

Resumen

El volumen de metano atrapado en los hidratos de gas representa una posible fuente de recursos energéticos con gran potencial productor. Los datos sísmicos de reflexión son la principal evidencia indirecta de las acumulaciones de hidratos de gas.

En este trabajo presento un modelo -desarrollado por Ian Lerche y Sheila Noeth- para inferir la concentración de metano, dentro de una acumulación de hidratos de gas, a partir de imágenes sísmicas. Para su aplicación se necesita una sección o imágenes sísmicas en profundidad, donde un reflector simulador de fondo y otro, atribuible a una superficie superior de acumulación de hidratos, hayan sido identificados. Como herramientas utilicé una computadora de escritorio, un programa para realizar simulaciones de Monte Carlo y graficar histogramas y una rutina propia elaborada en MATLAB. Tres ecuaciones sencillas constituyen la estructura del modelo. Éstas relacionan la presión litostática e hidrostática y las temperaturas de formación de hidratos a profundidades de los reflectores de interés con las concentraciones de metano y un segundo gas previamente escogido. La primera ecuación permite estimar las temperaturas en función de la profundidad dado un valor de gradiente geotérmico. Definidos los valores de temperatura y la presión *in situ*, una presión crítica de la mezcla para la formación de hidratos a 0° C, se obtiene mediante una ecuación de equilibrio termodinámico. La tercera relación expresa la presión de formación de hidratos de la mezcla como la media armónica de las presiones de formación para ambos gases puros. A partir de ésta, la relación de concentración de ambos gases se obtiene dados los valores de presión crítica. El procedimiento se repite para un número definido de ensayos de Monte Carlo y los resultados se presentan en histogramas de probabilidad de concentración de metano.

A partir de la concentración de metano, generé histogramas de densidad energética en términos del volumen equivalente de gas natural licuado. Finalmente, apliqué el modelo a una imagen sísmica del Golfo de México. Los resultados indican que de existir, los hidratos de gas presentarían concentraciones medias de metano de más del 90%.

Abstract

The methane volume trapped in gas hydrates represents a possible energy source of great production potential. The reflection seismology data are the main indirect evidence of gas hydrates accumulations.

In this text, I present a model –developed by Ian Lerche and Sheila Noeth- aimed at inferring the methane concentration within a gas hydrate accumulation, from seismic data. The model requires images or a seismic section in depth, where a *bottom-simulating reflector* and a second one, attributable to the upper surface of a hydrate accumulation, may be identifiable. As tools, I only used a desktop computer, software for Monte Carlo simulation and plotting and a self-made routine developed in MATLAB.

Three simple equations feature the framework of the model. They link pressures and temperatures at depths of target reflections with the concentration ratio of methane and a previously chosen second gas. The first equation allows “depth-wise” temperature estimation given a geothermal gradient value. Once pressure and temperature values are defined, I obtained hydrate formation pressure at 0°C via a specific thermodynamic equilibrium equation. Third equation expresses hydrate formation pressure of the gas mix as the harmonic mean of the pure gases formation pressures alone. Provided the formation pressure values, the concentration ratio of the two gases were obtained from this expression. The whole procedure was repeated for a given number of Monte Carlo trials and concentration probability histograms were produced.

Following methane concentration estimations, I produced energy density histograms in terms of the natural liquefied gas equivalent volume. Finally, I applied the model to a seismic image acquired in the

Gulf of Mexico. Results indicated that, if gas hydrates exist, the methane concentration would be up to 90%.

Introducción

Los clatratos, son soluciones sólidas con estabilidad dentro de una región determinada de presión y temperatura. Están constituidos por ensambles cristalinos, donde un conjunto de moléculas encierran a otras especies químicas formando celdas (Englezos, 1993).

Los clatratos, donde las celdas se construyen con moléculas de agua, son llamados “clatratos-hidratos de gas” (Englezos, 1993). Los vértices de las celdas poliédricas son formados por moléculas de agua, interconectadas entre sí por puentes de hidrógeno.

En el ambiente geofísico los clatratos-hidratos de gas usualmente son denominados (de manera imprecisa) como hidratos de metano, hidratos de gas o simplemente hidratos.

A lo largo del presente trabajo, utilizaré el término “*hidratos de gas*” o simplemente “*hidratos*” para referirme a los clatratos-hidratos de cualquier gas. Al referirme a las moléculas huésped alojadas en las celdas, utilizaré indistintamente el término “*huésped*” o “*soluto formador*”. El término “*hidrato de metano*”, se empleará cuando el huésped de interés, o el predominante, sea el metano. Toda otra sustancia que se presente disuelta en el agua pero que no sea de interés para la formación de hidratos de metano será llamada “*soluto*”. El agua, como sujeto en la

formación de hidratos, será denominada “*agua formadora*” o “*solvente*” según se requiera.

Los hidratos de gas son minerales, poco estables termodinámicamente, que ocurren en ambientes terrestres de alta presión y baja temperatura (Makogon et al., 2007). Las especies químicas que contienen como huéspedes dependen fundamentalmente de las dimensiones de la molécula y de la celda que la encierra (Uchida et al., 1995). Entre los huéspedes existen compuestos de interés energético como hidrocarburos ligeros (Englezos, 1993). Los que ocurren típicamente en acumulaciones naturales son el metano, etano, propano e isobutano. De entre todos los huéspedes presentes en los hidratos, el predominante es el metano (Tréhu et al., 2002).

La cantidad de hidrocarburos que contienen los hidratos de gas es extraordinaria (Mahajan et al., 2007; Makogon et al., 2007). Cada volumen de hidratos, contiene aproximadamente 164 volúmenes de gas y 0.8 volúmenes de agua (Makogon et al., 2007).

Los hidratos de gas abundan a lo largo de las regiones polares, lagos, mares y océanos del mundo. Se acumulan en distintas formas desde láminas y capas, betas rellenas de fracturas, o como agregados cristalinos en el espacio poroso entre partículas.

Las cantidades estimadas de metano contenido en los hidratos de gas, a nivel mundial, varían significativamente de autor a autor. Algunos valores propuestos van desde los $20 \times 10^{15} \text{ m}^3$ hasta 10^{16} m^3 de metano (Englezos, 1993; Collet et al., 2000).

Actualmente se estima que el contenido de carbono orgánico secuestrado en los hidratos de metano equipara o incluso duplica el total de la cantidad acumulada en las reservas existentes y probables de carbón mineral, petróleo y gas. Según Mahajan et al. (2007), incluso podría equiparar el total compuesto, de todas las acumulaciones naturales de carbono orgánico, sin incluir el kerógeno y los bitúmenes.

Además de su potencial energético, los hidratos de gas representan una fuente de riesgo para el medio ambiente, así como las operaciones de perforación, extracción y manejo de petróleo (Collett et al., 2000). Esto se debe a que son termodinámicamente inestables y se acumulan en ambientes de alta presión y baja temperatura.

Por todas las razones anteriores, los hidratos de gas son recursos naturales de gran interés económico.

La producción de gas a partir de los hidratos es ya, una realidad en algunos de estos sitios. Hacia 1968 un grupo de geólogos rusos descubrió, en regiones transárticas, la presencia de depósitos de hidratos en el campo de gas llamado Messoyakha (Makogon et al., 2007). Se estima que este yacimiento contenía $79 \times 10^6 \text{ m}^3$ de gas natural antes de empezar la producción. De acuerdo a Collet et al. (2000), un tercio de este volumen provenía probablemente de depósitos de hidratos de gas.

Las herramientas para explorar, caracterizar y cuantificar las acumulaciones naturales de hidratos de gas, son tan diversas como la recuperación de núcleos de pozo, los registros de pozo, métodos electromagnéticos superficiales, acústicos y la exploración

sísmica de reflexión en dos y tres dimensiones, entre otras (Lu y McMechan, 2002; Carcione y Gei, 2004).

Las técnicas de exploración son complementadas por un vasto repertorio de técnicas experimentales y teóricas que permiten estimar o determinar propiedades importantes de los hidratos como la saturación, la distribución y los hábitos de acumulación en distintos sedimentos y medios, así como la concentración y composición de los gases contenidos y por ende, la cantidad de metano presente (Bhatnagar et al., 2007).

Para cuantificar acumulaciones de hidratos de gas existen tres parámetros fundamentales a determinar: la saturación, la continuidad y el espesor de la acumulación (Hardage, 2007).

Sin embargo, las acumulaciones naturales de hidratos de gas a menudo son poco accesibles para su exploración y caracterización extensiva e intensiva. Existe un repertorio de técnicas, cuya aplicación y uso, es limitada por el costo y complicaciones logísticas. Debido a la gran abundancia de acumulaciones de hidratos en el planeta, algunos métodos incluso se vuelven impracticables para campañas de exploración de gran cobertura. Por lo tanto, los métodos que requieran la menor cantidad de herramientas y datos para lograr su cometido serán a menudo los más socorridos.

La exploración sísmica es una herramienta importante y ampliamente difundida en los campos de la exploración, cuantificación y caracterización de los hidratos de gas, por su capacidad para cubrir grandes áreas con una inversión relativamente pequeña – comparada con otros métodos. Permite estimar los espesores de las acumulaciones

cuando existe un contraste de impedancias acústicas apreciable entre la acumulación de hidratos y el sedimento circundante.

Además de ser empleada para delimitar y cuantificar la acumulación de hidratos, la exploración sísmica puede ser empleada con otros propósitos.

El objetivo de esta tesis es presentar y ensayar un modelo numérico que permite estimar la concentración de metano y el potencial energético asociado, en acumulaciones marinas de hidratos de gas. Utiliza exclusivamente imágenes sísmicas como observaciones directas. A partir de éstas se determinan profundidades y las superficies y espesores de la acumulación. De acuerdo a la profundidad, se infieren las condiciones de presión y temperatura. Los valores inferidos de presión y temperatura son utilizados para generar histogramas de frecuencia de la concentración de metano a partir de una ecuación de estado. De manera adicional, calculé la densidad energética (Hardage, 2007) asociada a las concentraciones de metano calculada.