# Escalamiento de modelos cinéticos para evaluar procesos de inyección de aire en yacimientos de crudo pesado en un campo X de Ecopetrol S.A.<sup>....</sup>

pags 47-66 Grupo de Investigación en Simulación de Yacimientos y Recobro Mejorado Jorge Luis Ramos Ramos• Andrés Felipe Rodríguez Caviedes•• Lina Paola Wilches Madrigal•• Edwin Rodríguez•••

Recibido: 25 de abril de 2014 Aceptado: 30 de mayo de 2014

### RESUMEN

El presente trabajo de investigación pretende estudiar el efecto que tiene el upscaling y downscaling en un modelo de tubo de combustión (cambios en el número de celdas), con el fin de observar si estos generan un impacto en la tasa de producción, la temperatura, la producción acumulada, entre otras variables. Todo esto con el fin de generar un ajuste numérico o una solución general para los cambios que se le realicen al modelo base. Dichos cambios son a nivel de resolución de celdas radiales y verticales. Lo anterior enfocado a la posibilidad de reproducir los modelos de laboratorio a una escala de campo.

Palabras claves: modelos cineticos, inyección de aire, crudos pesados.

### ABSTRACT

The present investigation studies the effects of upscaling and downscaling in a combustion tube model (changes in cells number.) The goal is to observe if the changes have an impact in rate production, cumulated production, among other variables. Based on the observations we will obtain a numeric adjustment or a general solution for realizable changes that occur in the base model, these changes are based on radial and vertical cells. This is focused to the possibility to reproduce the laboratory models to a field scale.

Key words: Kinetic modeling, air inyection, heavy oil.

Docente investigador Universidad de America, Ingeniero de Petróleos M.Sc. jorge.ramos@investigadores.uamerica.edu.co
 Tat diverse investigadores.uamerica.edu.co

<sup>••</sup> Estudiantes investigadores del programa de Ingeniería de Petróleos.

<sup>•••</sup> Ingeniero de Petroleos, Unidad de investigación Instituto Colombiano del Petróleo ICP. edwin.rodriguez@ecopetrol.com.co •••• Proyecto desarrollado en convenio con el Instituto Colombiano del Petróleo.

## INTRODUCCIÓN

El proceso de combustión in situ es un proceso térmico por el cual se inyecta un gas comburente, en la mayoría de los casos aire, para generar una disminución en la viscosidad de crudo remanente, el cual puede empezar a moverse por efecto de un frente de vapor que se genera. Dicho proceso es de vital importancia en la recuperación de crudo, y modelarlo de manera adecuada en los programas especializados permite obtener una prospección ideal del comportamiento al implementar el proceso. Sin embargo al tener en cuenta que los procesos de laboratorio no siempre permiten reproducir los resultados de manera óptima y que al llevarlos a escala de campos se impacta directamente la generación de los resultados, es necesario buscar una solución general o un ajuste apropiado que permita visualizar el comportamiento de la forma correcta al cambiar de escala ya que así se tendría una elevada confiabilidad en el proceso y se podría aplicar para diversos yacimientos sin importar las condiciones geométricas del enmallado que los represente.

## **COMBUSTIÓN IN SITU**

La combustión in situ es un proceso de inyección de aire que se ha aplicado para la extracción de crudo en la mayoría de los casos pesados y extrapesados. Es un proceso de inyección de gas para el recobro de petróleo, en donde se busca quemar una porción del petróleo in situ para así crear un frente de combustión, haciendo uso del calor generado para disminuir la viscosidad del crudo e incrementar el recobro de petróleo para evitar un porcentaje alto de petróleo remanente. La llama es provocada por la inyección de aire o de gas enriquecido con oxígeno dentro de la formación. Se definen tres tipos de combustión in situ principales: combustión progresiva seca y húmeda, y combustión en reversa.

## REACCIONES QUE INTERVIENEN EN LA COMBUSTIÓN IN SITU

La Combustión In Situ se diferencia de proceso de invección de vapor, porque en este ultimo la composición del petróleo y la mineralogía de roca tienen un impacto mínimo en la recuperación de petróleo; estos parámetros juegan un papel importante en el resultado de la combustión in-situ (CIS) debido a que este proceso depende para su existencia de la aparición de reacciones químicas entre el petróleo crudo y el aire inyectado dentro del yacimiento, también de la naturaleza de estas reacciones, así como los efectos del calentamiento inducido el cual a su vez obedece a las características del sistema petróleo - matriz. Los minerales de roca y el contenido de arcilla del yacimiento influyen en las reacciones del combustible de la formación y su posterior combustión.

**Craqueo térmico a altas temperaturas**. Es el proceso en el cual los enlaces carbonocarbono de los componentes más pesados de hidrocarburos se rompen en moléculas más pequeñas de hidrocarburos y una fracción inmóvil que se llama coque.

**Oxidación a baja temperatura (LTO).** A temperaturas inferiores a 350 °C, las reacciones predominantes son a baja temperatura, las cuales implican la adición de oxígeno a los maltenos y asfáltenos y producen una mayor oxidación de componentes pesados.

Oxidación a temperatura intermedia (ITO) O Pirólisis. Debido a que la temperatura del yacimiento aumenta, el petróleo experimenta un cambio químico llamado pirólisis.

**Oxidación a altas temperaturas (HTO).** La reacción entre el oxígeno en el aire inyectado y el coque a temperaturas superiores a 350 °C, se refieren generalmente como la oxidación a alta temperatura (HTO) o reacciones de combustión en la CIS.

## PRUEBAS DE TUBOS EMPACADOS O TUBO DE COMBUSTIÓN

Consisten en una muestra representativa de yacimiento la cual es empaquetada en un tubo de acero, se invecta aire y se genera ignición de principio a fin del tubo, produciendo y midiendo los gases y líquidos recolectados. Se pueden también definir como simuladores físicos, los cuales permiten la observación del frente de combustión bajo condiciones las cuales se aproximan al vacimiento y constituyen el primer paso para el diseño de este tipo de procesos. Se puede aplicar para crudos con gravedades que varían entre 6 y 45 °API en un rango de presiones desde 1 a 6000 Psi. La mayoría de los tubos de combustión tienen composiciones de aire normal (21% Oxígeno, 79 % Nitrógeno), pero es posible realizar pruebas con mayores concentraciones de oxígeno. El esquema general de una prueba de tubo presentan los siguientes componentes principales: Sistema de invección de gas, Tubo de combustión, Sistema de producción de líquido, Sistema de análisis de gases y Control v registro de datos

La saturación de fluidos en el interior es adaptada aproximadamente a las condiciones del yacimiento. El crudo se quema por medio de una inyección de aire y el frente de combustión avanza a través del tubo por causa de una inyección continua. La información de temperatura, presión, velocidad de flujo de aire y producción de agua, crudo y gas con sus respectivas composiciones es recolectada y analizada, para posteriormente calcular algunas variables.

Las variables tales como la producción de óxidos de carbono (CO2 y CO), relaciones H/C, relación aire combustible y la fracción de oxígeno consumido convertida a óxidos de carbono son sumamente importantes para estimar el modo de quema (desempeño del proceso) en el proceso (Alta o Baja temperatura LTO-HTO). Alta concentración de CO2 en los gases producidos es un indicativo de combustión en modo LTO, mientras que baja concentración de CO2 es un indicio de combustión en modo LTO

## **ESCALAMIENTO CINÉTICO**

Generalmente se simula la combustión de una fase de aceite que consta de tres componentes (aceite pesado, aceite medio y aceite ligero) en un tubo de combustión. Los parámetros del sistema y las condiciones de funcionamiento se adoptan a partir de los resultados experimentales, como lo explica Gutiérrez et al.<sup>1</sup>. La comparación de los resultados de la simulación para diferentes números de bloques del grid se hace demostrando la alta sensibilidad del crudo y la producción para el tamaño de bloque de malla. Se observa que el uso de celdas grandes da lugar a un avance más lento de frente de combustión, es decir, la localización de la temperatura máxima se predice a estar más cerca de la posición de inyección de aire cuando bloques grandes de la cuadrícula se utilizan. A través de este análisis, se identifican los parámetros del modelo con la mayor sensibilidad al tamaño de bloque. Al identificar las variables del modelo, se usan como parámetros de sensibilidad, así mismo se adaptan a las mallas (ya sean finas o gruesas) y se proporcionan las constantes de reacción.

Un modelo cinético es desarrollado y validado utilizando modelos de simulación de laboratorio a escala y no se puede utilizar directamente para debido a la baja fiabilidad de las predicciones (Ver **Figura 1**). En la ecuación de Arrhenius se muestra que la velocidad de reacción depende de la temperatura y del tiempo a través y así mismo estos dos factores dependen del tipo de combustibles; la dependencia de la temperatura hace que las reacciones sean sensibles al tamaño de celda, por lo cual las celdas grandes necesitan más calor para conseguir un nivel de temperatura determinado en comparación con las celdas más pequeños.

<sup>1</sup> GUTIÉRREZ. D, MOORE. R.G, SPE, URSENBACH. M.G y MEHTA. S.A. The ABCs of In-Situ Combustion Simulations: From Laboratory Experiments to the Field Scale.



# Figura 1. Esquema se simulación desde el laboratorio a escala de campo

La dependencia de tiempo puede ser fácilmente visualizado en términos de la adición de oxígeno y las reacciones de craqueo. Estas reacciones tienen períodos de inducción antes de la formación de coque, sin embargo, cuando se utiliza en simuladores de yacimientos termales las reacciones pueden transcurrir a la temperatura inicial del yacimiento, siempre y cuando los reactivos están disponibles. Esto no es necesariamente una preocupación para el modelado de los datos de laboratorio que se realizan en poco tiempo, pero si lo es para los modelos a escala de campo que normalmente se ejecutan durante largos periodos de tiempo. Algunas regiones en la malla que no están afectadas por el proceso de combustión podrían generar coque si no están hechos los cambios apropiados para el modelo de reacción.

Por estas razones, se requieren metodologías para ampliar las escalas que pueden capturar los procesos desarrollados en escala principal en las mallas utilizadas en la simulación de campo a escala numérica. Desafortunadamente, como lo explica Rodríguez et al.<sup>2</sup> no existe un procedimiento amplio y universalmente aceptado que tenga ciertos parámetros cinéticos del laboratorio a escala de campo, ya que esto sigue siendo un área de investigación.

El enfoque actualmente preferido implica el uso de técnicas que permitan el uso mallas pequeñas en las regiones en las que la mayoría de los frentes agudos se producen (frente de combustión, por ejemplo) y mallas más gruesas en las otras regiones (ver **Figura 2**).

Figura 2. Saturación de petróleo en un modelo de malla fina y gruesa



2 RODRÍGUEZ. E, ORDOÑEZ. A, COMAS. J, BELGRAVE. J y ALVAREZ. C. Superando Retos En El Modelamiento Numérico De Procesos De Combustión In Situ En Yacimientos De Crudo Pesado. Bogotá D.C. Colombia, Acipet: Noviembre de 2011 artículo presentado en el XIV Congreso Colombiano del Petróleo. p 2

Investigacion 7-1.indb 50

Esta característica está disponible en diferentes simuladores numéricos y ha sido utilizado con éxito en diferentes estudios. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esta opción requiere un poco de trabajo para configurarse correctamente. Por ejemplo, un modelo que se ajusta finamente y utiliza cuadriculación dinámica debe ser capaz de replicar algunos resultados en una malla fina antes de que pueda ser utilizado con confianza. Esto puede ser un reto para los modelos de vacimientos muy heterogéneos, incluso sin invección de aire. Por otro lado, según el caso, el tamaño de las mallas finas usadas durante cuadriculación dinámica (es decir, en el orden de metros o pies) podría no ser lo suficientemente pequeño como para la resolución necesaria de la frente térmico (es decir, del orden de centímetros).

La idea de desarrollar modelos de simulación es que permitan reproducir lo observado en el laboratorio en un simulador numérico de yacimientos y también cuantifiquen el desempeño de los procesos aplicados en los proyectos de campo. Tener un modelo cinético representativo es muy importante, ya que al realizar pruebas sobre diferentes tamaños de celda en una malla de simulación la respuesta es completamente diferente, lo cual genera el uso de varios modelos cinéticos para representar las pruebas experimentales y también genera la constante modificación de las variables cinéticas para observar perfiles similares a los obtenidos en pruebas de laboratorio y modelos de campo.

## **DESCRIPCIÓN DEL MODELO**

Este representa un tubo de combustión mediante el uso de una malla de tipo radial. Este tubo es sometido a la inyección de un determinado gas y consta de un arreglo en el cual se ubicó un pozo inyector en el tope y un pozo productor en la base. Gráficamente una vista de planta y una vista 3D del modelo se presentan a continuación en la **Figura 3**.

Este tubo de combustión fue sometido a un proceso de inyección de aire a nivel de laboratorio. En la **Tabla 1** se presentan las propiedades de la malla en la cual se representa el tubo de combustión las cuales se rigen por la definición geométrica de un cilindro y las propiedades correspondientes.



### Figura 3. Vista superior y vista 3D del tubo de combustión.

**Configuración de pozos.** El modelo tiene una configuración sencilla de pozos. El pozo inyector está ubicado en la capa superior en el tope del cilindro, siendo este el punto donde comienza la interacción del gas inyectado con las arenas de las capas internas. El periodo de tiempo empleado para la prueba fue de 24,03 horas. La ubicación exacta del pozo inyector es el bloque 1, 1, 1 mientras que el pozo productor está ubicado en 1, 1, 14, ambos conectados a superficie. La **Tabla 2** resume como se distribuyen las capas de distintos materiales del tubo. **Modelo composicional**. Los componentes en general son ocho, y tres de ellos corresponde al proceso denominado jumping o agrupamiento de fracciones composicionales. Por lo anterior es que se decide trabajar con el agrupamiento, para que por ejemplo, lo componentes que van desde la cadena n-C1 a n-C4 sean ingresados al proceso de simulación como un único componente con propiedades promedio de todas las fracciones que estén involucradas. En las **Tablas 3** y **4** se describen los componentes que hacen parte del modelo de combustión y sus respectivas propiedades.

Tabla 1. Características de la malla de modelo de combustión origina	
--	--

Propiedad	Característica	Propiedad	Característica
Tipo de malla	Radial	Bloques a lo largo de K	14
Rw	1.00E-05 cm	Dirección en K	Abajo
Divisiones	8	Radio del bloque más exterior	6,7 cm
Divisiones Theta	1	Barrido	360 °

### Tabla 2. Propiedades de las distintas capas del modelo de combustión

Sección del modelo	Tamaño (cm)
Divisiones de núcleo	0,9944 (Capas 1,2,3,4,5)
Capa acero y/o aislante	0,05 (Capa 6)
Capa acero y/o aislante	1,64 (Capa 7)
Capa acero y/o aislante	0,064 (Capa 8)
Tubo	6,726
Núcleo efectivo	4,972

### Tabla 3. Composición de las fases y propiedades básicas

Sustansia	Presión crítica	Temperatura crítica	Peso molecular
Sustancia	(Kpa)	(Celsius)	(Kg/gmol)
Agua	0	0	0
CO2	7376.49	31.05	0.04401
N2	3394.36	-146.95	0.028013
C1 toNC4	4633.9	-72.3333	0.017423
IC5toC20	1731.62	463.528	0.225072
C21toC30	1234.09	769.85	0.528764
02	5046	-118.55	0.031999
Coque			0.01313

52 Fundación Universidad de América - ISSN 2011 - 639X

	Sustancias						
Propiedad	Agua	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C1 TO NC4	IC5TOC20	C21 TO C30	
Densidad gmole/cm3	0	0.0203434	0.020856	0.0194945	0.00369065	0.00194624	
Compresibilidad 1/kPa	0	4.11E-06	4.22E-06	4.44E-06	7.90E-07	2.71E-07	
Coeficiente de expansión	0	0 0 00095202	0.0001970	0.00000050	0.000104029	1505.06	
térmica1 1/C	0	0.00065592	0.00091872	0.00092052	-0.000104238	1.502-00	
Coeficiente de expansión			5 77E 06	4 025 06	1705.06		
térmica 2 1/(C*C)	0	5.20E-00	5.77E-00	4.932-00	1.70E-06	5.52E-07	
Cruce de P-T 1/(kPa*C)	0	-8.56E-07	-7.98E-07	-3.34E-07	-4.30E-09	2.58E-10	

El coque por su parte tiene una densidad de 0,00138 Kg/ cm<sup>3</sup> y sus correspondientes coeficientes de expansión y compresibilidad son cero, ya que se trata de la única fase solida del sistema. Además el coque es el único componente que si trae asociado un coeficiente entálpico, siendo el primer coeficiente de correlación de capacidad térmica, siendo 17 J/ (gmole\*C) su valor ingresado al modelo.

**Reacciones químicas**. Como parte del modelo composicional se cuenta con la información estequiometria de las reacciones de óxido combustión. Dichas reacciones traen los reactantes y productos de cada reacción presentada en la prueba de combustión y sus cantidades exactas en cada caso junto con algunas propiedades como el factor de frecuencia de la reacción y la energía de activación. A continuación se presentan las cuatro reacciones (**Ecuaciones 1** a **4**) correspondientes al modelo de combustión y las propiedades de cada una (**Tablas 5** a **8**).

# Ecuación 1. Reacción química No. 1 del modelo original

$$1C_{21}$$
 to  $C_{30} \rightarrow 0.5374iC_{5}$  to  $C_{20}$  + 31,06 Coque

Propiedad	Valores default	Valor prueba
Factor de frecuencia	1.39E+15	
Entalpia	0 J/gmole	0 J/gmole
Energía de activación	0 J/gmole	2.095e5 J/gmole
Temp. inferior y superior	7 C - 1727 C	

### Tabla 5. Propiedades de la reacción 1

### Ecuación 2. Reacción química No. 2 del modelo original

 $1C_5 to C_{20} + 1,899639O_2 \rightarrow 0,540584 C_{11} to C_{30}$ 

### Tabla 6. Propiedades de la reacción 2

Propiedad	Valores default	Valor prueba
Factor de frecuencia	1.30E+00	
Entalpia	0 J/gmole	715673 J/gmole
Energía de activación	0 J/gmole	60000 J/gmole
Temp. inferior y superior	7 C – 1727 C	

### Ecuación 3. Reacción química No. 3 del modelo original

 $1iC_{21}$  to  $C_{30}$  + 3,63636 $O_2$   $\rightarrow$  49,131187 Coque

### Tabla 7. Propiedades de la reacción 3

Propiedad	Valores default	Valor prueba
Factor de frecuencia	1.00E+02	
Entalpia	0 J/gmole	1370191 J/gmole
Energía de activación	0 J/gmole	76700 J/gmole
Temp. inferior y superior	7 C – 1727 C	

### Ecuación 4. Reacción química No. 4 del modelo original

 $1,2825O_2 + 1Coque \rightarrow 0,565 H_2O + 1CO_2$ 

### Tabla 8. Propiedades de la reacción 4

Propiedad	Valores default	Valor prueba
Factor de frecuencia	4.00E+12	
Entalpia	0 J/gmole	5.409e5 J/gmole
Energía de activación	0 J/gmole	34000 J/gmole
Temp. inferior y superior	7 C – 1727 C	

Las cuatro reacciones presentadas que hacen parte del modelo, representan todas las interacciones entre componentes químicos durante el proceso térmico y sus porcentajes de error referencia que porcentaje está variando con respecto a las concentraciones teóricas. La energía de activación más elevada corresponde a la reacción 1 siendo esto a causa de la gran cantidad de energía que se requiere para romper el componente más pesado en dos compontes diferentes por acción térmica.

## CAMBIOS REALIZADOS EN EL MODELO

Al modelo base se le realzaron una serie de cambios en el número de celdas tanto radial, como verticalmente, con el fin de observar el impacto que tienen estas variaciones en parámetros de resultados como son la producción acumulada de fluidos y la temperatura entre otros.

**Cambios en el número de celdas radiales.** Se realizaron modelos de 2, 3, 4, 10, 12 y 15 celdas a partir de original, el cual es de 5 celdas, estos se muestran en la **Figura 3**, en estos modelos no se realizaron cambios en ninguna otra variable. Se verificó que simularan las 24,03 horas igual que el original, en caso de que esto no sucediera se hacia el debido análisis de errores y se cambiaban los datos pertinentes, siempre y cuando dichos cambios de control numérico funcionaran correctamente en el modelo original.

El comportamiento de la temperatura promedio de cada modelo en comparación con el original se muestra **Gráfica 1**, la gran diferencia con los modelos de baja densidad de celdas es debido a que no genera un pico de combustión.



### Figura 4. Modelos de radiales realizados a partir del original

## Gráfica 1. Temperatura promedio de los modelos con cambio de resolución radial en las celdas, comparados con el original



La comparación de la producción acumulada se muestra en la **Gráfica 5** donde se ve que los modelos de baja resolución llegan a una temprana estabilización a las 4 horas tan y como ocurre con la temperatura y la tasa de producción, los modelos de más celdas tienen un comportamiento bastante similar al del modelo original, sin embargo con producciones más bajas de alrededor de 3400 cm<sup>3</sup>.



# Gráfica 2. Producción acumulada de petróleo de los modelos con cambios en la resolución radial de celdas comparados con el original

Como puede verse, los modelo de menor resolución de celdas no generan el mismo comportamiento ya que no existe acumulación ni combustión, mientras que los modelo de mayor resolución tienden a comportarse igual. Por dicha razón se realizan sensibilidades a dichos modelos para tratar de determinar un ajuste.

**Cambios en el número de celdas verticales.** Se realizaron modelos de 3, 6, 9, 15, 18 y 21 celdas verticales a partir de original, el cual es de 12 celdas sin contar la capa superior e inferior (las cuales son mallas de alta permeabilidad). Los resultados de estos modelos se muestran en la **Figura 5**, en estos modelos no se realizaron cambios en ninguna otra variable y al igual que con las celdas radiales, se verificó que simularan las 24,03 horas igual que el original con el ajuste numérico antes mencionado.

En la **Gráfica 3** se muestra la temperatura promedio de los modelos, se puede observar claramente que el aumento de la temperatura es inversamente proporcional al número de celdas La **Gráfica 4** corrobora lo observado en las gráficas anteriores con respecto al modelo de 3 celdas verticales, puesto que el aumento de temperatura para el pico de combustión es más lento de lo normal en los otros modelos, la acumulación de petróleo también se genera casi 6 horas después del resto y en menor proporción.

Nuevamente puede ver que para modelos de menor resolución de celdas, en especial el caso del modelo de 3 celdas, no existe acumulación suficiente y que los demás modelos están cerca del comportamiento. Dichos modelos también son escogidos para sensibilizar.

## SENSIBILIDADES REALIZADAS

Los parámetros de ajuste se identificaron y se escogieron teniendo en cuenta que estos deben ayudar a representar de mejor forma los procesos de combustión a escala de campo, estos son los end points, la tasa de transferencia de calor y los factores de frecuencia, la **Figura 6** resume las sensibilidades realizadas a los modelos.



### Figura 5. Modelos de celdas verticales realizados a partir del original

Gráfica 3. Temperatura promedio de los modelos con cambios en la resolución vertical de celdas comparados con el original





# Gráfica 4. Producción acumulada de petróleo de los modelos con cambios en la resolución vertical de celdas comparados con el original

Puntos finales de las tablas de permeabilidad (End points). Estos puntos, de tanto las curvas de permeabilidad relativa agua–aceite, como las de gas–líquido, pueden modificarse para realizar ajustes en los modelos. En este caso se realizaron una serie de ajustes independientes a todos los modelos con el fin de observar si estas variables generaban algún cambio. Para su observación se sensibilizaron en los siguientes intervalos: Kwiro: 0.1 a 1 y Krgcw: 0.02 a 1

**Tasa de transferencia de calor.** Al igual que con la permeabilidad relativa, se le realizaron sensibilidades independientes a todos los modelos entre el rango de 2000 a 4500 con el fin de llegar a un ajuste con esta propiedad.

**Factor de frecuencia**. Es la frecuencia con la que ocurren colisiones en las reacciones químicas por unidad de volumen. En este estudio se realizaron sensibilizaciones individuales para cada modelo con cada una de los cuatro factores de frecuencia de la siguiente manera:

- Factor de frecuencia reacción 1: 1e14 a 1e16
- Factor de frecuencia reacción 2: 0 a 4
- Factor de frecuencia reacción 3: 50 a 300
- Factor de frecuencia reacción 4: 1e9 a 1e11

Energía de activación. La energía de activación suele utilizarse para denominar la energía mínima necesaria para que se produzca una reacción química dada. Para que ocurra una reacción entre dos moléculas, éstas deben colisionar en la orientación correcta y poseer una cantidad de energía mínima. En este caso se sensibilizaron los valores de activación de las reacciones 2 y 3.

- Energía de activación reacción 2: 30,000 a 80,000
- Energía de activación reacción 3: 50,000 a 100,000





## **RESULTADOS OBTENIDOS**

A partir de las sensibilidades anteriores se escogieron los mejores resultados en las variables observadas. Al realizarse todas las variaciones con los distintos modelos, se pudo observar que el mejor comportamiento se obtuvo con los cambios en el número de celdas verticales, debido a que fueron más uniformes, como ya se dijo antes, los modelos con cambios en el tamaño de núcleo no se pueden ajustar debido a que en esos casos hay mayor o menor cantidad de petróleo que puede reaccionar. La **Tabla 9** enseña los mejores valores de cada sensibilidad, es decir, qué sensibilidades se acercaron más a la historia de producción.

	No. celd	Kwro	Krgcw	Trans. de calor	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	EA 2	EA 3
	2	0.47	0.02	4346	6.90E+14	0.3	260	1.0E+08	63500	80500
dial	3	0.52	0.17	3718	8.30E+14	2.36	62.8	2.6E+10	61500	78300
ón ra	4	0.4	0.02	1733	5.00E+13	2.8	137.5	7E+10	73450	76000
oluci	10	0.31	0.14	2541	1.72E+14	2.56	235.9	6.3E+11	68000	68900
Res	12	0.33	0.02	2500	4.40E+14	0.55	75.8	4.8E+10	71700	67500
	15	0.4	0.04	2550	4.70E+14	3.8	115,5	7.6E+10	68900	71200
	3	0.95	0.02	4000	9.40E+15	2.2	170	9E+13	65000	73400
rtical	6	0.79	0.07	2767	3.90E+14	4.14	102.63	4E+12	53450	87900
n ve	9	0.92	0.15	2625	3.30E+13	0.3	231.25	6.7E+11	67500	82500
lució	15	0.14	0.25	2300	7.60E+12	0.4	87.5	4.3E+12	50500	76900
Reso	18	0.73	0.27	3125	3.40E+12	1.9	50	1E+11	57000	73600
	21	0.68	0.23	2976	4.87E+12	2.4	96.3	2.3E+11	70000	72350

## Tabla 9. Mejores valores de cada sensibilidad realizada a modelos de resolución

Con los datos anteriores se generaron curvas y sus respectivas ecuaciones como se ve en la **Tabla 10.** 

## Tabla 10. Ecuaciones de ajuste radial y vertical de cada propiedad

Variable	Modelos radiales	Modelos verticales
Kwiro	$F(F_{kwr}) = a + b * \cos(c * F_{kee} + d)$	$F(F_{Kwr}) = a + b * F_{Krv}$
Krgcw	$F(F_{kwr}) = \frac{1}{A + B \ln(x) + C \ln(x)^2}$	$F\left(F_{kgr}\right) = ab^{x}x^{c}$
Transferencia de calor	$F(F_{ttr}) = \frac{a \times b + c \times F_{ttr}^{d}}{b + F_{ttr}^{d}}$	$F(F_{ttr}) = a \times b^{F_{ttv}} \times F_{ttv}^{c}$
Factor 1	$F(F_{f1r}) = a + b \times F_{f1r} + c \times F_{f1r}^{2} + d \times F_{f1r}^{3}$	$F\left(F_{f^{1\nu}}\right) = \frac{a}{1 + e^{b - cx}}$
Factor 2	$F(F_{f^{2r}}) = a \times (b - e^{-C \times F_{f^{2r}}})$	$F(F_{f_{2v}}) = a \times b^{1/F_{f_{2v}}} \times Ff_{2v}^{C}$

### 60 Fundación Universidad de América - ISSN 2011 - 639X

L	ÍNEA DE INVESTIGACIO	ÓN: SIMULACION	DE YACIMIENTOS	Y RECOBRO MEJORADO

Variable	Modelos radiales	Modelos verticales
Factor 3	$F(F_{f^{3v}}) = a \times (b - e^{-C \times F_{f^{2r}}})$	$F(F_{f_{3v}}) = \frac{a}{1 + \left(\frac{F_{f_{3v}}}{b}\right)^{c}}$
Factor 4	$F(F_{f^{4v}}) = \frac{a}{1 + b \times e^{-C \times F_{f^{4r}}}}$	$F(F_{f_{4v}}) = a \times F_{f_{4v}}^{b/F_{f_{4v}}}$
Energía 2	$F(F_{ea2r}) = \frac{a}{\left(1 + e^{b - cx}\right)^{1/d}}$	$F(F_{ea2v}) = a + bx + cx^2 + dx^3$
Energía 3	$F\left(F_{ea3r}\right) = \frac{1}{a+bx+cx^3}$	$F(F_{ea3v}) = \frac{1}{A + B\ln(x) + C\ln(x)^3}$

## APLICABILIDAD DE LOS RESULTADOS

Para aplicar los resultados obtenidos en los ajustes se utilizaron dos modelos a escala de campo, un modelo base y un modelo escalado a partir de este, el cual contiene el 13% de celdas del modelo base. Estos modelos están diseñados para un proceso de inyección de aire. En primer lugar se tomaron los datos de ambos modelos, los cuales se muestran en la **Tabla 11** y se generaron dos factores de escala, uno horizontal, el cual se aplica en las ecuaciones

Ecuación 5. Factor de escalamiento horizontal

Factor escalamiento horizontal = 
$$\frac{[nX*nY]modelo\ escalado}{[nX*nY]modelo\ base} = 0.26862$$

### Ecuación 6. Factor de escalamiento vertical

Factor escalamiento vertical = 
$$\frac{[nZ]modelo\ escalado}{[nZ]modelo\ base}$$
=0.516129

Estos factores de escalamiento se aplicaron a las ecuaciones respectivas, dando lugar a resultados areales y verticales como se ve en la **Tabla 12**, el factor volumétrico es el producto resultante entre los valores horizontales y verticales.

ajustadas de las sensibilidades radiales y uno vertical que se aplica en las ecuaciones de las sensibilidades verticales, estos se muestran en las **Ecuaciones 5** y **6**.

# Tabla 11. Dimensiones de los modelos a escala de campo

	Modelo original	Modelo escalado
nX	34	15
nY	29	17
nZ	31	16
Total celdas	30566	4080

Los factores volumétricos son aplicables al proceso de escalamiento, luego de multiplicarlos por cada valor del modelo base como se ve en la **Tabla 13**. Cabe resaltar que los modelos a escala de campo están diseñados con tres ecuaciones de combustión, por lo que el factor de frecuencia de la reacción 1 no aplica en estos casos. **Comparación de resultados.** De las **Gráficas 5** a la **9** se comparan los resultados de temperaturas, producción acumulada de petróleo y tasa de producción de petróleo del modelo base, el modelo escalado sin ajuste y el modelo con el ajuste para observar si estos cambios afectan los resultados.

Horizontal								
Kwiro	Trans	. calor	Factor 1 Fac		Fact	tor 2	Factor 3	
2.54	4.10	E-12	0.8	83	-14.15		18.83	
Fact	tor 4	Krg	gcw Ener		gía 2	Energía 3		
2.	68	0.0	078 1.1		47	47 1.084		
			Vert	tical				
Kr	Trans	. calor	Fact	tor 1 Factor		tor 2	Factor 3	
4.40	277	7.19	0.23		0.16 1.63		1.63	
Factor 4		Krg	gcw Enei		gía 2 Energi		gía 3	
0.9	90	0.0	75	1.0421		1.25		
Volumétrico								
Kwiro	Trans	. calor	Factor 1		Factor 2		Factor 3	
11.16	1.14	E-08	0.19 -2.30		30	30.77		
Factor 4		Krg	rgcw Ene		gía 2	Ener	inergía 3	
2.42E-08		0.00	0.00059		95	1.3	35	

### Tabla 12. Resultados de las ecuaciones de ajuste

### Tabla 13. Valores del modelo base y valores aplicables al modelo escalado

Valores Modelo Base							
Kwiro	Trans	calor	Fact	tor 1	Fact	tor 2	Factor 3
0.05	(	)	N	/A	7.65E+10		2.47E+10
Fact	or 4	Krg	jcw	Ener	gía 2	Ener	gía 3
10	36	-	1	60000		76700	
Datos de ingreso al modelo escalado							
Kr	Trans.	calor	Fact	tor 1	Factor 2		Factor 3
0.56	(	)	N	/A	-1.76E+11		7.60E+11
Fact	or 4	Krg	jcw	Energía 2		Energía 3	
2.51	E-05	0.00	059	717	00 102,394.5		394.5

62 Fundación Universidad de América - ISSN 2011 - 639X



### Gráfica 5. Producción acumulada de los modelos en el Pozo PZ06

Gráfica 6. Tasa de producción de los modelos en el Pozo PZ06





## Gráfica 7. Producción acumulada de los modelos en el Pozo PZ14

Gráfica 8. Tasa de producción de los modelos en el Pozo PZ14





### Gráfica 9. Temperatura promedio de los modelos

De las gráficas anteriores se puede observar que el ajuste numérico solo varía en una mínima proporción la temperatura promedio, y no afecta la producción acumulada, ni las tasa de producción de petróleo

### LIMITACIONES

La escala, debido a que al tener valores tan pequeños en el modelo base al ser variados drásticamente en los casos escalados no se genera una óptima representatividad de los comportamientos de producciones y propiedades. Otra limitación es que no si no se logra igual convergencia ante diferentes casos, se generan diversas posibilidades en términos numéricos que se ven reflejadas en los porcentajes de error de las ecuaciones de balance de materia.

## CONCLUSIONES

Las variaciones realizadas al modelo original tanto en términos de resolución de celdas areal y vertical, tamaño de núcleo y tipo de malla fueron importantes, ya que permitieron descartar variables que no alteraron la combustión y se pudieron atacar los problemas presentados de las variables más impactadas en proceso, siendo estas las candidatas a sensibilizarse como lo fueron las variaciones de tasas acumuladas, temperaturas promedio y por celda y composición de gases producidos. También por este mismo enfoque se pudo determinar los procesos posibles de cambio en el modelo original que deben ser tratados de otra manera o con más detalle como, por ejemplo la geometría de la malla.

Al momento de realizar la representación gráfica del comportamiento de los modelos más pequeños (tamaño y número de celdas) con respecto al modelo original se mostró que estos no pueden generar combustión y por consiguiente la tasas de acumulación de petróleo no se obtuvieron de la misma manera, tal como se vio en los resultados, ya que se obtenía menos petróleo en comparación al modelo base. Esto puede contrarrestarse mediante la variación de las propiedades térmicas del modelo como se constató con las pruebas realizadas durante la investigación.

Según el estudio realizado, la prueba de tubo de combustión tiene un rango de diseño en la cual tiene que haber una proporción entre el núcleo de arena y el anillo externo, debido a que si el anillo es muy delgado con respecto a la roca, se generarían pérdidas de calor considerables lo cual desencadena en que el tubo no llegue a una combustión óptima para la acumulación de crudo, lo que hace que los resultados no sean fidedignos.

Basados en la literatura se utilizaron tres variables para realizar el proceso de sensibilidades: coeficiente de transferencia de calor, permeabilidades relativas y factores de frecuencia de reacción. Dichas propiedades son recomendadas pues sus variaciones impactan en el equilibrio térmico de la roca lo cual termina desajustando las curvas originales de temperaturas y tasas de producción. Sin embargo usarlas no es garantía de que a través de ellas se logré un buen ajuste como quedó demostrado, ya que los factores de escala y geometría son determinantes.

Las variaciones en cuanto a resolución de malla son fácilmente impactadas en la combustión tanto en modelos de mayor o menor densidad. Esto se debe a que la distancia entre las celdas adyacentes se hace o más grande o más corta de acuerdo al caso, y por ende el aire inyectado durante la prueba de tubo de combustión pasara más rápido por una zona o más lento por la misma.

## REFERENCIAS

BELGRAVE, J.D.M, MO-ORE, R.G., MEHTA, R., URSENBACH, M., AND LAU-RENSHEN, C.J. Some Insights into the Low-Temperature and High-Temperature In-Situ Combustion Kinetics. Articulo SPE/DOE 24174 presentado en el Eighth Symposium on Enhanced Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, Abril 22–24, 1992. 12 p

BURGUER J.C. SAHU-QUET B.C. Chemical aspects of insitu combustion – heat of combustion and kinetics. Rueil-Malmaison, Francia. Octubre de 1972. Institute Français du petrole. 13 p

GUTIÉRREZ. D, MOORE. R.G, SPE, URSENBACH. M.G y MEHTA. S.A. The ABCs of InSitu Combustion Simulations: From Laboratory Experiments to the Field Scale. 15 p

HERNANDEZ. Nestor. Evaluación experimental del proceso de combustión in situ empleando crudo de la faja petrolífera del Orinoco. s.n., Caracas, Octubre de 2003, trabajo de Grado presentado a la Universidad Central de Venezuela para optar por el título de especialista en gerencia integrada de yacimientos de hidrocarburos. 122 p

LE THLEZ. Pierre A. Y. LEMONNLER Patrick A. Inst. Français du Petrole An In-Situ Combustion Reservoir Simulator With a New Representation of Chemical Reactions. 8 p

MARJERRISON, D.M. y FASSIHI. M.R. A Procedure for Scaling Heavy-Oil Combustion Tube Results to a Field Model. Articulo presentado en el octavo simposio de recobro mejorado de petróleo llevado a cabo en Tulsa, Oklahoma. Abril de 1992. 9 p

RODRÍGUEZ. E, ORDO-ÑEZ. A, COMAS. J, BEL-GRAVE. J y ALVAREZ. C. Superando Retos En El Modelamiento Numérico De Procesos De Combustión In Situ En Yacimientos De Crudo Pesado. Bogotá D.C. Colombia, Acipet: Noviembre de 2011 artículo presentado en el XIV Congreso Colombiano del Petróleo. 8 p

SARATHI, Partha. In situ combustion handbook – principles and practices, 1998, Bartlesville, Oklahoma. BDM petroleum technologies. 424 p.