

## Análisis de la miscibilidad y desplazamiento del petróleo utilizando CO<sub>2</sub>

Hernández Vargas Iván, Durán Valencia Cecilia, López Ramírez Simón

Universidad Nacional Autónoma de México, Unida de Servicios a la Industria Petrolera  
Avenida Universidad No. 3000, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F. CP 04510.

ihvargas12@gmail.com

Fecha de aceptación: 28 de Julio de 2015

Fecha de publicación: 23 de Septiembre de 2015

### RESUMEN

La extracción terciaria del petróleo (aceite) consiste en modificar el equilibrio fisicoquímico en el sistema agua-aceite-roca, uno de los objetivos es el de reducir las fuerzas capilares que mantienen al aceite atrapado en el medio poroso. En condiciones favorables, el CO<sub>2</sub> que se inyecta al yacimiento, alcanza la miscibilidad con el aceite, resultado de un proceso dinámico a múltiple contacto. En esta condición las fuerzas capilares desaparecen, logrando una mayor extracción de aceite. El CO<sub>2</sub> es un gas abundante y económico, el cual al mezclarse reduce también la densidad y viscosidad del aceite, lo que favorece su extracción. Por lo anterior para asegurar un diseño adecuado del proceso, es necesario encontrar las condiciones en la que el CO<sub>2</sub> alcanza la miscibilidad. En este trabajo se realizaron una serie de pruebas las cuales muestran que la presión mínima de miscibilidad entre el petróleo y el CO<sub>2</sub> depende principalmente de la composición de ambas sustancias.

**Palabras clave:** miscibilidad, capilaridad, recuperación terciaria, recuperación mejorada.

### ABSTRACT

A tertiary oil extraction modifies the physicochemical equilibrium in the oil-water-rock system, one of the objectives is to reduce the capillary forces that keep the oil trapped in the porous medium. Under favorable conditions, CO<sub>2</sub> is injected into the reservoir reaches the miscibility with the oil, the result of a dynamic process multiple contact. In this condition the capillary forces disappear, achieving greater oil extraction. CO<sub>2</sub> is an abundant and cheap gas, which when mixed also reduces the density and viscosity of the oil, which promotes removal. Therefore to ensure proper process design is necessary to find conditions in which the CO<sub>2</sub> reaches miscibility. In this paper a series of tests which show that the minimum miscibility pressure between the oil and CO<sub>2</sub> depends mainly on the composition of both substances were performed.

**Key words:** miscibility capilarity, tertiary oil extraction, enhanced oil recovery.

## INTRODUCCIÓN

El uso de tecnologías que aumenten la producción de aceite es un tema de gran interés en la actualidad ya que este se utiliza como materia prima para varios procesos industriales, además de proporcionar varias sustancias que se utilizan como fuente de energía. Utilizando los conocimientos que se tienen sobre las propiedades fisicoquímicas de las rocas en el yacimiento, así como de las propiedades del aceite se pueden implementar modelos que predicen la movilidad de este, es por eso que se debe recurrir a información obtenida en laboratorio para tener una mejor comprensión del comportamiento real que tendrá el aceite en el yacimiento.

Se sabe que las propiedades del aceite varían en función de la composición de este, es decir que un petróleo rico en hidrocarburos ligeros tiene menor densidad y viscosidad comparado a un petróleo rico en hidrocarburos más pesados. Basándose en este hecho se puede deducir que es conveniente “diluir” el petróleo con componentes ligeros para así enriquecer este y reducir su viscosidad y densidad, lo cual favorece al desplazamiento del aceite y genera un mayor rendimiento en la extracción del hidrocarburo. En este trabajo se propone al CO<sub>2</sub> como diluyente ya que además de ser una sustancia afín al aceite, es abundante y económico. Como se mencionó, las propiedades del aceite variarán según su composición, por lo que las mejores propiedades posibles se obtendrán al saturarlo con nuestro diluyente, es por esto que se busca que el CO<sub>2</sub> sea miscible en el aceite.

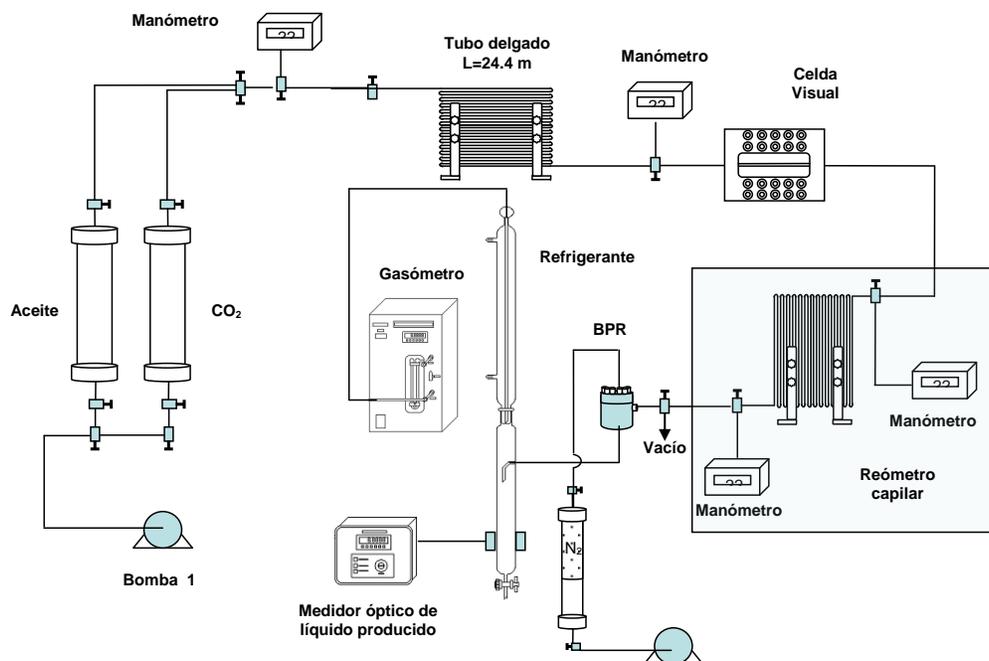
La miscibilidad es una condición que se tiene entre dos sustancias cuya característica es que sin importar la proporción en la que se mezclen ambas sustancias se tendrá una sola fase homogénea, esto favorece a la extracción del petróleo ya que aseguramos un cambio uniforme en las propiedades de este, además de la desaparición de las fuerzas capilares de la roca. Se puede llegar a la condición de miscibilidad de dos maneras, una de ellas es la miscibilidad a contacto simple, este tipo de miscibilidad se obtienen cuando ambas sustancias se encuentran en las condiciones adecuadas y al primer contacto se formara la mezcla miscible, y la segunda forma de obtener la condición de miscibilidad es las que se conoce como miscibilidad a contacto múltiple; esta miscibilidad consiste en el enriquecimiento paulatino y mutuo de componentes entre ambas sustancias hasta llegar a las condiciones de miscibilidad, en nuestro caso particular el CO<sub>2</sub> disolvería algunos de los componentes ligeros del aceite, mientras que el aceite se enriquece poco de CO<sub>2</sub>, esto hasta que se llegue a una composición que favorezca la miscibilidad (mientras más se parezcan las sustancias las condiciones de miscibilidad dejan de ser tan demandantes, por ejemplo las condiciones de miscibilidad entre el alcohol etílico y el agua)

Cuando la presión del yacimiento está significativamente debajo de la PMM, el efecto primario de la inyección del CO<sub>2</sub> es el hinchamiento y la reducción de viscosidad del aceite. El hinchamiento puede causar que parte del aceite residual llegue a ser móvil y recuperable, sin alcanzar el beneficio completo que se observa en un desplazamiento miscible. Generalmente, la presión requerida para alcanzar la miscibilidad entre el CO<sub>2</sub> y el aceite es relativamente alta, por lo que el uso del CO<sub>2</sub> para recuperar aceite adicional en estos yacimiento, incluye la estimulación individual del pozo, proceso conocido como Huff and puff. En este proceso, el CO<sub>2</sub> se inyecta, se deja añejar y la mezcla CO<sub>2</sub>-aceite obtenida se produce en el mismo pozo. Mientras que en un proceso miscible, el CO<sub>2</sub> se inyecta continuamente a través de un pozo inyector para desarrollar un frente miscible que empuja al aceite a los pozos productores. El desplazamiento miscible en el laboratorio resulta en recuperaciones cercanas al 100 %, el desplazamiento a escala de yacimiento recupera menos, debido a la heterogeneidad del medio, la inestabilidad viscosa en el frente de los fluidos, la diferencia de densidades entre los fluidos, provocando la irrupción temprana del CO<sub>2</sub> en los pozos productores.

El experimento realizado busca la Presión Mínima de Miscibilidad (PMM), esta condición indica la mínima presión a la que a condiciones dadas de composición y temperatura el CO<sub>2</sub> será miscible en el petróleo.

## METODOLOGÍA

El experimento consiste en un sistema conformado por un tubo delgado, el cual ayuda a simular un desplazamiento de fluido en una sola dimensión con efectos de mezclado muy bajos, este tubo se lleva a temperatura de yacimiento (70°C) y se llena con aceite de propiedades y composición conocidas, una vez saturado se desplaza CO<sub>2</sub> por el tubo con un gasto fijo, la mezcla de CO<sub>2</sub> aceite es posteriormente “flasheada” y se mide el volumen desplazado de aceite determinando así la efectividad del proceso.

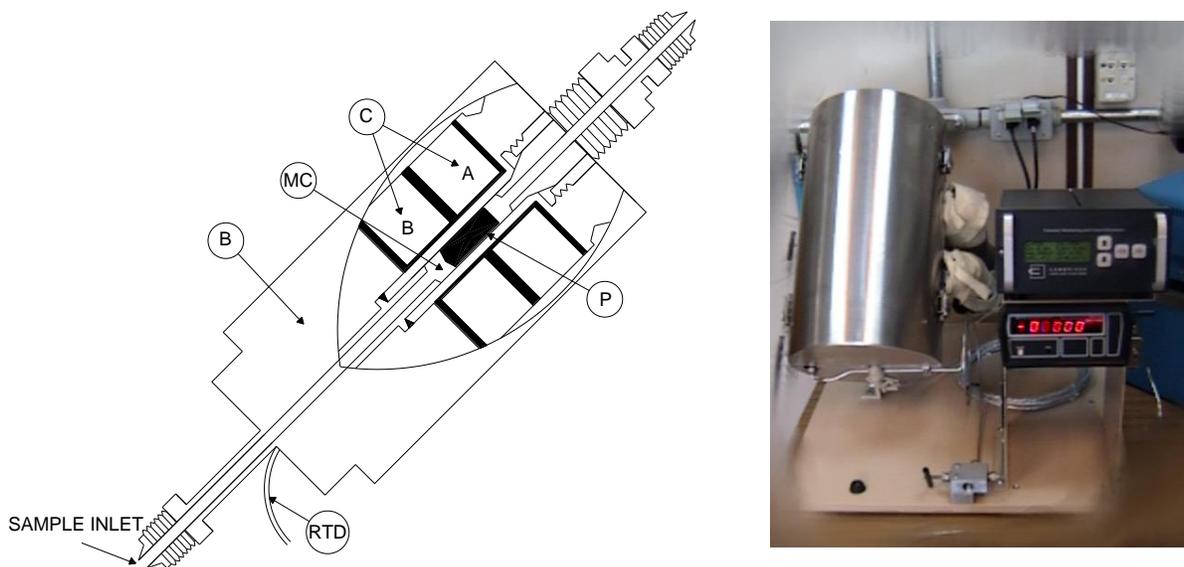


**Figura 1.** Diagrama del sistema de medición experimental de PMM.

En el diagrama se observa el sistema que está compuesto por una bomba que desplaza el aceite y el CO<sub>2</sub> a lo largo de un tubo delgado en el cual se miden las presiones de entrada y salida, posteriormente la mezcla formada pasa por una celda visual y un reómetro capilar, los cuales ayudan a entender como varían las propiedades de la mezcla en función de la presión y el tiempo, y para asegurar que se mantenga cierta presión en el sistema se agrega una válvula BPR la cual se conecta a un recipiente en el cual se separa el líquido del gas, a los cuales se midió el volumen para determinar el rendimiento de desplazamiento de aceite.

Para determinar la viscosidad se utiliza un viscosímetro electromagnético. El principio de operación del viscosímetro electromagnético tipo pistón es simple. La figura 11 muestra un diagrama del viscosímetro SPL440. El pistón (P) se sumerge en una cámara de medición (MC) que se llena con el fluido a ser analizado; este viscosímetro contiene dos bobinas magnéticas (C) "A" y "B" dentro de un tubo cilíndrico (B), las cuales están colocadas alrededor de la MC. El Pistón de acero inoxidable dentro de la MC recorre (forzado magnéticamente) una distancia fija a través del fluido. Cuando la MC se llena con el fluido, la bobina "B" se activa y la fuerza magnética ejercida sobre P lo atrae hacia la base de la MC; de esta manera, obliga a que el fluido fluya alrededor del P hacia la apertura del detector. En forma simultánea, la bobina "A" se activa para monitorear magnéticamente el movimiento del pistón, P, corriente abajo. Cuando el pistón, alcanza el fondo de la MC, la bobina "A" se activa y al mismo tiempo la bobina "B" se utiliza para monitorear el desplazamiento del pistón corriente arriba. Cuando el pistón alcanza el extremo superior de la MC, la bobina "B" se activa de nuevo y el proceso se repite. Ya que

la medición del movimiento del pistón se hace en las dos direcciones (hacia abajo y hacia arriba), se supone que las variaciones en el tiempo de travesía debido a la vibración, orientación y flujo no presentan ningún efecto considerable. A lo largo del ciclo, la temperatura del fluido se mide mediante una sonda de temperatura colocada en la base de la MC. Esta tecnología analiza el tiempo de travesía bidireccional del pistón y el tiempo requerido para que éste recorra la distancia fija, la cual se relaciona directamente a la viscosidad absoluta del fluido contenido en el interior de la MC. Por consiguiente, a medida que el fluido dentro de la MC sea más viscoso, el movimiento del pistón será más lento.



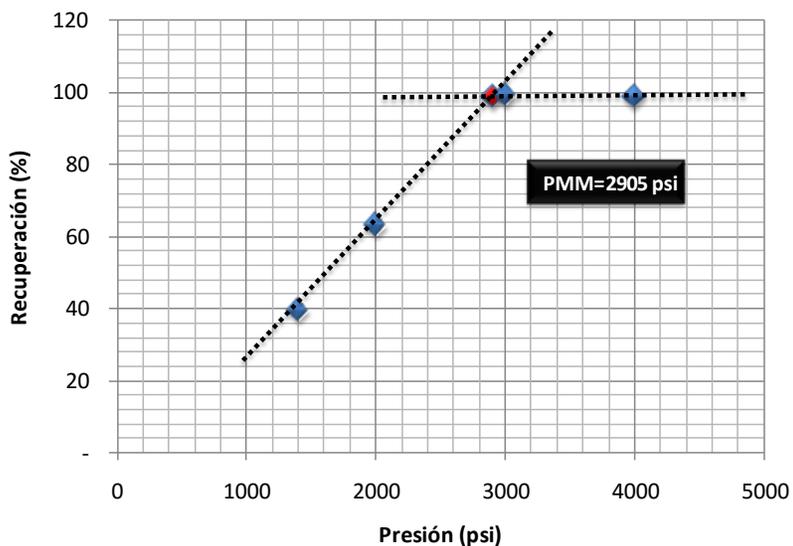
**Figura 2.** Viscosímetro electromagnético.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para determinar la presión mínima de miscibilidad se realizó el experimento anteriormente descrito a presiones de 1400, 2000, 3000, 4000 y 4700 psi, y se considera la condición de miscibilidad cuando se llega a obtener un 90% del aceite originalmente retenido en el tubo.

**Tabla 1.** Porcentaje de recuperación de aceite en función de la presión de inyección.

Presión	Recuperación (%)
1400	39.41
2000	63.17
3000	99.33
4000	98.76

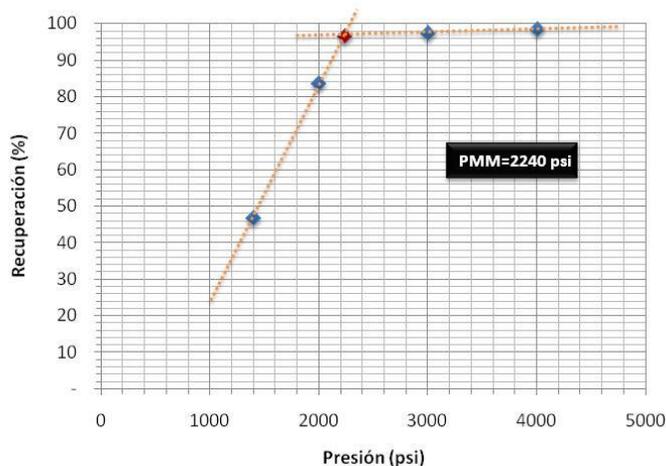


**Gráfica 1.** Determinación gráfica de la PMM.

Para medir el efecto de la composición, se enriqueció el aceite anterior con componentes ligeros e intermedios, esto bajo la suposición de que se tendrá un mejor desplazamiento.

**Tabla 2.** Porcentaje de recuperación de aceite en función de la presión de inyección.

Presión	Factor de recuperación (%)
1400	46.73
2000	83.60
3000	97.44
4000	98.58

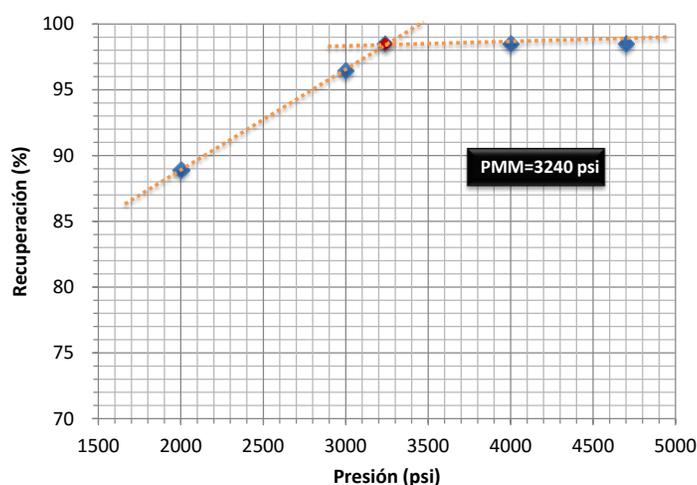


**Gráfica 2.** Determinación gráfica de la PMM.

Por último se probó el efecto contrario, es decir probar un aceite con carencia de compuestos ligeros, esto para reafirmar la suposición de que un aceite con estas características presentara un peor desplazamiento.

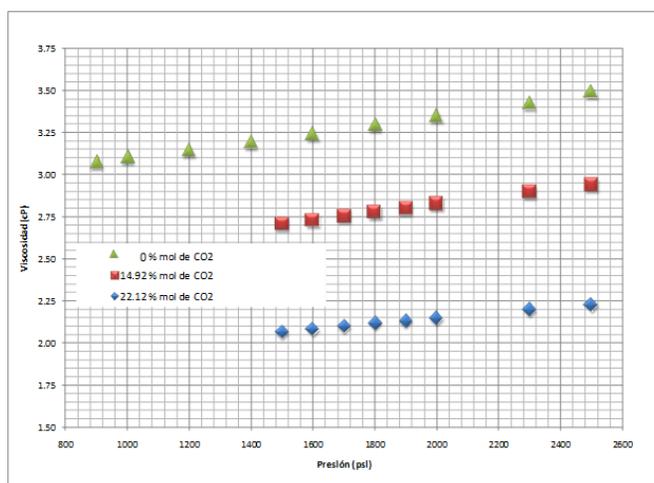
**Tabla 3.** Porcentaje de recuperación de aceite en función de la presión de inyección.

Presión	Factor de recuperación (%)
2000	88.92
3000	96.44
4000	98.53
4700	98.47



**Gráfica 3.** Determinación gráfica de la PMM.

Se tomaron varias muestras en los cuales se absorbió una cantidad dada de CO<sub>2</sub>, y se le fue medida la viscosidad, dando los siguientes resultados.



**Gráfica 4.** Reducción de la viscosidad en función de CO<sub>2</sub> disuelto.

## CONCLUSIONES

Los resultados muestran de forma clara que la presión mínima de miscibilidad depende de forma muy importante de la composición del aceite, por lo que un estudio previo es necesario para poder utilizar de manera eficiente este tipo de tecnologías.

Los aceites ricos en compuestos ligeros son los que tienen la PMM más baja, pero de igual manera, son estos aceites los que escasean cada vez más, por lo que una de opción viable para reducir la PMM sería la de "contaminar" el CO<sub>2</sub> con metano o hidrocarburos ligeros, ya que esto generaría un disminución considerable en la PMM.

Aun sin llegar a la PMM la inyección de CO<sub>2</sub> tiene sus ventajas al bajar la viscosidad del aceite, lo cual aumenta su movilidad y en consecuencia el rendimiento de extracción.

## REFERENCIAS

Influence of Viscous and Buoyancy Forces on the Mobilization of Residual Tetrachloroethylene during Surfactant Flushing Kurt D Pennell, Gary A Pope y Lindam Abriola, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia 30332, Department of Petroleum Engineering, University of Texas at Austin, Austin, Texas 78712, and Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109