

EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL FINGERING VISCOSO

Adriana Fornés, Fernando Arévalo, Bibiana Castiglione

Grupo de Física de Líquidos y Medios Porosos – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Cuyo

Abstract

El fingering viscoso es un fenómeno que se presenta cuando un líquido de menor viscosidad desplaza a otro de mayor viscosidad en un medio poroso. Puede ser miscible o inmiscible. Este último aparece cuando se realiza recuperación secundaria de petróleo y afecta a la productividad ya que, debido a él, no toda el área es barrida por el agua.

No existe un modelo teórico que explique el fingering inmiscible. Desde la década del cincuenta éste es estudiado experimentalmente con la celda de Hele - Shaw. La misma consiste en dos placas de vidrio paralelas, separadas no más de 1 mm, la cual es saturada con un líquido que luego es desplazado por otro de menor viscosidad. La experiencia es filmada y estudiada mediante tratamiento de imágenes. Este tipo de experiencias ha permitido avanzar mucho en el conocimiento fenomenológico del fingering. Las experiencias, hasta la fecha, han sido realizadas a temperatura ambiente.

En este trabajo se presentan modificaciones a una celda de Hele Shaw radial, de configuración five spot invertido que permitieron su termostatación, se muestran resultados experimentales del fingering inmiscible de líquidos de reología newtoniana, en función de la temperatura ente 21°C y 80°C y se analizan los efectos sobre: velocidad, eficiencia areal y longitud de onda crítica, comparándolos con los cambios producidos en la viscosidad y la tensión interfacial debido a la variación de la temperatura.

La velocidad de la interfaz aumenta con la temperatura. La eficiencia areal, si se mide, como es habitual en el momento en que la primera gota del líquido desplazante aparece en uno de los orificios "productores" disminuye con la temperatura, este proceso es menos marcado a medida que transcurre el tiempo.

La longitud de onda crítica también aumenta con la temperatura, lo que hace que aparezcan menos dedos y por lo tanto, a la larga se favorezcan las canalizaciones.

Si bien estos resultados no son extrapolables en principio en su totalidad, debido a que las variaciones de viscosidad y tensión interfacial son características de cada fluido, se considera un avance interesante el poder estudiar el efecto de fingering inmiscible a temperaturas de reservorio, ya que, como se muestra en este trabajo los resultados son muy diferentes a los encontrados a temperatura ambiente

1 – INTRODUCCIÓN

El fenómeno de fingering viscoso se produce cuando un fluido de menor viscosidad desplaza a otro de mayor viscosidad. Por ello se produce en la recuperación secundaria de petróleo.

El mismo consiste en la aparición de inestabilidades en la interface en las cuales partes del fluido empujante penetran en el empujado (figura 1), y la superficie límite entre ambos fluidos adquiere una forma de guante, de allí el nombre de fingering viscoso o digitación viscosa que recibe el fenómeno. Este efecto es contrarrestado por la tensión interfacial que va a tratar que la superficie de la interfaz tenga el menor valor posible. Es importante tener en cuenta que el fingering viscoso se produce aunque el desplazamiento ocurra en un medio poroso absolutamente homogéneo. En cuanto a la aplicabilidad de estos conocimientos al movimiento de fluidos en reservorios, ello indica que, se producirán canalizaciones en una recuperación secundaria, aunque no se trate de un yacimiento de doble permeabilidad y ni siquiera existan heterogeneidades en el mismo.

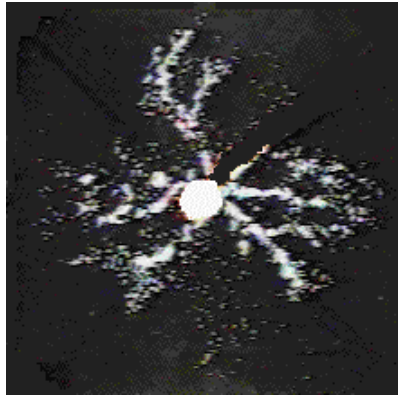


Figura 1. Imagen de un fingering viscoso producido al desplazar petróleo con agua en un lecho de esferas de vidrio

Este fenómeno hace que no toda el área de un reservorio sea tocada por el agua, dejando petróleo sin desplazar en el subsuelo, por lo que es importante conocer las leyes que lo rigen para poder evitarlo dentro de lo posible y así aumentar la producción de petróleo.

Desde 1951 ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾, se evalúa este tipo de fenómeno con un dispositivo llamado celda de Hele Shaw. La misma consiste en dos placas de vidrio paralelas separadas una distancia inferior a 0.001 m. Puede probarse que en el desplazamiento de fluidos en este dispositivo se cumple la ley de Darcy si la permeabilidad equivale a $b^2/12$, siendo b la separación entre placas. Con ella se han evaluado no sólo recuperaciones secundarias, sino también terciarias para ver el efecto de agregar sustancias químicas en el agua de inyección.

A este tipo de estudios pueden hacerse varias críticas:

- 1) Muchas veces los fluidos utilizados no han sido agua de inyección y petróleo sino glicerina o aceites siliconados, de similares valores de viscosidad, desplazados por agua destilada. Si bien este tipo de estudios favorece la comprensión de los fenómenos físicos involucrados en la experiencia, no representa la realidad ya que, tanto el petróleo como el agua de formación son fluidos multicomponentes, muchas veces con cargas que afectan a la tensión interfacial, y frecuentemente en el petróleo coexisten dos o más fases, debido a la presencia de agua emulsionada, sólidos, aglomerados de asfaltenos y/o parafinas, y por lo tanto tiene un comportamiento no newtoniano
- 2) Las placas de vidrio paralelas no simulan todos los fenómenos que suceden en un reservorio, en particular no muestran el entrampamiento de la fase no mojante en los espacios interporales, simplemente porque no existen espacios interporales. Este problema fue tratado en una publicación anterior ⁽⁶⁾ y
- 3) Las experiencias se realizan a temperatura ambiente que, obviamente no es la misma que tienen los reservorios y tanto la viscosidad como la tensión interfacial, magnitudes que intervienen en este proceso, dependen de la temperatura.

El presente trabajo se dedica a solucionar el problema planteado en los dos últimos puntos con los siguientes objetivos: diseñar y construir un equipo experimental capaz de termostatar la celda de Hele Shaw; estudiar el comportamiento del fingering viscoso inmiscible en función de la temperatura con fluidos puros de comportamiento newtoniano; en particular, la eficiencia areal, la longitud de onda crítica y la velocidad de la interfaz y por último analizar las consecuencias de este tipo de estudios en la recuperación secundaria de petróleo.

2 TEORÍA

El fingering viscoso inmiscible, al contrario que el miscible, no ha sido completamente estudiado hasta la fecha. No se conocen con precisión sus causas y no se ha formulado una teoría matemática que lo pueda predecir en todo sus aspectos. Sin embargo, hay algunas magnitudes que pueden cuantificarlo de alguna manera.

Elas son: la eficiencia areal, la velocidad crítica y la longitud de onda crítica.

La eficiencia areal ⁽⁷⁾ es la relación entre el área barrida por el agua y el área que habría barrido de no existir el fingering viscoso (flujo pistón) total y se calcula como:

$$E_a = A_b/A_t \quad (1)$$

La velocidad crítica ⁽⁷⁾ se define a partir del concepto de presión crítica. La ecuación de estabilidad para un flujo bifásico inmiscible fue postulada por Collins en 1979, aplicando determinadas condiciones de contorno a la ecuación de Darcy. La ecuación encontrada es la siguiente:

$$-\Delta P_c = (L \Delta \rho g \sin \alpha) / (1 - M^0) - L \rho_1 g \sin \alpha \quad (2)$$

La velocidad superficial crítica correspondiente a esta presión está dada por:

$$v_c = (k \lambda_{rl}^0 \Delta \rho g \sin \alpha) / (M^0 - 1) \quad (3)$$

A partir de la velocidad crítica las condiciones para el crecimiento de los dedos pueden ser resumidas en:

$v < v_c$: crecimiento estable

$v > v_c$: crecimiento inestable

$v = v_c$ crecimiento neutro

Puede demostrarse, a partir de (2) y (3) que la condición de estabilidad es $M^0 < 1$

Como la forma de “guante” que adquiere la interfaz puede ser asimilable a una onda ⁽⁷⁾, se ha utilizado la teoría de ondas para explicar este efecto. Según ella los dedos pueden crecer cuando la longitud de onda es mayor que una longitud de onda crítica dada por:

$$\lambda_c = (C/3) \left\{ (k \lambda_{rl}^0 \sigma_{12}) [(M^0 - 1)(v - v_c)] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

donde C es la llamada constante de Choke por Peters quien determina $C = 25$ para desplazamientos inmiscibles sin agua residual presente como será el caso de las experiencias que se presenten en este trabajo.

En estas tres ecuaciones las magnitudes que varían con la temperatura son la viscosidad y la tensión interfacial. En líquidos puros y newtonianos éstas cumplen con la ley de Eyring y la de Eotvos respectivamente. La primera prevé una variación exponencial de la viscosidad con la temperatura:

$$\eta = \eta_0 \exp(-bT) \quad (5)$$

donde b es una constante característica de cada fluido y la segunda una variación lineal de la tensión interfacial con la misma:

$$\sigma = \sigma_0 + cT$$

donde c es una constante característica de cada fluido

3. - METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 – EQUIPO EXPERIMENTAL

La celda tradicional de Hele Shaw se muestra en la figura 2. En ella hay dos placas de vidrio paralelas como ya se dijo, iluminadas desde abajo. Entre la fuente de iluminación y la celda hay colocado un difusor de luz para asegurarse iluminación pareja en toda la celda. La configuración elegida para este trabajo es la five spot invertido, es decir, cuatro pozos productores simulados

mediante orificios que se encuentran en la mitad de cada una de las caras y un pozo inyector en el centro de la misma. Se utilizó una separación entre placas de 0,005 m. Las placas miden 0,32 m x 32 cm.

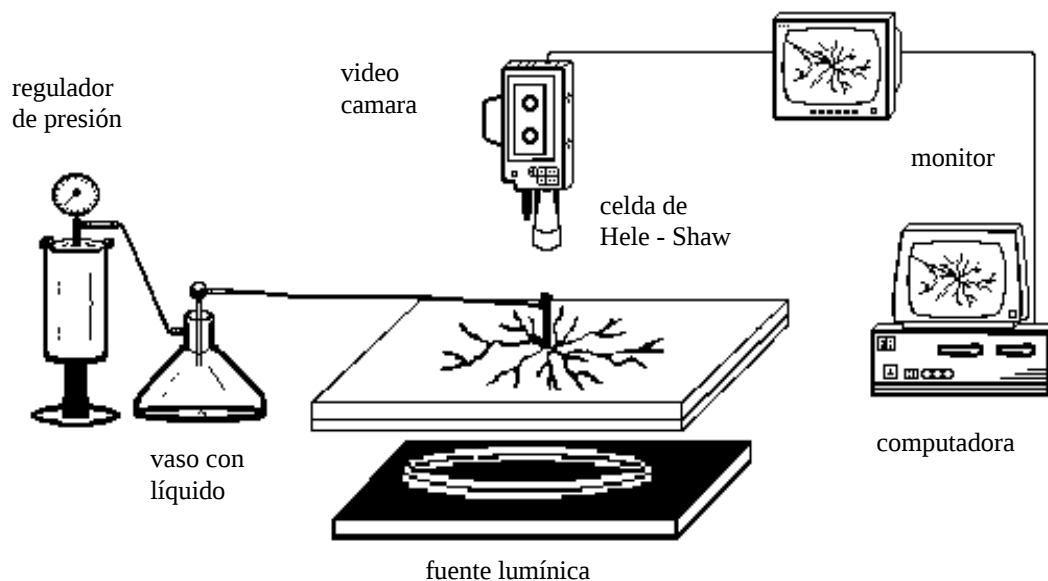


Figura 2: esquema de celda de Hele Shaw convencional

Las experiencias son filmadas y los datos son transmitidos a una PC donde son tratados mediante un software adecuado.

En el presente trabajo la celda fue colocada dentro de una cámara termostaticante que está realizada en material aislante con radiadores infrarrojos en la parte central de cada cara. Cuatro termocuplas calibradas y conectadas a un controlador de temperatura son colocadas en cada uno de los pozos productores. La cámara termostaticante tiene en la parte superior un vidrio térmico de 0,015m de espesor que permite filmar las experiencias sin pérdida significativa de calor.

Previo a la realización de las experiencias se controló la constancia de la temperatura en toda la celda, encontrándose un gradiente máximo de $0.06^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ (equivale a $6^{\circ}\text{C}/\text{m}$ en el SI).

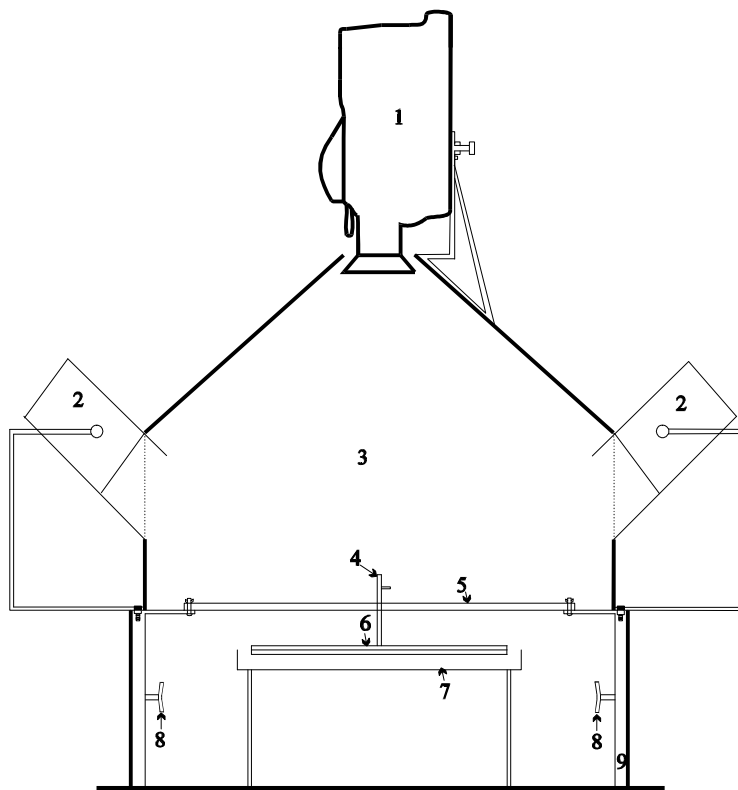
Además se colocó una cámara oscurecedora con fuentes de luz que iluminan oblicuamente la cara superior de la fuente. Tanto la inclinación de las caras de esta cámara como la inclinación de las fuentes de luz fueron calculadas para minimizar los reflejos ya que los mismos, en el tratamiento de imágenes, debido a que el petróleo es negro, pueden ser confundidos con zonas tocadas por el agua. Un esquema de todo el sistema se muestra en la figura 3

3.2 – EXPERIENCIAS REALIZADAS

Como el objetivo de este trabajo no es evaluar una recuperación secundaria sino encontrar las leyes empíricas del comportamiento de fingering viscoso con la temperatura las experiencias se realizaron con líquidos puros de comportamiento newtoniano.

Ellas fueron realizadas con agua destilada coloreada de rosado desplazando aceite siliconado. El colorante fue elegido de manera que no alterara la tensión superficial del agua.

La temperatura de inyección fue la misma a la que se termostaticó la celda. Se realizaron experiencias a 21°C , 50°C y 80°C . Las figuras 4a y 4b muestran las imágenes a los 3 segundos de haber comenzado las experiencias a 35°C y 80°C respectivamente y las 5a y 5b muestran la imagen



Referencias

- | | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 1 Video cámara | 2 Sistema de luces |
| 3 Cámara oscurecedora | 4 Canal de ingreso de líquido |
| 5 Vidrio transparente | 6 Celda de Hele-Shaw |
| 7 Bandeja para recuperar líquido | 8 Emisor infrarrojo |
| 9 Aislación | |

Figura 3: esquema de celda de hele Shaw termostatzada (corte lateral)

al momento del corte a las mismas temperaturas.

De la filmación obtenida se seleccionaron imágenes en el momento del corte y a los cuatro segundos de haber comenzado la experiencia. Las imágenes fueron digitalizadas y la eficiencia areal calculada como:

$$E_a = \text{píxeles rosados} / \text{píxeles totales que hubieran habido de ser el desplazamiento estable}$$

Además se realizaron las curvas de viscosidad en función de la temperatura del aceite y del agua.

Los resultados se muestran en las figuras 6 y 7 respectivamente

Se midió la tensión interfacial agua-aceite en función de la temperatura. El resultado se muestra en la figura 8.

3.3 RESULTADOS OBTENIDOS

De las experiencias realizadas se midieron los tiempos que tardó el dedo mayor en salir por uno de

los orificios, para cada una de las diferentes temperaturas. A fin de obtener el comportamiento del fenómeno en función de la velocidad, se evaluó la eficiencia areal en función del tiempo. Los resultados se muestran en la figura 9.

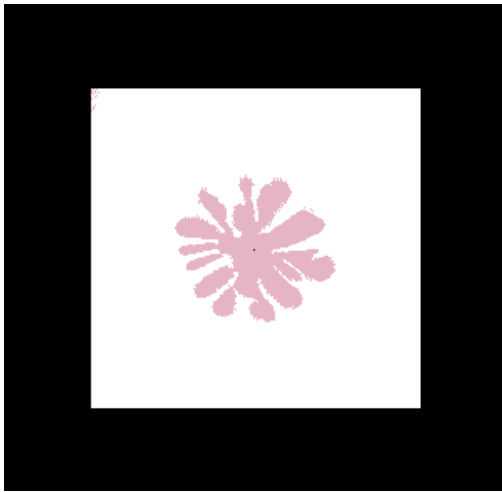


Figura 4a: avance del frente a los 3 segundos y a 35°C de temperatura.

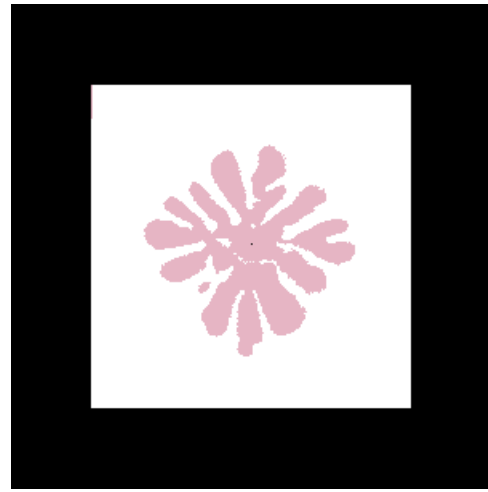


Figura 4b: avance del frente a los 3 segundos y a 80°C de temperatura.

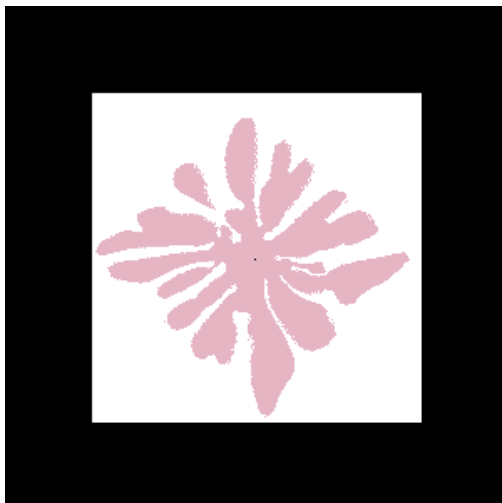


Figura 5a: avance del frente al momento de irrupción del frente por un productor y a 35°C de temperatura..

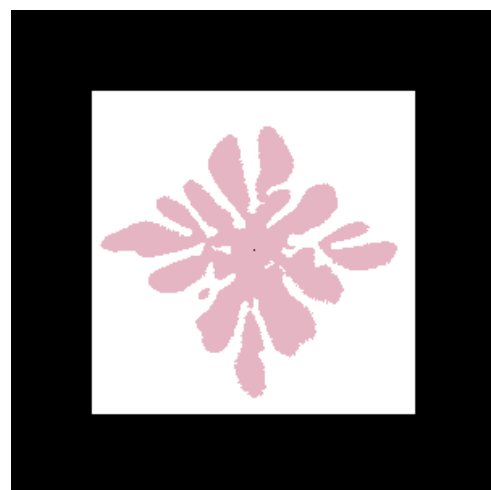


Figura 5b: avance del frente al momento de irrupción del frente por un productor y a 80°C de temperatura.

Mediante tratamiento de imágenes se midió la longitud de onda crítica y la eficiencia areal en el momento del corte y 4 segundos después de haberse comenzado las experiencias.

La figura 10 muestra la variación de la longitud de onda en función de la temperatura.

Las figuras 11 y 12, son la eficiencia areal en función de la temperatura, en el momento de la irrupción del agua por un productor y a los cuatro segundos de haberse comenzado la inyección, siendo este tiempo, para todas las temperaturas, mayor que el de la irrupción. La figura 13 es un gráfico comparativo de las dos.

4 ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES

Del análisis de las figuras 6 y 7 se puede observar que el agua tiene una variación más marcada con la temperatura que el aceite, lo que hace que, a mayores temperaturas la relación de movilidades haya disminuido sólo el 5%, mientras que la tensión interfacial, disminuyó el 10% (figura 8).

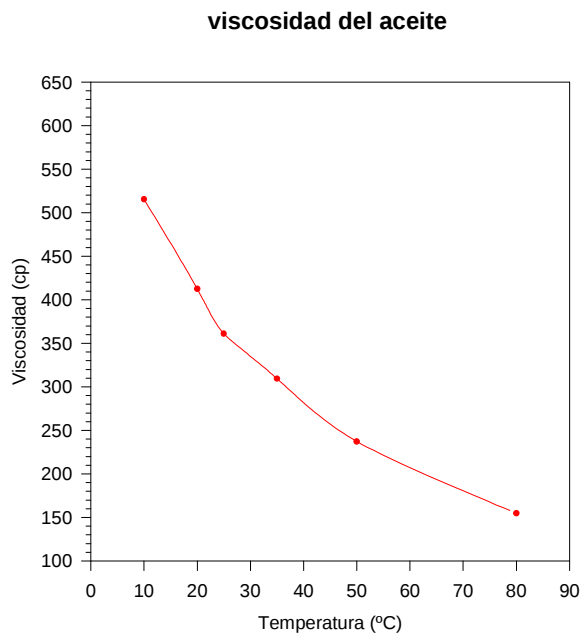


Figura 6: viscosidad del aceite en función de la temperatura

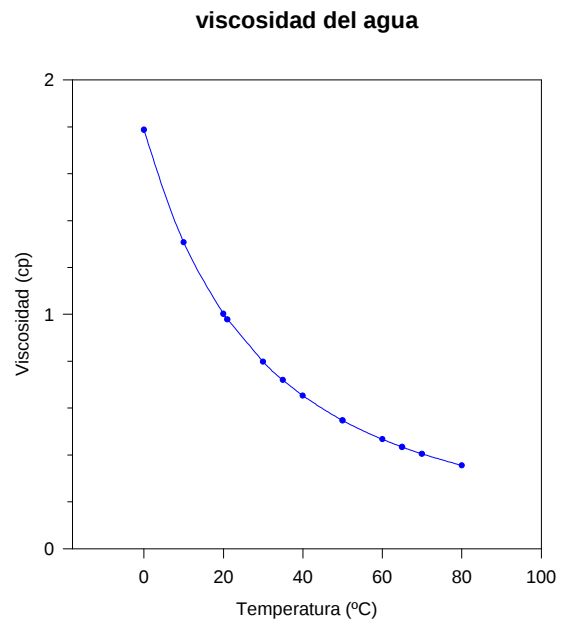


Figura 7: viscosidad del agua en función de la temperatura.

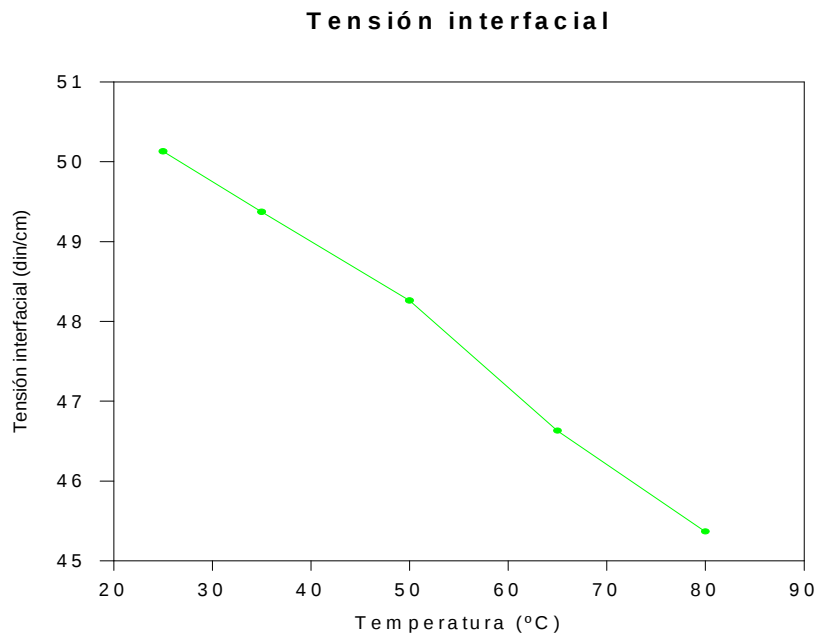


Figura 8: tensión interfacial agua-aceite en función de la temperatura

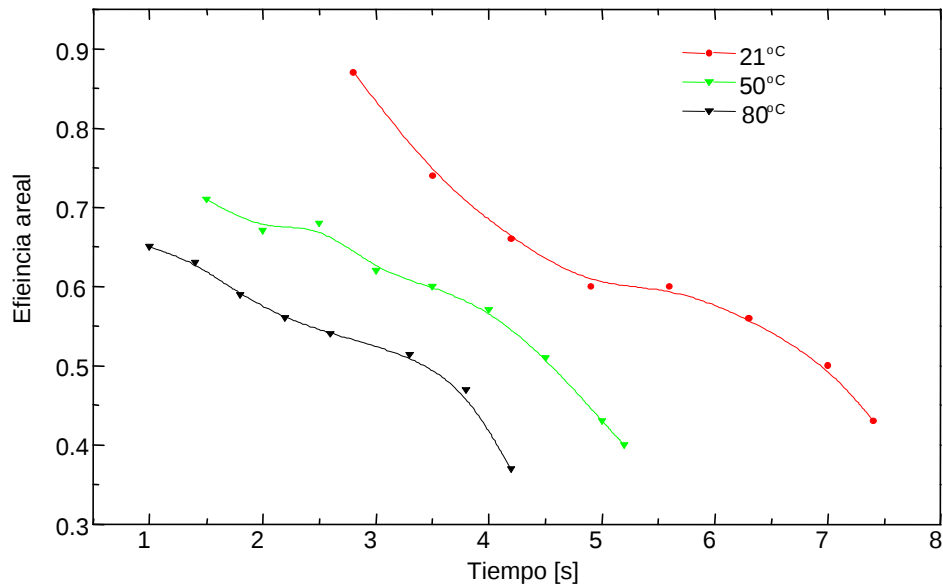


Figura 9: Variación de la eficiencia areal en función del tiempo para diferentes temperaturas

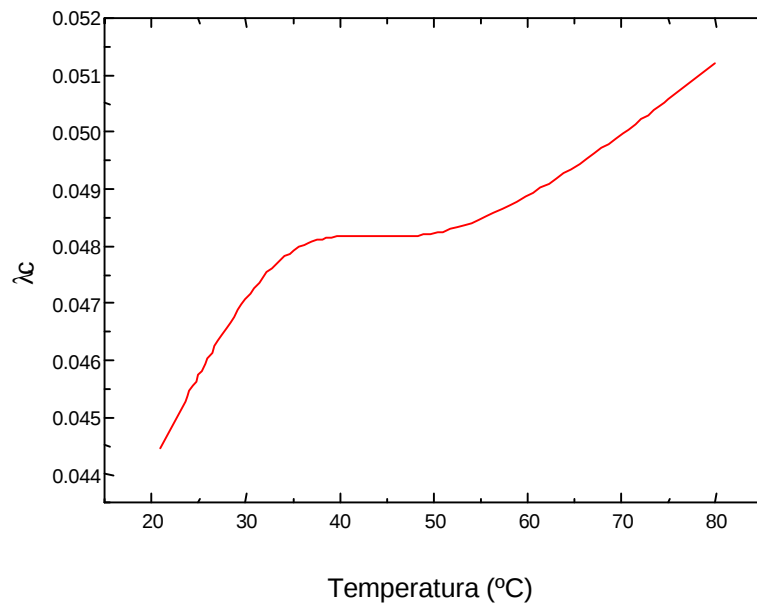


Figura 10: Longitud de onda crítica en función de la temperatura

O sea que la magnitud que inestabiliza la interfaz varió en mayor proporción que la que la estabiliza y por lo tanto hubo mayor fingering.

Este hecho se ve confirmado del análisis de la figura 9 que nos indica que los dedos crecen más rápidamente a mayores temperaturas. Ésto muestra que la velocidad es menor para menores temperaturas, se puede observar, además, que las curvas de comportamiento de la eficiencia areal en función del tiempo son bastante similares a las distintas temperaturas. La comparación de las imágenes mostradas en las figuras 4a y 4b confirman este efecto.

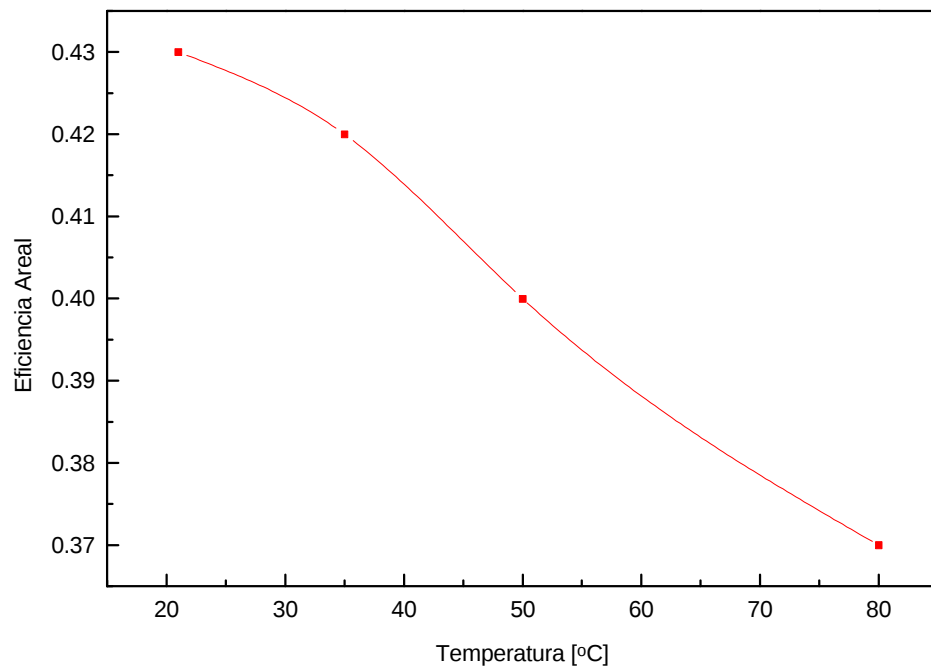


Figura 11: Eficiencia areal en función de la temperatura en el momento del corte de agua

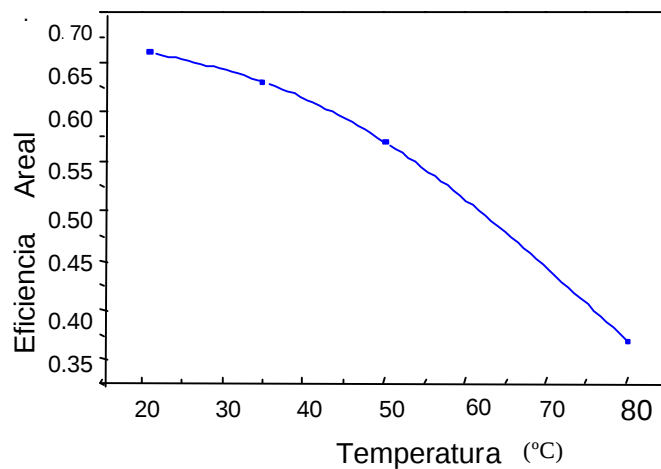


Figura 12: Eficiencia areal en función de la temperatura, a los cuatro segundos de haber comenzado a inyectar

Tanto de la observación de todas las imágenes mostradas en este trabajo. Como del análisis de la figura 10, puede observarse que la temperatura ha disminuido el fingering viscoso en el sentido que la cantidad de dedos es menor, lo que se ve confirmado porque la longitud de onda crítica crece con la temperatura, pero los dedos son más largos y comienzan a formarse a menor distancia del punto de inyección.

El hecho que haya disminuido la cantidad de dedos y que estos crezcan más rápidamente, no siempre es favorable a la recuperación de petróleo, ya que favorece la canalización en muy pocos

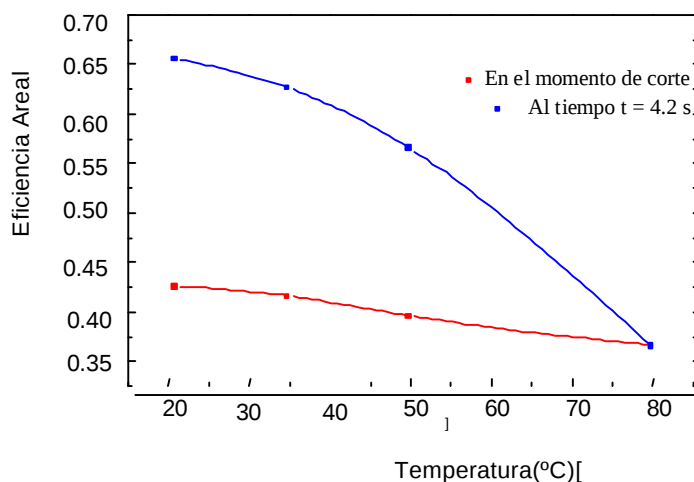


Figura 13: cuadro comparativo de eficiencias areales en diferentes tiempos

canales y ello hace que disminuya la eficiencia areal como se ve claramente en las figuras 11, 12 y 13.

En ellas puede observarse también que, hay una marcada diferencia en el comportamiento de la eficiencia areal con la temperatura cuando se la mide en el momento de la irrupción de agua por uno de los productores, que cuando se la mide a los cuatro segundos (tiempo superior al de la irrupción de agua en todas las experiencias). En este caso la eficiencia areal es mucho mayor a bajas temperaturas, si bien esta diferencia desaparece a los 80°C.

Estos resultados dicen claramente dos cosas:

La primera es que la celda de Hele Shaw utilizada en la forma tradicional, a temperatura ambiente da resultados que sobredimensionan la recuperación de petróleo. Otro error se comete al medir las eficiencias areales en el momento de irrupción de la primera gota por uno de los productores como es convencional y se debe medir cuando se hayan inyectado la cantidad de volúmenes porales que se piense inyectar.

La segunda es que hay que tener cuidado, con trasladar estos resultados de disminución de eficiencia areal a procesos de recuperación terciaria térmicos, ya que el fingering viscoso es una delicada interrelación entre las viscosidades de ambos fluidos y la tensión interfacial y debe tenerse en cuenta ésta también y no sólo la relación de movilidades al hacer el estudio previo. Estas experiencias se realizaron con líquidos puros diferentes del agua de formación y petróleo. Por otra parte, las experiencias en este trabajo han sido realizadas isotérmicamente, lo que no sucede en una recuperación terciaria térmica donde cada uno de los fluidos tiene diferente temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 – Rappoport L.A. et al. , AIME, vol 195, pg 213 (1958)
- 2 – Lee. K.S. et al, Journal of Society Petroleum Engineers, pg 52, marzo de 1988
- 3 – Stoneberger, U, et al. SPE RE, pg 1221, noviembre de 1988
- 4 – Das. S. K. Et al. JCPT, Vol33, pg 39, 1994
- 5 – Barker, J.W. et al. SPE RE, pg 116, mayo de 1995
- 6 - Fornés et al, Petrotecnia, Año XL, vol 4, pg39, 1999
- 7 - Enhanced Oil Recovery, Larry Lake Editorial Prentice hall, 1º edición, 1989

NOMENCLATURA

E_A Eficiencia areal
 A_b Area tocada por el agua
 A_t Área total
 P_c Presión crítica
 L Longitud de la celda
 ρ densidad
 g aceleración de la gravedad
 M^0 relación de movilidades
 V_c velocidad crítica
 K permeabilidad
 λ_{kr}^0 movilidad de la interfase
 v velocidad
 C constante de Chouke
 σ_{12} tensión interfacial
 η viscosidad
 η_0 viscosidad a temperatura ambiente
 σ tensión superficial
 b constante de la ecuación de Eyring
 c constante de la ecuación de Eotvos
 T temperatura
 $\Delta\rho$ diferencia de densidades
 α ángulo entre la dirección del flujo y la horizontal
 λ_c Longitud de onda crítica
 σ_0 Tensión interfacial a temperatura ambiente