

	<b>Diseño y construcción de una celda de desplazamiento</b>	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 1 de 11
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

## Práctica 2. Desplazamiento miscible

### Introducción

La generación de metodologías experimentales y la oferta de recursos didácticos, como las demostraciones de laboratorio, pueden contribuir al mejoramiento de los procesos de enseñanza. En esta práctica se presenta la metodología para llevar un experimento de desplazamiento miscible utilizando salmueras de cloruro de sodio y bromuro de sodio, así como una mezcla de bromuro de sodio con glicerina. El procedimiento de esta práctica fue adaptado del trabajo de James, E. H. (1993) *Characterizing Permeability Heterogeneity in Core Samples from Standard Miscible Displacement Experiments*. El uso de distintas disoluciones de salmuera y glicerina permite trabajar con fluidos de densidad y viscosidad distinta, lo cual a su vez, da como resultado diferencias en la permeabilidad.

Alumnos y alumnas de la carrera de ingeniería petrolera participaron en el desarrollo de los experimentos con la celda de desplazamiento, y la construcción de ésta, en el laboratorio de interacción roca-fluido y fluido-fluido (LIRFFF) del Departamento de Ingeniería Petrolera y son productos del proyecto PAPIME 112020.

La celda de desplazamiento consiste en una bomba de doble pistón, una bomba de confinamiento y dos acumuladores. A partir de estos elementos principales y otros subsistemas es posible obtener información valiosa acerca de la dinámica y la eficiencia de la recuperación de fluidos. La caracterización de transmisión de fluidos a través de materiales porosos se realiza por desplazamiento transitorio. Durante una prueba de desplazamiento, la saturación o la composición se propagan a través del medio en la dirección del flujo, resultando en la variación de las propiedades de flujo del sistema roca-fluido.

### Cuestionario previo

1. ¿Qué es la movilidad?
2. Defina la miscibilidad
3. ¿Qué es la permeabilidad?
4. ¿Cuáles son las diferencias entre permeabilidad absoluta, efectiva y relativa?
5. Defina a la densidad y la viscosidad ¿cómo se relacionan estas propiedades con la movilidad de los fluidos?

### Objetivo

Las y los alumnos de ingeniería petrolera conocerán como cambia la permeabilidad para una muestra de berea al desplazar diferentes salmueras a través de dicha muestra y comprenderán cómo la naturaleza de los fluidos juega un papel importante en la determinación de las propiedades petrofísicas.

	<b>Diseño y construcción de una celda de desplazamiento</b>	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página <b>2</b> de <b>11</b>
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

## Materiales

- a) Roca berea
- b) Cortadora
- c) Lija
- d) Brocha
- e) Vernier
- f) Balanza analítica Ohaus
- g) Agua destilada
- h) Bromuro de sodio (NaBr); 243 [g]
- i) Cloruro de sodio (NaCl); 13.5 [g]
- j) Agitador magnético
- k) Parrilla de agitación
- l) Matraz aforado de 10 [mL]
- m) Viscosímetro Brookfield
- n) Tensiómetro SITA
- o) Colorantes vegetales
- p) Vaso de precipitados 50 [mL]
- q) Campana de vacío
- r) Celda de desplazamiento (capacidad de cada cilindro = 1000 [mL])
- s) Manga de hule (diámetro interior = 3.81 [cm], longitud = 5.08 a 7.62 [cm])
- t) Papel absorbente
- u) Guantes de nitrilo

## Desarrollo experimental

Se llevó a cabo, una prueba de desplazamiento miscible de tres fases, utilizando un núcleo de berea, el cual es un afloramiento comercial. Se prepararon tres disoluciones en total y se determinó la densidad, viscosidad y tensión superficial para cada una. Para distinguir fácilmente entre las tres salmueras se emplearon colorantes. Las disoluciones preparadas y ocupadas para el desarrollo de esta práctica son:

1. 450 mL de salmuera de bromuro de sodio (NaBr), 36% p/p; sin color
2. 450 mL de salmuera de cloruro de sodio (NaCl), 3% p/p; **color azul**
3. 450 mL de una mezcla glicerina–NaBr (1:1), 36% p/p; **color morado**

En la Tabla 2 se muestran las propiedades medidas en el laboratorio para las tres disoluciones preparadas. Es posible consultar como se realizaron los cálculos y el procedimiento para la determinación de las propiedades en la liga:

[https://drive.google.com/file/d/1IMNF1IBLuUZuD2bt2UPVm-zh0uAt-X\\_B/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1IMNF1IBLuUZuD2bt2UPVm-zh0uAt-X_B/view?usp=sharing)

	<b>Diseño y construcción de una celda de desplazamiento</b>	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página <b>3</b> de <b>11</b>
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

**Tabla 1.** Propiedades de los fluidos de desplazamiento.

	<b>Bromuro de sodio (NaBr)</b>	<b>Cloruro de sodio (NaCl)</b>	<b>Glicerina-NaBr 1:1</b>
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	1.336	1.006	1.307
Viscosidad [cP] @250 rpm	6.43	5.16	23.66
Tensión superficial [mN/m] @50[m/s]	55.63	64	76.53

## Procedimiento

### A. Preparación de la muestra

1. Cortar la muestra de berea tomando en cuenta que debe cumplir con las dimensiones siguientes: diámetro interior = 3.81 [cm] y longitud = 4.80 [cm].<sup>1</sup>
2. Lijar la base superior e inferior de la muestra de berea hasta que estén uniformes. Utilizar guantes
3. Limpiar y cepillar la muestra de berea con ayuda de la brocha.
4. Pesar la muestra de berea en la balanza analítica Ohaus; medir su longitud y diámetro con el Vernier.
5. Colocar la muestra de berea dentro de un vaso de precipitados y llenarlo con la salmuera de bromuro de sodio (36%, p/p) hasta que la muestra esté cubierta por completo.
6. Ingresar la muestra sumergida en la salmuera en una campana de vacío para saturarla durante 3 días.
7. Después del tiempo transcurrido, retirar la muestra de la salmuera y pesarla.

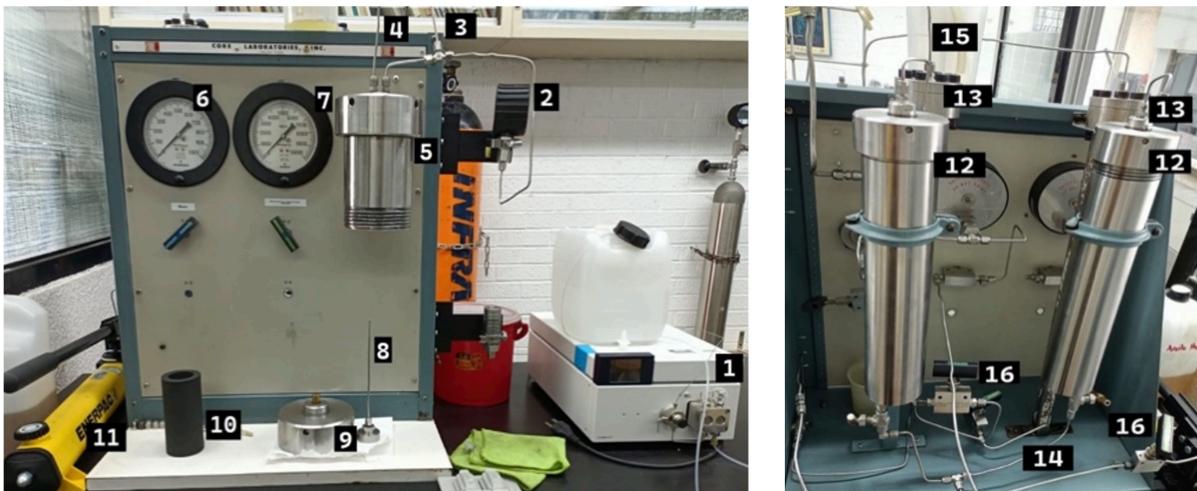
### B. Montado de la muestra y preparación de la celda de desplazamiento

8. Colocar la muestra del paso 7 dentro de la manga de hule.
9. Introducir la manga en el portamuestras, verificando que la manga se encuentre a tope del cabezal ranurado (parte superior de la celda) y verificar lo mismo con la muestra.

<sup>1</sup> Examinar la muestra en busca de deformidades en la cima y en la base. En caso de que se detecten irregularidades en la inspección, la muestra se lija hasta que quedar lo más uniforme posible. Esto se realiza para que la superficie de los dispersores de flujo (tanto de entrada como de salida) hagan contacto completamente con la muestra, sin dejar espacios.

	<b>Diseño y construcción de una celda de desplazamiento</b>	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página <b>4</b> de <b>11</b>
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

10. Cerrar el puertamuestras con el cabezal ranurado y una vez enroscado, empujar a tope la línea de salida de los fluidos de trabajo para asegurar que la muestra esté en contacto con la superficie de salida de fluidos.
11. Verter NaBr (36% p/p) en uno de los dos acumuladores (12; **Figura 1**); después accionar la bomba HPLC P40 Knauer a 5 [mL/min], desplazar el fluido hacia las líneas de inyección y (eliminar el aire en éstas. Terminada la purga, colocar un tapón a la línea de inyección (15; **Figura 1**))
12. Verter la salmuera de NaCl (3% p/p, azul) en el otro acumulador (12; **Figura 1**), accionar la bomba tipo HPLC P40 Knauer a 5 [mL/min] nuevamente y repetir procedimiento de paso 11.
13. Purgar las líneas que transportan el aceite hidráulico utilizado para confinar la muestra y llevar la muestra, a 2,000 psi<sup>2</sup> con ayuda de la bomba manual.



**Figura 1.** (1) bomba de doble pistón (HPLC P40 Knauer), (2) manómetro conectado a la línea del fluido, (3 y 4) líneas de flujo de fluidos<sup>3</sup>, (5) portamuestras, (6) (7) manómetros<sup>4</sup>, (8) línea de salida del fluido con cabezal ranurado, (9) tapa del efluente, (10) manga de hule, (11) bomba manual, (12) cilindros de almacenamiento de fluido, (13) filtros, (14) línea de flujo de aceite hidráulico, (15) línea de flujo del fluido, (16) válvulas.

<sup>2</sup> Las pruebas para la industria se realizan a tres presiones de confinamiento: 500 psi, 1,000 psi y una presión cercana a la presión de yacimiento

<sup>3</sup> Se emplean ambos cilindros porque se desplazan varios fluidos.

<sup>4</sup> El manómetro 7 muestra la presión a la cual la muestra está confinada.

	<b>Diseño y construcción de una celda de desplazamiento</b>	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página <b>5</b> de <b>11</b>
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

### C. Prueba de desplazamiento

#### Inyección y desplazamiento de NaBr (36% p/p)

14. Retirar el tapón de la línea de inyección de la salmuera de NaBr y conectarla a la celda de desplazamiento y abrir la válvula del acumulador para permitir el flujo de la salmuera por las líneas de inyección.
15. Inyectar la salmuera a un flujo constante de 1 [mL/min] con la bomba HPLC P40 Knauer.
16. Colocar una probeta en la línea de salida para colectar el fluido desplazado por la roca. Cambiar de probeta tantas veces como sea necesario hasta que termine el desplazamiento.
17. Registrar los valores de presión observados en el manómetro, cada 5 minutos hasta que la diferencia de presión se mantenga constante ( $\pm 0.02$  psi para la berea) por 15 minutos.<sup>5</sup> Entonces, detener el gasto y cerrar la válvula del acumulador de la salmuera de NaBr.

#### Inyección y desplazamiento de NaCl (3% p/p)

18. Previo a la inyección de NaCl, desplazar por 15 min la salmuera de NaBr. Repetir los pasos 13 y 14.
19. Una vez que la presión se mantiene estable, detener el gasto, cerrar la válvula del acumulador, desconectar la línea de inyección de la salmuera de NaBr y colocar el tapón.
20. Retirar el tapón de la línea de inyección de la salmuera de NaCl y conectarla a la celda de desplazamiento y abrir la válvula del acumulador para permitir el flujo de la salmuera por las líneas de inyección.
21. Con la bomba tipo HPLC P40 Knauer, inyectar la salmuera a un flujo constante de 1 [mL/min].
22. Pasos 16, 17 y 18 se repiten.

#### Inyección y desplazamiento de Glicerina–NaBr (36% p/p)

23. Desmontar el acumulador que contiene la salmuera de NaBr, vaciar la salmuera en un recipiente, limpiar y secar el acumulador. Después, verter la mezcla de Glicerina–NaBr.

---

<sup>5</sup> El gasto de inyección varía dependiendo del tipo de muestra y fluido de trabajo. Para muestras de carbonato el gasto de inyección puede seleccionarse en [0.5 mL/min] considerando agua como fluido de trabajo. Para las bereas el gasto debe mantenerse por debajo de los [2 mL/min] para evitar daño y producción de finos durante la prueba.

	<b>Diseño y construcción de una celda de desplazamiento</b>	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página <b>6</b> de <b>11</b>
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

24. Accionar la bomba HPLC P40 Knauer a 5 [mL/min] para desplazar el fluido hacia las líneas de inyección y eliminar el aire presente. Una vez terminada la purga, colocar un tapón al final de la línea de inyección.
25. Previo a la inyección de la mezcla, se desplaza por al menos 15 min, la salmuera de NaCl de las líneas, repitiendo el paso 13
26. Una vez que la presión se mantiene estable, detener el gasto, cerrar la válvula del acumulador, desconectar la línea de inyección de la salmuera de NaCl y colocar el tapón.
27. Retirar el tapón de la línea de inyección de la salmuera de Glicerina–NaBr y conectarla a la celda de desplazamiento y abrir la válvula del acumulador para permitir el flujo de la salmuera por las líneas de inyección.
28. Con la bomba HPLC P40 Knauer, inyectar la mezcla a un flujo constante de 0.5 [mL/min].<sup>6</sup>
29. Colocar una probeta en la línea de salida para coleccionar el fluido desplazado por la roca. Cambiar de probeta tantas veces como sea necesario hasta que termine el desplazamiento.
30. Registrar los valores de presión observados en el manómetro, cada 3 minutos hasta que la diferencia de presión se mantenga constante ( $\pm 0.02$  psi para la brea) por 15 minutos. Entonces, detener el gasto y cerrar la válvula del acumulador de la mezcla Glicerina–NaBr.
31. Desmontar y pesar la muestra.

NOTA: El procedimiento completo (A – C) se puede ver en el video:

[https://drive.google.com/file/d/1LhO06Fxy2QBeYFHK5HXttGfdSw5uFCVe/view?usp=share\\_link](https://drive.google.com/file/d/1LhO06Fxy2QBeYFHK5HXttGfdSw5uFCVe/view?usp=share_link)

## Resultados

Los datos registrados durante la inyección de salmueras se muestran en las **Tablas 2, 3, 4 y 5**. Utilizar la información de dichas tablas para contestar lo que se pide a continuación. En el Anexo de esta práctica se encuentran ecuaciones de apoyo

- a) Hacer un gráfico de la presión con respecto al tiempo para los resultados de la inyección de NaBr, NaCl y mezcla Glicerina-NaBr, con los datos de las **Tablas 3, 4 y 5**. ¿Qué semejanzas y diferencias observa entre los gráficos?
- b) ¿Cuál es la porosidad, en porcentaje, de la muestra de brea utilizada en este experimento?

<sup>6</sup> La mezcla glicerina-NaBr tiene una viscosidad (23.66 cP; 25 °C y 250 rpm) mayor que las salmueras de NaCl y NaBr, debido a la movilidad de los fluidos es necesario reducir el gasto para esta parte de la prueba.

	<b>Diseño y construcción de una celda de desplazamiento</b>	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página <b>7</b> de <b>11</b>
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

- c) ¿Cuál es la permeabilidad en [mD] de la muestra de Berea a la salmuera de NaBr, de NaCl y la mezcla Glicerina–NaBr? Utilizar la ecuación de Darcy y la presión en términos absolutos. Considerar cuando la diferencia de presión es constante.
- d) Comentar sobre el inciso anterior ¿La permeabilidad se mantuvo constante, cambio? Detallar su respuesta.
- e) Comparar las permeabilidades obtenidas con la que se obtuvo en el Práctica 1 “determinación de la porosidad y permeabilidad” con agua destilada ¿Hay diferencia? ¿A qué puede deberse?

**Tabla 2.** Características de la muestra de Berea *Sandstone* antes y después de la prueba de desplazamiento.

Diámetro	3.810	[cm]
Longitud	4.800	[cm]
Masa	114.102	[g]
Área de la roca	11.401	[cm <sup>2</sup> ]
Volumen de la roca	54.731	[cm <sup>3</sup> ]
Peso de la muestra saturada al vacío	125.918	[g]
Masa de la muestra saturada al vacío y por inyección de los 3 fluidos	126.207	[g]
Diferencia de masas; entre muestra seca y muestra saturada	12.105	[g]
Volumen poroso ocupado por el fluido	9.061	[cm <sup>3</sup> ]

**Tabla 3.** Datos de presión manométrica obtenidos durante la inyección de la salmuera de bromuro de sodio (NaBr) al 36% en peso. Continúan datos en la página siguiente.

Tiempo [min]	Presión man [psia]
0	4.99
5	5.11
10	5.15
15	5.2
20	5.29
25	5.31
30	5.35
35	5.39
40	5.43
45	5.43
50	5.48
55	5.54
60	5.55

Tiempo [min]	Presión man [psia]
65	5.57
70	5.62
75	5.65
80	5.68
85	5.71
90	5.75
95	5.79
100	5.82
105	5.85
110	5.88
115	5.92
120	5.96

	<b>Diseño y construcción de una celda de desplazamiento</b>	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página <b>8</b> de <b>11</b>
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

**Tabla 4.** Datos de presión manométrica obtenidos durante la inyección de la salmuera de cloruro de sodio (NaCl) al 3% en peso.

Tiempo [min]	Presión man. [psia]	Tiempo [min]	Presión man. [psia]
0	0	65	5.46
5	1.83	70	5.57
10	2.44	75	5.79
15	2.84	80	5.96
20	3.24	85	6.15
25	3.66	90	6.28
30	4.31	95	6.42
35	4.65	100	6.59
40	4.76	105	6.76
45	4.85	110	6.9
50	5	115	6.99
55	5.14	120	7.12
60	5.34	125	7.23

**Tabla 5.** Datos de presión manométrica obtenidos durante la inyección de la mezcla glicerina-bromuro de sodio (NaBr) (1:1). Continúan datos en la página siguiente.

Tiempo [min]	Presión man [psia]	Tiempo [min]	Presión man [psia]
0	0.00	111	18.70
3	2.20	114	18.80
6	4.10	117	18.80
9	5.20	120	18.90
12	5.80	123	18.90
15	7.00	126	19.00
18	8.80	129	19.00
21	11.70	132	19.10
24	14.00	135	19.10
27	15.30	138	19.20
30	16.00	141	19.20
33	16.30	144	19.30
36	16.60	147	19.30
39	16.80	150	19.40
42	17.00	153	19.40
45	17.00	156	19.50
48	17.20	159	19.50
51	17.20	162	19.50
54	17.30	165	19.60
57	17.40	166	19.60
60	17.50	167	19.70
63	17.60	168	19.70

	<b>Diseño y construcción de una celda de desplazamiento</b>	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página <b>9</b> de <b>11</b>
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

66	17.70
69	17.80
72	17.90
75	18.00
78	18.00
81	18.10
84	18.20
87	18.20
90	18.30
93	18.40
96	18.40
99	18.50
102	18.60
105	18.60
108	18.70

169	19.70
170	19.80
171	19.80
172	19.90
173	19.90
174	19.90
175	19.90
176	20.00
177	20.00
178	20.00
179	20.10
180	20.10
181	20.20
182	20.20

## Cuestionario de apoyo

Para mejorar esta práctica demostrativa agradecemos se conteste el cuestionario de apoyo siguiente:

[https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScxPSYfyz8IRidZAKpQr5NgWVDXhv2fzTJF1dnSyleqUWGwuQ/viewform?usp=sf\\_link](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScxPSYfyz8IRidZAKpQr5NgWVDXhv2fzTJF1dnSyleqUWGwuQ/viewform?usp=sf_link)

## Anexo

Los cálculos para la obtención de la permeabilidad absoluta a la salmuera de bromuro de sodio (NaBr) son:

1. La permeabilidad se describe matemáticamente como:

$$K = \frac{q \mu L}{A \Delta P} [mD]$$

2. Con la caracterización física de los fluidos (NaBr; 36% p/p) y de la muestra de berea, ver las Tablas 1 y 2 se obtiene la información necesaria para sustituir las variables en la ecuación de la permeabilidad, con excepción de la diferencial de presión, la cual se toma de la Tabla 3, último valor medido:

$$k = \left( \frac{0.017 \left[ \frac{cm^3}{seg} \right] \times 6.43 [cP] \times 4.80 [cm]}{11.40 [cm^2] \times \frac{5.96}{14.7} [psi]} \right) \times c [mD]$$

	<b>Diseño y construcción de una celda de desplazamiento</b>	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página <b>10</b> de <b>11</b>
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

Nota: c es una constante para determinar la permeabilidad, la cual se obtiene a partir de la conversión de unidades y el análisis dimensional. ¿A cuánto equivale dicha constante si la permeabilidad es de 111.30 mD?

$$k = 111.30 [mD]$$

Los cálculos para la obtención de la permeabilidad absoluta a NaCl (y salmuera de NaBr). Este cálculo contempla que la mayoría de la salmuera de NaBr se quedó en la muestra de roca

3. La permeabilidad se describe matemáticamente como:

$$K_{\alpha} @S_{\beta r} = \frac{q \mu L}{A \Delta P} \times c [mD]$$

4. Nuevamente se emplean datos de la caracterización física de la muestra de roca y la disolución de NaCl, 3% p/p, de las Tablas 1 y 2. La diferencial de presión se toma de la Tabla 4 y se sustituye en la ecuación:

$$k_{\alpha} @S_{\beta r} = \left( \frac{0.017 \left[ \frac{cm^3}{seg} \right] \times 5.16 [cP] \times 4.80 [cm]}{11.40 [cm^2] \times \frac{7.23}{14.7} [psi]} \right) \times c [mD]$$

$$k = 73.63 [mD]$$

Los cálculos para la obtención de la permeabilidad absoluta a la disolución de NaBr con glicerina:

5. La permeabilidad se describe matemáticamente como:

$$K_{\gamma} @S_{\alpha r} = \frac{q \mu L}{A \Delta P} \times c [mD]$$

6. Utilizar los datos obtenidos de la caracterización física de los fluidos (NaBr; 36% p/p) y de la muestra de berea, de las Tablas 1 y 2. El valor de la diferencial de presión se toma de la Tabla 5, es el último valor medido:

$$k_{\gamma} @S_{\alpha r} = \left( \frac{0.008 \left[ \frac{cm^3}{seg} \right] \times 23.66 [cP] \times 4.80 [cm]}{11.40 [cm^2] \times \frac{20.20}{14.7} [psi]} \right) \times c [mD]$$

	<b>Diseño y construcción de una celda de desplazamiento</b>	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página <b>11</b> de <b>11</b>
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

$$K = 70.42 [mD]$$

## Bibliografía

James, E. H. (1993, June). Characterizing Permeability Heterogeneity in Core Samples from Standard Miscible Displacement Experiments. *SPE Formation Evaluation*, 8 (02) 112 – 116. <https://doi.org/10.2118/18329-pa>

Dandekar, A. Y. (2013, February 21). *Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties* (2nd ed.). CRC Press.

Ahmed, T. (2019, January 3). *Reservoir Engineering Handbook* (5th ed.). Gulf Professional Publishing.

## Agradecimientos

Esta práctica y el material didáctico asociado a ésta se llevó a cabo con el apoyo del proyecto PAPIME PE112020 “Diseño y construcción de una celda de desplazamiento para favorecer el aprendizaje en Ingeniería Petrolera”



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.