

Modelo de flujo multifásico y transporte multicomponente en medios porosos

Martín A. Díaz-Viera

Mexican Petroleum Institute
`mdiazv@imp.mx`

Posgrado del Instituto Mexicano del Petróleo

9 de marzo de 2023

Modelo de flujo multifásico y transporte multicomponente en medios porosos

Martín A. Díaz-Viera

Mexican Petroleum Institute
`mdiazv@imp.mx`

Posgrado del Instituto Mexicano del Petróleo

9 de marzo de 2023

Contenido I

1 Introducción

- Antecedentes
- Motivación
- Objetivo

2 Modelo de Flujo y Transporte

- Modelo Conceptual
- Modelo Matemático
- Modelo Numérico
- Modelo Computacional

3 Simulación de Experimentos de Recuperación

- Secundaria por Inyección de Agua
- Mejorada por inyección de microorganismos y nutrientes

4 Conclusiones

- Discusión de los resultados

Contenido II

- Trabajo en curso y futuro
- Referencias

Antecedentes

- Los yacimientos petroleros en su etapa inicial de explotación producen empleando sólo la presión natural del mismo (recuperación primaria).
- En su etapa de madurez pierden energía por lo que requieren que se les inyecte gas o agua con el fin de incrementar o sostener la presión del yacimiento (recuperación secundaria)
- Cuando los yacimientos no producen usando los métodos de recuperación primaria o secundaria se recurre a otros métodos más sofisticados como son la inyección de vapor, químicos, microorganismos, etc. (recuperación terciaria o mejorada)
- La mayoría de los campos petroleros en México están entrando en esta tercera etapa.

Motivación

- Para el diseño óptimo de métodos de recuperación mejorada de hidrocarburos se requiere realizar un numero de pruebas a nivel de laboratorio en condiciones controladas que permitan comprender cuales son los mecanismos particulares de recuperacion para un método de recuperacion mejorada dado y un yacimiento específico.
- Estas pruebas de laboratorio son muy sofisticadas, costosas y mayormente no representativas de toda la variedad de fenómenos involucrados.
- Por lo que una adecuada modelación de las pruebas de laboratorio contribuiría de manera decisiva en la interpretación de los mecanismos de recuperación y en la obtencion de los parámetros relevantes para la implementación de procesos de recuperación mejorada a escala de pozo y/o yacimiento.

Objetivo

- En la presente plática presentaremos un modelo de flujo y transporte en medios porosos para la simulación de experimentos de recuperación mejorada a condiciones de laboratorio
- Desde el punto de vista metodológico mostraremos las etapas de desarrollo del modelo (conceptual, matemático, numérico y computacional)
- Para ilustrar este procedimiento usaremos como ejemplo un modelo desarrollado para simular el método de recuperación mejorada via microbiana (MEOR)

Metodología

El procedimiento para el desarrollo de un modelo comprende a grosso modo cuatro etapas:

- **Modelo Conceptual:** Se establecen todas las hipótesis, supuestos, condiciones, alcances y limitaciones que debe satisfacer el modelo.
- **Modelo Matemático:** Se realiza la formulación del modelo matemático en términos de ecuaciones de manera que satisfaga los requerimientos del Modelo Conceptual.
- **Modelo Numérico:** Se eligen los métodos numéricos más adecuados desde el punto de vista de eficiencia y desempeño para la solución del Modelo Matemático.
- **Modelo Computacional:** Para la realización del Modelo Numérico se requiere de su implantación computacional.

Modelo Conceptual

- Se consideran cuatro fases: **Agua** ($\alpha = W$), fluida ($\mathbf{v}^W \neq \mathbf{0}$); **Aceite** ($\alpha = O$), petróleo líquido ($\mathbf{v}^O \neq \mathbf{v}^W$), **Biopelícula** ($\alpha = B$) y **Sólida** ($\alpha = S$), ambas estáticas ($\mathbf{v}^B = \mathbf{v}^S = \mathbf{0}$).
- Hay cinco componentes: **agua** ($\gamma = w$) sólo en la fase agua, **aceite** ($\gamma = o$) sólo en la fase aceite, **roca** ($\gamma = r$) sólo en la fase sólida, **microorganismos** ($\gamma = m$) repartidos entre la fase agua (*planctónicos*) y la fase biopelícula (*sésiles*), y **nutrientes** ($\gamma = n$) también repartidos entre la fase agua (*fluyentes*) y la fase sólida (*adsorbidos*).
- No existe ningún tipo de discontinuidad en las propiedades del sistema.
- La roca (*matriz porosa*) y los fluidos son ligeramente compresibles.

Modelo Conceptual

- No existe difusión, es decir que $\tau(\mathbf{x}, t) \equiv 0$, para todas las fases.
- El medio está completamente saturado, es decir, las fases llenan completamente todo el medio.
- Las fases fluidas están separadas en los poros.
- Se considera que todas las fases están en equilibrio termodinámico.
- Aunque para el estado inicial el medio poroso se considerará homogéneo ($\phi = \text{const}$) e isotrópico ($\mathbf{k} = k\mathbf{I}$) se permite la variación de la porosidad y la permeabilidad debido a fenómenos como el taponamiento/destaponamiento (*adsorción/desorción*).

Modelo Conceptual

- Se considera que el flujo de los (*microorganismos y nutrientes*) siguen la ley de Fick: $\tau_{\gamma}^W(\mathbf{x}, t) = \phi S^W \mathbf{D}_{\gamma}^W \cdot \nabla c_{\gamma}^W$; $\gamma = m, n$, donde

$$\left(D_{\gamma}^W\right)_{ij} = (\alpha_T)_{\gamma}^W \left|\mathbf{v}^W\right| \delta_{ij} + \left((\alpha_L)_{\gamma}^W - (\alpha_T)_{\gamma}^W\right) \frac{v_i^W v_j^W}{|\mathbf{v}^W|} + \tau (D_d)_{\gamma}^W \delta_{ij}$$

- Los microorganismos y el nutriente interactúan biológicamente entre sí con una cinética de crecimiento tipo Monod
- Los microorganismos y el nutriente interactúan físico-químicamente con el medio poroso, suponiendo adsorción lineal y desorción lineal condicional

Modelo Conceptual

Fase (α)	Comp. (γ)	Prop. Intensiva (ψ_γ^α)
Agua ($\alpha = W$)	Agua ($\gamma = w$)	$\phi S^W \rho_w^W$
	Microorg. ($\gamma = m$)	$\phi S^W c_m^W$
	Nutrientes ($\gamma = n$)	$\phi S^W c_n^W$
Aceite ($\alpha = O$)	Aceite ($\gamma = o$)	$\phi S^O \rho_o^O$
Biopelícula ($\alpha = B$)	Microorg. ($\gamma = m$)	$c_m^B \equiv \rho_m \sigma$
Sólida ($\alpha = S$)	Roca ($\gamma = r$)	$\rho_{r_b}^S \equiv (1 - \phi) \rho_{r_p}^S$
	Nutrientes ($\gamma = n$)	$c_n^S \equiv \rho_{r_b}^S \hat{c}_n^S$

Cuadro 1: Propiedades intensivas asociadas a la masa por fases y componentes.

Modelo Matemático

- A partir del Modelo Conceptual se deriva el Modelo Matemático. En este caso se aplicará la **Formulación Axiomática de la Mecánica de los Sistemas Continuos**.
- Esta formulación adopta un enfoque macroscópico, cuya premisa fundamental consiste en considerar que un sistema continuo llena todo el espacio que ocupa.
- Los sistemas continuos están constituidos por conjuntos de partículas a los que se les llama **cuerpos**.
- En los sistemas continuos se trabaja con los promedios de sus propiedades físicas y existe un **volumen elemental representativo**, para el cual se calculan y son válidos los promedios de dichas propiedades.

A diagram showing a domain $B(t)$ (shaded gray) and its boundary. The boundary is divided into two parts: $\Sigma(t)$ (the interface, marked with a dotted line) and $\partial B(t)$ (the outer boundary, also marked with a dotted line). A normal vector \vec{n} is shown pointing outwards from $\Sigma(t)$. Two vectors, \vec{n}_Σ and \vec{v}_Σ , are shown pointing outwards from the interface $\Sigma(t)$.

◀ ◻ ▶ ◀ ▢ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ 🔍 ↺

Formulación Axiomática Mecánica Sistemas Continuos

- Esta formulación consiste básicamente en establecer las correspondencias biunívocas entre las *propiedades extensivas* $E(t)$ (son las integrales de volumen de las propiedades intensivas, por ejemplo la masa) y las *propiedades intensivas* $\psi(\mathbf{x}, t)$ (propiedades físicas por unidad de volumen, por ejemplo la densidad de masa), las cuales se relacionan mediante la siguiente integral de volumen:

$$E(t) \equiv \int_{B(t)} \psi(\mathbf{x}, t) d\mathbf{x}, \quad (1)$$

Formulación Axiomática Mecánica Sistemas Continuos

- Ecuación de balance global**

$$\frac{dE(t)}{dt} = \int_{B(t)} g(\mathbf{x}, t) d\mathbf{x} + \int_{\Sigma(t)} g_{\Sigma}(\mathbf{x}, t) d\mathbf{x} + \int_{\partial B(t)} \boldsymbol{\tau}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} d\mathbf{x} \quad (2)$$

donde $g(\mathbf{x}, t)$ — fuente en $B(t)$; $g_{\Sigma}(\mathbf{x}, t)$ — fuente en la discontinuidad $\Sigma(t)$; y $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{x}, t)$ — flujo de ψ a través $\partial B(t)$.

- Ecuaciones de balance local**

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \nabla \cdot (\psi \mathbf{v}) = g + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}; \quad \forall \mathbf{x} \in B(t) \quad (3)$$

$$[[\psi(\mathbf{v} - \mathbf{v}_{\Sigma}) - \boldsymbol{\tau}]] \cdot \mathbf{n}_{\Sigma} = g_{\Sigma}; \quad \forall \mathbf{x} \in \Sigma(t), \quad (4)$$

donde $[[f]]$ es el salto de la función f en $\Sigma(t)$

Formulación Axiomática Mecánica Sistemas Continuos

- El procedimiento anterior hay que realizarlo para cada componente en cada fase, resultando tantas ecuaciones como componentes se tengan por fases.
- Posteriormente, se especifican las *leyes constitutivas* que estén ligadas con la naturaleza del problema, como por ejemplo: la ley de Darcy y la de Fick. Estas relaciones permiten ligar a las propiedades intensivas de interés entre sí y definir sus términos fuente y de flujo, además se añaden tantas relaciones como sean necesarias para que el sistema de ecuaciones esté determinado.
- Finalmente, el modelo se completa al especificar suficientes *condiciones iniciales y de frontera* de manera que el problema resultante sea bien planteado, es decir que posea solución única.

Modelo de Flujo Bifásico

- Ecuación de presión

$$\begin{aligned}
 & -\nabla \cdot \left\{ \lambda \mathbf{k} \cdot \nabla p^O - \left(\lambda^W \frac{dp_c^{OW}}{dS^W} \right) \mathbf{k} \cdot \nabla S^W \right\} \\
 & -\nabla \cdot \left\{ (\lambda^O \rho^O + \lambda^W \rho^W) \gamma \mathbf{k} \cdot \nabla z \right\} = q^O + q^W - \frac{\partial \phi}{\partial t}
 \end{aligned} \quad (5)$$

- Ecuación de saturación

$$\begin{aligned}
 & \phi \frac{\partial S^W}{\partial t} - \nabla \cdot \left\{ \lambda^W \mathbf{k} \cdot \nabla p^O - \left(\lambda^W \frac{dp_c^{OW}}{dS^W} \right) \mathbf{k} \cdot \nabla S^W \right\} \\
 & -\nabla \cdot \left\{ (\lambda^W \rho^W \gamma) \mathbf{k} \cdot \nabla z \right\} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right) S^W = q^W
 \end{aligned} \quad (6)$$

Modelo de Transporte Multicomponente

- Ecuación de microorganismos planctónicos (en agua)

$$\frac{\partial \phi S^W c_m^W}{\partial t} + \nabla \cdot [c_m^W \mathbf{u}^W - \phi S^W \mathbf{D}_m^W \cdot \nabla c_m^W] = (\mu - k_d - k_a) \phi S^W c_m^W + k_r \rho_m (\sigma - \sigma_{irr}) \quad (9)$$

- Ecuación de microorganismos sésiles (en biopelícula)

$$\frac{\partial \rho_m \sigma}{\partial t} = (\mu - k_d) \rho_m \sigma + k_a \phi S^W c_m^W - k_r \rho_m (\sigma - \sigma_{irr}) \quad (10)$$

- Ecuación de nutrientes (total)

$$\frac{\partial (\phi S^W + \rho_{r_b}^S h) c_n^W}{\partial t} + \nabla \cdot (c_n^W \mathbf{u}^W - \phi S^W \mathbf{D}_n^W \cdot \nabla c_n^W) = -\frac{\mu}{Y_{m/n}} (\phi S^W c_m^W + \rho_m \sigma) \quad (11)$$

Relaciones complementarias

- **Modificación de la porosidad:** En el modelo se toma en cuenta la modificación de la porosidad debido a los procesos de taponamiento y destaponamiento mediante la siguiente expresión:

$$\phi = \phi_0 - \sigma \quad (13)$$

- **Modificación de la permeabilidad absoluta:** Mientras que la modificación de la permeabilidad absoluta se considera en función de la porosidad mediante la ecuación de Carman-Kozeny [4]:

$$k = k_0 \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (14)$$

Condiciones iniciales y de frontera

- Condiciones iniciales

$$\begin{aligned} p^O(t_0) &= p_0^O, \quad S^W(t_0) = S_0^W; \\ c_m^W(t_0) &= c_{m0}^W, \quad \sigma(t_0) = \sigma_0, \quad c_n^W(t_0) = c_{n0}^W; \end{aligned} \quad (15)$$

- Condiciones de frontera

- 1 Entrada

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^O \cdot \mathbf{n} &= \mathbf{u}^W \cdot \mathbf{n} = \mathbf{u}_{in}^W \cdot \mathbf{n}; \\ -[c_\gamma^W \mathbf{u}_{in}^W - \phi S^W \mathbf{D}_\gamma^W \cdot \nabla c_\gamma^W] \cdot \mathbf{n} &= c_{\gamma in}^W \mathbf{u}_{in}^W \cdot \mathbf{n}, \quad \gamma = m, n; \end{aligned} \quad (16)$$

- 2 Salida

$$\begin{aligned} p^O &= p_{out}^O, \quad \frac{\partial S^W}{\partial \mathbf{n}} = 0; \\ \frac{\partial c_\gamma^W}{\partial \mathbf{n}} &= 0, \quad \gamma = m, n; \end{aligned} \quad (17)$$

Modelo Numérico

- Consiste en seleccionar los métodos numéricos más adecuados desde el punto de vista de eficiencia y precisión para la solución del Modelo Matemático establecido.
- Como el problema resultante es en todo caso un sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales, se requeriría de los siguientes métodos numéricos:
 - ➊ Métodos de discretización de las EDP en espacio y tiempo (FVM, FDM, FEM)
 - ➋ Métodos de linealización del tipo de Newton-Raphson
 - ➌ Métodos para resolver el sistema de ecuaciones algebraicas lineales resultantes (directos o iterativos)
 - ➍ Métodos óptimos de construcción de mallas

Modelo Numérico de Flujo y Transporte

- Para las derivadas temporales se usa una discretización en Diferencias Finitas de segundo orden hacia atrás resultando un esquema completamente implícito en el tiempo.
- Mientras que para los operadores resultantes en derivadas espaciales se aplica la formulación estándar del Método de Elemento Finito de tipo Galerkin, donde para las funciones bases y de peso se usaron polinomios cuadráticos de Lagrange.
- La malla que se usa es regular con elementos triangulares en 2D y tetraedros en 3D.

Modelo Numérico

- Para la linealización del sistema de ecuaciones se usa el método iterativo de Newton-Raphson.
- Para la solución del sistema de ecuaciones algebraicas resultantes se usa el método directo LU para matrices no simétricas y ralas.
- El esquema de acoplamiento entre ambos modelos es secuencial iterativo:
 - 1 se resuelve el modelo de flujo y se obtienen: saturaciones, presiones y velocidades de las fases,
 - 2 se resuelve el modelo de transporte y se obtienen: concentraciones de las componentes,
 - 3 se modifican las porosidades y permeabilidades, y se itera.

Modelo Computacional

- Una vez establecido todo el esquema numérico para la solución del Modelo Matemático se requiere su implantación computacional.
- La implantación computacional del modelo numérico de flujo y transporte fue realizada en el software COMSOL Multiphysics [7] usando el modo de PDE en la forma de coeficientes para el análisis dependiente del tiempo.

Experimento desplazamiento aceite por inyección de agua

- Primeramente se realiza la recuperación de aceite mediante el desplazamiento por inundación de agua.
- Se considera un núcleo de arenisca Berea de $0,25m$ de longitud y $0,04m$ de diámetro colocado en posición vertical, con porosidad homogénea ($0,2295$) y tensor de permeabilidades isotrópico ($k = 326md$),
- Inicialmente es saturado con aceite,
- Se inyecta agua a una tasa de un pie por día ($3,53E - 6m \cdot s^{-1}$) por el extremo inferior,
- Presión constante ($10kPa$) a la salida durante 200 horas.
- Los datos son tomados de (Hoteit & Firoozabadi, 2008 [8] y Chang et al, 1991 [5]).

Dominio y mallado del medio poroso (núcleo)

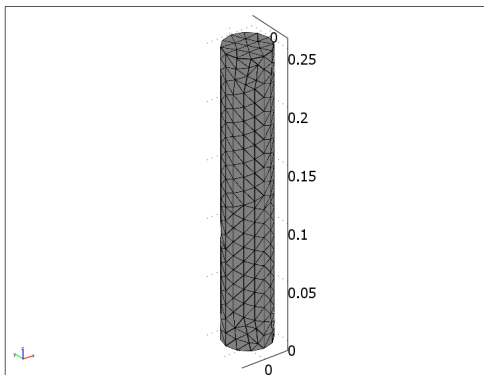


Figura 2: Número de elementos: 1,702, grados de libertad: 6,232, tiempo de ejecución: 170.179 seg, en una PC con CPU Intel Core2 Duo @2.66 GHz, 4Gb de RAM @1.97 GHz.

Presión de Aceite

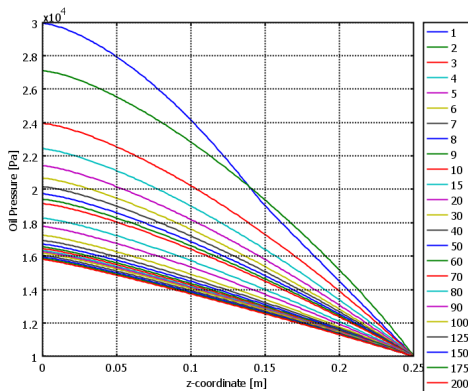


Figura 4: Evolución de la presión de aceite durante el experimento de inundación por agua para un período de tiempo de 200 horas.

Velocidad del Agua

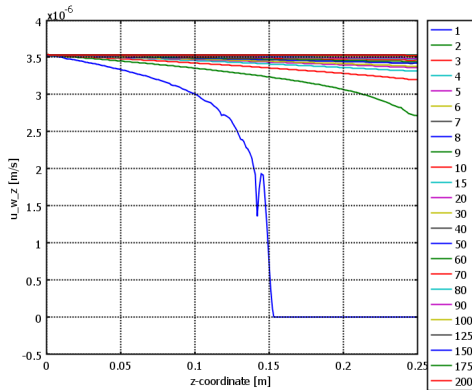


Figura 5: Evolución de la velocidad del agua durante el experimento de inundación por agua para un período de tiempo de 200 horas.

Caída de presión del aceite

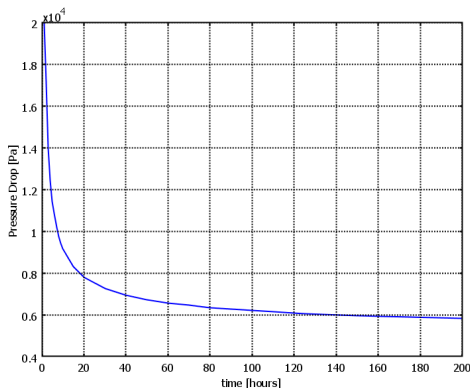


Figura 6: Evolución de la caída de presión del aceite durante el experimento de inundación por agua para un período de tiempo de 200 horas.

Recuperación de Aceite

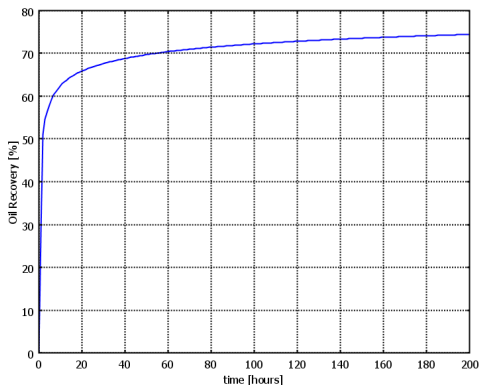


Figura 7: Recuperación de aceite por inundación con agua para un período de tiempo de 200 horas.

Interpretación de Resultados

- Se forma de un frente de agua a través del medio poroso que desplaza al aceite, el cual se está recuperando en el extremo superior del núcleo,
- El frente de agua irrumpe en el extremo superior del núcleo poco antes de las dos horas,
- La velocidad presenta cierta inestabilidad numérica mientras el desplazamiento del frente de agua no irrumpe en el extremo de producción del núcleo,
- La curva de recuperación de aceite muestra el comportamiento típico de un proceso de recuperación donde el medio poroso es fuertemente mojable por agua,
- La recuperación de aceite alcanza un valor de 74 % aproximadamente.

Experimento de Inyección de agua con Microorganismos + Nutrientes

- La segunda parte del experimento consiste en inyectar de manera continua durante 24 horas a través de la fase agua un cultivo bacteriano y nutriente en el núcleo de arenisca Berea para evaluar la recuperación adicional que se obtiene debido a la actividad microbiana (MEOR).
- Los datos que se usan son tomados de (Chang et al, 1991 [5]).

Dominio y mallado del medio poroso (núcleo)

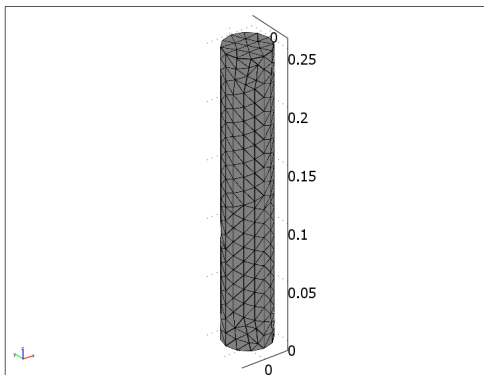


Figura 8: Número de elementos: 1,702, grados de libertad: 15,577, tiempo de ejecución: 216.906 seg, en una PC con CPU Intel Core2 Duo @2.66 GHz, 4Gb de RAM @1.97 GHz.

Saturación de Agua

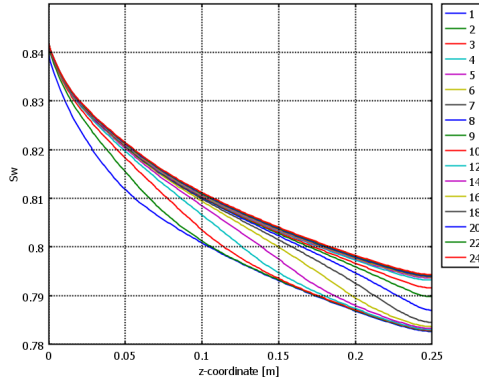


Figura 9: Evolución de la saturación de agua durante el experimento de inundación por agua con microorganismos y nutrientes para un período de tiempo de 24 horas.

Presión de Aceite

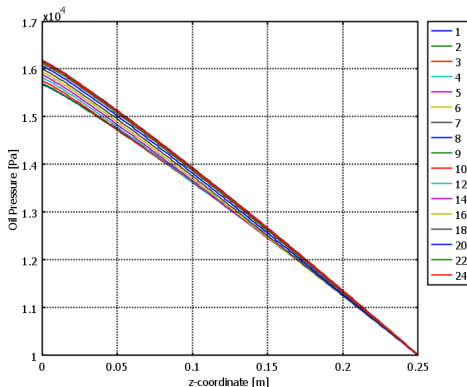


Figura 10: Evolución de la presión de aceite durante el experimento de inundación por agua con microorganismos y nutrientes para un período de tiempo de 24 horas.

Velocidad del Agua

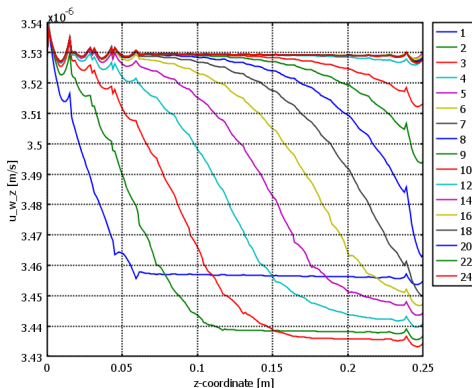


Figura 11: Evolución de la velocidad del agua durante el experimento de inundación por agua con microorganismos y nutrientes para un período de tiempo de 24 horas.

Caída de presión del aceite

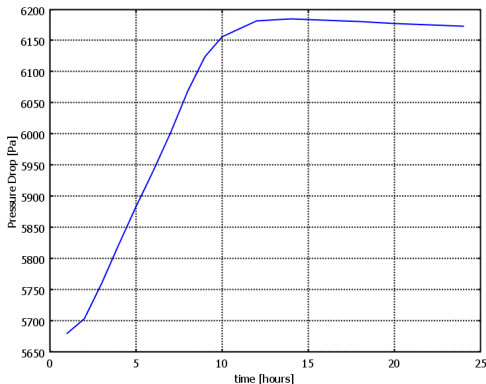


Figura 12: Evolución de la caída de presión del aceite durante el experimento de inundación por agua con microorganismos y nutrientes para un período de tiempo de 24 horas.

Recuperación de Aceite

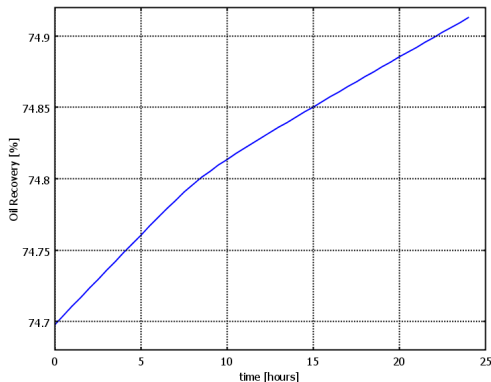


Figura 13: Recuperación de aceite por inundación con agua con microorganismos y nutrientes para un período de tiempo de 24 horas.

Concentraciones efluentes de microorganismos y nutrientes

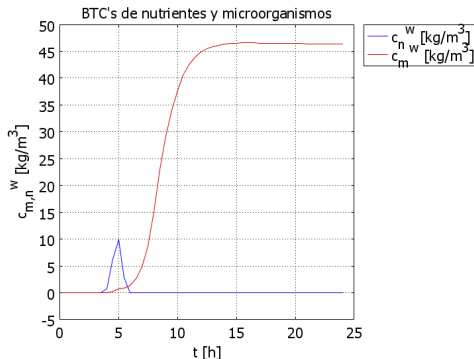


Figura 14: Curvas de la concentración efluente de cultivo bacteriano (curva roja) y de nutriente (curva azul) para un período de tiempo de 24 horas.

Distribución de nutriente y microorganismos

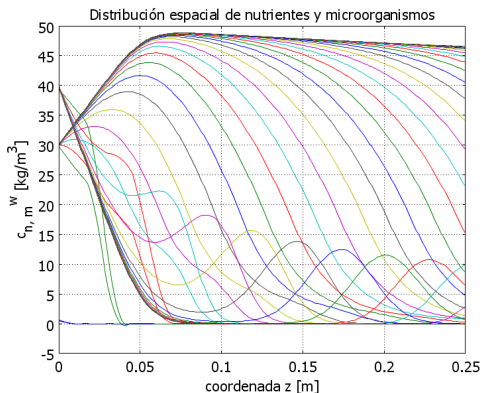


Figura 15: Distribución espacio-temporal (cada hora) de nutriente (salientes de 40 kg/m^3) y microorganismos planctónicos (salientes de 30 kg/m^3).

Distribución de microorganismos sésiles

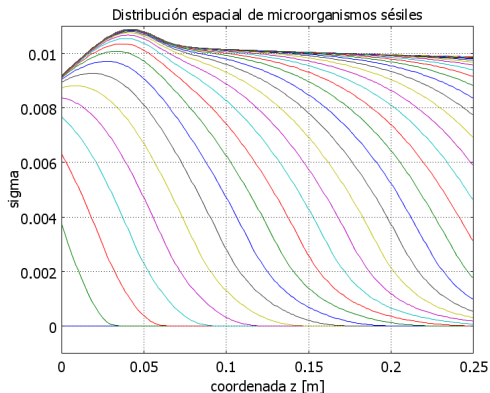


Figura 16: Distribución espacio-temporal (cada hora) de microorganismos sésiles.

Distribución en 3D de la porosidad

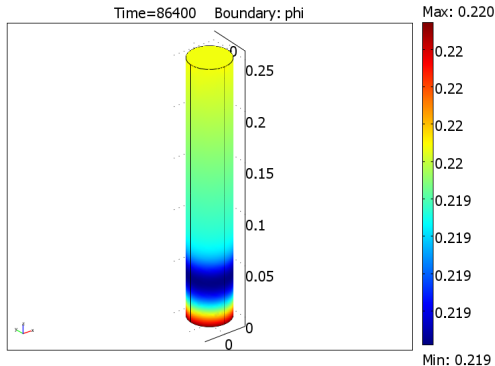


Figura 17: Distribución en 3D de la porosidad resultante del proceso de inyección de microorganismos y nutrientes para un tiempo de 24 horas.

Distribución en 3D de la permeabilidad

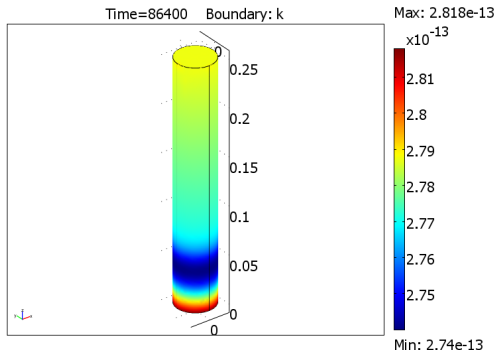


Figura 18: Distribución en 3D de la permeabilidad resultante del proceso de inyección de microorganismos y nutrientes para un tiempo de 24 horas.

Interpretación de Resultados

- La recuperación adicional de aceite durante las 24 horas de la inyección de microorganismos y nutrientes es del orden de 0,2 %,
- En la BTC de microorganismos hay una pequeña meseta de casi 45 min a las 5 horas de inyección, la cual se interpreta como un equilibrio dinámico entre el crecimiento/decaimiento y la adsorción/desorción de los microorganismos a lo largo del núcleo,
- Se establecen estados estacionarios: alrededor de las 6 horas prácticamente se han consumido por completo los nutrientes, mientras que alrededor de las 24 horas se alcanza un valor asintótico en la concentración de microorganismos,

Interpretación de Resultados

- Los microorganismos planctónicos y sésiles tienen valores máximos de concentración de $c_{pm}^w = 48,85 \text{ kg}/\text{m}^3$ y $\sigma = 1,09\%$ en $0,074\text{m}$ y $0,041\text{m}$ (aproximadamente $3/10$ y $1/6$ de la longitud del núcleo desde el lado de inyección), respectivamente,
- Esto se ve reflejado directamente en la modificación de la porosidad y consecuentemente de la permeabilidad, donde los mínimos de porosidad y permeabilidad se alcanzan en una zona alrededor de $0,05\text{m}$.

Discusión de los resultados

- El objetivo principal que se persigue con el experimento numérico aquí presentado es verificar el acoplamiento de los modelos de flujo y de transporte desarrollados de manera independiente, de manera que se pudiera evaluar su desempeño numérico conjuntamente.
- Una dificultad que afrontamos para poder validar las implementaciones numéricas desarrolladas consiste en la carencia de ejemplos bien documentados con los cuales poder comparar los resultados.
- En particular, en este ejemplo estamos usando datos tomados de diferentes fuentes, principalmente los datos del problema de flujo corresponden a la escala de yacimiento, mientras que los datos del problema de transporte (microbiano y de nutrientes) corresponden a experimentos a escala de núcleo.

Discusión de los resultados

- No obstante se puede hacer una evaluación cualitativa de los resultados numéricos obtenidos del acoplamiento de los modelos de flujo y de transporte.
- Existe un ligero incremento en la presión de 5700 a 6170 Pa durante el proceso de inyección de microorganismos y nutrientes, lo cual está asociado con la modificación de la porosidad y consecuentemente de la permeabilidad debido al crecimiento de biomasa.
- Esto prueba el principio que permitiría usar la biomasa para redireccionar el flujo e incrementar la eficiencia de barrido del aceite en un medio poroso heterogéneo.

Discusión de los resultados

- Con respecto al porcentaje de recuperación adicional que se obtiene en esta etapa se puede observar que es muy pequeño, menor del 1 %, y no pudiera ser directamente atribuible a los efectos mecánicos debidos al crecimiento microbiano como es el incremento de la presión.
- Se debe hacer notar que en este ejemplo sólo se estudia el crecimiento de la biomasa.
- Para modelar otros efectos como son: la modificación de las μ , mojabilidad de la roca, de las curvas de k_r y de p_c debido a la acción de bioproductos (gases, polímeros, surfactantes, etc) se requiere investigar sus efectos sobre fluidos y rocas, para obtener relaciones que cuantifiquen las variaciones de propiedades petrofísicas y de fluidos en función de las concentraciones de los bioproductos.

Trabajo en curso y futuro

- Trabajo experimental a escala de núcleo y condiciones de laboratorio
- Trabajo experimental a escala de núcleo y condiciones de yacimiento
- Generalización del modelo para incorporar los efectos debido a la acción de bioproductos (gases, polímeros, surfactantes, etc)

Referencias

- [1] M. B. Allen, I. Herrera and G. F. Pinder, *Numerical modeling in science and engineering*, John Wiley & Sons., USA, (1988).
- [2] Jacob Bear, *Dynamics of fluids in porous media*, Dover, USA, (1972).
- [3] R. Brooks and A. Corey, "Hydraulic Properties of Porous Media", of *Colorado State University Hydrology Paper*, 3, Colorado State University, (1964).
- [4] P. C. Carman, *Flow of gases through porous media*, Butterworth, London, (1956).
- [5] M. M. Chang, F. T-H. Chung, R. S. Bryant, H. W. Gao and T. E. Burchfield, "Modeling and laboratory investigation of microbial transport phenomena in porous media", *SPE*, **22845**, 299-308, (1991).
- [6] Z. Chen, G. Huan and Y. Ma, *Computational methods for multiphase flows in porous media*, SIAM, USA, (2007).
- [7] COMSOL Multiphysics, *Modeling Guide Version 3.4*, COMSOL AB, USA, (2007).
- [8] Hoteit H., Firoozabadi A., *Numerical modeling of two-phase flow in heterogeneous permeable media with different capillarity pressures*, *Advances in Water Resources*, 31, 56-73 (2008).

Muchas gracias por su paciencia

¿Preguntas , Comentarios?