respecto es importante anotar que de la edad de la falla depende en muchos casos la migración del gas. Por ejemplo, fallamientos recientes pueden inhibir el movimiento del gas durante períodos de erosión.

6.4. INFLUENCIA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN

6.4.1 Emisión de gas en sistemas de tajo largo

El gas desprendido durante la fase de explotación de un tajo proviene, del manto explotado y de la zona de distensión influenciada por la explotación como del mismo material de relleno o de derrumbe.

El gas proveniente del manto es involucrado rápidamente a las corrientes de aire y su cantidad depende de la rata de producción y de las dimensiones del tajo.

El gas proveniente de la zona de influencia es más lento, pero, a su vez, más constante en el tiempo y depende de la rata de avance, del tiempo, petrografía y permeabilidad de los estratos.

Un seguimiento sistemático en la variación de los contenidos de grisú en el retorno de un tajo permite observar ciclos característicos:

- Un ciclo diario, caracterizado por un aumento del tenor de grisú durante los turnos de arranque y una disminución de éste durante los turnos de mantenimiento.
- Un ciclo semanal, caracterizado por un aumento del tenor de grisú al finalizar cada jornada de producción; lo que a su vez, representa un aumento general durante el transcurso de la semana.

Cuando se presentan colapsos y derrumbes en explotaciones por el sistema de tajo largo, el aire grisutoso de la parte posterior del tajo es injectado hacia la cabeza del mismo provocando allí una elevación momentánea del tenor de grisú, seguida de una elevación menor, pero más prolongada, en el

retorno del aire. Tal fenómeno es frecuente en los tajos de avance rápido.

6.4.2 Emisión de grisú en sistemas de cámaras y pilares

El gas es producido por las paredes expuestas de los frentes de desarrollo y por los pilares del manto trabajado. Mientras los pilares expuestos son desgasificados rápidamente, el gas proveniente de los mantos tendrá una participación durante períodos de tiempo más largo.

En general, las concentraciones más altas de gas se presentan en los frentes de avance, más aún, cuando el arranque es realizado por medios mecánicos a causa de la alta conminución del carbón.

Las altas y potencialmente peligrosas emisiones de gas pueden ser moderadas por una desgasificación previa, ya sea mediante la aplicación de métodos de drenaje, por una eficiente ventilación o por controles en las tasas de avance.

En conclusión, cualquiera que sea el sistema de explotación utilizado, una significativa porción del grisú desorbiido proviene tanto de los estratos adyacentes y del material colapsado como de los ciclos de evacuación del mineral.

6.5. INFLUENCIA DE LAS DIMENSIONES DEL FRENTE Y LA TASA DE AVANCE EN LOS VOLUMENES DE EMISIÓN

La cantidad de grisú liberado depende en gran medida de las dimensiones del frente de avance y de la tasa de producción del mineral.

A mayor tasa de avance, menor será el tiempo disponible del carbón in situ para desorber el grisú que contiene y mayor será la cantidad de gas remanente al ser arrancado (G. V. Jolife, 1970). Igualmente, Klevanov, F. S., del Instituto de Minería de Moscú, ha encontrado la proporción de la emisión total de gas a partir de carbón recuperado, con el consecuente incremento relativo de la emisión proveniente del frente de producción con una tasa de avance mayor.

Una ecuación que permite determinar el desprendimiento de gas en metros cúbicos por tonelada (m³/ton), (Mysar, F. J.) será:

$$\text{Emisión (m}^3/\text{t}) = a \{ (t/\text{día})^{1/2} \} + b$$

Donde a y b son constantes

Otra forma de expresar matemáticamente la relación entre la emisión y la tasa de avance, es (Airey, E. M.):

$$\text{Emisión (m}^3/\text{t}) = k (\text{tasa de avance})^n$$

Donde k es constante y n = 0.8

Con respecto a la influencia que puede tener la dimensión del frente en el volumen de gas emitido, se ha encontrado que son preferibles frentes pequeños con rápidos ciclos de avance (Jollife, G. V.).

6.6. INFLUENCIA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

Toda alteración anormal y súbita en el tenor de grisú de una mina, que pueda ser explicada de acuerdo con los cambios de la red de ventilación es una anomalía y merece especial atención, si se tiene en cuenta que a ello están asociados la mayoría de los accidentes imputables a emisión de grisú.

6.6.1 Suspensión de la ventilación primaria

Una suspensión temporal, durante un periodo de tiempo corto, en el sistema de ventilación causará aumentos considerables en el volumen de grisú en puntos muy localizados. Por el contrario, si la suspensión es prolongada, el tenor en los contenidos de grisú crecerá exponencialmente, hasta llegar incluso a comprometer toda la seguridad de la mina; más si dicha suspensión ocurre durante los ciclos de producción. Cuando lo anterior se presenta, es necesario que se haga un control riguroso de aquellas zonas cuyo potencial de acumulación de grisú es elevado, ya que allí, una vez restablecida la normalidad, la dilución del gas puede tardarse un periodo de tiempo considerable.

6.6.2 Corto circuitos en el sistema de ventilación

Estos fenómenos pueden ser detectados gracias a la ocurrencia de una fase transitoria caracterizada por un tenor alto, en ocasiones precedido por una baja emisión debida al aumento momentáneo de la presión local del aire.

Las emisiones de gas en vías taponadas voluntariamente: Cuando estas suspensiones en la ventilación son realizadas sin ninguna precaución y control, eventualmente podrán generar altas emisiones de grisú a través del taponamiento, integrándose rápidamente al circuito de ventilación de la mina.

También los descensos rápidos y fuertes en la presión barométrica pueden producir corto circuitos en el sistema de ventilación. Si, de acuerdo con la ley de Mariotte, se considera el grisú como un gas libre, puede asumirse que las zonas derrumbadas en la parte posterior de un tajo, los frentes de desarrollo y las áreas de trabajos abandonados se comportan como ambientes naturales sometidos a descensos en la presión barométrica.

6.7. INFLUENCIA DE LAS VOLADURAS EN EL CORTE

La fragmentación del carbón como consecuencia de las voladuras en el corte rompe el equilibrio entre los contenidos de gas libre y gas adsorbido, propiciando un incremento en las emisiones de grisú que exige mayor consideración en la medida en que sea mayor el número de voladuras simultáneas en diferentes sitios.

Así mismo, cuando un frente de explotación se aproxima a zonas con altos contenidos de grisú, ya sea de explotaciones vecinas o de estratos suprayacentes o subyacentes a los mantos, las emisiones se incorporarán a la corriente de aire, incrementando los tenores de grisú en el área de explotación.

7. DETERMINACIÓN DE LOS CONTENIDOS DE GRISÚ IN SITU

Los métodos para la determinación de los contenidos de grisú en mantos de carbón in situ pueden ser ampliamente clasificados como directos e indirectos:

7.1. MÉTODO DIRECTO

Esta técnica, fue desarrollada inicialmente en el instituto Cerchar, en Francia, por Bertard, B. Bruyet y J. Gunther.

El método consiste en tomar una muestra del manto (finos) mediante una perforación y ubicarla inmediatamente dentro de un recipiente hermético para calcularle luego, por etapas, el volumen de gas que desprende dentro del recipiente. El proceso se repite hasta tanto las emisiones sean insignificantes.

Se tienen tres mediciones

Q1: Cantidad de gas liberado por el carbón desde el momento que se toma la muestra hasta que se deposita en el contenedor para transportarla.

Q2: Cantidad de gas liberado durante el transporte de la muestra.

Q3: Gas liberado en la trituración de la muestra.

La cantidad total de gas liberado, Q_t , es proporcional al tiempo (t) transcurrido desde cuando la muestra fue removida de su equilibrio en el manto de carbón, y puede expresarse como:

$$Q_t = K t^n$$

Donde K es una constante, y n será de 0,5 para los franceses Bertard, Bruyet y Gunther, al igual que para los norteamericanos F.N. Kissell, y C.H. Elder, mientras que para el ucraniano R. Bunmore varía entre 0,3 y 0,5 según el tipo de carbón.

El contenido total de gas in situ está dado por:

$$Q_t = Q1 + Q2 + Q3 : (\text{m}^3 / \text{ton})$$

Cada uno de estos contenidos parciales debe ser ajustado a condiciones estándar de presión y temperatura.

En Ucrania, en el instituto MRDE, se ha desarrollado un método para la determinación de los contenidos de gas que consiste en la toma de muestras de núcleos de perforación que son transportadas al laboratorio en recipientes herméticamente sellados, diseñados exclusivamente para tal fin, donde junto con el recipiente de transporte, son trituradas en un molino de bolas

previamente llenado de nitrógeno líquido a una presión absoluta de 1,4 atm. Este procedimiento garantiza que el gas liberado no sólo fluya con facilidad a través de los equipos de medición, sino que sirva para evitar la oxidación del carbón pulverizado. El contenido de gas liberado es corregido a partir de la determinación del gas remanente en el carbón, para lo cual se utiliza un valor promedio de la isoterma de adsorción (Dunmore, R., 1978).

En Rusia, Y. L. Ettiinger y A. M. Dmitriev han tratado de reducir la pérdida de gas durante el muestreo. Para tal fin, han recurrido al sellamiento hermético del núcleo en el momento de la toma de muestras, e igualmente se han servido del mecanismo de congelación de éstas en el lugar mismo de muestreo.

En la República Federal Alemana, en cambio, los investigadores han considerado que los métodos directos para la determinación del gas liberado Q1 no son satisfactoriamente confiables; de ahí que hayan preferido asumir la cantidad Q1 como el 10 % de la suma Q2 + Q3 (Fussel, W., Hudewenz, D., 1974).

7.2. MÉTODO INDIRECTO

Este método fue desarrollado en Rusia por Y. L. Ettinger, en un intento por superar los problemas asociados al método directo. A grandes rasgos, consiste en la medición de la presión de gas en el manto, para luego determinar en el laboratorio, la cantidad de gas contenida por el carbón. Para tal fin, se realiza una perforación en el manto que es sellada mecánicamente en la cara superficial, de tal forma que la presión interna del gas pueda ser determinada; una vez alcanzado el equilibrio en la presión del gas, el valor correspondiente se asumirá como la presión del gas en el manto. De la misma forma, se calcula la temperatura a partir de la determinación de la isoterma de adsorción para el manto y se obtiene luego el contenido total del gas in situ.

La determinación del contenido de grisú por el método indirecto presenta varias desventajas, como el efecto adverso ocasionado por la humedad en el manto, que sumará a la presión del gas una presión hidrostática que lleva a resultados erróneos o a la total distorsión de éstos. E igualmente, puede alterar este cálculo el contenido de cenizas y de materia volátil (Kissel, F. N., Edwards, J. C., 1975).

7.3. MODELO PROPUESTO COMO PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO IN SITU DE GRISÚ EN MANTOS DE CARBÓN

7.3.1. Muestreos

Para la selección de las minas en estudio se tomó en consideración:

- Una adecuada distribución espacial con el fin de obtener datos lo más representativos posible, que permitieran caracterizar la zona en términos de grisutosidad in situ.
- Aquellas minas que tuvieran antecedentes de accidentes imputables a grisú, como aquellas que fueran consideradas en la zona "poco grisutosas", con el fin de establecer parámetros de comparación, así como la corroboración experimental sobre la veracidad histórica.
- Cubrir dentro del estudio los diferentes sistemas de explotación que tradicionalmente se utilizan en la zona.
- Cubrir minas que representaran entre si rangos ampliamente significativos en términos de producción.
- Por último, minas entre las cuales existieran diferencias significativas en términos de tecnificación y medidas de seguridad.

De acuerdo con lo anterior, se eligieron siete minas de la cuenca Amagá-Angelópolis: En total se llevaron a cabo cincuenta perforaciones de muestreo a una profundidad mínima de 2,50 m, para lo cual se utilizó en 7 mantos una barrenadora eléctrica con varillas helicoidales acopladas (Tabla 2).

7.3.2. Mediciones

Se realizaron tres mediciones sucesivas: Q1, Q2 y Q3. En la tabla 3 se presentan los resultados del trabajo de campo.

Como se observa en la tabla 3, las concentraciones en la zona son muy similares, tanto entre las diferentes minas como entre sus respectivos mantos. Lo anterior

puede ser explicado, entre otros factores, por la similitud en la calidad de los carbones, la poca profundidad de los mantos y la escasa diferencia en la estructura litológica de la formación.

Pese a que tampoco se encontró una diferencia significativa en cuanto a la concentración de grisú entre los diferentes mantos de las minas objeto de estudio, se pueden señalar algunas variaciones referidas a los valores extremos presentados por las diferentes muestras analizadas, como son:

- Presentan los mayores contenidos netos de grisú in situ el manto 1 de la mina 2, el manto 2 de la mina 3 y el manto 3 de la mina 1. Esto para las minas cuyos mantos se encuentran actualmente en explotación y que, por tal motivo, permiten su comparación.
- El manto Capotera de la mina 3, el manto 4 de la mina 1 y los mantos La Regular y La Solapuda de la mina 5, dado que son mantos únicos en explotación actual en las minas respectivas, no pudieron ser confrontados en términos de las concentraciones de grisú in situ.

Es necesario anotar que el manto 4 de la mina 1 presenta la mayor grisutosidad entre todas las muestras analizadas a pesar de que el muestreo se efectuó en un frente inactivo durante 2 o 3 meses, tiempo en el cual el manto sufrió una desgasificación, pudiéndose esperar dificultades por alta grisutosidad durante su explotación.

En cuanto a excepciones específicas del muestreo, debe señalarse que en el manto 4 de la mina 1 debió ser realizado en una vía cuya cara libre había sido expuesta desde hacia varios meses, lo que representa un factor de incertidumbre frente a los datos de concentración obtenidos. Tal salvedad se hizo con el único propósito de obtener datos sobre un manto no explotado en ninguna de las minas seleccionadas para el estudio.

Tabla 2 Datos de campo

Mina	Manto	Muestra	Prof perf.	Xo tenor (m)	X tenor frent.	Pf mm recip.	Pext. mm ca	ΔP mm ca	Tf °C ca	Text °C	Mues. transp (g)	Muestra triturada (g)	
Mina 1	1	1	2,50	0,10	0,50	9015	8824	1,2	28,4	24,1	12,1	10,0	
		2	2,90	0,10	0,40	"	"	1,8	"	"	12,4	"	
		3	3,40	0,10	0,60	"	"	4,9	"	"	13,3	"	
		4	3	0,10	0,40	"	"	2,4	"	"	11,6	"	
	2	1	2,80	0	0,20	9044	8936	3,0	25	24	11,2	11,2	
		2	2,80	0	0,20	"	"	1,43	26	"	12,7	12,7	
		3	1	2,80	0	1,00	9031	8995	5,98	26	29	11,9	11,9
		2	2,80	0	0,50	9017	8936	2,15	27	24	11,8	11,8	
	3	3	2,80	0	0,70	"	"	22,7	"	20	10,7	10,0	
		4	2,80	0	0,60	"	"	15,5	"	"	9,8	9,8	
		1	3,30	0	0,50	8950	"	44,3	22	23	15,6	10,0	
		2	3,30	0	0,60	"	"	43,1	"	"	12,7	"	
	4	3	3,30	0	0,40	"	"	37,1	23	"	14,9	"	
		4	3,30	0	0,40	"	"	36,0	"	"	13,5	"	
Mina 2	1	1	2,80	0	1,60	9248	9045	11,97	25,5	23,0	17,53	10,12	
		2	"	0	0,20	9221	9085	43,11	28,0	28,0	13,78	10,00	
		3	"	0	0,30	"	"	31,13	"	"	15,37	"	
		4	"	0	0,30	"	"	37,12	"	29,0	18,63	"	
	2	1	"	0	0,90	9180	9045	16,29	"	23,0	19,26	10,42	
		2	"	0	1,00	"	9085	19,16	28,5	"	23,29	10,27	
		3	"	0	0,30	9167	"	42,00	30,0	29,0	21,71	10,00	
		4	2,80	0	0,6	9167	9085	38,30	31,0	29,0	16,78	10,0	
	3	1	"	"	1,0	9153	9045	11,98	24,0	23,0	21,18	10,49	
		2	"	"	1,2	"	"	7,43	"	"	17,45	10,30	
Mina3	Capo- tera	1	2,80	0	0,20	8950	8855	1,80	26,5	22,0	9,42	9,42	
		2	"	0	0,20	"	"	2,15	26,0	"	12,21	12,21	
	2	1	2,60	0	0,40	8922	8868	6,58	"	24,0	21,63	10,72	
		2	2,80	0,2	0,80	9085	8895	13,41	30,0	26,0	17,45	10,0	
		3	"	0,1	0,90	"	"	17,12	"	"	14,46	10,0	
		4	"	0,2	0,80	"	"	19,40	31,0	"	10,44	10,0	

Tabla 2 Datos de campo (continuación)

Minas	Manto	Muestra	Prof perf.	X ₀ tenor (m)	X tenor frent.	P _f mm recip.	P _{ext.} mm ca	ΔP mm ca	T _f °C ca	T _{ext} °C	Mues. transp (g)	Muestra triturada (g)
	3	1	2,60	0	0,25	8885	8855	2,75	25,0	22,0	22,41	11,90
		2	2,80	0	0,40	8922	"	7,18	32,0	25,0	16,78	10,0
		3	"	0	0,30	"	"	13,00	"	"	17,58	10,14
		4	"	0	0,20	"	"	15,57	"	"	16,65	10,20
Mina 4	1	1	2,80	0	0,5	9004	8890	25,40	24,0	34,0	20,50	10,0
		2	"	0	0,4	"	"	21,00	25,0	"	13,82	"
		3	"	0	0,3	"	"	15,60	26,0	"	12,20	"
	2	1	"	0	0,3	9031	9031	9,00	24,0	19,0	13,38	10,5
		2	"	0	0,1	"	"	11,50	24,0	"	19,85	10,39
		3	"	0	0,6	8990	8990	7,50	34,0	26,0	15,11	10,0
		4	"	0	0,4	"	"	9,60	27,0	34,0	11,20	"
Mina 5	Solapuda	1	2,80	0	0,15	8814	8773	12,20	27,0	21,0	12,42	12,42
		2	"	0	0,10	"	"	2,40	26,0	"	11,01	11,01
		3	"	0	0,20	"	8895	26,30	"	25,0	13,78	10,0
		4	"	0	"	"	"	21,10	"	"	15,16	"
Regular	1	"	0	0,50	8773	"	9,80	"	"	"	15,91	"
	2	"	0	0,60	"	"	35,20	27,0	"	"	17,80	"
	3	"	0	0,50	"	"	37,80	"	"	"	14,53	"
	4	"	0	0,70	"	"	31,13	"	"	"	18,40	"
Mina 6	3	1	2,80	0	0,5	8977	8950	20,6	25,0	27,0	9,08	9,08
		2	"	0	0,7	"	"	19,4	25,0	"	10,23	10,23
		3	"	0	0,4	9004	"	21,0	24,0	"	11,96	11,96
Mina 7	1	1	2,80	0,25	0,8	8882	8868	17,25	25,0	27,0	15,56	12,24
		2	"	"	"	"	"	25,0	"	"	12,73	12,73

* Los datos para el manto 1 de la mina 1 fueron tomados de la tesis de grado de Carlos Arbeláez y Rodrigo Salazar (1983).

P_f = presión en el frente; P_{ext} = presión en superficie; T_f = temperatura en el frente;

T_{ext} = temperatura en la superficie.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN

DEPTO. DE BIBLIOTECAS
BIBLIOTECA MINAS

Tabla 3 Resultados del trabajo de campo

Mina	Manto	Muestra	Prof. Perf. (m)	X ₀ tenor frent.	X tenor recip.	Q1 (cm ³)	Q2 (cm ³)	Q3 (cm ³)	%C	C _f (cm ³ /g)	
Mina 1	1	1	2,50	0,10	0,50	0,19	1,69	0,20	2,8	0,18	
		2	2,90	0,10	0,40	0,29	1,27	0,50	"	0,19	
		3	3,40	0,10	0,60	0,78	2,11	0,20	"	0,24	
		4	3	0,10	0,40	0,38	1,27	0,20	"	0,17	
	2	1	2,80	0	0,20	0,44	0,77	1,04	3,0	0,54	
		2	2,80	0	0,20	0,20	0,77	1,56	"	0,20	
		3	1	2,80	0	1,00	0,86	1,72	1,72	"	0,55
		2	2,80	0	0,50	0,31	1,04	1,04	6,3	0,29	
	3	3	2,80	0	0,70	3,30	2,67	3,96	3,0	0,98	
		4	2,80	0	0,60	2,26	2,25	2,80	3,1	0,76	
		1	3,30	0	0,50	6,25	1,93	4,00	3,0	0,97	
		2	3,30	0	0,60	6,35	2,28	6,55	4,0	1,39	
	4	3	3,30	0	0,40	5,44	1,53	2,44	4,4	0,74	
		4	3,30	0	0,40	5,30	1,53	4,80	4,0	1,03	
Mina 2	1	1	2,80	0	1,60	1,75	6,20	0,62	7,0	1,10	
		2	"	0	0,20	6,20	0,78	4,54	4,0	1,00	
		3	"	0	0,30	4,52	1,17	2,62	"	0,66	
		4	"	0	0,30	5,32	1,17	2,78	"	0,66	
	2	1	"	0	0,90	2,34	3,49	0,26	5,0	0,35	
		2	"	0	1,00	2,76	3,80	0,44	4,0	0,33	
		3	"	0	0,30	6,03	1,15	4,26	"	0,80	
		2	4	2,80	0	0,6	5,50	2,27	2,52	4,0	0,74
	3	1	"	"	1,0	1,79	3,96	1,15	6,0	0,40	
		2	"	"	1,2	1,10	4,72	0,62	5,0	0,41	
		1	2,80	0	0,20	0,26	0,76	2,00	4,0	0,33	
		2	"	0	0,20	0,31	"	2,60	3,9	0,31	
	2	1	2,60	0	0,40	0,95	1,52	0,86	3,6	0,20	
		2	2,80	0,2	0,80	1,92	2,29	2,15	3,2	0,48	
		3	"	0,1	0,90	2,45	3,05	1,90	3,0	0,59	
		4	"	0,2	0,80	2,83	2,28	3,44	2,9	0,86	
	3	1	2,60	0	0,25	0,40	0,95	1,73	3,0	0,16	
		2	2,80	0	0,40	1,02	1,49	0,60	"	0,21	
		3	"	0	0,30	1,85	1,10	3,18	2,8	0,49	
		4	"	0	0,20	2,22	0,74	3,44	2,3	0,53	

Tabla 3 Resultados del trabajo de campo (continuación)

Mina	Manto	Muestra	Prof. Perf. (m)	X ₀ tenor frent.	X tenor recip.	Q1 (cm ³)	Q2 (cm ³)	Q3 (cm ³)	%C	C _f (cm ³ /g)
Mina 4	1	1	2,80	0	0,5	3,72	1,92	2,26	2,97	0,57
		2	"	0	0,4	3,10	1,54	1,76	4,0	0,53
		3	"	0	0,3	2,26	1,15	1,80	2,9	0,78
	2	1	"	0	0,3	1,32	1,16	0,89	3,0	0,28
		2	"	0	0,1	1,67	0,38	1,16	3,6	0,21
		3	"	0	0,6	1,06	2,24	4,08	2,8	0,65
		4	"	0	0,4	1,38	1,52	0,42	3,2	0,31
Mina 5	Solapuda	1	2,80	0	0,15	1,78	0,56	0,86	6,8	0,28
		2	"	0	0,10	0,35	0,37	3,10	3,0	0,36
		3	"	0	0,20	3,82	0,75	1,30	2,0	0,47
		4	"	0	"	3,06	"	2,16	3,0	0,48
	Regular	1	"	0	0,50	1,42	1,86	3,98	20,7	0,77
		2	"	0	0,60	5,00	2,23	2,42	20,7	0,77
		3	"	0	0,50	5,47	1,86	3,88	20,3	1,14
		4	"	0	0,70	4,50	2,62	2,24	14,0	0,72
Mina 6	3	1	2,80	0	0,5	3,0	1,9	1,72	2,0	0,74
		2	"	0	0,7	2,83	2,7	3,97	2,1	0,95
		3	"	0	0,4	3,06	1,54	4,10	2,0	0,74
Mina 7	1	1	2,80	0,25	0,8	2,51	3,03	1,54	9,4	0,57
		2	"	"	"	3,64	5,03	0,43	3,1	0,58

* Los datos para el manto 1 de la mina 1 fueron tomados de la tesis de grado de Carlos Arbeláez y Rodrigo Salazar, 1983.

P_f = presión en el frente

T_{ext} = temperatura superficie

P_{ext} = presión en superficie

C_f = concentración total de grisú

T_f = temperatura en el frente

%C = contenido de cenizas

8. MECANISMOS DE CONTROL DE EMISIONES DE GRISÚ

8.1. VENTILACIÓN

Para prevenir posibles desastres por altas emisiones de grisú, que ocasionarían mezclas explosivas, debe tenerse en cuenta lo siguiente:

Al realizar controles diarios del contenido de grisú, debe observarse que los valores registrados no superen los límites máximos permisibles y la ventilación debe ser adecuada para evitar acumulaciones de grisú en el techo.

- En lo posible, no se debe suspender la ventilación principal o auxiliar; de ser así, se debe dar un previo aviso y en el momento de restituirla, se deben revisar todos los frentes activos.
- Las corrientes de ventilación deben ser ascendentes u horizontales para facilitar la disipación del gas.
- En las vías subterráneas, no deben haber cables eléctricos desnudos; de ser así, deben impedirse las corrientes de ventilación con contenidos de grisú superiores al 0.3%. Además, las líneas eléctricas deben estar suficientemente alejadas del techo.

8.2 DRENAJE DE GRISÚ

La extracción de grisú de estratos carboníferos tiene como objeto producir combustible gaseoso, reducir las emisiones de gas en los trabajos mineros o ambas cosas. Pero si el interés es obtener combustible para la venta o el consumo local, es necesario que se cumplan unas normas de pureza y tasa de flujo; en tal caso, los principales parámetros que influyen son: 1) la permeabilidad natural o inducida del manto de origen y sus posibles estratos asociados; 2) la conveniencia de llevar a cabo el drenaje de gas; 3) el método de explotación minera.

8.2.1 Drenaje de grisú dentro del manto

El drenaje de grisú dentro de un manto gracias a la perforación con barrenos es conveniente sólo si la permeabilidad del carbón lo permite. De ahí que los desarrollos tecnológicos hayan estado dirigidos a incrementar la funcionalidad potencial del drenaje de gas dentro del manto y que gracias a eficientes equipos de perforación y mecanismos de conducción pueda hoy lograrse que el barreno perfore hasta profundidades considerables dentro del manto; con lo cual se logra que la permeabilidad del carbón sea lo suficientemente alta como para que el gas fluya dentro de la mina, o que pueda ser reducido significativamente si se hace un drenaje previo del manto. La eficiencia del gas capturado por estos medios asciende hasta el 50%, donde:

$$\text{Eficiencia del gas} = \frac{\text{Gas capturado por drenaje de metano} \times 100\% \text{ capturado}}{\text{Gas capturado} + \text{gas emitido en la ventilación}}$$

8.2.2 Drenaje de grisú por perforaciones superficiales
La relajación de los estratos suprayacentes y subyacentes en una zona excavada en panel de tajo largo crea espacios vacíos donde se puede acumular gas a una alta concentración, particularmente cuando otro lecho de carbón existe dentro de la columna estratigráfica. Si este gas no es removido, migra hacia los trabajos horizontales y afecta el sistema de ventilación de la mina.

El drenaje de grisú tiene por objeto la extracción del gas con destino a la venta a consumidores industriales

o domésticos, si bien las impurezas pueden restringir aún más su utilización. El grisú puede ser utilizado como combustible a bajo costo en hornos que proporcionen agua caliente, vapor de agua o aire caliente; las edificaciones superficiales de las minas y de las comunidades locales también pueden beneficiarse con su uso y en plantas de procesamiento de minerales puede ser utilizado para facilitar los procesos de secado y las reacciones químicas.

Las turbinas de gas pueden ser empleadas para producir electricidad no solo producen cientos de megavatios de energía eléctrica sino que también generan calor a partir de gases pobres. Además, entre otros usos, el grisú alimenta el fuego de hornos de plantas locales de metalurgia y de hornos de coke y sirve para la síntesis química.

9. CONCLUSIONES

En la cuenca Amagá-Angelópolis las concentraciones in situ de grisú son bajas (cerca de $1 \text{ m}^3/\text{t}$), con algunas pequeñas e insignificantes variaciones entre mantos. Esto, si se comparan con las concentraciones de hasta $30 \text{ m}^3/\text{t}$ halladas en países como Estados Unidos y Francia.

Esas bajas concentraciones encontradas pueden explicarse de acuerdo con los parámetros que regulan la capacidad del carbón para fijar grisú, como son la profundidad de los mantos y el rango, el contenido de materia volátil y el grado de humedad de los carbonos asociados a éstos.

En la cuenca del Sinifaná, la profundidad de los mantos actualmente en explotación es escasa, o sea que las diferencias de temperatura y presión entre la superficie y el área de trabajo minero son leves; el rango característico que poseen los carbonos de la zona y que se reflejan en el alto contenido de materia volátil; y el alto contenido de humedad que varía entre un 8 y un 10%; cifras que, comparadas con valores experimentalmente calculados (5% de humedad), superan ampliamente el valor de saturación de la capacidad del carbón para fijar grisú.

De igual forma, las bajas concentraciones de grisú en la zona pueden ser explicadas también por otros

actores como el elevado grado de alteración de los depósitos, producto de una explotación prolongada durante años y de la forma descuidada, desorganizada y poco técnica como tradicionalmente se ha llevado a cabo allí la recuperación del recurso carbonífero.

En rigor, esos bajos contenidos de grisú no descartan la peligrosidad asociada al gas; pues, en términos cuantitativos, un alto contenido de grisú no implica necesariamente que la peligrosidad sea mayor ya que esta depende en gran medida del conocimiento que se tenga acerca de los riesgos que de allí se derivan y de las medidas que pueden tomarse para mitigar los efectos. Ello explica porqué, pese al bajo contenido de grisú in situ, en la región se han presentado a lo largo de su historia hechos nefastos imputables al grisú; hechos que han cobrado un significativo número de vidas humanas y cuantiosas pérdidas materiales.

10. RECOMENDACIONES

Dada la vigencia que cobra el tema en nuestro país, resulta fundamental extender el estudio de caracterización de las minas en términos de grisutosidad a otras cuencas carboníferas; lo que además permitiría ampliar la base de conocimientos que sobre el particular se tiene en nuestro medio, así como ampliar, corregir o mejorar el método propuesto para determinar el contenido de grisú en una mina.

De continuar con el desarrollo de esta temática, se recomienda un seguimiento del fenómeno sistemático y más prolongado en el tiempo; con el fin de salvar las dificultades asociadas al carácter netamente aleatorio de una formación carbonífera y poder determinar la evolución del fenómeno en el tiempo.

Igualmente, podría revisarse en detalle el aspecto metodológico, para evitar posibles errores en la determinación del contenido de grisú en las muestras, particularmente en lo relacionado con la variable tiempo y con la forma de recuperación de la muestra. Así mismo, es preciso que se cuente con el equipo adecuado que permita realizar perforaciones profundas, para determinar las variaciones del contenido de grisú con respecto a la profundidad.

Por lo demás, es importante revisar la reglamentación con que se cuenta acerca de la seguridad minera en el país; en particular en lo relacionado con los requerimientos mínimos de aire en función del potencial de grisú que puede ser integrado a las corrientes de aire.

Otra recomendación que puede hacerse, con respecto a las concentraciones halladas en la zona de estudio, específicamente en el manto 4 de la mina 1, donde se encontraron los más altos índices de grisú, es que debe prestarse especial atención al comportamiento del gas en términos de su desprendimiento.

11. BIBLIOGRAFÍA

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