

**Título** Un estudio de estabilidad y convergencia en la simulación de desplazamiento agua-petróleo utilizando OpenFOAM

---

**Tipo de Producto** Ponencia completa

---

**Autores** Soledad Fioroni, Axel E. Larreteguy y Gabriela B. Savioli

---

**Publicado en:** ENIEF 2017, La Plata.

**Código del Proyecto y Título del Proyecto**

---

D16T02 - Simulación de flujo multifásico con efectos geomecánicos para modelar procesos de fracturación hidráulica en reservorios no convencionales

---

**Responsable del Proyecto**

---

Soledad Fioroni

---

**Línea**

---

FC Fluidodinámica Computacional

---

**Área Temática**

---

MYS Modelado y Simulación Computacional (transversal)

---

**Fecha**

---

Noviembre 2017

---

# Un Estudio de Estabilidad y Convergencia en la Simulación de Ensayos de Desplazamiento Agua-Petróleo Utilizando OpenFOAM®

Soledad Fioroni<sup>b</sup>   Axel E. Larreteguy<sup>†</sup>   Gabriela B. Savioli<sup>‡</sup>

<sup>b</sup>Instituto de Tecnología, UADE - CONICET, [sfioroni@uade.edu.ar](mailto:sfioroni@uade.edu.ar)

<sup>†</sup>Instituto de Tecnología, UADE, [alarreteguy@uade.edu.ar](mailto:alarreteguy@uade.edu.ar)

<sup>‡</sup>Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Instituto del Gas y del Petróleo, [gsavioli@fi.uba.ar](mailto:gsavioli@fi.uba.ar)

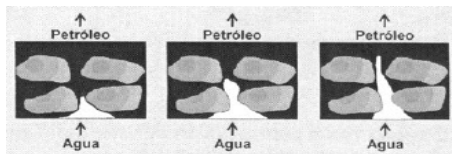


09 de Noviembre de 2017

ENIEF 2017 - Universidad Nacional de La Plata

# Introducción

## Problema



## Objetivo

Estudiar el comportamiento de las soluciones del sistema de ecuaciones no-lineales, que rigen el flujo en medios porosos, al variar el esquema de interpolación temporal.

## Casos a Estudiar

- 1D: Solución analítica de Buckley-Leverett
- 2D: Experiencia en una celda de laboratorio

# Introducción

## Simulación del flujo en medios porosos

Involucra la resolución de las siguientes ecuaciones:

*Conservación de masa:*

$$\phi \frac{\partial S_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{v}_i = q_i$$

*Movimiento de Darcy:*

$$\mathbf{v}_i = -\frac{\mathbf{K}k_{ri}}{\mu_i} \cdot (\nabla p_i - \rho_i \mathbf{g} \nabla D)$$

(*i* = o:petróleo, w:agua, *g*:gas)

# Introducción

## *porousMultiphaseFOAM* ‡

- Herramienta de cálculo dentro de la filosofía de OpenFOAM®.
- Simula flujos bifásicos incompresibles con efectos capilares en medios porosos e isotérmicos.
  - Múltiples hipótesis simplificatorias.
- Restricciones en los pasos temporales:
  - $\Delta t$
  - Courant
  - $\Delta S_{max}$

‡ P. HORGUE, C. SOULAINÉ, J. FRANC, R. GUIBERT, AND G. DEBENEST (2015), *An open-source toolbox for multiphase flow in porous media*. Computer Physics Communications, 187, 217-226.

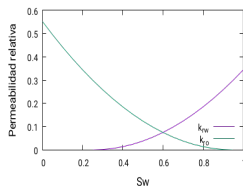
# Introducción

## Modelo de Permeabilidad y Capilaridad (Brooks And Corey)

### Permeabilidades Relativas

$$k_{ra}(S_{b,eff}) = k_{ra}^*(1 - S_{b,eff})^n$$

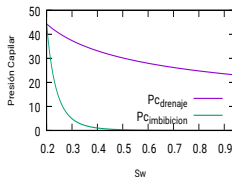
$$k_{rb}(S_{b,eff}) = k_{rb}^* S_{b,eff}^n$$



### Capilaridad

$$p_c(S_{b,pc}) = p_{c,0} S_{b,pc}^{-\alpha}$$

$$\text{Con } S_{b,eff} = \frac{S_b - S_{b,irr}}{1 - S_{a,irr} - S_{b,irr}} \text{ y } S_{b,pc} = \frac{S_b - S_{pc,irr}}{S_{pc,max} - S_{b,irr}}$$



# Caso Unidimensional

## Hipótesis

Flujo	Medio
Bifásico	Homogéneo
1D - Horizontal	Isotérmico
Presión capilar despreciable	Mojable al agua

Testigo lineal: Inyección por el volumen rojo

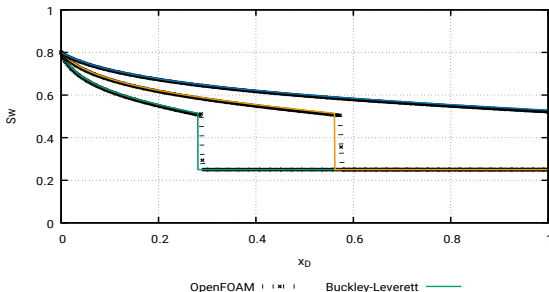


# Caso Unidimensional

## History Matching (Regresión a partir de datos teóricos o experimentales)

$$k_{ro}(S_w) = 0.9 \left( 1 - \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right)^2 \quad k_{rw}(S_w) = 0.3 \left( \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right)^2$$

Celdas: 400 -  $\Delta t = 2s$



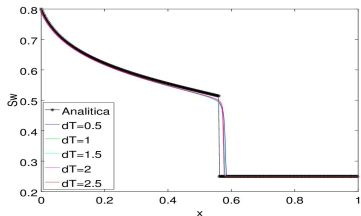
Distribución de saturaciones a  $t_D = 0.1; 0.2; 0.4$



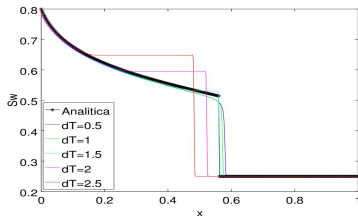
# Caso Unidimensional

Restricciones:  $\Delta t$  y Courant

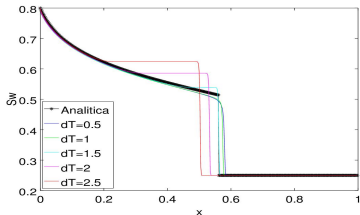
Euler



Crank-Nicolson



Backward

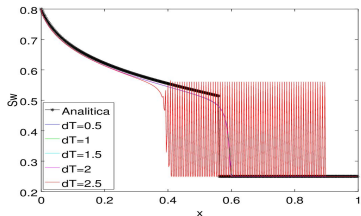


Aparecen soluciones que carecen de sentido físico.

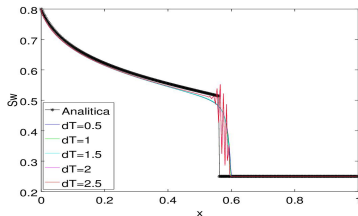
# Caso Unidimensional

Restricciones:  $\Delta t$  y Courant - Considerando  $Pc$

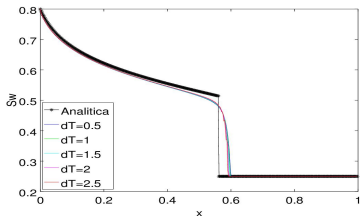
Euler



Crank-Nicolson



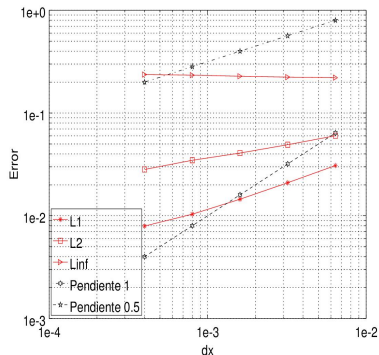
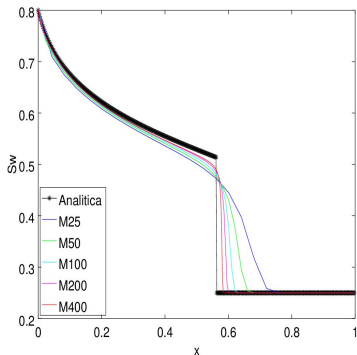
Backward



# Caso Unidimensional

## Influencia del refinamiento de malla

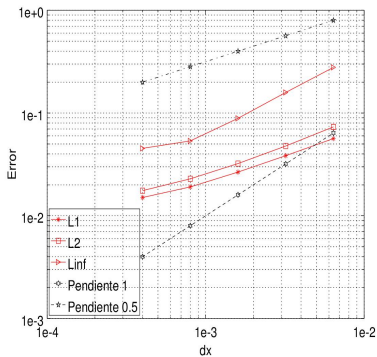
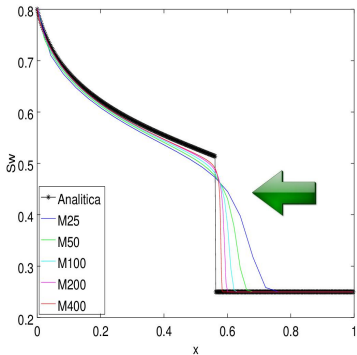
Euler sin  $P_c$  –  $\Delta t = 0.5s$



# Caso Unidimensional

## Influencia del refinamiento de malla

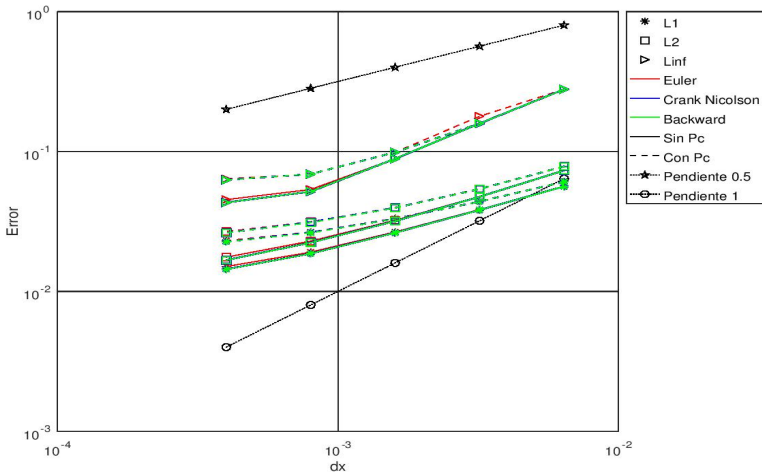
Euler sin  $P_c$  –  $\Delta t = 0.5s$



# Caso Unidimensional

## Influencia del refinamiento de malla

$\Delta t = 0.5s$

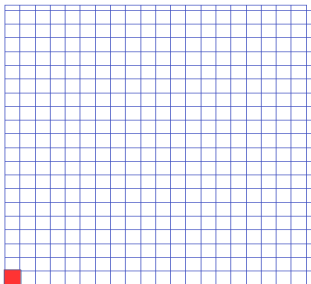


# Caso Bidimensional

## Celda de Laboratorio

### Geometría y Malla

- Pozo inyector: Extremo inferior izquierdo
- Pozo productor: Extremo superior derecho



### Procesos a simular

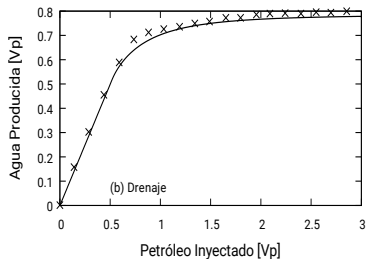
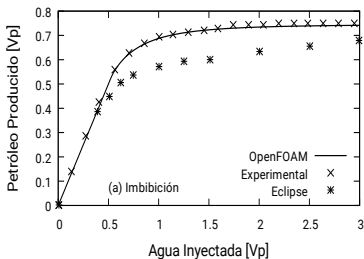
- Drenaje: Desplazamiento de la fase mojanante (agua) por la fase no mojanante (petróleo);
- Imbibición: Desplazamiento de la fase no mojanante por la fase mojanante

# Caso Bidimensional

## History Matching

$$k_{ro}(S_w) = 0.6 \left( 1 - \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right)^{1.35} \quad k_{rw}(S_w) = 0.4 \left( \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right)^{1.35}$$

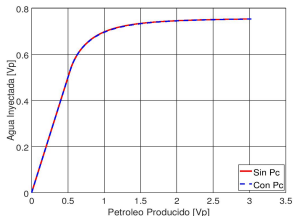
Celdas: 2700 -  $\Delta x = 0.004m$  -  $\Delta t = 5s$



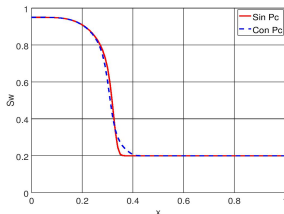
# Caso Bidimensional

**Imbibición**  
(Agua desplaza Petróleo)

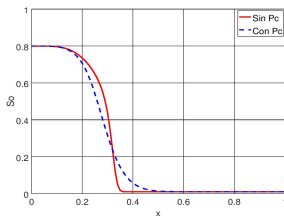
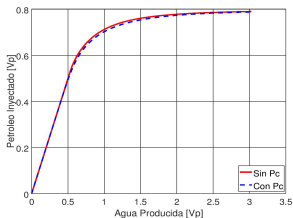
Producción Acumulada



Perfil de Saturación  
( $t = 0.1V_p$ )



**Drenaje**  
(Petróleo desplaza Agua)



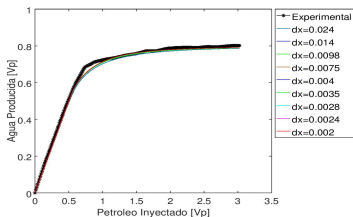


# Caso Bidimensional

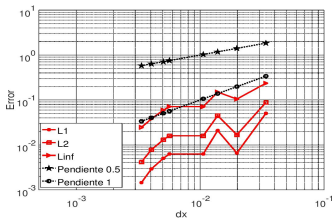
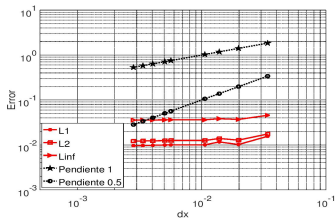
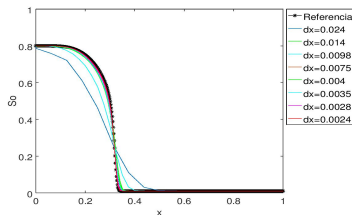


## Drenaje (Euler)

### Producción Acumulada



### Perfil de Saturación ( $t = 0.1V_p$ )

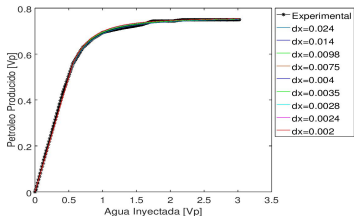


# Caso Bidimensional

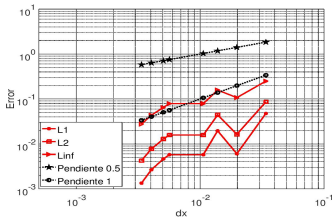
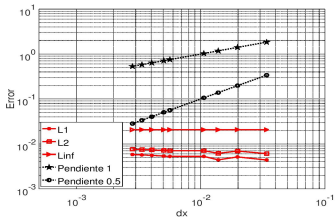
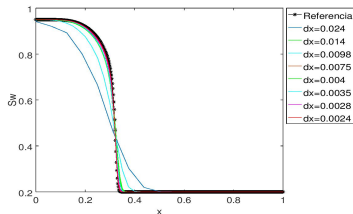


## Imbibición (Euler)

### Producción Acumulada



### Perfil de Saturación ( $t = 0.1V_p$ )



# Caso Bidimensional

Relación entre  $\Delta t = 1.5s$  y  $\Delta x$

$\Delta x$	$\Delta t / \Delta x$	$(\Delta t / \Delta x)_{rel}$
0.024	62.5	0.08
0.014	107.14	0.14
0.0098	153.06	0.20
0.0075	200	0.27
0.004	375	0.5
0.0035	428.57	0.57
0.0028	535.71	0.71
0.0024	625	0.83
0.002	750	1

# Caso Bidimensional

Relación entre  $\Delta t = 1.5s$  y  $\Delta x$

$\Delta x$	$\Delta t / \Delta x$	$(\Delta t / \Delta x)_{rel}$
0.024	62.5	0.08
0.014	107.14	0.14
0.0098	153.06	0.20
0.0075	200	0.27
0.004	375	0.5
0.0035	428.57	0.57
0.0028	535.71	0.71
0.0024	625	0.83
0.002	750	1

Grupo 1  
Grupo 2

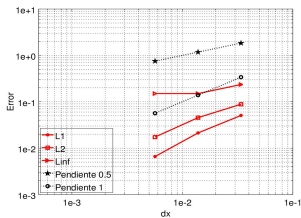
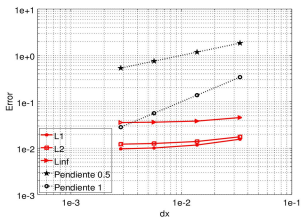
# Caso Bidimensional

## Drenaje (Euler)

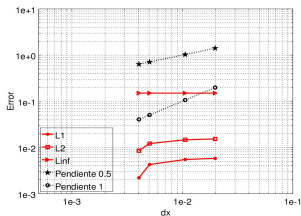
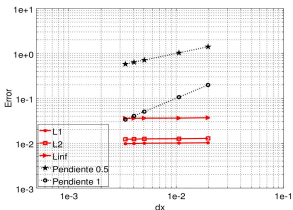
### Producción Acumulada

### Perfil de Saturación ( $t = 0.1V_p$ )

Grupo 1



Grupo 2



# Caso Bidimensional

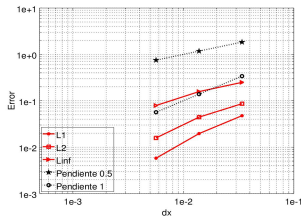
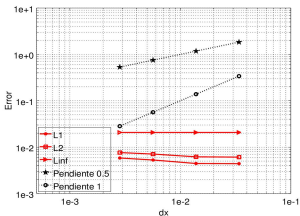


## Imbibición (Euler)

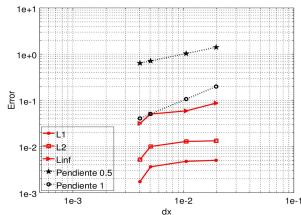
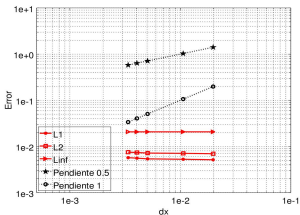
### Producción Acumulada

### Perfil de Saturación ( $t = 0.1V_p$ )

Grupo 1



Grupo 2



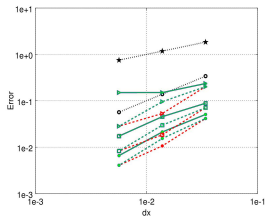
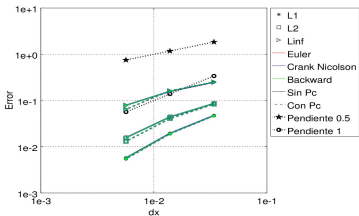
# Caso Bidimensional

## Comparación en Saturación

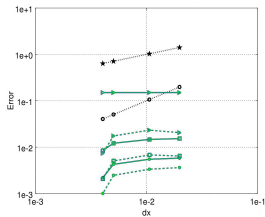
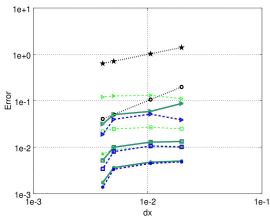
### Imbibición

### Drenaje

Grupo  
1



Grupo  
2



# Conclusiones



- Buscar la estabilidad y convergencia de la solución no siempre conduce a un resultado con sentido físico
- Tener en cuenta la restricción temporal determinada mediante el  $\Delta S_{max}$
- No basta con analizar el error según una sola norma
- Utilizar únicamente los datos de producción acumulada en el history matching no es suficiente
- Estudiar casos que tengan relaciones  $\Delta t/\Delta x$  comparables



Gracias por su atención

