

# SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE INYECCIÓN DE AGUA EN UN MODELO FÍSICO ESCALADO 3D

Fernando Wilson Londoño Galvis<sup>1</sup>, Carlos Eduardo Naranjo Suarez<sup>2</sup>, Samuel Fernando Muñoz Navarro<sup>3</sup>

## RESUMEN

En el presente trabajo se muestra el proceso para simular un proceso de inyección de agua en el Equipo de Desplazamiento Radial, EDR. La metodología empleada, fue el conocimiento de las partes que lo conforman, el entrenamiento en su manejo y operación, la selección de la técnica de empaquetamiento del medio poroso. Seleccionada la técnica de empaquetamiento teniendo en cuenta la estabilidad estructural, la repetitividad y reproducibilidad de las propiedades petrofísicas y el tiempo de construcción, se planteó un procedimiento para la fabricación de medios porosos sintéticos para modelos físicos.

Adicionalmente, mediante la realización de pruebas preliminares en modelos en acrílico y en el EDR se identificaron e implementaron mejoras para garantizar el éxito de las pruebas las cuales incluyen procedimientos técnicos de ensayo, manejo de los datos obtenidos, los empaques a emplear y el sistema de monitoreo/control. Finalmente, se simuló físicamente un proceso de desplazamiento en el EDR presentando los resultados obtenidos de las pruebas realizadas.

**Palabras Claves:** Modelo físico, modelo físico escalado, modelo 3D, medios porosos sintéticos, Simulación física, Inyección de agua.

## SIMULATION OF A WATERFLOODING PROCESS IN A PHYSICAL SCALED MODEL 3D

## ABSTRACT

The objective of this work is to show the proceedings to simulate a water injection process in the Radial Displacement Equipment, EDR. The methodology used the recognizability of the parts that make, training in handling and operation, selection of packaging technique of the porous medium. Packing technique selected considering the structural stability, repeatability and reproducibility of the petrophysical properties and construction time, it was proposed a method for the manufacture of synthetic porous media to physical models.

Additionally, by carrying out preliminary tests on models in acrylic and the EDR were identified and implemented improvements to ensure the success of the tests which include technical testing procedures, data collected management, packaging to be used and the system monitoring / control. Finally, displacement process was simulated in the EDR presenting the results of tests carried.

**Keywords:** Physical model, scaled physical model, 3D model, synthetic porous media, physical simulation, waterflooding.

1. Ingeniero de petróleos, Candidato a Msc. en Ingeniería de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia. E-mail: fernandowil.londono@ecopetrol.com.co

2. Msc. en Ingeniería de Hidrocarburos. ICP-Ecopetrol. Piedecuesta, Colombia. E-mail: carlosed.naranjo@ecopetrol.com.co

3. Msc. en Ingeniería de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. E-mail: samuel@uis.edu.co

## INTRODUCCIÓN

Una de las herramientas con la que cuentan la ingeniería de yacimientos para estudiar la factibilidad técnica de implementar procesos de recuperación de hidrocarburos, son las pruebas de desplazamiento en modelos físicos y físicos escalados. Estos experimentos, se realizan en laboratorio y permiten estudiar un fenómeno particular a nivel cualitativo y cuantitativo.

Los modelos físicos escalados, son la reproducción simplificada de fenómenos y dispositivos que ocupan un gran espacio físico y temporal. Específicamente, en ingeniería de yacimientos este tipo de modelos permiten, a partir del principio de similitud la simulación física de procesos de desplazamiento y el escalamiento a campo; es decir, llevar los resultados obtenidos en laboratorio a nivel de campo.

La exactitud de estos modelos depende de los criterios que previamente se escalaron haciendo uso de técnicas como el análisis dimensional e inspeccional.

## RESEÑA HISTÓRICA

En 1942 Leverett [1], presentó el primer estudio de construcción y operación de modelos escalados junto con su teoría de flujo radial y lineal. Luego, en 1953 Rapoport y Leas [2], realizaron inyecciones lineales y presentaron las leyes de escalamiento incluyendo los efectos de capilares.

Rapoport en 1955 [3] formuló matemáticamente las leyes de escalamiento introduciendo la técnica de análisis inspeccional en las ecuaciones de flujo bifásico. En el mismo año Croes y Schwarz [4], presentaron los grupos adimensionales de un proceso de inyección de agua y analizaron el efecto de la relación de viscosidades aceite/agua sobre la eficiencia de recobro.

En 1956 Geerstma [5], empleo el análisis inspeccional y dimensional para obtener las leyes de escalamiento de procesos de inyección de agua caliente. Luego, Dietz y Baker [6] realizaron experimentos con inyección de agua usando los grupos propuestos por Geerstma.

Pujol y Boberg [7], desarrollaron un criterio de escalamiento para modelos a alta presión y demostraron la dificultad de escalar las fuerzas viscosas, gravitacionales y capilares en procesos de inyección de

vapor. Stegemeier en 1980 [8], aplico este enfoque para plantear un criterio a baja presión.

Kimber, Puttagunta y Farouq Ali en 1988 [9], propusieron cinco métodos de escalamiento de procesos de inyección de vapor. Kimber y Farouq Ali en 1989 [10], analizaron por medio de experimentos las fortalezas y debilidades de tres de los cinco criterios.

En 1993 Duarte [11], diseño un modelo escalado en dos dimensiones para la inyección de vapor involucrando un análisis de la formulación matemática. Uribe y Peralta [12], estudiaron el comportamiento de la inyección de agua en las arenas inferiores del campo Casabe utilizando técnicas de escalamiento.

Araque y Montañez [13], determinaron la permeabilidad absoluta en medios porosos en el modelo SCALA. Además, identificaron fallas del equipo y problemas con la técnica de empaquetamiento cuales causaban inestabilidad del mismo.

Posteriormente, Lesmes y Londoño [14], diseñaron un modelo físico de desplazamiento radial, aplicando las técnicas de escalamiento de procesos de inyección de vapor/agua junto con herramientas asistidas por computador.

Silva y Trujillo [15], mediante un análisis de sensibilidad concluyeron que parámetros como: tasa de inyección, dimensiones, porosidad y viscosidad son los que más inciden en el escalamiento de un proceso de inyección de agua. Trigos y Jerez [16], estudiaron el efecto de propiedades petrofísicas como porosidad, permeabilidad, saturaciones irreducibles y permeabilidades relativas, en el escalamiento de un proceso de inyección de agua.

Londoño, Muñoz y Rivera [17], rediseñaron su modelo físico siguiendo las metodologías de escalamiento para procesos de recobro mejorado. Adicionalmente, mediante simulación numérica estudiaron el comportamiento del prototipo de campo y modelo bajo los procesos estudiados.

Celis y De Castro [18], propusieron una correlación que relaciona la porosidad y la permeabilidad para la construcción de medios porosos sintéticos y realizaron pruebas de desplazamiento en medios porosos estratificados en un modelo físico escalado.

## METODOLOGÍA

### 1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE DESPLAZAMIENTO RADIAL, EDR

El EDR, es un modelo físico escalado de desplazamiento radial el cual se desarrolló aplicando las técnicas de escalamiento para procesos de inyección de agua/vapor y agua mejorada junto con herramientas de diseño e ingeniería asistida por computador. El modelo físico, está constituido por dos módulos independientes que se ensamblan entre sí [19- 22], ver figura 1.

En el primer módulo, están los sistemas hidráulico, de control/adquisición, generador de vapor y en el segundo modulo se ubica el portamedio poroso el cual contiene el medio poroso. A continuación se describen brevemente.

**Sistema hidráulico.** Está compuesto por líneas de flujo en acero inoxidable y teflón, dispositivos mecánicos, medidores analógicos y digitales, los cuales se encargan

de ejecutar las órdenes dadas por el usuario desde el sistema de control/adquisición de datos.

**Sistema de control/adquisición de datos.** Se cuenta con un software de monitoreo y control para indicar la información de la prueba, la apertura/cierre de válvulas, el sentido de flujo de los fluidos y el registro de los datos de temperatura y diferencial de presión.

**Generador de vapor [23].** Es un equipo para generar vapor a 689.5 KPa y temperatura de saturación de 433 K, con un rango de tasas de 0,1 – 4,0 cm<sup>3</sup>/min de agua equivalente mediante un sistema el cual permite el control de presión y nivel de fluidos en el equipo.

**Modelo físico radial.** Representa un cuarto de patrón de cinco puntos (25.6 x 25.6 x 3.6 cm), está compuesto por un portamedio poroso y una tapa con dos pozos ubicados en esquinas opuestas, ver figura 1b. Su principal función, es contener el medio poroso que será sometido a procesos de desplazamiento.

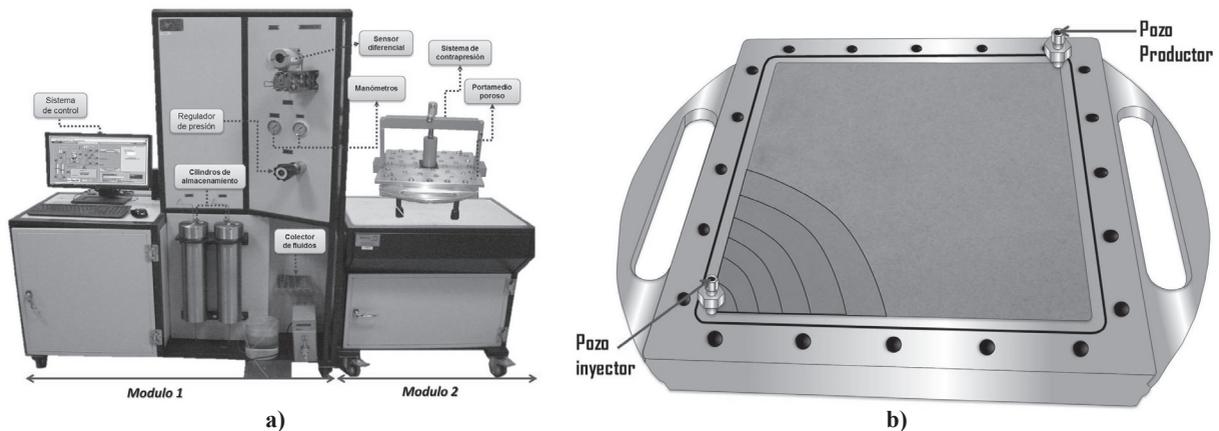


Figura 1. Equipo de desplazamiento radial, EDR.

### 2. SELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE CONSTRUCCIÓN DEL MEDIO POROSOS

Puesto que el medio poroso es un aspecto crítico en la simulación física, se estudiaron tres técnicas

para su fabricación; por inyección de una mezcla de arena/agua, en húmedo y con resina epoxi [24]. En el empaquetamiento por inyección, se introduce al modelo físico una mezcla de agua/arena, en la figura 2 a y b se muestra la configuración empleada y a partir de ella se evidencia que no hay un completo llenado de arena en el modelo.

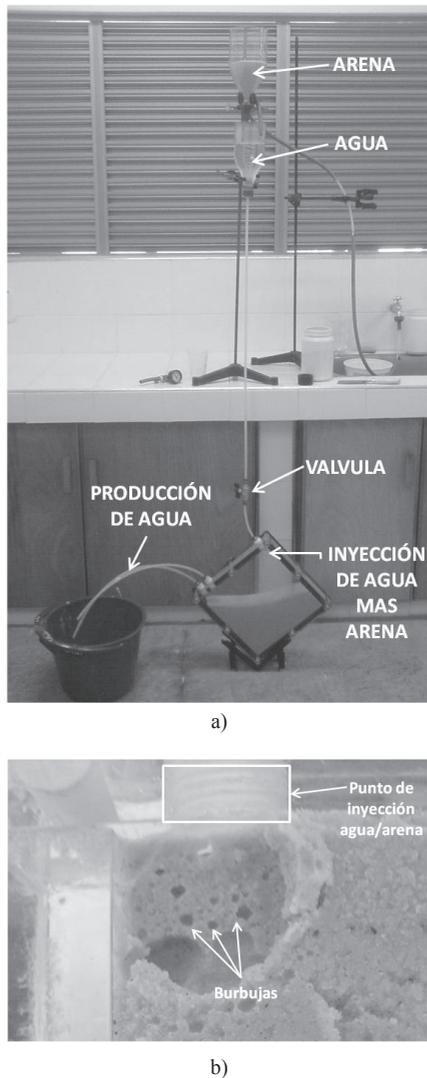


Figura 2. Empaquetamiento por inyección de agua más arena.

En la técnica en húmedo, se adiciona un volumen determinado de agua en el modelo y posteriormente se agrega la arena de forma gradual (Figura 3 a y b). Este proceso de empaquetamiento, es muy largo, presenta

problemas de formación de espuma y se debe tener mucho cuidado con los granos de arena que pueden quedar e los pozos inyector/productor y en los tornillos que cierran el modelo

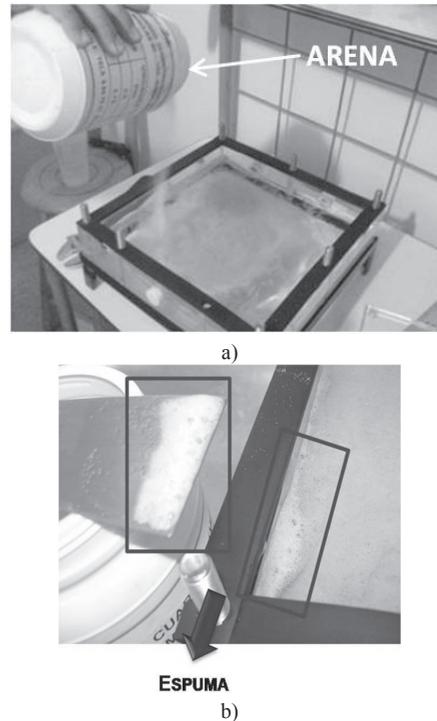


Figura 3. Empaquetamiento en húmedo.

En la fabricación de medios porosos sintéticos, se emplea arena y una solución epoxi la cual sirve como material cementante entre grano y grano. En esta técnica, uno de los aspectos claves es el proceso de mezcla puesto que la resina debe ser homogénea en toda la muestra.

Para el proceso de selección, se analizaron aspectos como la estabilidad estructural, la repetitividad y reproducibilidad de las propiedades petrofísicas y el tiempo requerido de construcción, ver tabla 1.

Tabla 1. Comparación de las técnicas de empaquetamiento de medios porosos.

Criterios	Por inyección	En húmedo	Sintético
Tiempo de construcción	Más de dos semanas	8 horas	55 min
Estabilidad	No hay	Regular	Excelente
Resistencia térmica, mecánica	No hay	No hay	Excelente
Costos, pesos colombianos de 2013	\$536.500	\$536.500	\$602.083
Repetitividad	No hay	No hay	Alta
Reproducibilidad	No hay	No hay	Alta
Problemas	Obstrucción	Espuma	Vapores
Nro. de pruebas	10	12	50
Pruebas de construcción	12	7	50
Pruebas de desplazamiento	Ninguna	Ninguna	15
Problemas	Taponamiento, no hay compactación.	Arena en pozos y en fluidos producidos.	

Con base en los resultados, se seleccionó la técnica con resina epoxi por sus ventajas con respecto a las otras técnicas y por la posibilidad extraer y de fabricar una muestra (plug) para medir propiedades petrofísicas básicas y especiales.

Posteriormente, se identificaron las variables de respuesta, controlables y no controlables (figura 4) para establecer el procedimiento de construcción teniendo en cuenta el tipo y tiempo de curado, resistencia térmica/mecánica, proporción y forma de mezclar la arena/resina, repetitividad y reproducibilidad de las propiedades. Como resultado se planteó una metodología de fabricación de medios porosos sintéticos.

A continuación se describe el procedimiento.

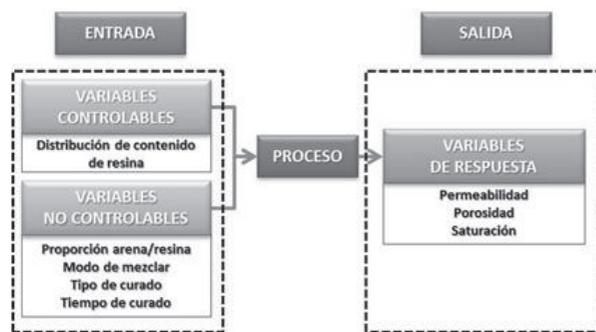


Figura 4. Variables de respuesta, controlables y no controlables.

- **Medir la masa de arena a emplear.** Es necesario contar con una balanza, para el presente estudio se requiere de 4.1 kg de arena.
- **Calcular el volumen de resina [25].** Por cada 20 gr de arena, se usa 1 cm<sup>3</sup> de resina por tanto se requieren 225 cm<sup>3</sup> de solución.
- **Mezclar arena más resina.** Se debe agregar la arena a la resina y mezclar en cuatro etapas hasta que sea homogénea. Primero se mezclan 1025 gr de arena con la resina, luego cada 20 minutos se agregan 1025 gr.
- **Llevar al portamedio poroso.** Se debe llevar la mezcla al portamedio poroso de forma secuencial compactándola en capas nivelando la superficie con la ayuda de un pisón, ver figura 5.
- **Dejarsecar.** El curado, se debe realizar a temperatura de 60-80 °C (factores como la humedad, tamaño y geometría de la muestra aumentan el tiempo de curado).

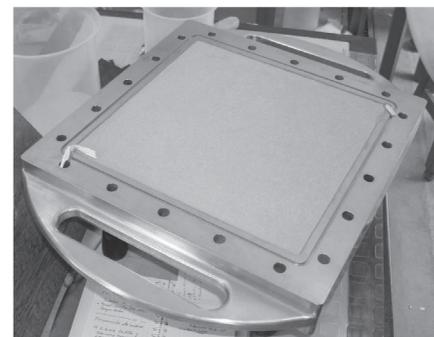
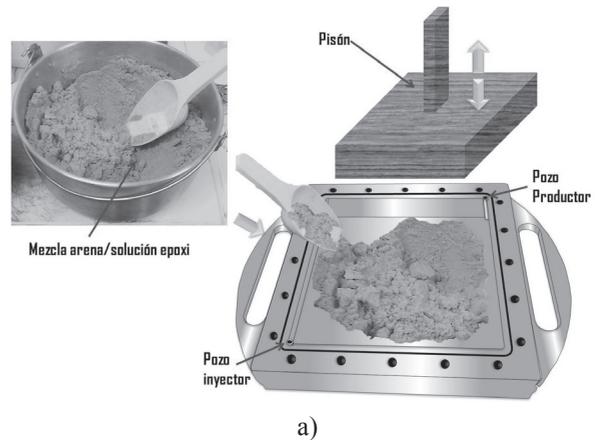


Figura 5. Procedimiento de construcción de medios porosos en el EDR.

Para el desarrollo de esta metodología, se realizaron 50 pruebas de construcción de las cuales 30 fueron plug y 20 en modelos físicos (16 modelos en acrílico y 4 en el EDR). La tabla 2 muestra un resumen de las pruebas realizadas.

Tabla 2. Resumen de pruebas de construcción de medios porosos.

Tipo muestra	Nro. de pruebas	Objetivo
Plug	30	Procedimiento de fabricación, repetitividad y reproducibilidad, adherencia al metal, selección empaque, resistencia mecánica/térmica, curado en caliente/frío.
Escala EDR	8	Modificación en la fabricación, saturación con agua/aceite, selección empaque.
Modelo lineal	3	Prueba de desplazamiento para evaluar el flujo del agua y aceite mineral
Modelo areal	3	Prueba de desplazamiento, prueba de saturación 100% de agua del medio poroso.
EDR en acrílico	2	Evaluar la metodología, tiempo límite de fabricación. Prueba de desplazamiento.
EDR	4	Pruebas de desplazamiento en el EDR.
<b>Total</b>	<b>50</b>	

### 3. PRUEBAS PRELIMINARES

Para garantizar el éxito de las pruebas de desplazamiento, se realizaron pruebas para la selección de los fluidos desplazante/desplazado y de desplazamiento.

**Selección de fluidos.** Se realizaron pruebas de determinación de densidad y viscosidad al aceite mineral, búcaros, gourmet y ACPM seleccionando este último por su relación de movilidad con el agua (Tabla 3).

Tabla 3. Propiedades de los fluidos

	Densidad, g/cm <sup>3</sup>	Viscosidad, cp
Ace. búcaros	0,914	51,49
Ace. gourmet	0,911	58,27
Ace. mineral	0,85	36,55
ACPM	0,85	4,20
Agua destilada (II)	1,00	1,00

**Problemas para el desarrollo de las pruebas de desplazamiento.** Se realizaron cuatro pruebas de desplazamiento en el EDR pero en las dos primeras se presentaron inconvenientes que ocasionaron su interrupción.

**Prueba 1.** Se empleó como fluidos desplazante y desplazado el agua y aceite mineral, el medio poroso se fabricó con 4500 gramos de arena 80-100 y 225 cm<sup>3</sup> de solución epoxi. Saturado el medio poroso con agua y aceite, se procedió a simular físicamente un proceso de inyección de agua a una tasa de un 1.0 cm<sup>3</sup>/min.

A partir de la figura 6 a, se puede observar que después de 27 minutos de iniciada la prueba se presenta un rápido incremento en la producción del agua indicando la canalización. Motivo por el cual, se detuvo la prueba para analizar los resultados concluyendo que:

- Debido a la rigidez del empaque superior del portamedio poroso y a los orificios de las termocupas, no hay un completo contacto entre el empaque y la tapa, ver figura 6 b.
- El medio poroso saturado de agua y aceite mineral, presenta una mayor restricción al fluido desplazante, lo cual ocasiona que el fluido se mueva por donde hay menos restricción al flujo, ver figura 6 b.
- La manera como se cierra el modelo no es apropiada debido a la inexactitud del ajuste entre la tapa y la base del molde. Motivo, por el cual fue necesario replantear este procedimiento y realizarlo en forma de brida.

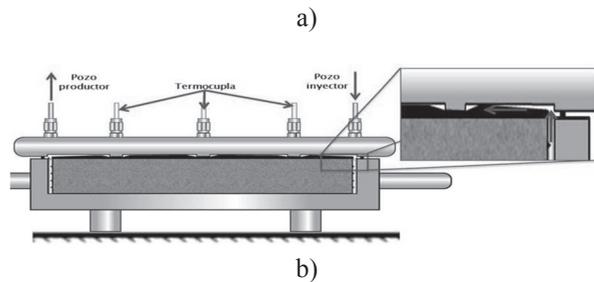
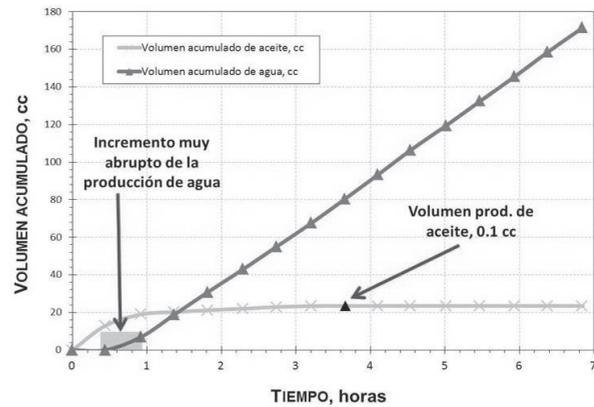


Figura 6. Resultados de primera prueba de desplazamiento en el EDR.

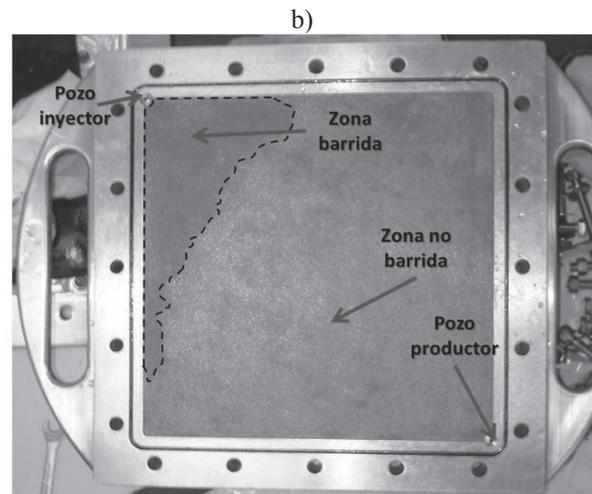
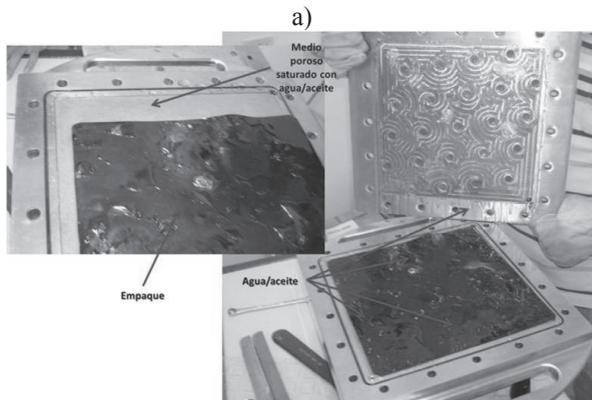
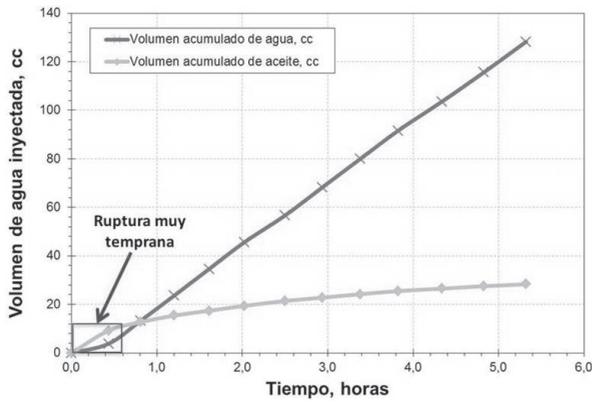
**Prueba 2.** Se usaron los mismos fluidos y el medio poroso se construyó de igual forma que en la prueba 1. Saturado el medio poroso con agua y aceite, se procedió a inyectar agua a una tasa de un 0.5 cm<sup>3</sup>/min.

Por otra parte, se usó un empaque más flexible y de mayor espesor para evitar la ruptura temprana del agua. A partir de la figura 7 a, se observa que a los 26 minutos de iniciada la prueba, se produjeron 3.8 cm<sup>3</sup> y se incrementa rápidamente indicando la canalización. Motivo por el cual, se desmontó el medio poroso para su análisis respectivo, ver figura 7 b y c.

A partir de las observaciones realizadas, se concluyó que:

- El empaque empleado entre la tapa y el portamedio poroso no presenta la forma geométrica requerida, su material es aún muy rígido y de espesor irregular.
- El sistema de control, no realiza cálculo de permeabilidad, las lecturas del diferencial de presión no se registraban.
- El desmolde del medio poroso, permitió evidenciar la necesidad de desarrollar elementos para optimizar este procedimiento y no afectar la integridad física del EDR.

- Se debe garantizar que el medio se sature 100% con agua.
- Es necesario seleccionar fluidos con mejor relación de movilidad. Motivo por el cual, se realizaron pruebas de determinación de densidad y viscosidad.



**Figura 7.** Resultados de segunda prueba de desplazamiento en el EDR.

**Cambios efectuados para el desarrollo de las pruebas.** Identificados los problemas de las pruebas 1 y 2, se procedió a realizar las siguientes modificaciones.

- Se cambió el empaque entre la tapa y el medio poroso, para evitar la canalización durante las pruebas.
- El empaque, se seleccionó teniendo en cuenta la resistencia térmica, química, mecánica observada durante las pruebas realizadas. A partir de los resultados obtenidos, se optó por el acetato de vinilo por no reaccionar con solución epoxi y por su adherencia a la superficie metálica.
- La hermeticidad se obtiene con un buen empaque y cierre en forma de brida.
- Se evidenció la necesidad de usar una tapa en acrílico para identificar las zonas donde se presentaba la canalización de los fluidos.
- El sistema de control se adecuó para el cálculo de la permeabilidad absoluta y registrar los datos en excel en un intervalo de tiempo seleccionado.
- Se realizó registro fotográfico y en video de la pruebas.
- Para saturar el medio 100 % con agua, se debe usar una combinación de tasas bajas, en las cercanías de los pozos inyector/productor y altas en la zona media del modelo.

## RESULTADOS

Con los resultados de las pruebas 1 y 2, y los cambios efectuados se realizaron las pruebas de desplazamiento 3 y 4 con el propósito de estudiar la repetitividad de los resultados obtenidos. En las dos pruebas, se emplearon como fluidos desplazante y desplazado el agua y ACPM, y el medio poroso se construyó de igual forma. A continuación se describen brevemente:

**Prueba 3.** Se inició el proceso de inyección de agua a una tasa de 0.5 cm<sup>3</sup>/min, se almacenaron los fluidos producidos en tubos de ensayo de 13 cm<sup>3</sup> y se registraron los resultados en una bitácora. La figura 8 muestra el comportamiento de la producción acumulada de ACPM (Np), en función del tiempo transcurrido y del volumen poroso de agua inyectada.

A partir de la figura, se puede observar que se produjeron 142.5 cm<sup>3</sup> de ACPM después de transcurridas 4.61 horas de la prueba, este tiempo corresponde a la producción

de la primera gota de agua en el tubo de ensayo número 11 momento en el cual se habían inyectado 0.17 VP de agua.

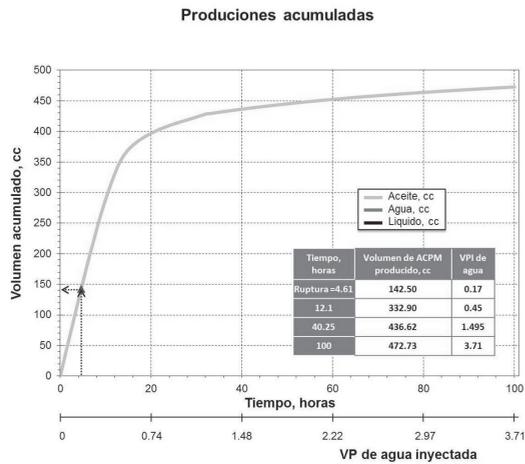


Figura 8. Producción acumulada de ACPM de la prueba 3 en el EDR.

Luego de transcurridas 12.1, 40.25 y 100 horas las producciones acumuladas de ACPM fueron respectivamente 332.9, 436.6 y 472.7 cm<sup>3</sup> que corresponden a 0.45, 1.495 y 3.71 VPI. La figura 9 muestra la producción de agua acumulada durante el desplazamiento, a partir de ella se puede verificar el tiempo de ruptura.

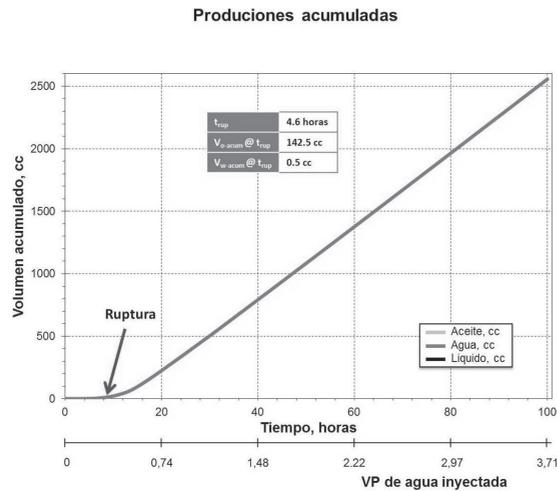


Figura 9. Producción acumulada de agua de la prueba 3 en el EDR.

Las figuras 10 y 11 muestran los cortes y tasas de producción de agua y aceite de la prueba de desplazamiento 3, a partir de los resultados que se presentan en cada una de las figuras se ve que el equipo

EDR representa el comportamiento típico de un proceso de inyección de agua. Por tanto, se puede decir que el equipo esta calibrado y sus resultados se pueden escalar a campo.

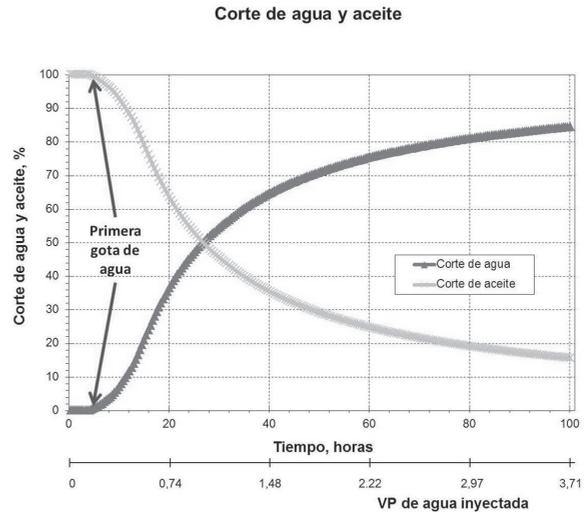


Figura 10. Cortes de agua y ACPM de la prueba 3 en el EDR.

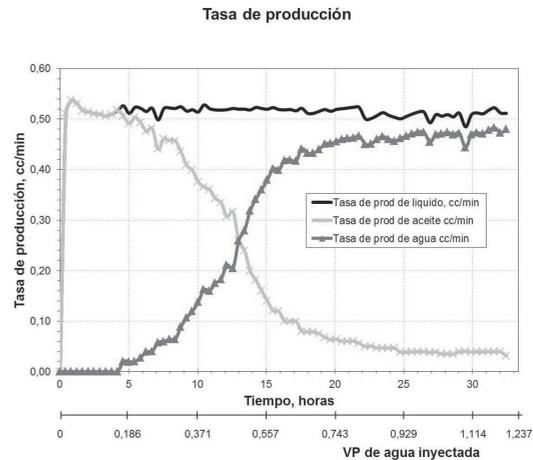


Figura 11. Tasa de agua y ACPM de la prueba 3 en el EDR.

**Prueba 4.** Con el propósito de estudiar la repetibilidad de los resultados, se llevó a cabo la prueba 4 siguiendo el mismo procedimiento realizado en las demás pruebas pero ejecutado por otra persona. La figura 12 muestra las producciones acumuladas de las pruebas 3 y 4, de ella se puede ver que las producciones al cabo de 4.61, 12.1, 40.25 y 80 horas fueron 151, 336.76, 442.14 y 464.33 cm<sup>3</sup> de ACPM con una desviación de 5.97, 1.16, 1.26 y 0.11 por ciento con respecto a la prueba 3, lo cual indica que los resultados son muy similares.

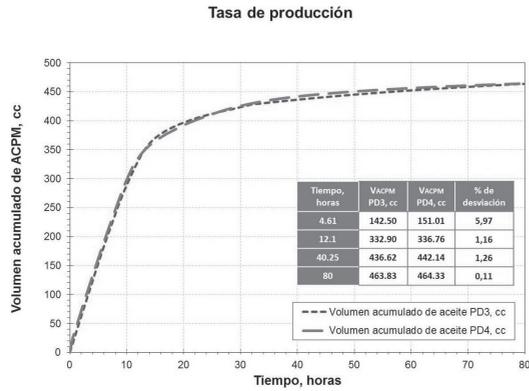


Figura 12. Comparación de las producciones acumuladas de ACPM de las prueba 3 y 4.

Debido a que el tiempo de ruptura en la figura 12 no se puede identificar fácilmente, se debe estudiar otras graficas como la producción acumulada de agua, cortes de agua y aceite de las pruebas. Las figuras 13a y b presentan las producciones acumuladas de agua durante las pruebas de desplazamiento, de ellas se puede ver que el tiempo de ruptura de la prueba 3 y 4 ocurren a los tiempo de 4.61 y 4.46 horas, es decir presentan una diferencia de 9 minutos lo cual significa una desviación de 3.25 por ciento entre ellas.

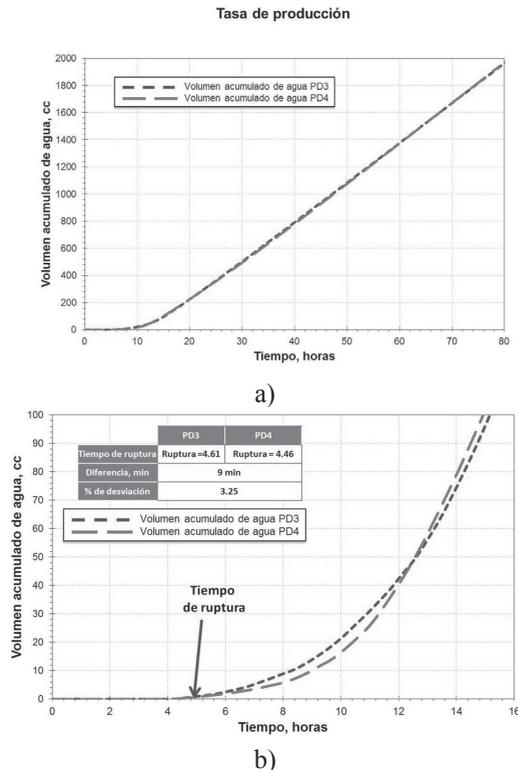


Figura 13. Comparación de la producción acumulada de agua en las pruebas 3 y 4.

Los cortes de agua y aceite para las pruebas se presentan en la figura 14, de ella se puede observar que los comportamientos de las pruebas 3 y 4 son muy similares salvo en el periodo comprendido entre las 8 a 10 horas, donde presentan desviación de menos del 2%.

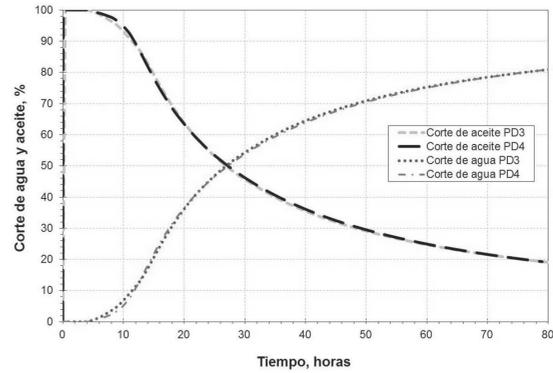


Figura 14. Cortes de agua y ACPM de las pruebas 3 y 4 en el EDR.

**Propiedades de flujo.** En el presente estudio no fue posible determinar las presiones del medio poroso, por tanto no se determinaron experimentalmente las curvas de permeabilidades relativas. No obstante, por medio del balance de materia y realizando una corrección por volumen muerto en la línea de producción del equipo se determinaron la saturación de agua irreducible y el aceite residual. A continuación se describen brevemente.

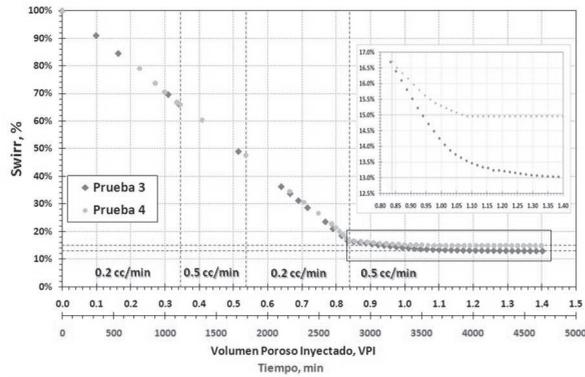
**Saturación de agua irreducible.** Se determino empleando la ecuación 1 y teniendo en cuenta que el volumen poroso está saturado 100% con agua. Además, fue necesario medir el volumen de agua producido de agua al tiempo que se satura con aceite hasta que produzca solo este.

$$S_{wirr} = \frac{VP - (Wp_{wirr} + VM_{wirr})}{VP} \times 100 \quad (1)$$

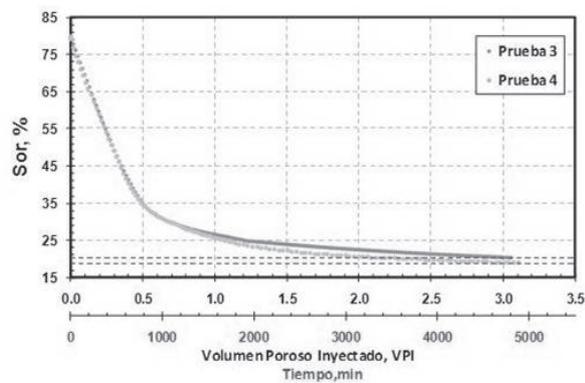
**Saturación de aceite residual.** Se requiere inyectar agua o salmuera al portamedio poroso, para recolectar y medir la cantidad de aceite hasta que se produzca solo agua; la saturación de aceite residual se determina según la siguiente ecuación:

$$S_{or} = \left[ 1 - (S_{wirr} + \left( \frac{AP_{sor} + VM_{sor}}{VP} \right)) \right] \times 100 \quad (2)$$

La figura 15 a y b presenta los resultados de las pruebas 3 y 4 en la determinación de la saturación de agua irreducible y aceite residual contra el VPI/tiempo. A partir de ella se puede observar la saturación de agua irreducible 13-15 % y el aceite residual presenta un valor entre un 19-20%.



a)



b)

Figura 15. Determinación de la  $S_{wirr}$  y  $S_{or}$  a partir de las pruebas de desplazamiento.

### CONCLUSIONES

- Mediante la realización de experimentos en modelos físicos en acrílico y en el EDR, se identificaron parámetros críticos en el proceso de construcción de medios poroso y en el desarrollo de pruebas de desplazamiento. Como resultado, se planteó e implementaron procedimientos técnicos de ensayo para garantizar la repetitividad y reproducibilidad de la simulación física de la inyección de agua.
- Los modelos físicos escalados son una herramienta muy útil a la hora de estudiar el efecto de parámetros como la tasa de inyección, eficiencias de barrido, viscosidades y razón de movilidades sobre un proceso de inyección de agua. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que es difícil satisfacer el conjunto completo de grupos dimensionales y que en laboratorio es difícil de reproducir un

par de curvas de permeabilidad que satisfagan los requerimientos de la técnica de escalamiento aplicada a procesos de inyección de agua.

- Se habilitó y puso en marcha un modelo físico escalado 3D, mediante el uso de modelos físico en acrílico y pruebas de desplazamiento, con el objetivo de escalar y simular físicamente procesos de inyección de vapor, agua y agua mejorada.

### RECONOCIMIENTOS

Los autores de este artículo expresan su agradecimiento a COLCIENCIAS, al Grupo de Investigación Recobro Mejorado, a Ecopetrol S.A.-ICP por el apoyo y la colaboración suministrada para la realización de este trabajo.

### NOMENCLATURA

- $AP_{sor}$  = Aceite producido durante la prueba,  $cm^3$ .
- $Np$  = Producción acumulada de aceite,  $cm^3$ .
- $S_{or}$  = Saturación de aceite residual, fracción.
- $S_{wirr}$  = Saturación de agua irreducible, fracción.
- $VM_{wirr}$  = Volumen muerto en la línea de producción,  $cm^3$ .
- $VM_{sor}$  = Volumen muerto en la línea de producción,  $cm^3$ .
- $VP$  = Volumen poroso.
- $VPI$  = Volumen poroso inyectado.
- $WP_{wirr}$  = Agua producida durante la prueba de  $S_{wirr}$ ,  $cm^3$ .

### REFERENCIAS

1. LEVERETT, M. C., LEWIS, W. B., TRAE, M. E.: "Dimensional-Model Studies of Oil-Field Behavior". Transactions of the AIME. 1942, vol 146, num 1, p. 175.
2. RAPOPORT L. A., Leas, W. J.: "Properties of Linear Waterfloods". Transactions of the AIME. 1953, vol 198, p.139.
3. RAPOPORT L. A. "Scaling Laws for Use in Design and Operation of Water-Oil Flow models". Published in Petroleum Transactions. 1955, vol 204.

4. CROES G. A., SCHWARZ N.: "Dimensionally Scaled Experiments and the Theories on the Water Drive Process". Transactions of the AIME. 1955, vol 204, p. 35.
5. GEERTSMA, J., CROES, G. A., SCHWARZ, N.: "Theory of Dimensionally Scaled Models of Petroleum Reservoir". Transactions of the AIME. 1956, vol 207, p.459.
6. DIETZ, D. N.: "Hot Water Driver", Proc., Seventh World Pet. Cong., Ciudad de Mexico. 1967, vol 3, p. 451.
7. PUJOL, L. y BOBERG, T. C.: "Scaling Accuracy of Laboratory Steam-flooding Models", SPE 4191". California Regional Meeting of the SPE. Noviembre, 1972.
8. STEGEMEIER, G. L., LAUMBACH, D. D., VOLEK, C. W.: "Representing Steam Processes with Vacuum Models". SPE Journal. 1980, vol 20, num 3.
9. KIMBER, K. D., FAROUQ ALI, S. M., PUTTAGUNTA, V. R. "New Scaling Criteria and their Relative Merits for Steam Recovery Experiments". Journal of Canadian Petroleum Technology. 1988, vol 27, num 4, p. 86-94.
10. KIMBER, K. D., FAROUQ ALI, S. M.: "Verification of Scaling Approches for Steam Injection Experiments". Journal of Canadian Petroleum Technology. 1989, vol. 28, num 1, p. 40-47.
11. DUARTE, A.: "Diseño de un modelo escalado en dos dimensiones para inyección de vapor" ECOPETROL – ICP 1993.
12. URIBE, J. y PERALTA, R. "Estudio del Comportamiento de la Inyección de Agua en las Arenas Inferiores del Bloque I del Campo Casabe Utilizando Técnicas de Escalamiento". Tesis de grado. Director: Samuel Fernando Muñoz Navarro. Universidad Industrial Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2000.
13. ARAQUE, David y MONTAÑEZ, Ana. "Habilitación del Equipo Modelo de Inyección de Cinco Puntos SCALA". Tesis de Grado. Director: Samuel Fernando Muñoz Navarro. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2005.
14. LONDOÑO, Fernando., LESMES, Juan. "Diseño de un modelo físico de desplazamiento radial para simular procesos de recobro de hidrocarburos". Trabajo de grado. Director: Samuel Fernando Muñoz Navarro. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos y mecánica, 2006.
15. SILVA, Néstor y TRUJILLO, Martha. "Análisis de Sensibilidad de Parámetros de Escalamiento en un Patrón de Cinco Puntos Sometido a Inyección de Agua". Tesis de Grado. Director: Samuel Fernando Muñoz Navarro. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2006.
16. TRIGOS, Erika y JEREZ, Carlos. Análisis de Sensibilidad para Determinar el Efecto de las Propiedades Petrofísicas sobre el Escalamiento de un Proceso de Desplazamiento Inmisible. Tesis de Grado. Director: Samuel Fernando Muñoz Navarro. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2008.
17. LONDOÑO G., MUÑOZ N. y NARANJO S. "Desarrollo de un modelo físico de desplazamiento radial para simular procesos de recobro de hidrocarburos". COLCIENCIAS, ECOPETROL, UIS, 2011.
18. CELIS L., DE CASTRO O. "Estudio experimental de procesos de inyección de agua en el equipo de desplazamiento radial con medios porosos estratificados". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2012.
19. LONDOÑO GALVIS, Fernando Wilson; MUÑOZ NAVARRO, Samuel Fernando y NARANJO SUAREZ, Carlos Eduardo. Manual de operación del equipo de desplazamiento radial. GRM, Marzo 2011.
20. LONDOÑO GALVIS, Fernando Wilson; MUÑOZ NAVARRO, Samuel Fernando y NARANJO SUAREZ, Carlos Eduardo. Manual de mantenimiento del modelo físico de desplazamiento radial para simular procesos de recobro de hidrocarburos. GRM, Marzo 2011.
21. LONDOÑO GALVIS, Fernando Wilson; MUÑOZ NAVARRO, Samuel Fernando y NARANJO SUAREZ, Carlos Eduardo. Guía rápida para el manejo y operación del EDR. GRM. Diciembre 2010.

22. LONDOÑO GALVIS, Fernando Wilson; MUÑOZ NAVARRO, Samuel Fernando y NARANJO SUAREZ, Carlos Eduardo. Manual de procedimientos de ensayo en el equipo de desplazamiento radial. GRM, Diciembre 2010.
23. CASTIBLANCO G., MORANTES D.: "Diseño y construcción de un prototipo de Generador de vapor eléctrico para procesos de recobro térmico en un modelo físico de desplazamiento radial". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2008.
24. LONDOÑO GALVIS, Fernando Wilson. Informe de investigación: Fabricación de medios porosos en modelos físicos escalados para pruebas de desplazamiento. GRM. 2009.
25. BECERRA V., W.: "Escalamiento de inyección de agua en un modelo de cinco puntos". Instituto Colombiano del Petróleo, Enero de 2009.

---

**Recepción:** 21 de Septiembre de 2013

**Aceptación:** 19 de Diciembre de 2013