

H e r n á n • V á s q u e z • C .

Metano del Carbón

En el proceso de la transformación del material vegetal al carbón (Carbonificación), los productos que se generan incluyen CH_4 , CO_2 , N_2 y H_2 . El metano es generado por dos mecanismos: por debajo de 50°C se genera el biogénico, como producto de descomposición microbiana, y por encima de 50°C , debido a los efectos del entierro y aumento del rango del carbón hay desprendimiento de metano termogénico, como resultado de la catagénesis.

El metano generado se almacena en las superficies internas del carbón, macro y micro poros y en las fracturas naturales.

La presencia de acumulaciones de gas del carbón ha sido conocida en todo el mundo por muchos años, pero sólo como algo indeseable por su peligro en la explotación minera del carbón.

Hernán Vásquez C. Geólogo e Ingeniero de Petróleos de la Facultad de Minas de Medellín y Universidad de Texas, U.S.A. Profesor del Depto. de Geología, Universidad EAFIT.

A partir de los años 80 se empezó a considerar el metano del carbón como un recurso energético que sólo en los EE.UU. podría alcanzar $2.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (80×10^{12} pies cúbicos) y en la China podría sobrepasar las reservas de gas conocidas relacionadas a los hidrocarburos.

En los EE.UU. se inició el aprovechamiento de este recurso, se definieron 13 cuencas potencialmente productoras, y de una docena de pozos a principios de los años 80 se llegó a más de 5.000 pozos productores en los 90, con rendimiento que excede $28 \times 10^6 \text{ m}^3$ por día (1×10^9 pies cúbicos por día) y reservas probadas del rango de $340 \times 10^9 \text{ m}^3$ (12×10^{12} pies cúbicos) de metano.

En Colombia apenas se inicia la investigación de este recurso, con una evaluación de los carbones de Cundinamarca-Boyacá auspiciada por ECOPEPETROL y la firma de un contrato de asociación en la cuenca Cesar-Ranchería con Geomet en 1994.

El metano es generado por dos mecanismos: por debajo de 50°C se genera el biogénico, como producto de descomposición microbiana, y por encima de 50°C , debido a los efectos del entierro y aumento del rango del carbón hay desprendimiento de metano termogénico, como resultado de la catagénesis.

INTRODUCCIÓN

La presencia de acumulaciones de metano en los lechos de carbón ha sido conocida por muchos años, especialmente como un peligro en la explotación de minas de carbón. Numerosos accidentes causados por la explosión del

gas grisú (mezcla de metano y oxígeno) han sido conocidos en muchos países del mundo. Sólo en los últimos años estas acumulaciones de metano han sido consideradas como reservas energéticas explotables, que sólo en los EE.UU. se les asignan disponibilidades del rango de $22.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (800×10^{12} pies cúbicos) de gas (reservas in situ), para depósitos de carbón explotables hasta profundidades de 914 m (3000 pies). Estos recursos, con un recuperable del 50%, podrían abastecer el país por 20 años a las tasas actuales de consumo.

En China las reservas del gas del carbón pueden sobrepasar las reservas conocidas relacionadas a los yacimientos de hidrocarburos.

Mantos de carbón con acumulaciones de metano se encuentran presentes en todos los continentes y han sido la causa de muchos desastres mineros, pero la producción y utilización de este gas sólo se inició a principios de 1900 en un rancho de la cuenca de Power River (USA), de un pozo de agua que penetró un manto de carbón y donde se utilizó el gas obtenido para consumo doméstico. También se registra el hecho de que Kansas (USA) tuvo una industria del metano del carbón en completo desarrollo durante los años 20, cuando la producción del gas natural había declinado en el área. La operación se volvió antieconómica hacia el año 40, pero más tarde resurgió con pozos capaces de producir 283 m^3 /día (10000 pies cúbicos por día) y con un buen precio del gas.

DISPONIBILIDAD

En los Estados Unidos el desarrollo y producción del gas del carbón ha aumentado espectacularmente en los últimos años, con una docena

de pozos productores en los años 80 y cerca de 5000 productores, a más de otros 2000 pendientes de terminación, en los años 90. Su producción excede $28 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$ ($1 \times 10^9 \text{ pc/d}$) y sus reservas probadas alcanzan $340 \times 10^9 \text{ m}^3$ (12×10^{12} pies cúbicos) de metano. Las proyecciones futuras consideran producciones de $85 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$ ($3 \times 10^9 \text{ pc/d}$) para 1996 y de $28 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{día}$ ($1 \times 10^{12} \text{ pc/d}$) para el año 2000.

En cuanto a la disponibilidad mundial del metano del carbón, está relacionada a las de carbón (pardo y bituminoso), con recursos estimados en 25000×10^9 toneladas (Fig. 1). Cuatro países, Rusia, China, EE. UU. y Canadá con el 90% de los recursos, pero otros países como España, Hungría, Francia e Inglaterra, con recursos significativos de carbón también participan en el potencial de recursos del metano del carbón.

La disponibilidad total mundial del carbón puede agruparse geológicamente en cinco categorías, cada una de ellas con características que son el resultado de condiciones paleoclimáticas y de los tipos de vegetación existente al tiempo de la deposición del material orgánico que los formó.

Permocarboníferos: con reservas de carbón en Europa y E de los Estados Unidos. Estos carbones ocurren generalmente como lechos relativamente delgados de 0.30 a 3 m. (1 a 10 pies) y numerosos (hasta 80), repartidos en secuencia de varios cientos de metros (miles de pies). Son carbones altos en volátiles, bituminosos o de rango mayor, bajos en cenizas y con alto contenido vitrinitico. Su contenido de metano es superior a 19.9 m^3 por cada tonelada (700 pies cúbicos por tonelada) de carbón.

La presencia de acumulaciones de metano en los lechos de carbón ha sido conocida por muchos años, especialmente como un peligro en la explotación de minas de carbón. Numerosos accidentes causados por la explosión del gas grisú (mezcla de metano y oxígeno) han sido conocidos en muchos países del mundo. Sólo en los últimos años estas acumulaciones de metano han sido consideradas como reservas energéticas explotables.

Pérmicos: Carbones de Gondwana que ocurren en Australia, India, S. Africa y Antártica, con lechos moderadamente gruesos (mayores de 3 m) en secuencias con 3 a 6 mantos. Son de moderado enterramiento, rango bituminosos, altos en volátiles; algunos se encuentran en cercanía de intrusiones ígneas lo cual les produce aumento de rango hasta antracitas. Son ricos en minerales y pobres en vitrinita y con composición maceral variable. Su contenido de gas varía de 7 a $8.5 \text{ m}^3/\text{ton}$ (250 a 300 pc/ton) de carbón.

Jurásicos: Ocurren en Asia E y Central (Rusia, Kazahstan y China) con lechos que pueden ser gruesos (Hasta 90 m) y numerosos; son generalmente de bajo rango (lignito, bituminosos altos en volátiles). A menudo son de alto contenido mineral y de cenizas. Su contenido de gas es variable, pero menor de $5.7 \text{ m}^3/\text{ton}$ (200 pc/ton) de carbón.

Cretáceos: Limitados mundialmente pero presentes en las Montañas Rocallosas de Norteamérica desde México a través de los EE. UU. hasta Canadá. Con mantos de 3 a 12 m, y normalmente de 2 a 3. Su rango es bituminoso, altos en volátiles y a menudo altos en cenizas. Dependiendo de su rango y de la profundidad

de entierro, su contenido de gas varía de 5.7 a 14 m³/ton (200 a 500 pc/ton) de carbón.

Terciarios: Depósitos gruesos que se encuentran en todos los continentes. Son bajos en rango, lignitos a subbituminosos, altos en humedad. Los mantos pueden ser muy gruesos, hasta más de 100 m. Su contenido de gas es normalmente bajo, a veces menores de 2.8 m³/ton (100 pc/ton) de carbón.

Los recursos mundiales de gas del carbón están en el rango de los 113 a 198 x 10¹² m³ (4000 a 7000 x 10¹² pies cúbicos) de metano.

En Colombia, (Figura 2) con reservas de carbón postuladas en 9700 millones de toneladas, apenas se inicia tímidamente el estudio de los recursos del metano del carbón. ECOPETROL hace algunos años contrató un estudio para la evaluación del área Cundinamarca-Boyacá, y más recientemente (1994) se firmó un Contrato de Asociación, Patillal en la cuenca Cesar-Ranchería. El contrato originalmente consideró un área de 1.000.000 ha (hectáreas) donde se perforaron tres pozos corazonados, los cuales permitieron estimar el espesor de los mantos de carbón y su potencial almacenador de metano. Al terminar esta primera fase se redujo el área a 100.000 ha en las cuales se perforaron cinco pozos, de los cuales uno se encuentra en prueba. Este pozo alcanzó una profundidad de 910 m y encontró cerca de 80 m de carbón en la formación Los Cuervos (Paleoceno).

El carbón se forma a partir de material rico en carbono (Figura 3) por alteración química y térmica de restos orgánicos como plantas. Durante este proceso, llamado de Carbonificación, se generan productos que incluyen

agua, metano y CO₂. Con el aumento del rango del carbón (maduración) desde la turba hasta la antracita, se generan cerca de 116 m³ (5000 pies cúbicos) de metano por tonelada, pero este volumen excede la capacidad de almacenaje del carbón, que con metano adicional desprendido durante el proceso de entierro, migra y se acumula en los yacimientos arenosos tradicionales que acompañan los mantos de carbón.

Después de generado el metano durante el proceso de la carbonificación, este se almacena en el carbón como una capa monocelular adsorbida en las superficies internas de la matriz del carbón (Figura 4). La cantidad de metano adsorbida puede ser significativa puesto que las moléculas están muy empacadas y el carbón tiene una gran área de superficie interna, mas de 93 x 10⁶ m² (1 x 10⁹ pies cuadrados) por tonelada. Como resultado el carbón puede contener dos o tres veces mas gas que el mismo volumen de un yacimiento arenoso.

La cantidad de metano almacenada en el carbón esta relacionada a su rango y profundidad de entierro. A mayor rango del carbón y mayor profundidad de entierro, mayor es la capacidad para contener el metano.

En Colombia, con reservas de carbón postuladas en 9700 millones de toneladas, apenas se inicia tímidamente el estudio de los recursos del metano del carbón. ECOPETROL hace algunos años contrató un estudio para la evaluación del área Cundinamarca-Boyacá, y más recientemente (1994) se firmó un Contrato de Asociación, Patillal en la cuenca Cesar-Ranchería.

GENERACIÓN DEL METANO

El proceso por medio del cual el material orgánico es alterado en su paso a través de la turba, el lignito, los bituminosos hasta la antracita, se denomina Carbonificación (Figura 3). Los cambios que normalmente se toman como indicadores del progreso de la carbonificación (o maduración) son valor calorífico, contenido de humedad, material volátil y carbono fijo. Todas las propiedades anteriores son alteradas por el aumento de la temperatura causada por el incremento de la profundidad con el entierro.

La formación de la turba a partir de restos vegetales se ha denominado "Carbonificación bioquímica" debido a la actividad microbiana de las bacterias anaeróbicas que en ambientes reductores consumen el oxígeno del material orgánico y dejan un material enriquecido en hidrógeno.

Los cambios físicos que ocurren en esta etapa son la disminución de la porosidad y el alineamiento de partículas, todo ello causado por el aumento del peso de los sedimentos como resultado del entierro.

Los cambios diagenéticos ocurren hasta un nivel límite (entre el lignito y los subbituminosos), a temperaturas del rango de los 50°C; por encima del rango subbituminoso los cambios pueden estar relacionados a alteración metamórfica.

Los mayores productos del proceso de carbonificación son CH_4 , CO_2 , N_2 y H_2O , con el metano generado por dos mecanismos: biogénico y termogénico. A temperaturas por debajo de 50° C el metano biogénico se forma por la descomposición microbiana, que para el caso

de entierro y subsidencia rápida puede acumularse en yacimientos poco profundos. El metano biogénico puede alcanzar hasta un 10% del metano generado a temperaturas menores de 200° C.

A temperaturas por encima de 50° C, debido al aumento de la profundidad del enterramiento, el rango del carbón aumenta, aunque no en forma instantánea, pues está relacionado al tiempo y a la temperatura. Los principales productos gaseosos producidos en esta etapa son CH_4 y N_2 .

Catagénesis es el proceso por el cual el material orgánico es alterado o transformado por el efecto del aumento de la temperatura. El metano generado a temperaturas por encima de 50° C es el resultado de la Catagénesis y es metano termogénico.

Durante el período de la carbonificación se generan grandes volúmenes de metano y otros gases debido a la alteración térmica del material orgánico. El material húmico, componente principal de la mayoría de los carbones, está compuesto por lignina, rico en oxígeno y celulosa, lo cual, según el diagrama de Van Krevelen (Van Krevelen, D. W. 1961. Coal. New York, Elsevier, p.514), indicaría que el carbón es equivalente al kerógeno Tipo III.

Durante la fase de carbonificación que termina en el límite entre volátiles altos y medios, se genera más CO_2 que metano (dos veces), pero a partir de este límite la generación de metano aumenta rápidamente para alcanzar un pico a 150°C equivalente al límite bituminoso de volátiles medio y bajo.

Los dos principales contaminantes del metano del carbón son CO_2 y N_2 . Las emisiones de

nitrógeno se inician como amonio (NH_3) alrededor de los 120°C , pero a menudo sólo como constituyente menor. El CO_2 , aunque aparece como el principal componente del gas termogénico inicial, está presente en cantidades variables pero normalmente pequeñas, y con la característica de ser muy soluble en el agua.

El H_2S se ha identificado como generado a partir de trazas del material orgánico húmico, pero por su solubilidad en el agua y por el hecho de ser el último componente gaseoso en formarse (a partir de los 100°C), sólo se han detectado trazas de este gas en el metano del carbón.

Los gases del carbón contienen generalmente más del 95% de metano con cantidades menores o trazas de etano y propano, y con menos del 3% de N_2 y CO_2 . Su poder calorífico es del rango de 7 Kcal/m^3 (1000 BTU por pie cúbico).

RETENCIÓN DEL METANO EN EL CARBÓN

El metano es retenido en los lechos del carbón en tres formas diferentes:

- a. Como moléculas adsorbidas en las superficies.
- b. Como gas libre en poros y fracturas.
- c. Como gas disuelto en el agua dentro del lecho.

El área superficial disponible dentro del carbón parece estar relacionada al contenido de C fijo: carbones con contenido de carbono fijo menor de 76%, así como aquellos con contenido mayor del 83%, poseen áreas de superficies internas que en general son menores de $1 \text{ m}^2/\text{g}$ (metro cuadrado por gramo). Para carbones con

carbono fijo en el rango de 76 a 83%, las áreas internas son mayores de $10 \text{ m}^2/\text{g}$. Y para carbones antracíticos, con carbón fijo mayor de 92% la superficie interna varía entre 5 y $8 \text{ m}^2/\text{g}$.

La estructura y el tamaño de los poros controla el volumen y la rata a la cual el gas puede ser desprendido.

La distribución de los poros confirma que el total del área superficial en carbones de rango moderado a alto, está en los microporos (8 a 20 unidades Angström- 10^{-8} cm), y el máximo volumen poroso corresponde a aquellos con diámetro entre 7 y 8 unidades Angström. El volumen de los microporos decrece cuando el carbón aumenta de rango hasta el 85% de C fijo, y a partir de este punto su volumen aumenta con el aumento del C fijo.

La presión también tiene influencia en la capacidad de adsorción del carbón, pero típicamente esta capacidad de adsorción aumenta con el aumento del rango del carbón.

En cuanto al gas generado en exceso del que puede ser absorbido en las superficies internas del carbón, inicialmente se encuentra como gas libre en los espacios porosos y muy especialmente en las fracturas, pero está disponible para disolución en el agua que se mueve a través de los mantos del carbón.

El metano es parcialmente soluble en las aguas formacionales a presiones hidrostáticas normales, para el rango de temperaturas que generalmente ocurren en los yacimientos del metano del carbón, pero su solubilidad disminuye con el aumento de la salinidad de las aguas formacionales.

La porosidad de las fracturas del carbón esta relacionada a los llamados "cleat", los cuales son "joints" perpendiculares al manto del carbón, con dos juegos normalmente perpendiculares entre sí: "Face" como el "Cleat" mayor, de mayor extensión, y el "Butt cleat" que normalmente se extiende entre dos superficies de "Face cleat".

FLUJO DEL METANO

Después de que el gas se desadsorbe del carbón, se dispersa a través de la matriz hasta alcanzar una fractura ("cleat"). El gas fluye entonces a lo largo de estas u otras fracturas hasta alcanzar el pozo (Figura 4).

La dispersión del gas a través de la matriz del carbón está controlada por la concentración del gas, las propiedades de dispersión de la matriz y la distancia que el gas tiene que viajar para alcanzar las fracturas (o "cleats"). Cuando alcanza las fracturas el flujo es controlado por la permeabilidad y la presión, pero como el flujo es realmente de gas y agua, es necesario considerar las permeabilidades relativas para este flujo de dos fases, agua y gas.

Las pruebas en pozos de cuencas carboníferas indican que la permeabilidad de las fracturas ("cleats") dependen de la presión y de la profundidad de entierro del carbón. Por lo tanto, la permeabilidad del carbón es mayor en situaciones de bajos esfuerzos, tales como en los carbones poco profundos, por ejemplo en la cuenca de Bowen, Australia.

Para que se desprenda el metano adsorbido es necesario reducir la presión sobre el carbón, normalmente por remoción del agua y reducción de la presión hidrostática. La cantidad de

gas desprendido está controlada por la isoterma de desorción, una curva normalmente no lineal. Por ejemplo, al reducir la presión hasta un 50%, el gas desprendido puede ser del rango de un 20%, y hasta podría decirse en general que la presión del yacimiento debe de reducirse hasta cerca de la atmosférica (760 mm Hg, \pm 15 psi) para una eficiente expulsión del gas.

Es práctica normal en la producción del metano del carbón la fracturación hidráulica de los pozos productores. Entre las razones que justifican esta práctica se tienen: a) Acelerar la producción del agua y la reducción de la presión, lo cual podría traducirse en la aceleración del desprendimiento del gas de los microporos. b) Distribuir la reducción de la presión y controlar la producción de finos, al reducir la presión cerca del hoyo donde el carbón esta normalmente en una condición degradada. c) Hacer una conexión efectiva del hoyo con todo el yacimiento. Debido a las intercalaciones que acompañan los lechos de carbón, los pozos pueden no conectar todos los sistemas de fracturas.

YACIMIENTOS

El sistema de porosidad del carbón es esponjoso y múltiple, y la capacidad de almacenaje de gas para un carbón de rango medio es equivalente al de una arenisca con porosidad del 30% y saturación de agua del 0%.

En el carbón, el gas se encuentra adsorbido en las superficies de los microporos (de diámetro menor de 20 unidades Angström) y para permitir la salida y difusión del gas se requiere una reducción de la presión. El escape del gas se realiza a través de los macroporos intermedios en dirección a las fracturas naturales del carbón (Figura 4).

Las fracturas ortogonales del carbón ("cleats") se desarrollan durante la carbonificación y permiten la salida de los constituyentes volátiles (agua, metano, CO₂). La permeabilidad de estas fracturas se reduce por la presión causada por el entierro y por otra parte la capacidad de almacenamiento de gas se afecta por las bajas presiones del yacimiento.

Los yacimientos económicamente explotables de gas del carbón se encuentran a profundidades moderadas a poco profundas (300 a 900 m).

La presencia de sedimentos inorgánicos (como las cenizas) afecta el desarrollo natural de las fracturas en lo relacionado a su frecuencia, longitud y ancho, características estas que son inversamente proporcionales al contenido de cenizas. También las laminaciones delgadas de los lechos del carbón causan discontinuidades de las fracturas verticales.

Pero también pueden ocurrir fracturas adicionales causadas por efectos tectónicos o de compactación diferencial, que por cierto presentan diferente orientación a los "cleats". La presencia de estas fracturas puede permitir la ocurrencia de producción comercial del gas del carbón de lechos relativamente profundos.

La mayoría de los carbones se encuentran inicialmente saturados de agua y para que pueda iniciarse el desprendimiento del gas es necesario retirar algo de esa agua, lo cual facilita el aumento de la saturación del gas en los sistemas de micro y macroporos. Pero los carbones también tienen una saturación de agua irreductible, que por cierto afecta la permeabilidad relativa al gas. Esta permeabilidad relativa permanece baja durante la vida

productiva del yacimiento (\pm 10% de la permeabilidad absoluta).

El carbón es una roca relativamente frágil con baja resistencia a la compresión y por lo tanto es común la degradación y el movimiento de finos en las cercanías del hoyo durante la producción.

Debido al proceso de desorción (desprendimiento del gas) y a la alta capacidad de almacenaje de gas en el carbón, este tipo de yacimientos exhibe una baja declinación de producción y una larga vida productiva.

Donde el carbón se encuentra cerca a la superficie (menos de 150 m) el potencial de retención del gas generado disminuye en forma apreciable, pero cuando se encuentra a mayores profundidades el contenido de gas depende de la profundidad de entierro (presión hidrostática), rango del carbón y del ambiente hidrogeológico.

La cantidad de gas generado durante la carbonificación depende de la maduración térmica y de la cantidad de carbón presente.

Algunos investigadores se han concentrado en carbones gruesos con mucho gas, es decir carbones de alto rango y alta concentración de gas a poca profundidad. Sin embargo, se ha considerado recientemente que otros parámetros del yacimiento pueden tener un buen impacto en la calidad del prospecto:

- a. Características de adsorción del gas. Carbones de bajo rango (y por lo tanto de baja concentración de gas) con características favorables de adsorción pueden generar un prospecto de mejor calidad que un carbón

de alto rango (y mejor concentración potencial de gas) pero no totalmente saturado.

- b. Profundidad, presión y permeabilidad del carbón. Los carbones mas profundos y por lo tanto bajo mayores presiones, ofrecen o generan mejores prospectos que aquellos localizados a poca profundidad.
- c. Porosidad y saturación del carbón. Carbones de baja porosidad y baja saturación de agua originan mejores prospectos que aquellos de alta porosidad y alta saturación de agua, si se asume la misma permeabilidad para ambos casos.

Las características de los yacimientos carbonosos están influenciados por su geología, como es el caso de la presencia común de fallamientos mayores y menores, lo friable del carbón, la presencia de fracturas ("cleats") que hacen estos yacimientos de tipo único, cuando son comparados con los tradicionales de gas.

La localización de los prospectos se determina con base en geología, estudios superficiales, topografía y análisis de lineamientos, especialmente con ayuda de la fotografía infraroja y el radar. Los resultados de pruebas hidrológicas en conjunto con los de la producción del gas indican que la localización de los pozos en las cercanías de lineamientos mejora su producción de agua y por lo tanto la del gas.

También la exploración corriente puede basarse en la presencia de lechos gruesos de carbón que no estén muy profundos o muy cercanos a la superficie. Y mientras la determinación del gas (in situ) es importante, una permeabilidad suficiente es crítica.

Para la localización de prospectos adecuados para yacimientos de gas del carbón, se han utilizado los sensores remotos (como el Landsat) que permiten identificar características geológicas superficiales o indicar condiciones como permeabilidad mejorada, características menores como pliegues que favorecen la ocurrencia de fracturas abiertas, o áreas de bajos esfuerzos o superpresionadas como indicadores de permeabilidad mejorada.

Hay preguntas que pueden conducir a la selección de localizaciones ideales:

1. ¿Cuales fracturas, o aún eventos tectónicos podrían generar permeabilidad mejorada, y que otros eventos podrían reducir esa permeabilidad?
2. ¿La localización de los pozos sobre expresiones superficiales o lineamientos podría resultar en mayores exitos?
3. ¿Qué tan importante es la composición maceral del carbón, así como su composición mineral, para el desprendimiento del gas adsorbido y su producción por largo tiempo?

PROPIEDADES DE LOS YACIMIENTOS DE CARBÓN

Para medir las propiedades particulares del metano del carbón se requieren una serie de condiciones:

- a. Contenido de gas: Mientras el contenido inicial puede calcularse del rango del carbón, en conjunto con su profundidad de entierro, las pruebas de desorción (desprendimiento del gas) en corazones son requeridas para una mejor información.

- b. **Espesor Neto:** Los registros eléctricos de alta resolución y el análisis del contenido de cenizas son muy importantes en la determinación de los espesores de los mantos delgados y de su espesor neto verdadero.
- c. **Isoterma de Desorción (Fig. 5):** Cada tipo de carbón está gobernado por una isoterma particular que controla el desprendimiento del gas adsorbido. Es importante establecer si el contenido de gas corresponde a la isoterma porque entonces el gas estaría disponible para ser desprendido, o si por el contrario está por debajo de la isoterma (por debajo de la saturación), caso en el cual sería necesario rebajar la presión del yacimiento para que pueda ocurrir el desprendimiento del metano.
- d. **Propiedades de Difusión:** Aunque para algunos carbones las propiedades de difusión son favorables, para otros se han reportado tiempos de difusión del gas de 300 o más días. El estudio respectivo, en corazones controlados, puede dar información al respecto.
- e. **Permeabilidad absoluta relativa:** El carbón, por ser un medio fracturado, tiene una permeabilidad que es prácticamente imposible de determinar en el laboratorio, sin embargo, para solucionar este problema puede ayudar el uso de flujos cortos de muestras y de pruebas un poco más largas de inyección de agua. Los estudios simulados pueden permitir la determinación de las permeabilidades relativas al gas y al agua.

Otras propiedades importantes del carbón son porosidad, presión, temperatura y composición del gas, las cuales pueden obtenerse por medio

de los métodos tradicionales de pruebas del yacimiento.

DETERMINACIÓN DE GAS EN EL YACIMIENTO

La determinación del gas almacenado en el yacimiento de carbón puede hacerse por medio del análisis de corazones con base en tres componentes:

Gas perdido: Correspondiente al tiempo transcurrido entre el momento en el cual el yacimiento fue penetrado por la broca y la sellada de la muestra. Este valor se determina por extrapolación de las dos primeras horas de desorción.

Gas desorbido: Corresponde al gas desprendido o expelido por el carbón a presión atmosférica mientras la muestra está sellada.

Gas residual: Es el gas remanente atrapado en la matrix del carbón después de la desorción. Se determina disgregando o pulverizando el carbón en un compartimiento cerrado y midiendo el gas desprendido.

El contenido del gas analizado ha dado resultados que indican valores superiores a 28 m³ (1000 pies cúbicos) de metano por tonelada de carbón, pero estos valores parecen ser más bien la excepción que la regla.

El conocimiento del rango del carbón y su profundidad de ocurrencia por debajo de la superficie potenciométrica, permiten estimar el volumen de gas generado utilizando parámetros como la capacidad de generación y la presión hidrostática, todo ello en combinación con la curva isoterma de absorción. La determinación

del rango puede hacerse por medio de la reflectancia de vitrinita.

Un tercer método para estimar el metano en el yacimiento fue desarrollado por Kim (1977) como una ecuación basada en la combinación de la isoterma de absorción y la información química del carbón.

La información relativa a la emisión o escape de gas en las minas de carbón es otro indicativo para la determinación del volumen de gas en el yacimiento (in situ). Se compara el gas expelido con el contenido del gas en el carbón, este último obtenido por métodos directos:

EMISIONES DE GAS EN MINAS (M³ O PIES³/ TONS EXTRAIDAS)

Medida Directa (m³ o pies³/ton)

Los valores de esta relación pueden variar entre 6 y 9.

La estimación del gas en el yacimiento, así como su análisis económico, pueden ser relativamente simples pero no así el cálculo del gas que se espera recuperar, pues los métodos tradicionales de analogía basados por ejemplo en curvas de declinación de producción o los cálculos de balanza material, no son aplicables. El método entonces más confiable es el de la simulación de yacimientos. La razón para lo anterior es la de que los pozos productores de metano del carbón pasan por tres estados diferentes (Fig. 6): en el primero y debido a la pérdida de agua del yacimiento, la producción del metano aumenta (curva de declinación negativa) y esta producción está controlada por la permeabilidad relativa al agua-gas, así como por las presiones de desprendimiento del gas (desorción). Este estado termina cuando el nivel de

presión alcanza el límite de la presión del yacimiento. El segundo estado es el de producción estable del gas con mejoramiento de la permeabilidad relativa al agua-gas, así como desorción, que están limitados por la pérdida de permeabilidad debido a la compactación. El tercer estado semeja la producción convencional del gas con la declinación de la presión del yacimiento.

ÁREAS PRODUCTORAS DEL METANO DEL CARBÓN

La producción de metano del carbón, como actividad comercial es bastante reciente, y, los mayores desarrollos, tanto en investigación como en tecnología de la producción han ocurrido en los EE. UU (Fig. 7).

En los años 70 el US Bureau of Mines y el US Steel Institute iniciaron un proyecto sobre investigación del metano del carbón con una prueba de 5 pozos en la cuenca de Warrior (Alabama, USA). Este proyecto fue expandido con participación del Departamento de Energía, como un proyecto piloto con 23 pozos en el sitio de la mina Gak Grove. Los resultados de estos estudios indicaron que la mayor parte del metano almacenado en el yacimiento (73%) podría ser producido con pozos verticales porque los "cleat" y fracturas naturales facilitaban el drenaje de áreas importantes.

El Gas Research Institute (GRI) inició actividades en el campo del metano del carbón a principios de los años 80, con pruebas que permitieron explicar o entender los mecanismos que controlan el almacenaje, desprendimiento y producción eficiente del metano del carbón. El primer objetivo de la tecnología de desarrollo incluye el completamiento o terminación de mantos

productores múltiples. Se produjeron entonces pozos con tres mantos y se continuó con los planes hasta de 5 mantos en el mismo sistema de producción. Un segundo objetivo acometido se relacionó con la tecnología de pruebas e interpretación de las mismas para llegar al modelo de simulación para un yacimiento de metano del carbón. Además se realizaron análisis cuidadosos de pre y post-estimulación de pozos, con el fin de poder entender el resultado de la fracturación hidráulica en los carbonos, incluyendo los casos de varios lechos delgados, como ocurre en la cuenca de Warrior.

En los EE. UU. se han considerado 13 cuencas productoras de gas del carbón (Fig. 7) con un área total de 609738 km² (235420 mi²) que contienen estratos de carbón. Del área anterior se consideran 270588 km² (108670 mi²) con alto contenido de metano, de las cuales, y después de una evaluación, se seleccionaron 100633 km² (40415 mi²) con un contenido de gas en los yacimientos carbonosos (in situ) entre 2 y 11 x 10¹² m³ (72 y 400 x 10¹² pies³ cubicos) de gas.

La producción del metano del carbón tuvo un aumento anual continuo durante la década de los años 80 y al iniciarse la de los 90 parecía haberse estabilizado. De 1993 a 1994 la producción aumentó en sólo un 4.7% en el Black Warrior Basin (de 2.97 a 3.12 x 10⁹ m³ - 105 a 110 x 10⁹ pies³ - por día), 5.1% en San Juan Basin (17.3 a 18.18 x 10⁹ m³ - 611 a 642 x 10⁹ pies³- por día), y para el resto del país la producción de 1994 fue de 0.7 x 10⁹ m³ (25 x 10⁹ pies³). La producción total de EE. UU. en 1994 fue de 22 x 10⁹ m³ (777 x 10⁹ pies³), aproximadamente el 4% de la producción total de gas (5.6 x 10¹² m³ - 19.7 x 10¹² pies³).

También y como indicativo de la maduración exploratoria, las reservas de metano del carbón declinaron de .33 x 10¹² m³ a .27 x 10¹² m³ (11.6 a 9.38 x 10¹² pies³) en 1994. Este volumen de reservas corresponde a un 6% de las reservas del gas natural en los EE. UU. (4.64 x 10¹² m³ - 163.8 x 10¹² pies³). Se estima que el potencial de reservas recuperables de metano del carbón puedan alcanzar entre 1 y 1.6 x 10¹² m³ (43 y 58 x 10¹².pies³) de gas.

Algunas características de varias de las cuencas productoras en EE. UU. son:

Cuenca de San Juan: Esta cuenca esta localizada en el NW de New Mexico y el SW de Colorado, es asimétrica con dirección NW-SE. La formación Fruitland, Cretáceo Superior, está presente en un área de 19425 km² (7500 mi²) y contiene el mayor volumen de carbón aunque este también está presente en otras formaciones cretáceas (Reservas 200 x 10⁹ Ton).

Esta cuenca contribuye con cerca del 75% de la producción total de gas del carbón en EE. UU. A finales de de 1991, 1600 pozos producían a la rata de 24.4 m³/d (860 x 10⁶ pies³ /d).

Los carbonos de Fruitland son en general gruesos, de rango alto y están a mayores profundidades en la parte N de la cuenca. Su contenido de gas excede en algunas partes los 14.2 m³/Ton (500 pies³ /ton), y posee un total estimado de reservas de .88 x 10¹² m³ (31 x 10¹² pies³) de gas. Un pozo típico del norte de la cuenca puede alcanzar producciones de 14.2 a 28.3 x 10³ m³/día (500 a 1000 x 10³ pies³/día) con un recuperado último de 57 a 84 x 10⁶ m³ (2 a 3 x 10⁹ pies³); en la parte central de la cuenca, con lechos gruesos superpresionados de carbón, la producción puede alcanzar 84000

a $113000 \text{ m}^3/\text{d}$ ($3 \text{ a } 4 \times 10^6 \text{ pies}^3/\text{d}$) de gas, con recuperado total por pozo de $.28 \times 10^9 \text{ m}^3$ ($10 \times 10^9 \text{ pies}^3$) de gas.

Cuenca de Warrior: 90650 km^2 (35000 mi^2) en los límites de los estados de Alabama y Mississippi. Es una extensión sur de la Cuenca de los Apalaches que contiene sedimentos paleozóicos cubiertos parcialmente por cretáceos. El Pensylvaniano está representado por la formación Pottsville, la cual contiene 35×10^9 toneladas de las reservas de carbón de la cuenca. El carbón ocurre en 20 mantos agrupados en 7 grupos. De las reservas, se considera que 20×10^9 toneladas pueden ser objetivos para la producción del metano, con contenidos del rango de $14.2 \text{ m}^3/\text{ton}$ ($500 \text{ pies}^3/\text{ton}$) de carbón. El desarrollo comercial actual se restringe a los condados de Jefferson y Tuscaloosa (Alabama) en el grupo carbonífero Mary Lee. La disponibilidad de metano podría estar entre $19.8 \text{ y } 28.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ ($7 \text{ y } 10 \times 10^{12} \text{ pies}^3$) de gas.

Esta cuenca ha tenido el mayor número de perforaciones para la producción del gas del carbón. La producción de cerca de 2740 pozos ha aumentado constantemente y alcanzó $6.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$ ($235 \times 10^6 \text{ pies}^3/\text{día}$) en Abril de 1992.

Otras Cuencas:

La cuenca Central de los Apalaches se extiende por 59180 km^2 (22850 mi^2) en partes de Maryland, W. Virginia, Kentucky y Tennessee. Los estratos pensilvanianos y mississippiicos presentes en la cuenca contienen numerosos mantos de carbón generadores de metano. El potencial del metano estimado para la cuenca varía de $.28 \text{ a } 1.36 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ($10 \text{ a } 48 \times 10^{12}$

pies^3) de gas. En el área de W. Virginia se han perforado cerca de 200 pozos y se planea la perforación de un número similar. La producción promedio de la cuenca es de $2.83 \times 10^3 \text{ m}^3$ ($100 \times 10^3 \text{ pies}^3$) de gas por pozo.

La cuenca de Arkoma, 34930 km^2 (13488 mi^2) en las partes este y central de Oklahoma y oeste y central de Arkansas, con abundantes carbones en rocas Pensylvánicas; tiene una disponibilidad de reservas de 7.4×10^9 toneladas de carbón. El estimado de contenido de metano, en, por ejemplo los carbones de Hartshorne (OK), esta entre $2.07 \text{ y } 16.14 \text{ m}^3$ ($73 \text{ y } 570 \text{ pies}^3$) por tonelada, con 5.4×10^9 toneladas de reservas de carbon y $69.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ ($2.45 \times 10^{12} \text{ pies}^3$) de gas (In situ). En esta región, en la cuenca poco profunda de Cherokee se tienen cerca de 130 pozos productores de gas del carbón y para finales de 1992 se espera doblar este número. La producción del metano es variable pero con un promedio de 1420 m^3 (50000 pies^3) de gas por pozo.

La cuenca de Power River es intermontana y está limitada por Black Hills al este y Big Horn Mts. al oeste, con cerca de 66820 km^2 (25800 mi^2). En esta cuenca se han perforado cerca de 160 pozos dirigidos a la búsqueda de gas del carbón en secuencias poco profundas con carbones de bajo rango. Los 40 pozos productores actuales producen a ratas desde $280 \text{ a } 3960 \text{ m}^3$ ($10000 \text{ hasta } 140000 \text{ pies}^3$) de gas, con los últimos con ratas entre $2830 \text{ y } 5660 \text{ m}^3$ ($100000 \text{ y } 200000 \text{ pies}^3$) de gas por día.

La cuenca de Piceance esta localizada en el NW de Colorado y contiene lechos de carbón de la formación Mesaverde (Cretáceo Superior) en un área de 17000 km^2 (6570 mi^2). Se les estima un espesor promedio a los carbones de 15 m (50 pies) y una disponibilidad de carbón hasta

3000 metros (10000 pies) de profundidad de 380×10^9 toneladas. El metano contenido en estos carbones se estima en $1.70 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ($60 \times 10^{12} \text{ pies}^3$) de gas. En esta cuenca se han completado 125 pozos desde 1989. Algunos son productores duales (del carbón y de las arenas gasíferas adyacentes) y han registrado entre 2800 y 11300 m^3 (100000 y 400000 pies^3) de gas por día. Dos pozos recientemente perforados en la parte norte probaron 26900 m^3 (950000 pies^3) de gas por día.

CONCLUSIONES

La presencia de metano en mantos de carbón ha sido conocida por muchos años especialmente como un peligro en la explotación del carbón.

Mantos de carbón con acumulaciones de metano se encuentran en todos los continentes, pero apenas ahora se inicia su aprovechamiento como reserva energética.

Los recursos mundiales del gas del carbón están en el rango de 113 a $198 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (4000 a $7000 \times 10^{12} \text{ pies}^3$) de gas.

En Colombia apenas se inicia el estudio del gas del carbón con proyectos auspiciados por ECOPEPETROL en Cundinamarca-Boyacá y Cesar-Ranchería.

La cantidad de metano almacenada en el carbón está relacionada a su rango y a la profundidad de entierro.

El metano es retenido en los mantos de carbón en tres formas: a) Como moléculas adsorbidas en las superficies. b) Como gas libre en poros y fracturas. c) Como gas disuelto en el agua.

El sistema de porosidad del carbón es múltiple y la capacidad de almacenaje de gas para un carbón de rango medio es equivalente a la de una arenisca con porosidad del 30% y saturación de agua del 0%.

Las fracturas ortogonales del carbón ("cleats") se desarrollan durante la coalificación y permiten la salida de los constituyentes volátiles (agua, metano, CO_2).

Debido al proceso del desprendimiento del gas y a la alta capacidad de acumulación de gas en el carbón, este tipo de yacimientos presentan una baja declinación de producción y una larga vida productiva.

Las características de los yacimientos carbonosos están influenciados por la geología del área, la presencia de fallas y fracturas y lo friable del carbón.

Para medir las propiedades de los yacimientos del metano del carbón, se requiere el conocimiento del contenido de gas, el espesor del lecho del carbón y la isoterma de desorción.

Después de que el gas se desprende del carbón, éste se dispersa a través de la matriz hasta alcanzar las fracturas y por estas alcanza el hoyo del pozo.

Para desprender el metano adsorbido en el carbón es necesario reducir la presión en el carbón por medio de la remoción del agua y de la reducción de la presión hidrostática.

Las características de los yacimientos carbonosos están influenciados por la geología del área, la presencia de fallas y fracturas y lo friable del carbón.

La estimación del gas almacenado en el yacimiento puede hacerse con base en el gas perdido, el gas adsorbido y el gas residual.

En los EE. UU. se han considerado 13 cuencas productoras de gas del carbón y en las áreas evaluadas se les estima un total de 104670 km² (40415 mi²) con un potencial de gas (in situ) entre 2 y 11.30 x 10¹² m³ (72 y 400 x 10¹² pies³) de gas.

BIBLIOGRAFÍA

- Aalund, L. R.-Editor. Coalbed Resources. The Oil and Gas Journal, vol 87, No 41, Oct. 9/89, p.17.
- Ayers Jr., W.B. Coalbed Methane Production and Activity in the U.S. Energy Mineral 1, No. 1, p. 2.
- Cramer, P.D. Fracturing key element in Fruitland methane activity. The Oil and Gas journal 41, Oct. 9/89, p. 57.
- Henderson, K.S. & Gazzier, C.A. Interest aroused over coalbed gas resource potential Oil and Gas Journal, vol. 87, No. 35, August 28/89, p. 61.
- Kuuskraa, V.A. & Branderburg, Ch. F. Coalbed Methane sparks a new energy Journal, vol. 87, No. 41, Oct.9/89, p. 49.
- , Boyer II, C.A. & Kelafant, J.A. Hunt for quality basins goes abroad. Coalbed gas 1. The Oil and Gas Journal, vol. 90, No. 40, Oct.5/92, p. 49.
- , & Mcbane, R.A. Steps to assess resource economics covered. Coalbed Gas Journal, vol. 87, No. 52, Dec. 25/89, p. 121.
- Lambert, S.W. & Graves, S.L. Production strategy developed. Coalbed Methane 5. The 87, No. 47, Nov. 20/89, p.55.
- , ——— & Jones, A.H. Warrior Basin drilling stimulation covered. Coalbed Gas Journal, vol 87, No. 46, Nov. 13/89, p. 87.
- Logan, T. L. Western Basins dictate varied operations. Coalbed Methane 6. The Oil and No. 47, Nov. 20/89, p.55.
- McElhiney, J.E., Koenig, R.A. & Schranfnagel, R.A. Evaluation of coalbed methane different techniques. Coalbed Methane 3. The Oil and Gas Journal, vol. 87, No. 44, Oct. 30/89, p. 63.
- Rightmore, C. T. Coalbed Methane Resources of the U. S. AAPG Studies in Geology. Series # 17-1984. p.1.
- Rogers, R.E. & Carrison, K.W. Corehole to evaluate coalbeds in Mississippi. The Oil and Gas Journal, vol. 89, No. 49, Dec.9/91, p.70.
- Schranfnagel, R. A., McBane, P.A. & Kuuskraa, V.A. Coalbed Methane Development Faces Technology Gaps. The Oil and Gas Journal, vol. 88, No. 6, Feb.5/90, p. 48.
- Stevens, S.H., Kuuskraa, J.A. & Schranfnagel, R. A. Technology spurs growth of U.S. Coalbed Methane. Unconventional Gas 2. The Oil and Gas Journal, vol. 94, No. 1, Jan 1/96, p.56.
- Zebrowiz, M. & Thomas, B.D. Coalbed stimulations are optimized in Alabama Basin. The Oil and Gas Journal, vol. 87, No. 41, Oct. 9/89, p. 61.

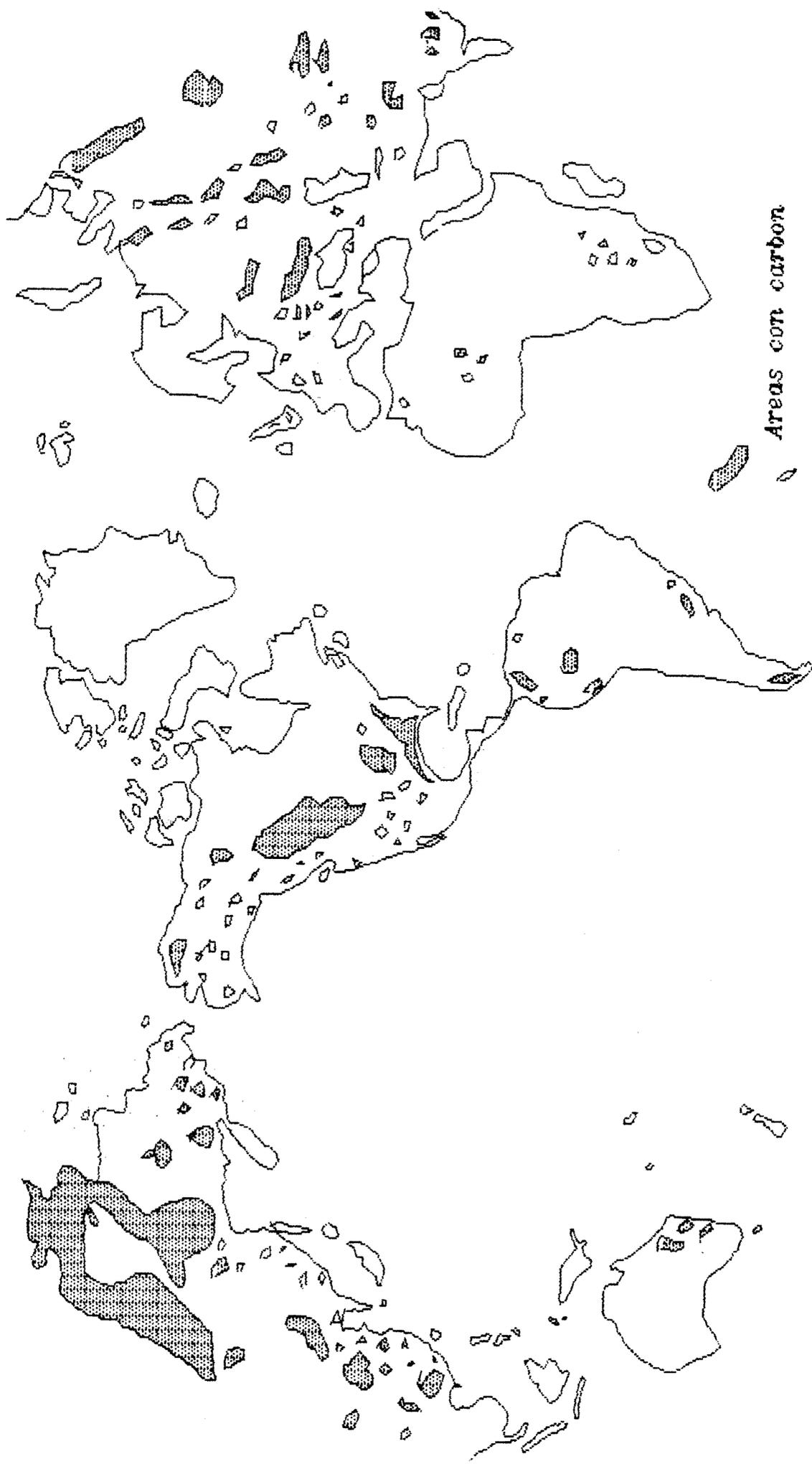


FIGURA 1

Áreas con carbón de extensión geológica conocida e inferida

De: J.D. McLennan et.al. A guide to determining coalbed gas content. GAS RESEARCH INSTITUTE 1995

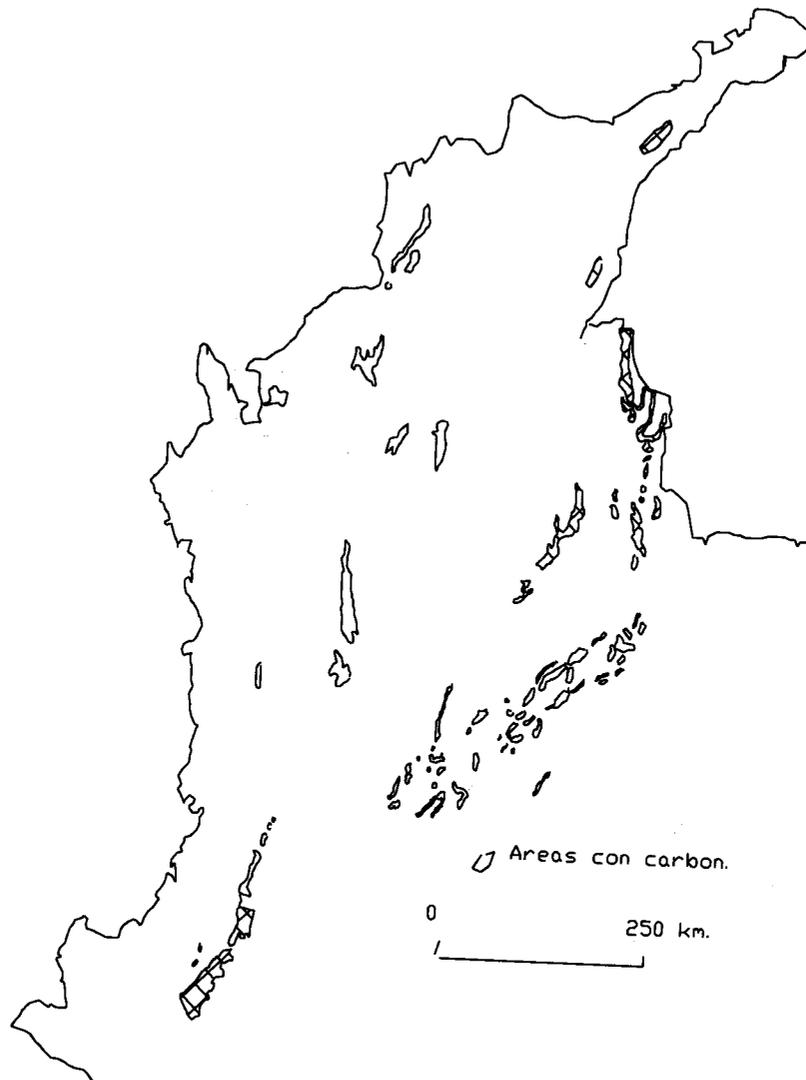


FIGURA 2
Cuencas Carboníferas Colombianas
De: INGEOMINAS, Colombia

ISOTERMA DE DESORCIÓN/ADSORCIÓN

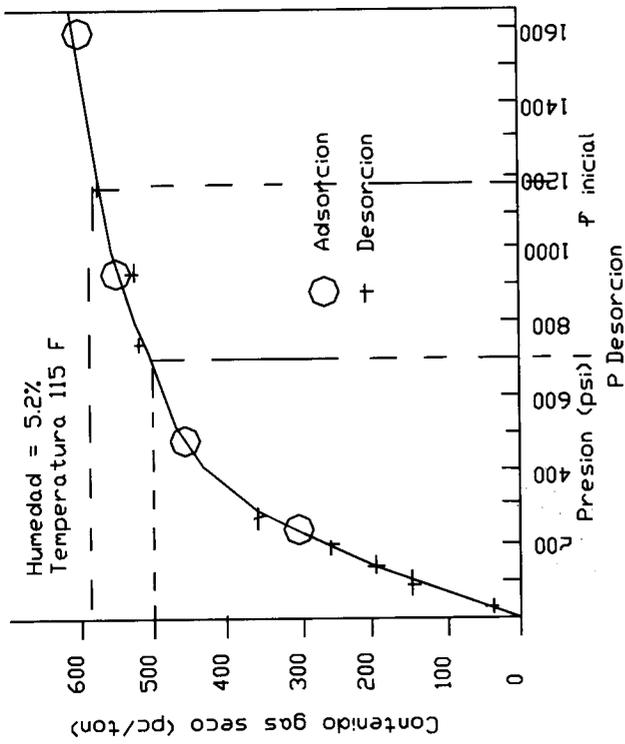


FIGURA 5

De: J.E. McElhiney et.al. Evaluation of Coalbed methane involves different techniques. The O & GJ. Vol. 87 N. 44

CARBONIFICACIÓN

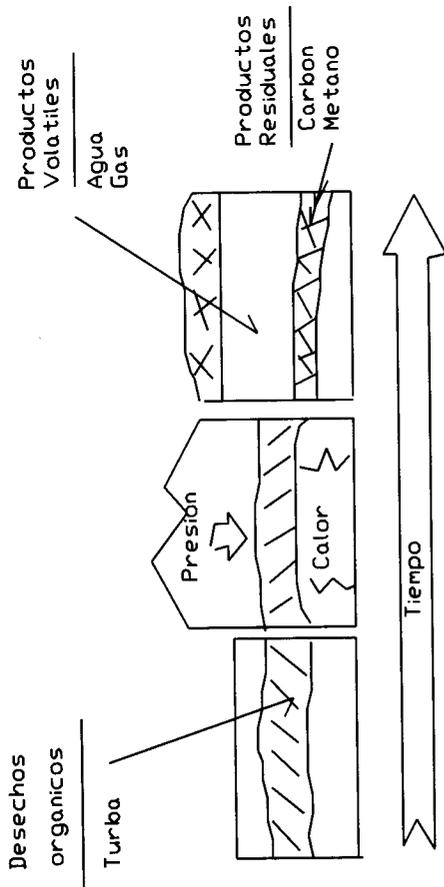


FIGURA 3

De: V.A. Kuuskraa et.al. Coalbed methane sparks a new energy industry. The O & GJ vol. 87 N. 41

ESTADOS DE PRODUCCIÓN DE UN POZO

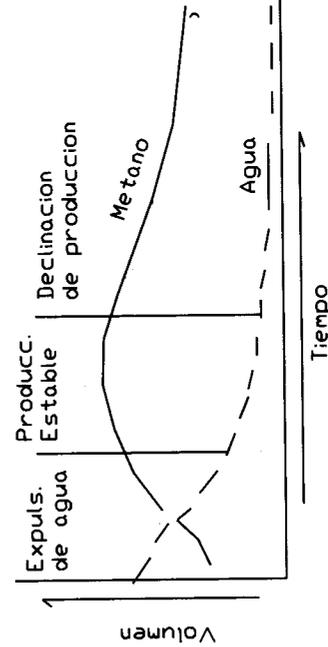
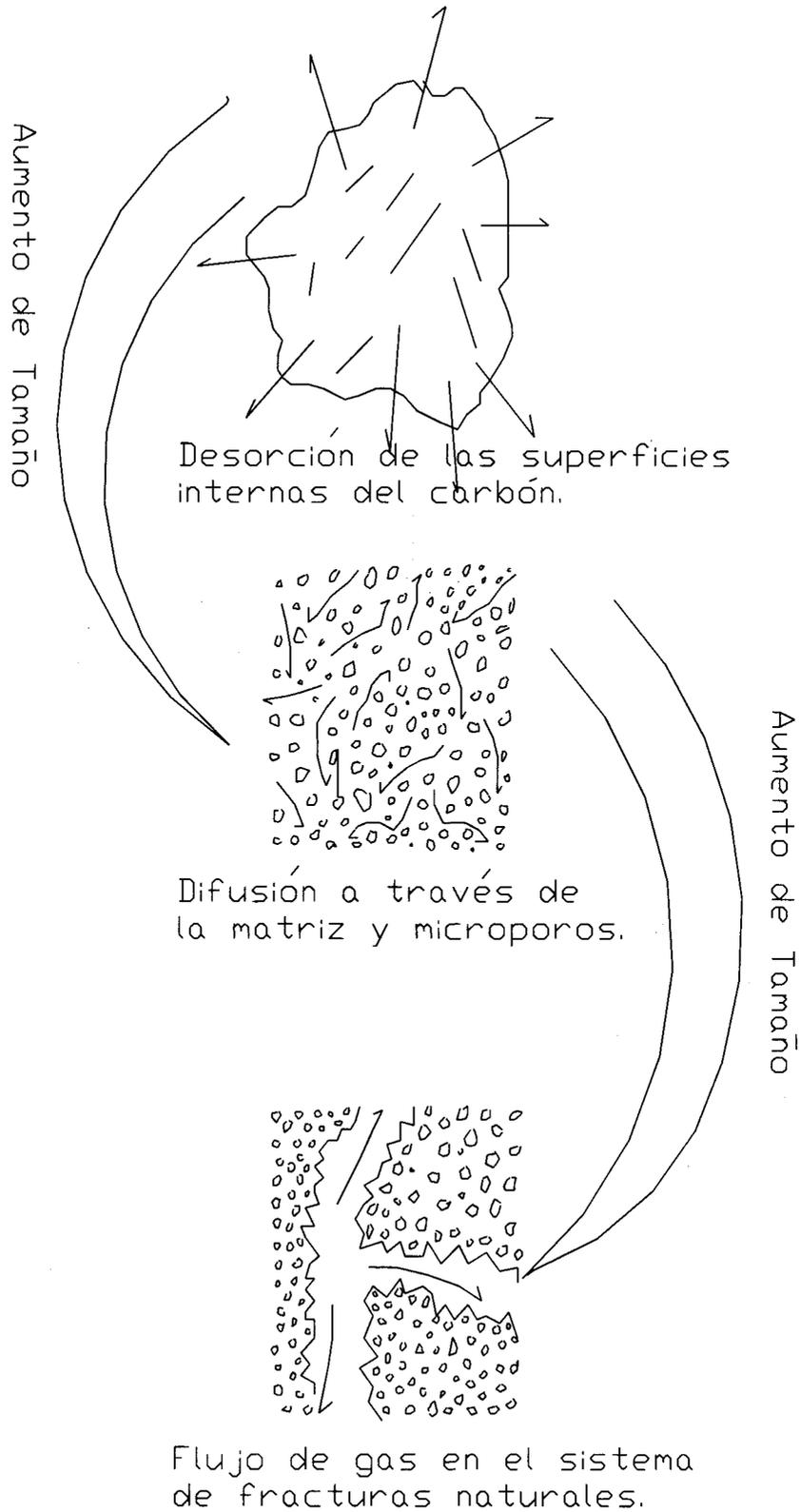


FIGURA 6

De: V.A. Kuuskraa et.al. Coalbed methane sparks a new energy industry. The O & GJ vol. 87 N. 41

FIGURA 4
Transporte del Metano



De: V.A. Kuuskraa et.al. Coalbed methane sparks a new energy industry.
The O & GJ vol. 87 N. 41



FIGURA 7

Cuencas Carboníferas Mayores de los EE.UU.

De: J.D. McLennon et.al. A guide to determining Coalbed gas content. 1995.

GAS RESEARCH INSTITUTE