

HIDRATOS DE GAS

(Primera Parte)

*Eduardo González Pacheco**

Introducción.

Los hidratos de gas son un grupo especial de sustancias químicas cristalinas que ocurren naturalmente, de agua y gases de poco peso molecular, llamados compuestos de inclusión, que tienen una estructura clathrática o de jaula y que incluyen moléculas de gas metano. La molécula huésped en la estructura clathrática es agua, en forma de hielo y la inclusión son el metano y otros gases. Son sustancias sólidas que se asemejan al hielo, sin embargo, se pueden formar a temperaturas sobre el punto de congelación del agua. Generalmente todos los gases (exceptuando el hidrógeno, helio y neón) forman hidratos, sin embargo, los más conocidos y abundantes en la naturaleza son los hidratos de metano. Hidratos de cloro fueron descubiertos en 1812 por Sir Humphrey Davis, mientras trataba de licuar cloro en presencia de agua.⁷ Hay dos formas cristalográficas de hidratos de gas que se distinguen según el tamaño de los huecos en la estructura clathrática. Una de estas estructuras de hidratos, designada I, contiene 46 s de agua por celda y un máximo de 8 moléculas de metano. La otra, designada II, contiene 136 moléculas de agua por celda y hasta 8 moléculas de metano. Se pueden formar hasta temperaturas sobre 0° C en determinadas condiciones de presión del gas. En la estructura I de hidratos de metano, completamente saturado, por cada molécula de metano existen 5.75 moléculas de agua. Con esta estructura en teoría, si se considera un factor de expansión apropiado de los hidratos, 1 m³ de hidratos de metano, en condiciones del depósito, puede contener hasta 164 m³ de gas metano en condiciones estándar de presión y temperatura a nivel del mar.^{2 1} (figuras 2 y 3). Por esto los hidratos de gas en un reservorio situado a más de 0.5 Kms. Bajo la superficie marina, contienen más metano por unidad de volumen que el contenido como gas libre en el mismo espacio. Este hecho explica el enorme interés en los hidratos de gas como potencial de futura fuente de recursos energéticos, cuya desestabilización se asocia a riesgos geológicos submarinos en el margen continental y puede constituir un factor importante en los cambios climáticos globales.²¹

Los hidratos comenzaron a ser un problema en la industria del petróleo en la década de 1930 cuando fueron observados que se formaban en los gasoductos y líneas de gas natural bloqueando el flujo libre del gas.

Distribución de los hidratos de gas en el mundo.

Los hidratos de gas existen en el mundo en numerosos ambientes, desde el Ártico ala Antártica. (figura 1) En tierra en las regiones con "permafrost" (donde la temperatura bajo el punto de congelación existe permanentemente) de Alaska, Norte de Canadá y Siberia y se encuentran ampliamente distribuidos en el margen continental externo, en sedimentos del fondo (figura 5) y subsuelo marino del talud y elevación continental, estabilizados in situ.

En este último ambiente se forman por las condiciones de alta presión hidrostática (50 a 100 atmósferas), bajas temperaturas del fondo y una adecuada concentración de gas (figuras 1, 4, 6, y 7).

La presión en el mar se incrementa con la profundidad en aproximadamente 1 atmósfera por cada 10 mts. de columna de agua. Así a la profundidad de 500 mts. la presión de agua alcanzará 50 atmósferas, aproximadamente y la temperatura usualmente no exceder de 2 a 3° C. (figura 7).⁷

Los hidratos de metano son los más comunes, pero pueden incluir etano y otros gases. Investigadores de metano en los hidratos de gas en el golfo de México costafuera del sudoeste de Estados Unidos y norte de California, mar Negro, y del margen continental de Chile, costafuera de la península de Taitao, han concluido que el metano es principalmente un gas biogénico de origen microbiano que tiene un componente de gas de origen termogénico.^{4,6, 8, 15, 17, 21}

Es posible que el volumen de gas en los reservorios mundiales de hidratos de gas exceda el volumen de las reservas convencionales conocidas de gas.³ Sin embargo, existe un gran vacío en los estudios del potencial de producción o de factibilidad económica de la extracción de metano de los hidratos de gas.

Formación de los hidratos de gas.

En la naturaleza los hidratos de gas se pueden formar en los sedimentos de los fondos marinos y en tierra en las zonas de "permafrost" de las regiones Árticas del hemisferio norte.

La ocurrencia de hidratos de gas en los sedimentos de los fondos marinos está controlada por la temperatura, presión, composición de la mezcla de metano y de otros gases y la impureza iónica de los contenidos en los espacios porales de las rocas sedimentarias del fondo marino, como se indica en la figura 7.

El metano, generado por degradación biológica de la materia orgánica y/o por generación térmica, que es posteriormente transportado como gas disuelto en el agua del espacio poral de los sedimentos o como flujo de gas libre y de difusión molecular asciende de los estratos generadores hasta alcanzar las condiciones favorables de presión y temperatura (zona de estabilidad de los hidratos), en un ambiente anóxico saturado de gases de metano y otros gases, iniciándose la formación de hidratos de gas en los espacios de poros y fracturas de los reservorios, en presencia de moléculas de agua. Estos estratos porosos son cubiertos por nuevas capas de sedimentos que contienen materia orgánica, continuándose el ciclo de generación de metano y formación de hidratos de gas.

En las regiones del Ártico, las zonas de permafrost constituyen un buen sello para formar trampas acumuladoras de gas. De esta forma el gas, principalmente metano y otros hidrocarburos livianos que ascienden lentamente desde capas profundas de la columna de rocas sedimentarias se acumula bajo la zona de permafrost, como se muestra en la (figura 9). Debido a las bajas temperaturas cercanas a la superficie, comienza la formación de los cristales de hidratos, en los espacios porales. El espesor de las zonas de hidratos va a depender de las gradientes geotérmicas y da la existencia y espesor de reservorios acumuladores adecuados.

Hidratos de gas costafuera en los fondos marinos.

Antes de 1970 no se conocía la existencia de hidratos de metano en los fondos marinos profundos. Las primeras indicaciones de la existencia de hidratos de metano en los fondos marinos profundos se obtuvieron de los estudios sismológicos realizados en la década de 1970, por los geofísicos George Bryan y John Ewing del "Lamont-Doherty Earth Observatory" de la Universidad de Columbia, en el área de "Blake Ridge", costafuera de la costa de Carolina.^{11, 22}

La presencia de hidratos de gas costafuera en los márgenes continentales ha sido inferida por la existencia de reflectores anormales que coinciden con la fase limitante de la base de la zona de estabilidad de los hidratos de gas. Este reflector es conocido como el reflector simulador de fondo (B.S.R),^{10, 11, 24} (figura 8) que ha sido observado en muchas líneas sísmicas de los márgenes continentales del mundo, a profundidades bajo el fondo marino entre 100 y 1.100 metros. Las reflexiones BSR generalmente delinear el techo de una zona de gas libre que puede existir bajo la base de la zona de estabilidad de los hidratos de gas. (figura 9).

En la detección y evaluación de los intervalos que contienen hidratos de gas, los datos de líneas sísmicas se complementan con la información geofísica de perfiles de pozo. Los perfiles de pozo

para estudios de hidratos de gas incluyen: caliper, gamma ray, bulk density, neutron porosity, compresional velocity, resistivity, compresional velocity- vp, shear velocity-vs, Vp/Vs ratio y mud gas como se indica en las figuras 14 y 15.

En el margen continental de Chile se ha observado este reflector BSR en las líneas sísmicas registradas por el RV Conrad del Lamont Doherty Earth Laboratory (líneas sísmicas 745 a 762), como parte del estudio sísmico en el área costafuera de la península de Taitao, previo a las perforaciones efectuadas por el Joides Resolution, en las ubicaciones de perforación del Ocean Drilling Program, crucero (leg) 141, efectuado en diciembre de 1991 - enero 1992. (figuras 10 y 13).¹⁷

Además se infiere la presencia de hidratos de gas por la existencia de BSR en las líneas sísmicas F9. 28 (fig. 11) y E4-90 (fig. 12) registradas en los años 1981 y 1979, respectivamente, por ENAP en la plataforma y talud continental de las cuencas de Madre de Dios y Arauco y en las líneas sísmicas ENAP- 1, ENAP-2 y ENAP-6 registradas costafuera, en 1988 por el barco oceanográfico R/V *Conrad*, del "Lamont-Doherty Earth Laboratory" de la Universidad de Columbia para la Empresa Nacional del Petróleo, en las cuencas de Chanco, Itata y Valdivia.^{4, 5, 23}

Hidratos de gas han sido recuperados en muestras y testigos colectados en sedimentos del fondo y del subsuelo marino en los márgenes continentales, al S.O. de Acapulco, costafuera de México; costafuera de Oregon, costafuera de California, en el golfo de México en el área de Blake Ridge, costafuera de Carolina y costafuera de Alaska, en Estados Unidos; en la fosa de Centroamérica; costafuera de Perú; en el Mar de Okhotsk; en el mar Negro; en el mar Caspio; en el mar Mediterráneo; costafuera de Japón, costafuera de India y costafuera de la Antártica.^{3, 21, 22}

En Chile se ha inferido la presencia de hidratos de gas en testigos colectados en sedimentos bajo el fondo marino, por el barco de investigación *Joides Resolution*, en el margen continental de Chile, costafuera de la península de Taitao durante el programa de investigación del crucero (leg) 141.¹⁷

Aún considerando estas investigaciones, la extensión areal y vertical de las acumulaciones de hidratos de gas están basadas principalmente en las condiciones teóricas de estabilidad de los hidratos, en lugar de medidas directas de la presencia y concentración de depósitos de hidratos.³

Hidratos de gas en tierra en zonas de "permafrost".

En tierra se ha estudiado la presencia de hidratos de gas en Siberia Occidental y otras áreas de "permafrost" en el norte de R u s i a .³ Evidencia directa de hidratos de gas se han observado en el "North Slope" de Alaska y norte de Canadá en testigos obtenidos en los pozos perforados con motivo de las exploraciones de petróleo. Evidencias indirectas vienen de perfiles de pozos que sugieren la presencia de numerosas capas de hidratos de gas en los yacimientos de petróleo de "Prudhoe Bay" y "Kuparuk River", en Alaska y pozos perforados en el delta del Mackenzie. (figuras 14 y 15) e islas del Ártico en Canadá.²³

La investigación de hidratos de gas en Alaska y Norte de Canadá en las regiones de permafrost indican que los hidratos existen en la subsuperficie a profundidades que fluctúan entre 130 y 2000 metros.

En Siberia occidental se cita el yacimiento gasífero Messoyakha, como un ejemplo de producción de hidratos de gas "in situ". Los datos de producción y la información geológica prueban la presencia de hidratos de gas en la parte superior de ese yacimiento de gas. La producción principal de dicho yacimiento proviene de un depósito de gas libre acumulado bajo el sello de hidratos de gas. (figura 9).³

Estimaciones de los recursos mundiales de metano en los hidratos de gas.

Las estimaciones de la cantidad de metano en los hidratos de gas son todavía especulativas e inciertas. Sin embargo se estima que los hidratos de gas se distribuyen en todo el mundo y el conocimiento geológico de los depósitos de hidratos de gas es incompleto.

En 1981 el "Petroleum Gas Committee" resumió esas estimaciones las cuales muestran un rango que fluctúa entre $1.4 \times 10^{13} \text{ m}^3$ de gas metano, para las regiones Árticas de permafrost y $7.6 \times 10^{13} \text{ m}^3$ de gas metano en los sedimentos no oceánicos.

Las estimaciones mundiales actuales de la cantidad de gas metano en los depósitos de hidratos de gas, in situ, incluyendo las zonas con permafrost en tierra y en los sedimentos de los fondos oceánicos, fluctúan entre $2.1 \times 10^{16} \text{ m}^3$ de gas metano (según Mac Donald, 1990) y $4 \times 10^{16} \text{ m}^3$ de gas metano (según Kvenvolden & Claypool, 1988). El mayor volumen de hidratos de gas se encontraría en los sedimentos de los fondos marinos.

Si estas estimaciones son válidas la cantidad de gas metano contenida en los hidratos de gas es casi dos órdenes de magnitud mayor que el total de metano comercial mundial, remanente recuperable, evaluado en $2.5 \times 10^{14} \text{ m}^3$ y alrededor de dos veces el carbono equivalente a todos los depósitos conocidos de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural).²¹ (figura 1).

Estabilidad de los hidratos de gas.

Los hidratos de gas no solamente existen en las condiciones de aguas frías y profundas de los fondos marinos. En el golfo de México se ha observado la presencia de hidratos desde aguas poco profundas, con temperaturas de hasta 20° C , hasta más de 2000 metros de profundidad. La composición química de los gases de los hidratos juega un papel importante en la estabilidad de éstos. Por ejemplo un porcentaje de etano permite la existencia de hidratos a más baja presión y mayor temperatura que los hidratos que contienen solamente metano. Con 10% de etano en la mezcla de gas, los hidratos son estables a 6 atmósferas de presión (aproximadamente 60 metros de columna de agua) y 6° C de temperatura, mientras que los hidratos de metano puro son estables solamente a presiones sobre 40 atmósferas (aproximadamente 400 metros de columna de agua).⁷

La profundidad a la cual se encuentra la base de los hidratos de gas aumenta al incrementarse la profundidad del agua. Para estimar la profundidad de la base de los hidratos de gas, debe conocerse el régimen de estos hidratos para la formación de los hidratos en función de la presión y temperatura. De esta manera estimando la presión en un área determinada y la gradiente de temperatura es posible estudiar el régimen de estabilidad de los hidratos de gas en función de la profundidad, como se indica en la figura 7.⁷

El límite inferior de la ocurrencia de hidratos de metano está determinado por la gradiente geotérmica; el máximo del límite inferior, de acuerdo con la figura 7, estaría alrededor de los 2000 metros bajo la superficie sólida. Sin embargo, el límite inferior es mucho menor dependiendo de condiciones locales. De esta forma los hidratos están restringidos a la geosfera poco profunda.

Los hidratos de gas y el peligro en las perforaciones costa fuera y navegación.

La disociación de los hidratos de gas y la pérdida de resistencia mecánica de los sedimentos ayuda a quebrar la estabilidad del bloque sedimentario y produce deslizamientos en el talud como se ha observado en los márgenes continentales de Estados Unidos y Noruega.⁸

La disociación de los hidratos de gas puede ser lenta o explosiva (figura 16), esto va a depender del contenido y concentración del gas en los hidratos y cuan rápidos sean los cambios de las condiciones de presión y temperatura. En los taludes de algunos márgenes continentales como en la costa del Atlántico de Estados Unidos se ha observado deslizamientos en masa, hacia las profundidades oceánicas (figura 17). Estos fenómenos cambian la presión sobre las capas de hidratos y permiten el escape de los gases disociados de los hidratos. En costafuera de Carolina

en Estados Unidos han ocurrido extensos deslizamientos en el talud continental, de hasta 40 millas de ancho.^{1, 7} En este sector, que forma parte del Triángulo de las Bermudas, se ha informado de aguas agitadas que asemejan domos de agua en ebullición. Estos domos de agua en agitación se han atribuido a escapes de grandes volúmenes incontrolados de gas metano de los sedimentos de los fondos marinos (figura 18). Es posible que en el área costafuera de Papudo, en el margen continental de Chile, donde se ha observado borbollones en el mar, se deba a escape de gas metano de hidratos de gas, formados en el talud.*

A pesar de la apariencia de roca sólida, los hidratos son inestables y cualquier cambio de presión y temperatura o estructura puede producir la disociación de los hidratos y escape brusco del metano. Una disociación explosiva de hidratos de gas se ha inferido en el mar de Barents, por la presencia de numerosos cráteres en el fondo marino.⁷ (figura 1).

Una de las zonas de mayor peligro para la perforación petrolera costafuera, por la posibilidad de disociación explosiva de los hidratos de gas, es el área costa-fuera en la parte sur de la cuenca del mar Caspio, como se muestra en la figura 16.¹

Las evidencias de señales de inestabilidad en los taludes en el área del Triángulo de las Bermudas incluyen cráteres que asemejan volcanes de barro, de hasta 1000 pies de amplitud y 100 pies de profundidad y excavaciones profundas en el talud del Blake Ridge, cuya dotación corresponde al término de la última glaciación.^{7, 8}

* Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile. Miembro Vitalicio del Colegio de Ingenieros de Chile.

Figura 1. Distribución de depósitos de hidratos de gas que contienen metano y otros gases en el mundo, bajo el fondo marino y en las regiones de permafrost en tierra. Los hidratos de gas contienen más carbón orgánico que las reservas globales de combustibles fósiles convencionales (carbón, petróleo y gas natural) y otras fuentes. Reproducida de 22 Op. cit. Figura 2. Estructura de hidrato de gas, mostrando la molécula de metano rodeada por las moléculas de agua. Reproducida de 21 Op. cit.

Figura 3. Un m³ de hidratos de gas proporciona 164 m³ de gas y 0.8 m³ de agua a presión y temperatura estándar. Reproducida de 21 Op. cit.

Figura 4. Tipos de depósitos de hidratos de gas. Reproducida de 3 Op. cit.

Figura 5. Montículo de hidratos de gas, semejantes a un depósito de hielo, en el fango del fondo marino, rodeado de gusanos tubiformes, encontrado costafuera de Oregon (EE.UU.) a una profundidad de 785 metros bajo la superficie del mar. El depósito de hidratos de gas es frágil y deja escapar burbujas de metano. Reproducida de 22 Op. cit.

Figura 6. Diagrama de fase de hidratos, permafrost y marinos. Reproducida de 3 Op. Cit

Figura 7. Diagrama de fases de hidratos, mostrando el límite entre el metano libre y los hidratos de metano en un sistema de agua y metano. Al agregarse cloruro de sodio, la curva se desvía hacia la izquierda. Al agregarse anhídrido carbónico, ácido sulfídrico, etano y propano al metano, se desvía el límite a la derecha, incrementando el área de estabilidad de los hidratos. Reproducida de 7 Op. cit.

Figura 8. Sección sísmica en el flanco Este de Blake Plateau, mostrando la reflexión simuladora de fondo marino (BSR), de la base de la capa e hidratos de gas. Reproducida de 18 Op. cit.

Figura 9. Formación de hidratos de gas en regiones de "permafrost". Reproducida de 1 Op. cit.

Figura 10. Sección sísmica de línea 745 (ubicación indicada en figura 13), mostrando la existencia de la reflexión BSR de la base de la capa de hidratos de gas, costafuera de la península de Taitao. Reproducida de 17 Op. cit.

Figura 11. Sección sísmica de la línea F9-28, cuenca de Madre de Dios. Posible BSR de la base de una capa de hidratos de gas.

Figura 12. Sección sísmica de línea E4-90, cuenca de Arauco. Posible BSR de la base de una capa de hidratos de gas.

Figura 13. Plano batimétrico del margen de Chile en el área de península de Taitao. Se indica ubicación de la línea sísmica 745. Reproducida de 17 Op. cit.

Figura 14. Registro generalizado de pozos para el JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38. Reproducida de 19 Op. cit.

Figura 15. Datos de registros de pozos perforados tomados con el Mallik 2L-38 a través de la sección de hidratos de gas.

Reproducida de 19 Op. cit.

Figura 16. Disociación explosiva de hidratos de gas, en diapiros de arcilla de la cuenca del mar Caspio. Reproducida de 1 Op. cit.

Figura 17. Disociación de hidratos de gas en la Plataforma Continental de la costa del Atlántico de Estados Unidos, costafuera de Carolina. Reproducida de 1 Op. cit.

BIBLIOGRAFÍA

1 Bagirov, Elchin and Lerche, Ian. Hydrates represent gas source, drilling hazard. *Oil and Gas Journal*, Dec. 1997.

2 Collett, T.S., *Natural gas hydrate of the Prudhoe Bay and Kuparuk River area. North Slope, Alaska. A.A.P.G. Bull Vol 77 N° 5*, 1993.

3 Collett, T.S. and Kuuskraa, V.A. Hydrates contain vast store of world gas resources. *Oil and Gas Journal*, May 11, 1998.

4 ENAP Líneas sísmicas costafuera_ F9-28, Cuenca Madre de Dios, (Prakla.1981) y E4-90, Cuenca de Arauco. (Western Beacon, 1979).

5 ENAP Líneas sísmicas costafuera ENAP-1 y ENAP-6 registradas por el R.V. Conrad, enero de 1988.

6 Galimov, F.M. and Kvenvolden, K. 1983, Concentrations and carbon isotopic composition of CH₄ and C₂ in gas from sediments of the Blake Outer Ridge, Deep Sea Drilling Project Leg 76, in Sheridans R.E. et al. Initial reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 76, Washington, D.C., U.S. Printing Office.

- 7 Gruy, H.J., H.J. Gruy and Associate Inc., *National Gas Hydrates and The Mystery of the Bermuda Triangle. Hart's Petroleum Engineer International*. March 1998.
- 8 Haq, B.U., *Gas Hydrates: Greenhouse Nightmare?, Energy Panacea or Pipe Dream? GSA Today (Geological Society of America) Vol. 8 N° 11, Nov. 1998.*
- 9 Kvenvolden, K.A., *Gas hydrates as a potential energy resource - A review of their methane content, in Howell, D.G. (ed). The future of energy gases. U.S.G.S. Professional Paper 1570, 1993.*
- 10 MacLeod, M. K., *Gas Hydrates in Ocean Bottom Sediments. A.A.P.G. Bulletin V.66, N° 12, Dec. 1982.*
- 11 Markl, R. et al., 1970, *Structure of the Blake - Bahamas outer Ridge. Journal of Geophysical Research, V.75.*
- 12 McIver, R. D., *Hydrocarbon gas (methane) in canned Deep Sea Drilling Project core samples, in J.R. Kaplan ed., Natural gases in marine sediments New York Plenum Press, 1974.*
- 13 *Offshore Next 50 years. May 1997.*
- 14 Okuda Yoshihisa *Introduction to exploration research on gas hydrates in Japan Bulletin of the Geological Survey of Japan. Vol. 49 (10), 1998.*
- 15 Paull, C.K. et al., 1995, *Methane rich plumes on the Carolina continental rise: Associations with gas hydrates; Geology V. 23.*
- 16 *Petroleum Economist. Methane hydrates, approaching commerciality Nov., 1998.*
- 17 *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Volume 141, 12 Nov. 1991-12 January 1992. National Science Foundation and Joint Oceanographic Institutions, Inc. 1992.*
- 18 Shipley, T.H. *Seismic Evidence for the widespread occurrence of possible Gas Hydrate Horizons on Continental Slopes and Rises. A.A.P.G. Bulletin, V. 63, N° 12 (December, 1979).*
- 19 Krasov, Jan *Methane hydrates impetus for research and exploration Offshore, March, 1999.*
- 20 Shipley, T.H. & Dedyk, Borys. *Occurrence of Methane Hydrates offshore Southern Mexico. Deep Sea Drilling Project, Volume 1, XVI Washington, 1981.*
- 21 Henriot, J.P. & Mienert J., editors *Gas Hydrates. Relevance to world margin stability and climatic change. Geological Society, (Publication N° 137, 1998).*
- 22 Suess E., et al. *Fammable Ice. Scientific American. November 1999.*
- 23 Díaz Naveas, Juan L. *Sediment Subduction and Accretion at the Chilean Convergent Margin Between 35° and 40° S. Christian - Albrechts - Universität, Kiel 1999.*
- 24 Miller, John; Lee, Myung; von Huene, R. 1991 *Analysis of a Seismic Reflection from the Base of a Gas Hydrate Zone, Offshore Peru. The A.A.P.G. Bulletin V75 N°S (May 1991).*