

## **SIMULACIÓN DE LA PRODUCCIÓN PROVENIENTE DE LAS ACUMULACIONES DE HIDRATOS DE GAS**

MARÍA LLAMEDO

PDVSA-Intevep. Gerencia Técnica de Esquemas de Explotación. Urbanización Santa Rosa.  
Sector El Tambor. Los Teques Edo. Miranda 1201 Venezuela  
e-mail: llamedom@pdvsa.com

Recibido: diciembre de 2008

Recibido en forma final revisado: octubre de 2009

### **RESUMEN**

Los hidratos de gas se vislumbran como el mayor potencial para suplir los requerimientos de gas natural en el siglo 21, asumiendo que la tecnología necesaria para explotar y comercializar la producción de este tipo de yacimientos de gas puede ser desarrollada. La disponibilidad de modelos matemáticos de simulación capaces de predecir el comportamiento de producción constituye una necesidad para su explotación. Durante dos décadas, más de 10 tipos de modelos predictivos han sido estudiados para modelar producción a partir de hidratos de gas. Los mecanismos estudiados principalmente han sido vía despresurización e inyección de vapor para disociar los hidratos de gas. El presente trabajo muestra los resultados del análisis y evaluación de un simulador numérico de yacimientos comercial para representar los mecanismos de producción de gas. En una primera etapa, se construyó un modelo unidimensional tratando de representar las condiciones experimentales reportadas en la literatura, cuyo mecanismo de producción es la despresurización isotérmica. Posteriormente, se construyó un modelo conceptual tridimensional que incluye el proceso de transferencia de masa y calor durante la disociación de los hidratos de gas mediante despresurización y/o estimulación térmica; demostrando ser capaz de modelar estos procesos.

*Palabras clave:* Hidratos, Producción de gas, Simulación, Despresurización, Estimulación térmica.

## **GAS PRODUCTION SIMULATION FROM GAS HYDRATE RESERVOIRS**

### **ABSTRACT**

Gas hydrates represent a potentially enormous source of natural gas, mainly methane in the 21st century, assuming the technology can be developed for commercial gas production from this kind of reservoir. To exploit this non-conventional gas reservoir suitable mathematical models to predict gas production are necessary. During the last two decades, more than ten models including analytical or numerical modeling have been used to represent the transformation of solid gas hydrates to gas and water. The different techniques studied for decomposing gas hydrates by modeling are mainly depressurization and thermal stimulation through steam injection into the gas hydrate reservoir. The present work shows the results obtained by the analysis and evaluation of the commercial numerical reservoir simulator used for gas production modeling of hydrate accumulations by two mechanisms; (a) depressurization, and (b) thermal stimulation. Firstly, an experimental one-dimensional model was built and analyzed, the model attempts to represent the experimental conditions referred in the literature, where the production mechanism is based on isothermal depressurization. The second part was to build a three-dimensional model; it represented a conceptual model to evaluate the tool in order to consider the process of mass and heat transference during gas hydrate dissociation either by depressurization and/or thermal injection. The results obtained showed that it is feasible to represent these two processes.

*Keywords:* Hydrates, Gas production, Simulation, Depressurization, Thermal stimulation.

### **INTRODUCCIÓN**

Los hidratos de gas han sido considerados como potencial

fuelle de energía para el siglo 21, debido a la inmensa cantidad de gas metano almacenada en forma de acumulaciones de hidratos de gas.

Algunos autores consideran que las acumulaciones de hidratos exceden las reservas acumuladas a nivel mundial de los yacimientos convencionales de petróleo y gas, así como otro tipo de acumulaciones de fuentes energéticas tales como carbón. La mayoría de los hidratos de gas se forman en sedimentos oceánicos a grandes profundidades o en tierra, a moderadas o someras profundidades en regiones del ártico. Existen evidencias, algunas están siendo evaluadas y analizadas con mayor énfasis, de la presencia de depósitos oceánicos de hidratos de metano en la parte del Océano Atlántico y Pacífico (Sawyer, 2000). Los hidratos de metano estables pueden ser encontrados a temperaturas y presiones presentes a profundidades desde 300 a 500 metros. Los hidratos también pueden ser estables a altas altitudes tales como en las zonas del ártico. Bajo las condiciones adecuadas de presión y regímenes de temperatura la migración termogénica o biogénica de metano puede formar puentes con las moléculas de agua para formar hidratos.

Los hidratos de metano son celdas de moléculas de agua que rodean y atrapan las moléculas de metano. Son sólidos cristalinos que se forman bajo presiones moderadas y a temperaturas bajas pero por debajo del punto de congelamiento del agua. Existen tres tipos morfológicos de cristales de hidratos; masivos, gelatinosos, o hilachas. En los últimos 30 años, se han realizado esfuerzos considerables en estudios para la producción comercial del gas natural a partir de los yacimientos de hidratos de gas. Hasta la actualidad, existen prácticamente sólo métodos a escala de laboratorio, a excepción de la explotación de un campo ubicado al oeste de Siberia (Messoyaka), el cual ha sido explotado de manera exitosa durante varios años. Los hidratos de gas se vislumbran como un potencial enorme para suplir los requerimientos de gas natural en el siglo 21, asumiendo que la tecnología necesaria para producir y comercializar la producción de este tipo de yacimientos de gas puede ser desarrollada. Dentro de los requerimientos para la explotación de estas acumulaciones de hidratos de gas, está la disponibilidad de modelos matemáticos de simulación capaces de predecir el comportamiento de producción, así como definir las posibles estrategias operacionales para explotar este tipo de yacimientos mediante los mecanismos de despresurización y/o estimulación térmica. El simulador considera la transferencia de masa y calor presente, cuando ocurre la disociación de los hidratos de gas mediante los procesos de despresurización o estimulación térmica; así como la cinética de la reacción de disociación. La evaluación del simulador numérico de yacimientos permite concluir la factibilidad de representar estos procesos para la producción del gas asociado a las acumulaciones de hidratos de gas, lo que implica la disponibilidad de una herramienta capaz de analizar y estudiar posibles estrategias de producción para este tipo de yacimientos de gas.

## **MODELAJE DE LA PRODUCCIÓN DE GAS ASOCIADA A HIDRATOS DE GAS**

Los esfuerzos durante las últimas décadas por representar la producción de gas asociada con las acumulaciones de hidratos de gas natural o yacimientos no convencionales han sido importantes. La producción de gas proveniente de las acumulaciones de hidratos ha sido representada inicialmente utilizando modelos analíticos conceptuales, posteriormente se han evaluado diferentes modelos más complejos tratando de representar el proceso de disociación de los hidratos de gas. Se reporta inclusive el desarrollo de modelos numéricos específicos para este tipo de procesos (Sawyer *et al.* 2000; Ahmadi *et al.* 2004). Los primeros modelos documentados en la bibliografía han sido analíticos, referidos a modelar la producción de gas mediante despresurización al nivel de pruebas de núcleo en el laboratorio o al nivel de un modelo tipo pozo. También se reportan trabajos modelando la estimulación térmica. Los esfuerzos más recientes reportan el desarrollo de un simulador por parte del Laboratorio Nacional de Tecnología y Energía (NETL) en USA: denominado TOUGH-Fx/ Hydrate Program (NETL, 2006), el cual ha sido desarrollado como parte de un programa de identificación de nuevas fuentes energéticas a nivel mundial. El uso de una herramienta avanzada de simulación permitirá entender como se comportan estos yacimientos no convencionales y poder establecer posibles estrategias para su explotación, desde estudios de laboratorio para investigación fundamental hasta estudios integrados que incluyan modelos de simulación predictivos. Los esfuerzos se mantienen por cerrar las brechas al entendimiento de esta alternativa energética. La disponibilidad de un simulador para el ámbito académico de investigadores permite dar un paso más hacia ese objetivo. El impulso y desarrollo en esta área data desde los trabajos de Moridis (2003), donde refiere la alternativa de utilizar un simulador numérico para estudiar la producción de gas proveniente de las zonas de hidratos de gas en Mallik - Canadá, con la perforación de un pozo en 1998. Así mismo se han realizado trabajos haciendo uso de simuladores numéricos de yacimientos para hidrocarburos convencionales, tales como Swinkels & Drenth (1999). De igual forma, el presente trabajo evalúa esa alternativa con el uso de un simulador térmico para petróleo pesado.

## **SIMULADOR NUMÉRICO DE YACIMIENTOS**

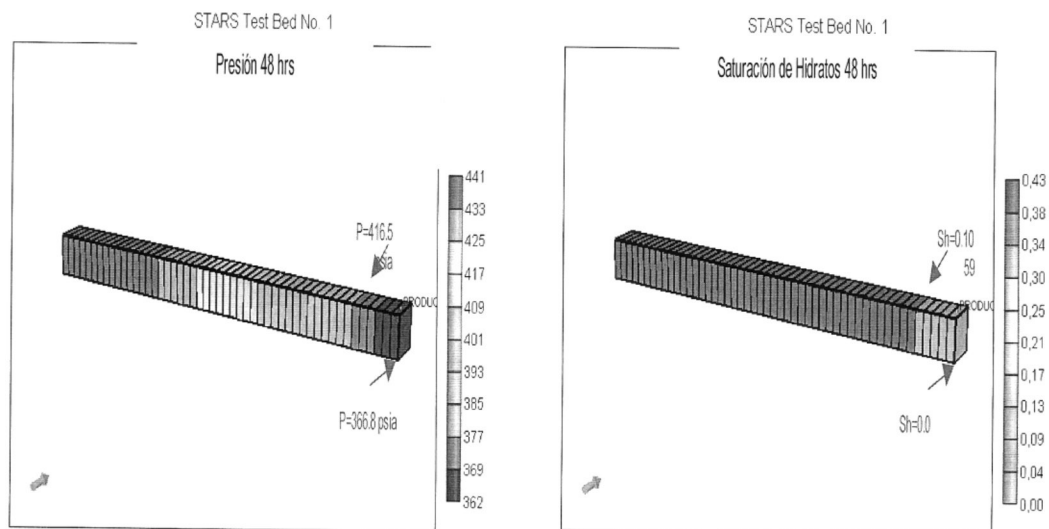
Las simulaciones realizadas para este trabajo se llevaron a cabo en un simulador comercial denominado STARS. El simulador STARS es un modelo trifásico, multicomponente, y térmico para yacimientos convencionales de petróleo pesado desarrollado por Computer Modeling Group (Canadá). Consiste en un modelo matemático que representa los procesos de propagación de calor y temperatura a través

del medio poroso así como sus efectos e interacción con los fluidos y las propiedades de la roca. Puede ser utilizado como un simulador multicomponente, multifase e isotérmico. El simulador incluye la definición de componentes dispersos de una fase en otra, entre sus principales fortalezas, está la de modelar reacciones químicas, en condiciones de transferencia de masa en situación de no-equilibrio.

### SIMULACIÓN NUMÉRICA 1D

La primera parte del estudio consistió en un modelo experimental 1D, que representa el flujo en una sola dimensión similar al reportado por Yousif (1991, 1990). Las condiciones de trabajo definidas para el modelo representan el mecanismo de producción mediante la despresurización isotérmica. La transferencia de masa se establece para este caso dependiente de la presión. La figura 1 representa el modelo 1D generado para este trabajo y la tabla 1, resume los parámetros y los valores utilizados para el estudio. Las permeabilidades relativas utilizadas son: unas pseudo curvas modificadas de un modelo de simulación para petróleo pesado que representan a la fase hidrato como una fase no móvil. Los hidratos de gas se definen como un pseudo componente líquido cuyas propiedades representen el comportamiento de un sólido. La disociación se consideró isotérmica, partiendo de que los diferenciales de presión son muy pequeños y se encuentran básicamente en la curva de equilibrio termodinámico. El simulador numérico muestra la capacidad para modelar el proceso de despresurización, como lo reportan

otros estudios previos utilizando modelos analíticos. Se realizaron sensibilidades a diferentes parámetros críticos para el proceso de producción de gas reportados en trabajos previos; permeabilidad, porosidad y la constante cinética de la reacción de disociación. Una limitante importante a considerar en estos modelos es la poca disponibilidad de datos reales obtenidos de las acumulaciones de hidratos de gas; por lo que se incurre en asumir valores teóricos reportados en la literatura para poder conceptualmente evaluar la factibilidad de modelar el proceso. La descripción del proceso de disociación de los hidratos de gas, mediante la combinación de la definición de la cinética de reacción de disociación y el uso de las constantes de equilibrio termodinámico  $K$  constituye un punto innovador pues sólo el estudio previo de Moridis (2003) utilizó el proceso de disociación mediante la combinación de la cinética de reacción y el equilibrio termodinámico pero definió un componente hipotético adicional. El modelo numérico permite definir tres componentes: agua, gas e hidratos, y las tres fases definidas son hidratos, agua, y gas. El gas puede estar presente tanto en la fase acuosa como en la fase gaseosa. Los hidratos se definen como un líquido no móvil, con propiedades características. El uso de las opciones intrínsecas del simulador permite disponer de un modelo que representa la producción de gas asociada con acumulaciones de hidratos por el mecanismo de despresurización isotérmica y realizar sensibilidades con tres parámetros del modelo: permeabilidad, porosidad y constante cinética de reacción.



**Figura 1.** Modelo 1D. Distribución de la presión de hidratos de metano y saturación para la producción de gas mediante despresurización por 48hrs.

**Tabla 1.** Datos de entrada (modelo 1D).

| PARÁMETRO                               | VALOR               |
|---|---------------------|
| Número de bloques, (adim)               | 50                  |
| Longitud, (cm)                          | 15                  |
| sección Transversal, (cm <sup>2</sup> ) | 11.4                |
| Permeabilidad, (mD)                     | 1x10e <sup>-4</sup> |
| Temperatura, (°F)                       | 33.8                |
| Presión Inicial, (psi)                  | 459.77              |
| Porosidad, (%)                          | 18                  |
| Saturación Inicial de Gas, (%)          | 0.402               |
| Saturación Inicial de Agua, (%)         | 0.20                |

## RESULTADOS MODELO 1D

### Sensibilidad al valor de permeabilidad

Se realizaron varias corridas con diferentes valores de permeabilidad desde 10<sup>-4</sup> como valor inicial hasta el valor reportado de 100mD; este rango contempla valores tan bajos como los que se corresponden a un yacimiento de gas con bajas permeabilidades hasta el valor reportado por Yousif (1990, 1991). Es importante resaltar que para este modelo numérico, los cambios a consecuencia de la disociación de los hidratos de gas están definidos mediante las pseudo curvas de permeabilidad relativa, reportadas por Swinkles & Drenth (1999). Las curvas de permeabilidad relativa representan el movimiento relativo de los componentes en el sistema agua, gas e hidratos. Los resultados obtenidos de la producción acumulada de gas, cuando la permeabilidad tiene un valor de 100mD, son los más altos pero no se logra un acumulado del orden de magnitud del reportado (Yousif, 1991). El modelo unidimensional para una permeabilidad

de 100mD logra disociar toda la saturación de hidratos definida inicialmente en el sistema, esto pudiera indicar que la reacción ocurre muy rápido y que la movilidad definida no permite alcanzar mayores acumulados para el gas. La figura 2 muestra la producción acumulada de gas para los diferentes valores de permeabilidad definidos en el sistema, corroborando que mayores permeabilidades permiten un mayor acumulado de producción.

### Sensibilidad al valor de porosidad

Las sensibilidades realizadas con respecto a la porosidad estuvieron entre los valores 18,7% y 30%, característicos de las acumulaciones de hidratos de gas. Se notó un incremento muy bajo en los acumulados de gas y agua producidos, a mayor porosidad, mayor acumulado de producción. Este resultado es acorde con la definición de porosidad efectiva, que representa el espacio poroso interconectado, que contiene los fluidos en un yacimiento. También cabe destacar que en el modelo numérico de este estudio la porosidad efectiva está relacionada con la saturación presente de hidratos de gas; una vez los mismos estén disociados, la porosidad efectiva es igual a la absoluta. La figura 3 muestra los resultados obtenidos con diferentes porosidades.

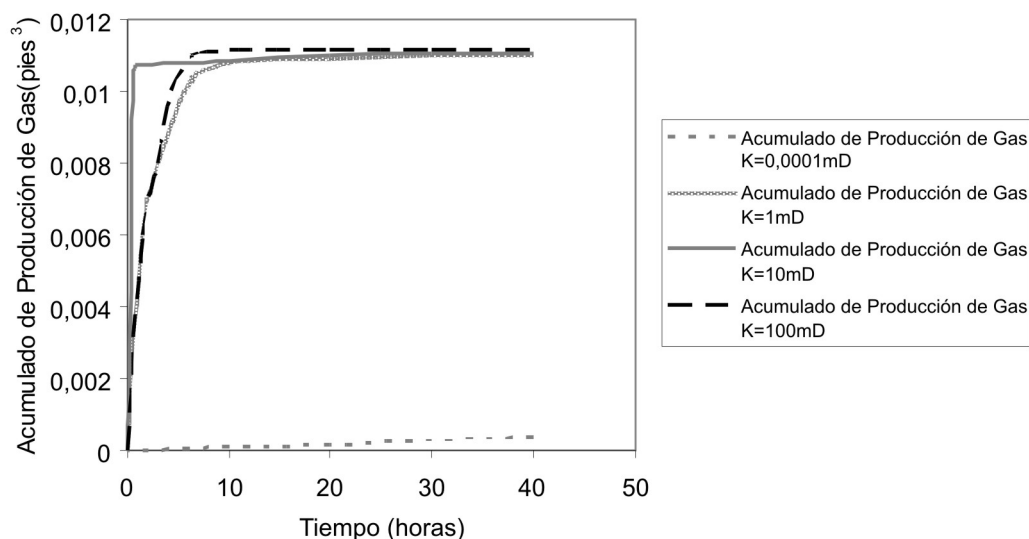
$$\phi_{\text{efectiva}} = \phi_{\text{absoluta}} * (1 - S_h) \quad (1)$$

donde:

$\phi_{\text{efectiva}}$  : porosidad efectiva

$\phi_{\text{absoluta}}$  : porosidad absoluta

$S_h$  : saturación de hidratos



**Figura 2.** Comparación de resultados de producción acumulada de gas considerando diferentes permeabilidades.

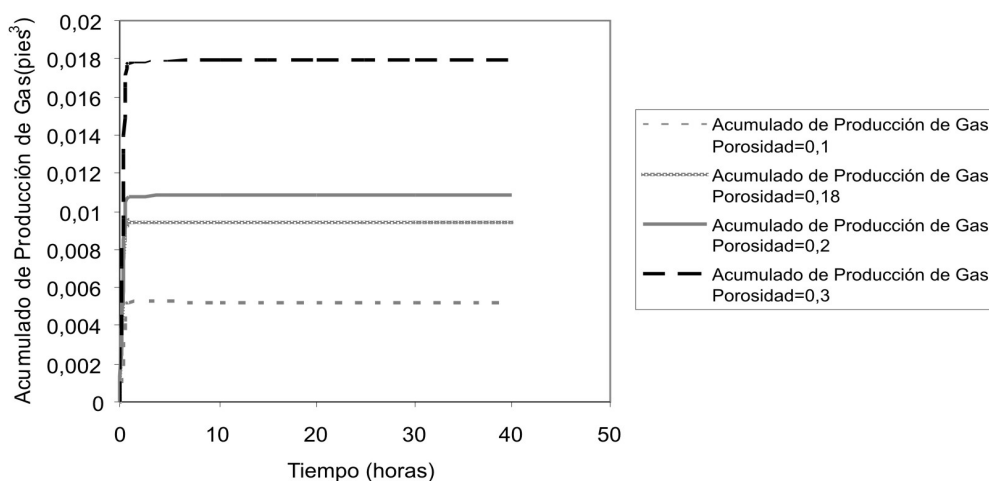


Figura 3. Comparación de resultados de producción acumulada de gas considerando diferentes porosidades.

### Sensibilidad al valor de constante cinética de reacción

La constante cinética de la reacción es un tema abierto, son muy pocos los estudios referidos, adicionales a la referencia de Kim *et al.* (1987), donde se reportan valores experimentales correlacionados para la determinación de la constante cinética.

Se realizaron sensibilidades de la constante cinética de reacción tratando de cotejar la producción acumulada. En su estudio Yousif (1991) utilizó un valor numérico menor para la constante cinética global que involucra ambas fuerzas; transferencia de masa y reacción química. En este estudio se empleó una constante cinética de primer orden así como los términos involucrados en la expresión de velocidad de reacción. Los términos que definen la transferencia de masa y la cinética de reacción química, se definen por separado. Se realizaron sensibilidades desde el orden de magnitud  $10^{-8}$  hasta  $10^{+16}$ . Estas variaciones tan extremas se realizaron para establecer la influencia de la constante cinética para la

reacción química. La expresión de las relaciones de equilibrio mediante las constantes K, en este caso, sólo depende de la presión pues el sistema es isotérmico. La reacción química isotérmica comienza de manera casi instantánea, bajo las condiciones iniciales definidas en la tabla 1; la diferencia más importante es que se logró dissociar el total de saturación de hidratos de gas presentes en la longitud total del modelo. A pesar de los valores extremos analizados, el valor de la constante cinética que mostró una velocidad equivalente al modelo de Yousif (1991), fue del orden  $10^{+1}$ . Los valores del orden  $10^{+16}$  (lbmol/(pies<sup>2</sup>\*day\*psi)) generan serios problemas en el balance de masa y en la convergencia numérica. Estos resultados pudieran explicarse, basándose en la premisa del modelo 1D, que para el sistema isotérmico se desprecia la transferencia de masa, y esto genera problemas en los cálculos y severos problemas de convergencia. Los resultados de las sensibilidades de los valores de la constante cinética de reacción se muestran en la figura 4.

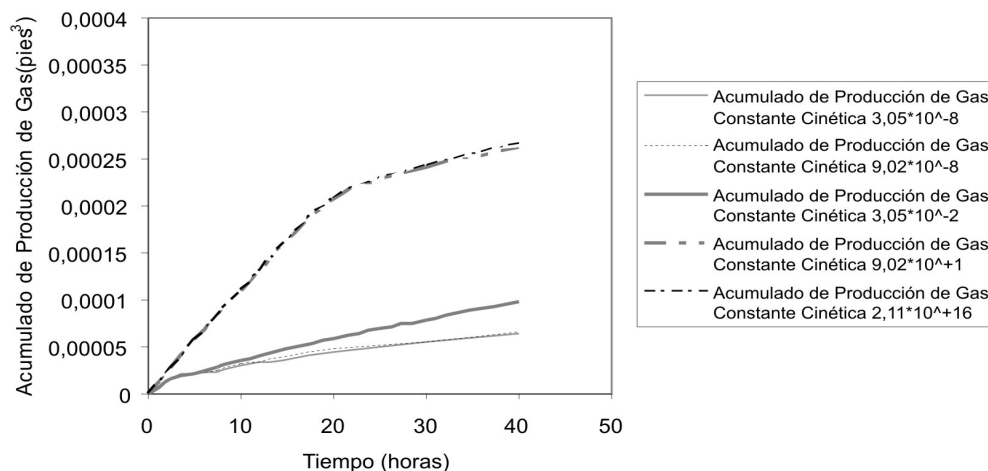


Figura 4. Comparación de resultados de producción acumulada de gas considerando diferentes constantes cinéticas.



## MODELO CONCEPTUAL 3D

La segunda parte del estudio consistió en representar mediante un modelo 3D conceptual, un yacimiento no-conventional del tipo acumulaciones de hidratos de gas, para determinar los parámetros críticos en la disociación de hidratos de gas dependiendo del mecanismo de producción utilizado. Las estrategias de producción evaluadas fueron las dos más estudiadas; despresurización, disminuyendo la presión por debajo de la presión de equilibrio, y la segunda opción es la estimulación térmica mediante la inyección de vapor incrementando la temperatura hasta exceder la correspondiente en equilibrio y promover la disociación de los hidratos. Los parámetros de yacimientos utilizados se obtuvieron de los estudios previos y los restantes se asumieron según otras referencias de yacimientos de hidrocarburos convencionales de manera de poder evaluar y analizar los procesos de producción mencionados. El modelo conceptual se basa en el estudio realizado por Swinkels & Drenth (1999), con algunas variaciones. La producción se lleva a cabo en un pozo vertical, se estudian diferentes casos: un pozo vertical produciendo solamente de la zona de hidratos y un pozo vertical produciendo de la capa de gas inferior a la zona de hidratos; estos casos corresponden a la producción de gas mediante despresurización. Se modeló, también la producción de gas, posterior a un periodo de inyección de vapor en la zona de hidratos. En este trabajo, no se considera la presencia de hielo en el equilibrio de fases (temperaturas menores a 32.8°F), pues para este estudio el acceso a ese modulo es una opción restringida.

Es importante resaltar que el uso de un modelo de simulación es para jerarquizar, mediante diferentes escenarios de producción el esquema potencial y económicamente más rentable para la explotación y producción de yacimientos no-convencionales de gas.

## RESULTADOS MODELO 3D

### Despresurización de un yacimiento de hidratos de gas

El modelo 3D está definido básicamente con los mismos parámetros de la tabla 2. La producción de gas se refiere a las capas de hidratos. La constante cinética de reacción en este caso, es la reportada por Kim (1987) ( $5.0672404 \times 10^{17}$  1/día). El modelo 3D, es un modelo no isotérmico que considera la convección y conducción. La transferencia de masa se define mediante la expresión de constantes de equilibrio en función de presión y temperatura.

El modelo 3D se define con un mallado cartesiano homogéneo, con un pozo vertical ubicado en la parte media del área de estudio con propiedades homogéneas, y las permeabilidades relativas definidas restringen prácticamente

Tabla 2. Datos de entrada (modelo 3D).

| PARÁMETRO                                  | VALOR    |
|--|----------|
| Tamaño de la malla (adim)                  | 15x15x10 |
| Profundidad del yacimiento, (pies)         | 3000     |
| Espesor del yacimiento, (pies)             | 500      |
| Permeabilidad, (mD)                        | 100      |
| Temperatura, (°F)                          | 33.8     |
| Presión Inicial, (psi)                     | 700      |
| Porosidad, (%)                             | 20       |
| Saturación Inicial de Hidratos de Gas, (%) | 0.25     |
| Saturación Inicial de Agua, (%)            | 0.725    |

la movilidad de los hidratos; el sistema definido corresponde a hidratos de gas en exceso de agua, como reporta Kim (1987). Se realizaron sensibilidades considerando la despresurización adiabática y no adiabática. Los resultados muestran que los acumulados de producción de gas y agua son mayores para el caso adiabático (Efecto Joule Thomson), la figura 5 muestra los acumulados de gas; esto se explica porque el proceso ocurre rápidamente sin intercambio de calor y la reacción endotérmica se favorece promoviendo la disociación de hidratos. En el proceso no-adiabático, el sistema produce un trabajo que en parte se disipa en el sistema; y debido a la limitante del modelo numérico que no considera la reacción de formación de hidratos, ese trabajo se disipa en parte al sistema promoviendo incrementos de temperatura y presión.

También se realizaron sensibilidades respecto a la expresión de equilibrio (Kamath, 1991; Selim & Sloan, 1990; Hong & Pooladi-Darvish, 2002). A continuación, se muestra la expresión de equilibrio propuesta en el trabajo de Selim & Sloan (1990):

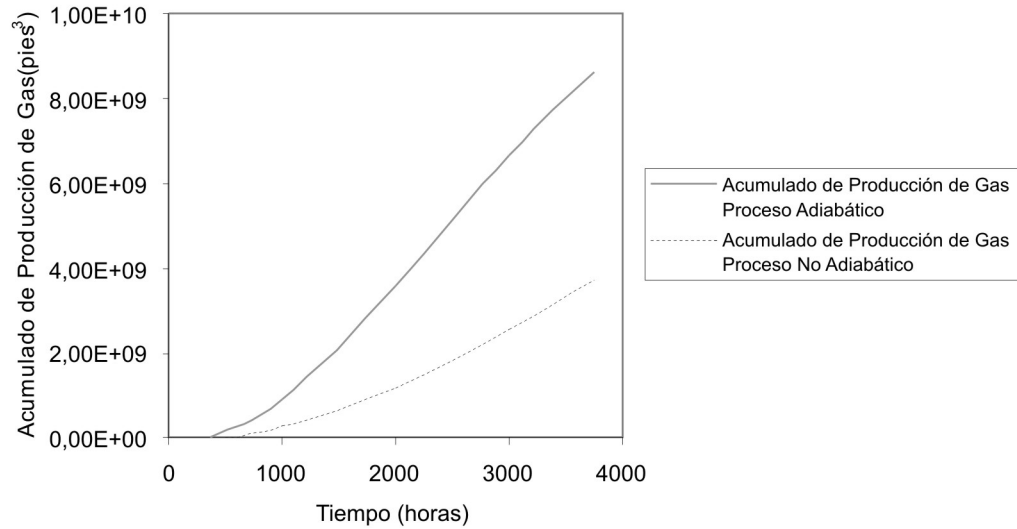
$$P_e = 10^{-6} \exp(49.3185 - 9459/T_s) \quad (2)$$

donde:

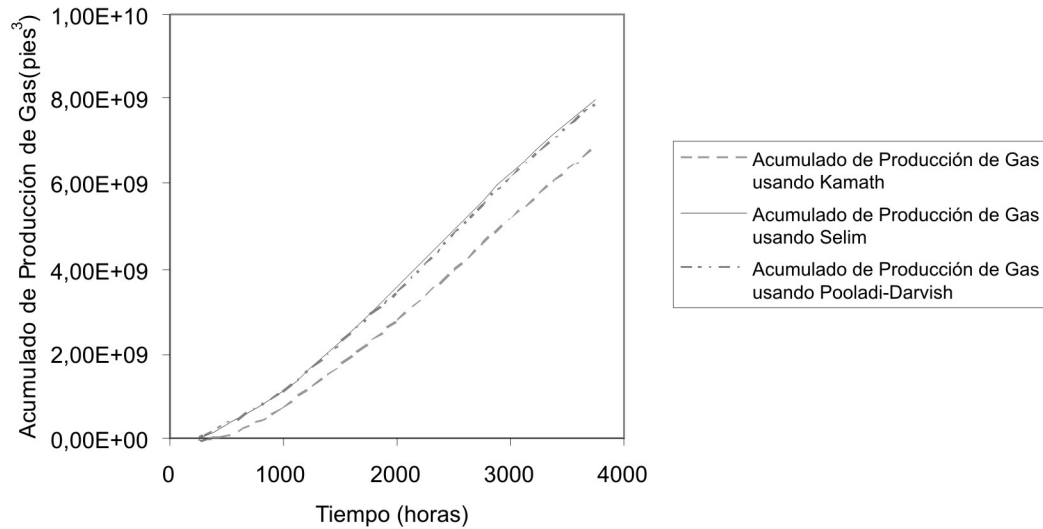
$P_e$ : presión de equilibrio (Kpa)

$T_s$ : temperatura en la superficie hidrato de gas/interfaz(K).

Los resultados muestran que la reacción se inicia prácticamente de manera instantánea independientemente de la expresión de equilibrio utilizada, los resultados son bastante comparables, figura 6. Luego de 10 años de producción de gas, no se logra disociar toda la zona de hidratos de gas, solo una pequeña porción en las cercanías del pozo. La disociación de hidratos es un proceso lento en la vida productiva de un yacimiento.



**Figura 5.** Comparación de los resultados de producción de la acumulada de gas considerando el proceso adiabático y no adiabático.



**Figura 6.** Comparación de resultados de producción de la acumulada de gas considerando las expresiones de Antonie para la transferencia de masa.

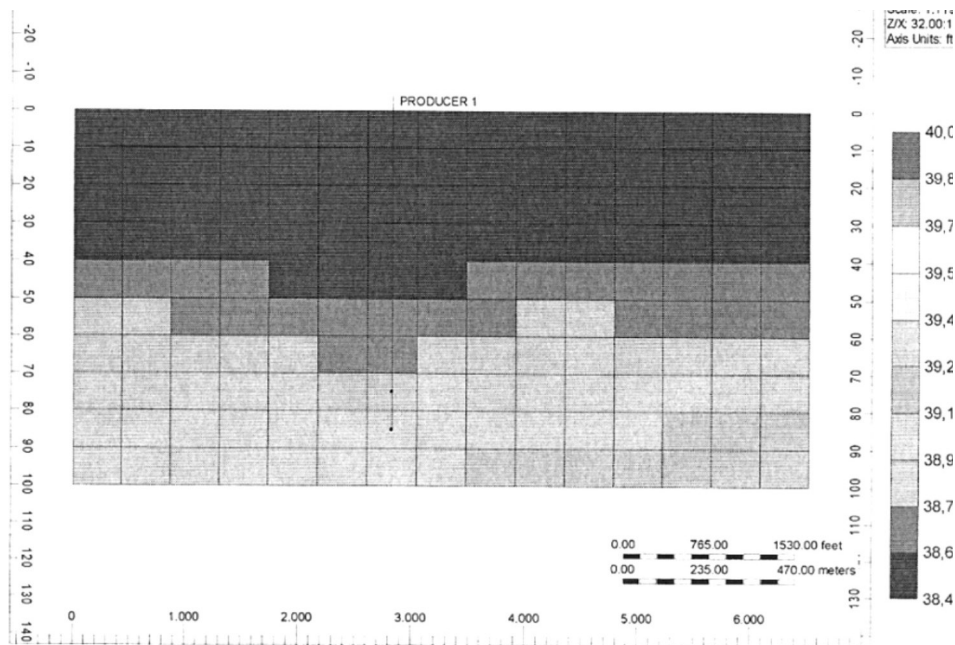
### Despresurización de un yacimiento de hidratos con capa de gas

Con el mismo modelo conceptual se definió una capa de gas por debajo de la zona de hidratos de gas, la misma es prácticamente gas metano puro, y el pozo productor vertical se encuentra completado sólo en la zona de gas. Las propiedades de saturación se establecieron mediante la definición

de dos zonas; una zona de hidratos con exceso de agua ( $S_H = 0.25$ ,  $S_w = 0.725$ ,  $S_G = 0.025$ ), y una zona inferior de gas libre ( $S_G = 0.83$ ,  $S_w = 0.17$ ); las permeabilidades fueron definidas diferentes en ambas zonas; para la zona de gas libre 10mD y para la zona de hidratos de gas igual a 100mD; la permeabilidad vertical se definió 1mD entre todas las capas a excepción de la capa que separa ambas zonas (contacto hidratos de gas y gas libre), la cual se definió con 0.01mD

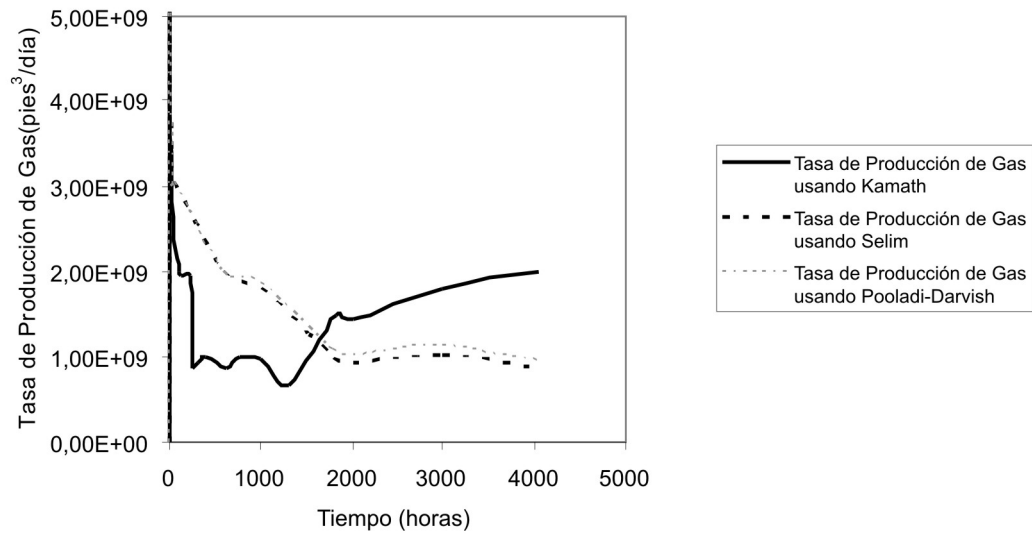
para establecer un sello entre ambas zonas. La tasa de producción de gas se estableció en 500.000 pies<sup>3</sup>/día, como restricción. Se realizaron sensibilidades de las expresiones de equilibrio. Los resultados muestran, que la presión disminuye inicialmente en las capas de la zona de gas. La producción inicialmente es de gas con una mínima cantidad de agua. Posteriormente, la producción de gas se reduce, mientras que la producción de agua se incrementa iniciada la reacción disociación. La presión en el área de estudio va disminuyendo desde el fondo que corresponde a la capa de gas, formándose un cono térmico desde el tope. El área de transición entre ambas zonas muestra cambios de presión y saturación de gas, evidenciando la producción de gas. La capa más baja del modelo mantiene valores cercanos a los iniciales aún después de 10 años de producción del pozo. La zona de hidratos muestra los efectos de la disociación de hidratos. La presión, inicialmente, en el contacto de ambas zonas incrementa muy ligeramente en los primeros días de producción, luego se despresuriza como todo el área de estudio. Este efecto puede explicarse debido a que la producción de gas sólo se realiza mediante dos intervalos en la zona de gas lo que promueve cierta acumulación o presurización que posteriormente se equilibra con la producción.

La expansión del gas, adiabática (Efecto Joule Thomson), se observa durante la producción de gas. La reacción de disociación se inicia a diferentes tiempos dependiendo de la expresión de equilibrio definida; más de 100 días (Selim & Sloan, 1990), más de 2005 días (Kamath, 1991), y más de 1025 días (Hong & Pooladi-Darvish, 2002). Las distribuciones de presión y temperatura muestran al cabo del periodo de simulación, que las zonas del tope y el inferior presentan las mayores presiones y temperaturas, que se corresponde con las zonas menos drenadas. El comportamiento en las cercanías del pozo se encuentra controlado por la producción de gas. La distribución de presión y temperatura muestran la expansión del gas y enfriamiento del área. El gas lentamente logra difundirse en la parte más alta de la zona de hidratos de gas, mientras que la parte mas baja de la zona de gas evidencia un menor efecto de expansión. En la figura 7 se aprecian los resultados en distribución de temperatura; la figura 8 muestra la sensibilidad en las tasas de producción usando las diferentes expresiones para establecer la transferencia de masa durante la reacción; y en la figura 9 se consideran los resultados en distribución de presión en una sección transversal al cabo de 3650 días.

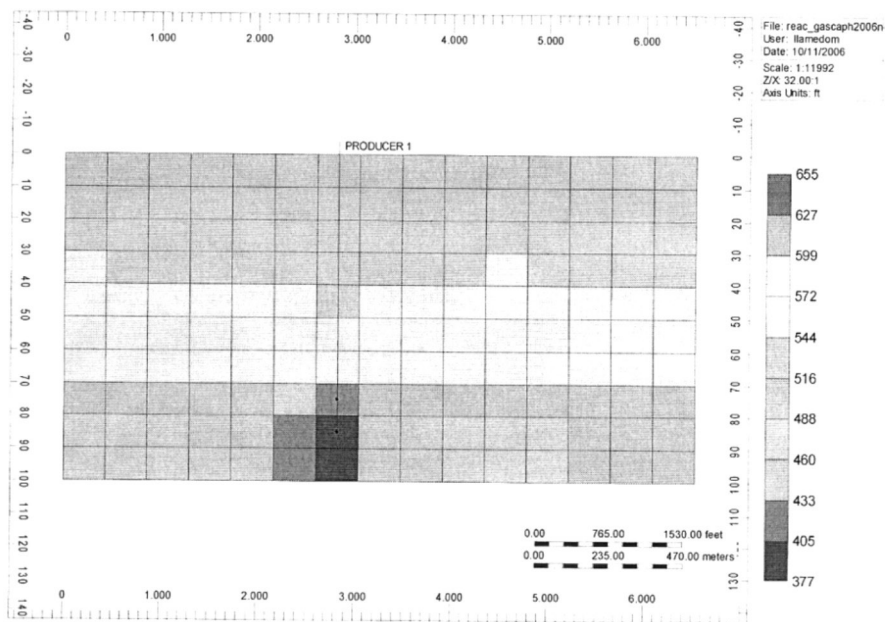


**Figura 7.** Distribución de la temperatura (°F) en la zona transversal luego de 3650 días de producción mediante la capa de gas.





**Figura 8.** Comportamiento de la tasa de producción para las expresiones de Antonie hacia la transferencia de masa.



**Figura 9.** Distribución de la presión (psi) en la zona transversal luego de 3650 días de producción mediante la capa de gas.

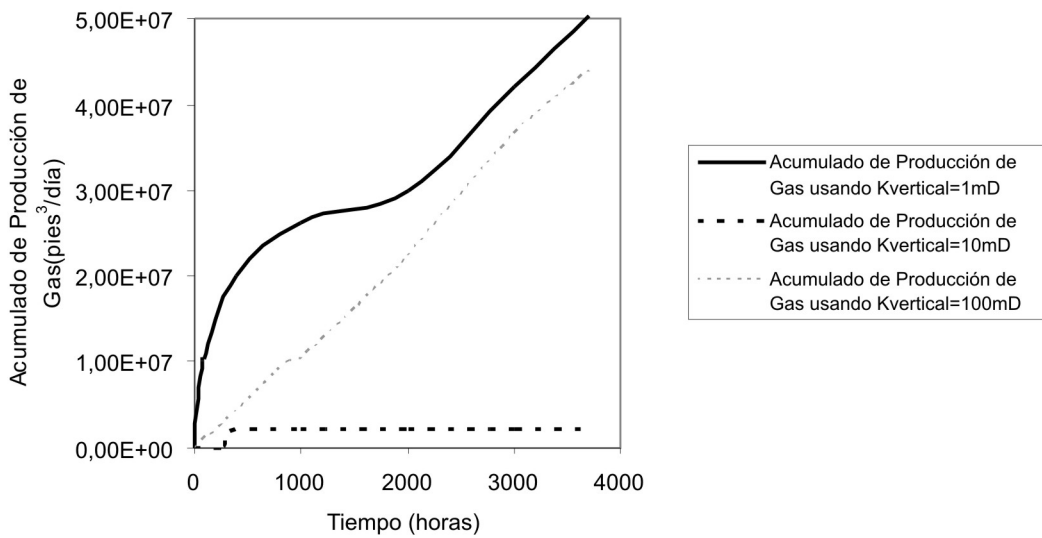
### Estimulación térmica mediante la inyección de vapor para la producción de gas

Para el caso de estimulación mediante inyección de vapor, el modelo mantiene la definición de un pozo productor que inicia su producción en una zona de hidratos de gas por 90 días, luego se cierra y en una zona inferior se inyecta vapor a una temperatura de 450°F con una calidad del 70%, por 8 días; con un total de vapor inyectado de aproximadamente el equivalente a 660 barriles. La inyección de vapor

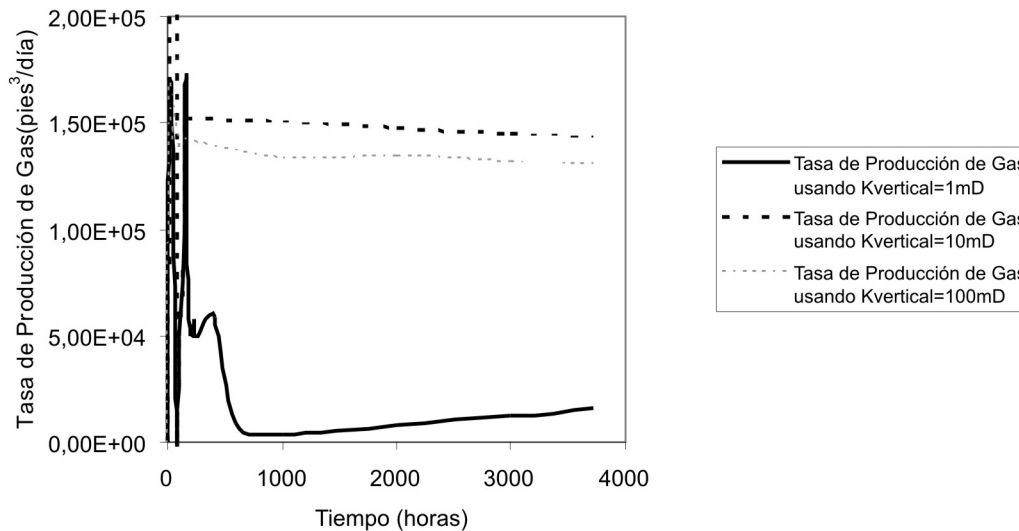
está restringida por una tasa máxima de gas de 500.000 cc/día. El pozo se cierra a la inyección para dar un tiempo de remojo de 10 días y se abre nuevamente a la producción. El mecanismo de producción se basa en la combinación de la inyección de vapor, que incrementa la temperatura del yacimiento y promueve el rompimiento de los puentes de hidrógeno para la liberación de gas al disociarse los hidratos. El proceso es realmente una combinación de los efectos producidos por la estimulación con inyección de vapor y la despresurización al producirse el pozo, ambos pozos

productor e inyector, son verticales. Las características del área de estudio son las indicadas en la tabla 2, a excepción de que se requiere una mayor saturación de gas inicial ( $S_G > 0.05$ ) para producir gas excediendo la saturación crítica de gas del sistema ( $S_w = 0.5$ ,  $S_H = 0.45$  y  $S_G = 0.05$ ). Los parámetros para la transferencia de calor fueron los utilizados por Kamath (1991). La reacción se inicia aproximadamente luego de 35 días posteriores a la inyección de vapor, la misma ocurre muy lentamente y no se logra sino disociar aproximadamente sólo el 10 % del volumen de hidratos de gas del área de estudio. El comportamiento de la producción muestra baja sensibilidad a los cambios en la presión de fondo (60, 90, 360 psi), así como a la temperatura de inyección del vapor (450°F y 518°F). Las tasas iniciales

de producción de gas son muy altas, superiores a las del agua. Posterior a la inyección de vapor, éstas comienzan a ser elevadas, luego de un periodo sin producción de gas, decaen y nuevamente se incrementan; pero no llegan a ser tan altas como inicialmente, esto se debe a que alcanzan la presión mínima de fondo fluyente fijada como restricción, y se estabiliza la tasa de producción de agua. La presión en las cercanías de las perforaciones o zonas productoras disminuye como la temperatura, esto es producto del efecto de enfriamiento y la consecuente expansión del gas al producirse. Las figuras 10 y 11 muestran sensibilidades respecto al efecto de la permeabilidad vertical en las tasas y acumulado de producción de gas.



**Figura 10.** Comportamiento de las tasas de producción de agua y gas a diferentes permeabilidades verticales.



**Figura 11.** Comportamiento del acumulado de producción de agua y gas a diferentes permeabilidades verticales.

## LIMITACIONES DEL MODELO

Los resultados obtenidos se basan en modelos conceptuales que tratan de representar la producción de gas a partir de las acumulaciones de hidratos de gas, considerando los diferentes mecanismos de producción para promover la disociación de hidratos. Diferentes simplificaciones o consideraciones han sido incluidas para el caso de acumulaciones de hidratos de gas. La importancia de la captura de la información así como un mayor entendimiento de los efectos a consecuencia del proceso de disociación de los hidratos de gas en este tipo de yacimientos es indispensable, se recomienda disponer de la siguiente información: modelo geomecánico asociado a la posible subsidencia producida en la formación geológica con la disociación y como representarla en el modelo de simulación; curvas reales de permeabilidad relativa trifásicas, valores de las constantes cinética de reacción, valores de los parámetros de la transferencia de masa y calor. Incluir en el modelo la representación de la presencia de fracturas, es también importante en este tipo de formaciones donde las permeabilidades son muy bajas naturalmente; y éste pudiese plantearse como un posible esquema para la explotación de estas acumulaciones. También se deben considerar otros escenarios tales como patrones de pozos, condiciones de producción, pozos horizontales, con el fin de optimizar la producción.

Este trabajo, aun con sus limitaciones, demuestra la potencialidad y fortaleza del simulador comercial convencional para hidrocarburos. El simulador STARS es capaz de representar, modelar y estudiar este tipo de yacimiento no-convencional; el reto es mantener el esfuerzo para la captura, evaluación y estudio continuo, tanto en actividades de laboratorio como a nivel de modelaje, pues la potencialidad de producir gas mediante estas acumulaciones, es una oportunidad energética. La herramienta académica desarrollada por el Instituto de Energía (DOE) de USA, es un modelo académico, cuya contribución es importante al dar respuesta a estas incertidumbres para consolidar las oportunidades de estas potenciales fuentes de energía. El simulador STARS ha sido evaluado para simular la producción de mantos de carbono y la disposición de dióxido de carbono con bastante éxito demostrando su gran versatilidad en procesos complejos.

## CONCLUSIONES

El simulador térmico y semi-composicional de yacimientos, utilizado para modelar la producción de gas a partir de acumulaciones de hidratos de gas, mostró la capacidad de representar el comportamiento termodinámico y cinético de éste tipo de yacimiento de hidrato de gas con y sin presencia de una capa de gas. El simulador comercial muestra la

capacidad de representar el comportamiento PVT y cinético sin alteraciones específicas para el caso de hidratos de gas.

La producción de gas en un yacimiento de hidratos está asociada a una importante cantidad de producción de agua lo que puede implicar altos costos por manejo en superficie del agua.

La producción en presencia de la capa de gas acelera el proceso de despresurización para disociar la zona de hidratos de gas y su producción.

La estimulación con vapor muestra resultados favorables como alternativa para producción de los hidratos, pero se requiere determinar y disponer de mayor información real para realizar algunas sensibilidades adicionales.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiese sido posible sin las valiosas discusiones e intercambio de ideas con el Dr. Bahman Tohidi, MSc. Ross Anderson de Heriot Watt University en Edimburgo – Reino Unido y Mr. Dennis Coombe, Mr. David Hicks, Mr. Víctor Salazar de la compañía CMG en Canadá.

## REFERENCIAS

- AHMADI, G., CHUANG, J., SMITH, D.H. (2004). Numerical Solution for Natural Gas Production from Methane Hydrate Dissociation, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 41 (4), pp. 269-285.
- ECKER, C., DVORKIN, J., NUR, A.M. (2000). Estimating the amount of gas hydrate and free gas from marine seismic data, *Geophysics*, Vol.65. No 2, March-April, pp. 565-57311.
- HONG, H., POOLADI-DARVISH, M., BISHNOI, P.R. (2002). Analytical Modeling of Gas Production from Hydrates in Porous Media, Presented at the Petroleum Society's Canadian International Petroleum Conference, June 11-13, Calgary, Alberta, Canada.
- KAMATH, V.A., MUTALLK, P.N., SIRA, J.H., PATIL, S.L. (1991). Experimental Study of Brine Injection and Depressurization Methods for Dissociation of Gas Hydrates, *SPE Formation Evaluation*, December, pp. 477-484.
- KIM, H.C., BISHNOI, P.R., HEIDEMANN, R.A., RIZVI, S.S.H. (1987). Kinetics of Methane Hydrate Decomposition, *Chem. Eng. Sci.*, 42, pp. 1645-1653.
- KVENVOLDEN, K.A. (1993). *Rev. Geophysics*, Vol. 31, 173.

MORIDIS, G.J. (2003). Numerical Studies of Gas Production from Methane Hydrates, SPE 75691, Presented at the 2002 SPE Gas Technology Symposium, 30 April-2 May, Calgary, Alberta, Canada.

NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY (2006). Computer Program Provides Insight Into "Fire Ice", [www.netl.doe.gov](http://www.netl.doe.gov) (09/2008).

SAWYER, W.K., BOYER, C.M., FRANTZ, J.H., YOST II, A.B. (2000). Comparative Assessment of Natural Gas Hydrate Production Models, SPE 62513, Presented at the 2000 SPE/CERI Gas Technology Symposium, 3-5 April, Calgary, Canada.

SELIM, M.S., SLOAN, E.D. (1990). Hydrate Dissociation in Sediment, SPE Reservoir Engineering, May, pp. 245-251.

SWINKELS, J.A.M. & DRENCH, J.J.W.K. (1999). Thermal Reservoir Simulation Model of Production from Naturally Occurring Gas Hydrate Accumulations, SPE 56550, Presented at the 1999 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 3-6 October, Houston, USA.

YOUSIF, M.H., LI, P.M., SELIM, M.S., SLOAN, E.D. (1990). Depressurization of Natural Gas Hydrates in Berea Sandstone Core, Journal of Inclusion Phenomena and Molecular Recognition in Chemistry, 8, pp. 71-88.

YOUSIF, M.H., ABASS, H.H., SELIM, M.S., SLOAN, E.D. (1991). Experimental and Theoretical Investigation of Methane gas- Hydrate Dissociation in Porous. SPE Reservoir Engineering, February, pp. 69-76.