

"Metodología para la obtención de propiedades efectivas de flujo en medios porosos usando un Modelo de Red de Poros"

Edgar G. Martínez Mendoza¹ Martín A. Díaz Viera²



¹Facultad de Ingeniería UNAM
edgar.g.martinez@hotmail.com

²Instituto Mexicano del Petróleo
mdiazv@imp.mx



XXX Jornadas Técnicas de la AIPM

México D.F. 30 de Octubre de 2015, 10:30-11:00

- 1 **Introducción**
 - Objetivo y alcance
 - Antecedentes
- 2 **Modelo de Red de Poros (MRP)**
 - Definición
 - Discretización del medio poroso
- 3 **Metodología para generar un MRP**
 - Red
 - Geometría
 - Fases fluidas
 - Leyes constitutivas
 - Algoritmos
- 4 **Aplicación del MRP**
 - Permeabilidad absoluta
 - Curva de Presión Capilar
 - Descripción del MRP
 - Resultados
- 5 **Comentarios finales**
 - Observaciones y conclusiones
 - Trabajo en curso

Objetivo y alcance de los Modelos de Red de Poros

Objetivo

Presentar a los Modelos de Red de Poros (MRP) como un **enfoque metodológico para la caracterización de medios porosos** a escala de poro, el cual permita **predecir el comportamiento de propiedades efectivas de flujo y transporte**.

Alcance

Se emplea la metodología de un Modelo de Red de Poros para simular **flujo y desplazamiento inmisible**, bajo condiciones ideales.

Estado del Arte I

- Pionero: Irving Fatt en 1956. Desarrolló un sistema de redes para el estudio de flujo a escala de poro, observando la importancia de las **fuerzas capilares en los procesos de flujo** en medios porosos.
- Lenormand y Boris 1980, y Chandler et al. 1982, incorporan la **teoría de Percolación para modelar desplazamientos de fluidos inmiscibles** (procesos de drene primario y de imbibición).
- En 1998 Pål-Eric Øren desarrolló de un método de reconstrucción de imágenes para simular drene primario e inyección de agua, derivando así **relaciones entre la estructura de poro, la mojabilidad y la presión capilar**.

Estado del Arte II

- Una línea de trabajo reciente es la de Martin Blunt y colaboradores. Sus investigaciones se enfocan en **técnicas especializadas de imagen** de medios porosos y sus **reconstrucciones tridimensionales**. Después generan MRP's para observar **los efectos de mojabilidad en flujo de fluidos newtonianos y no newtonianos**, para varios tipos de roca.

¿Qué es un Modelo de Red de Poros?

MRP: técnica que discretiza/representa un medio poroso, con el fin de estudiar la influencia de fuerzas capilares y los efectos de mojabilidad en parámetros de flujo y transporte.

Principales características:

- El espacio poroso de una roca se representa mediante una red
- Se le asignan propiedades topológicas y geométricas
- Predicciones de propiedades de flujo y transporte considerablemente más rápidas que las mediciones directas
- Puede emplear pequeñas muestras de recortes y fragmentos de núcleos

De Medio Poroso a MRP

Espacio poroso: cuerpos de poros (poros) que son conectados por caminos más estrechos llamados gargantas de poro (gargantas).

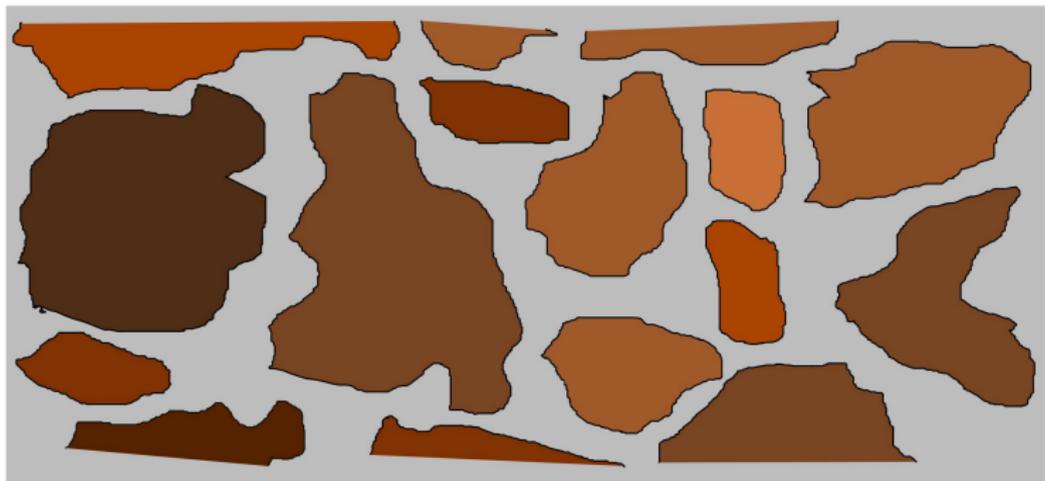


Figura 1: Esquema de un medio poroso. Porosidad en gris.

De Medio Poroso a MRP

Espacio poroso: cuerpos de poros (poros) que son conectados por caminos más estrechos llamados gargantas de poro (gargantas).

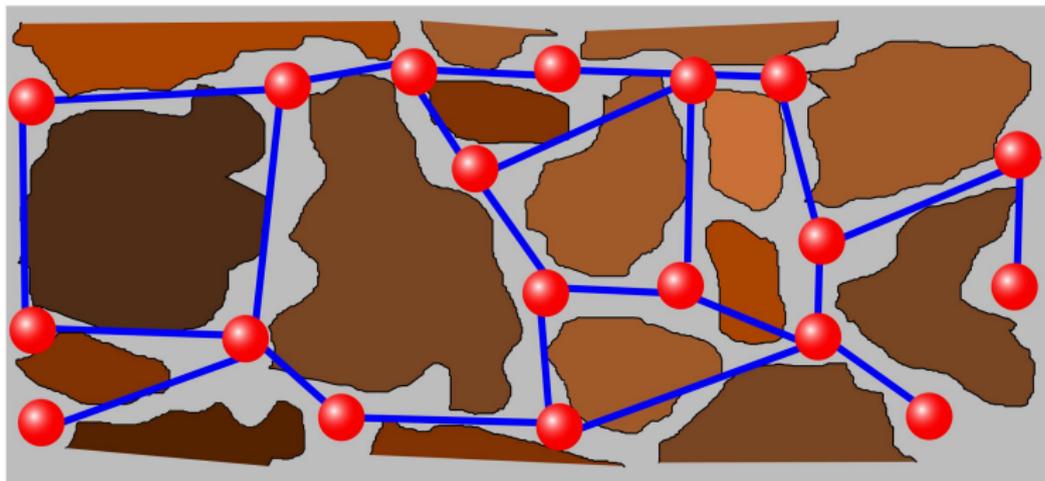


Figura 2: Espacio poroso discretizado mediante un MRP

Pero... ¿Cómo obtener información del medio poroso?

- Métodos de imagen (medición) una sola
- Métodos de reconstrucción (procesamiento) muestra
- Métodos estocásticos (genera variantes)

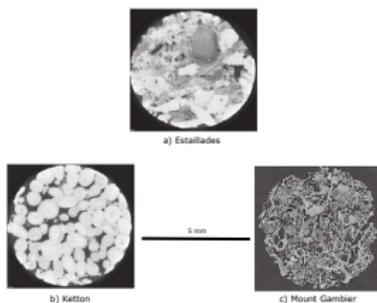


Figura 3: Imágenes micro-CT de tres muestras diferentes de carbonatos en escala de grises.

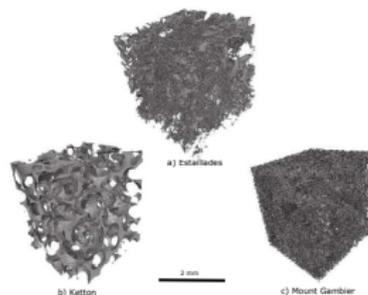


Figura 4: Representación tridimensional del espacio poroso de las muestras de carbonatos

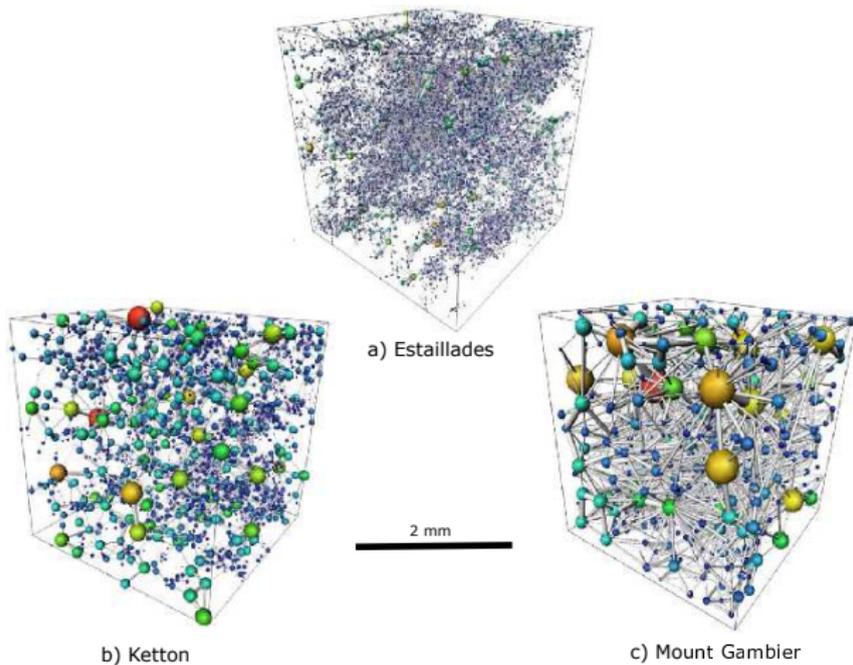


Figura 5: El espacio poroso de las muestras se representa como un MRP de esferas y cilindros

Metodología para generar un MRP

Elementos que constituyen un MRP

- 1 Red
- 2 Geometría
- 3 Fases fluidas
- 4 Leyes constitutivas
- 5 Algoritmos

1. Red

Conjunto de sitios localizados espacialmente, los cuales se conectan mediante enlaces.

Número de coordinación: enlaces conectados a un sitio

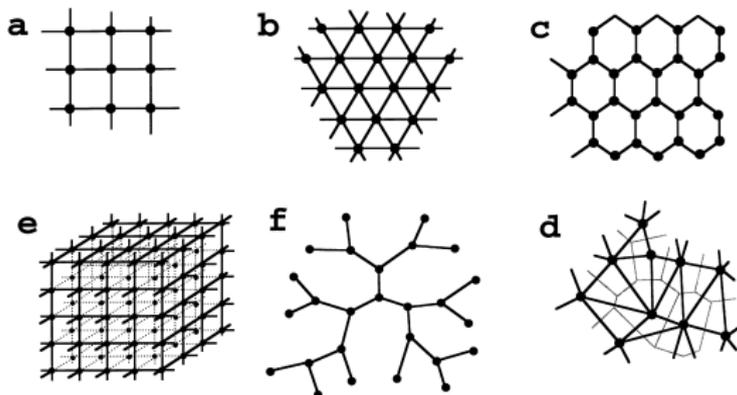
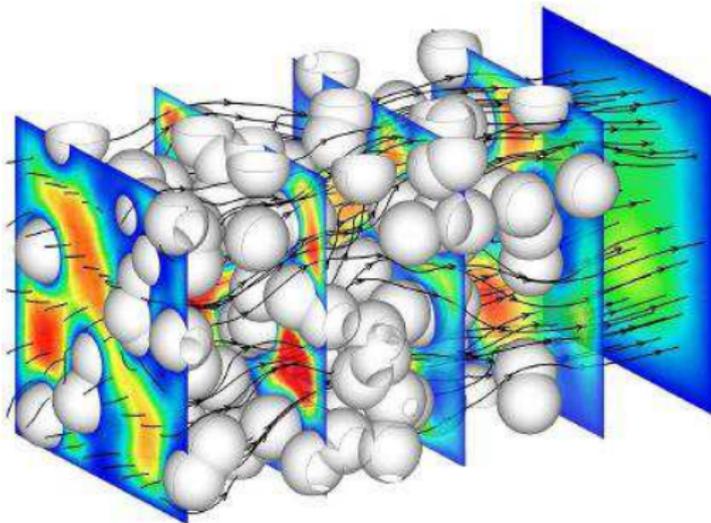


Figura 6: Principales redes empleadas en un MRP

3. Fases fluidas

Dependiendo del proceso a simular, se requerirá **caracterizar física y químicamente las fases a emplear** (por ejemplo mercurio, agua, aire, petróleo, etc.).



4. Leyes constitutivas

Definiciones, leyes y ecuaciones físicas que **regirán el comportamiento de las fases** de acuerdo los procesos deseados y a las características geométricas y topológicas del MRP.

5. Algoritmos

Algoritmo	Propiedad a obtener
Flujo de Stokes	Presión
Difusión de Fick	Fracción molar
Conducción de Fourier	Temperatura
Conducción de Ohm	Diferencia de potencial
Percolación de invasión	Curva de presión capilar

Metodología para generar un MRP: Línea de trabajo

Pore-to-Core

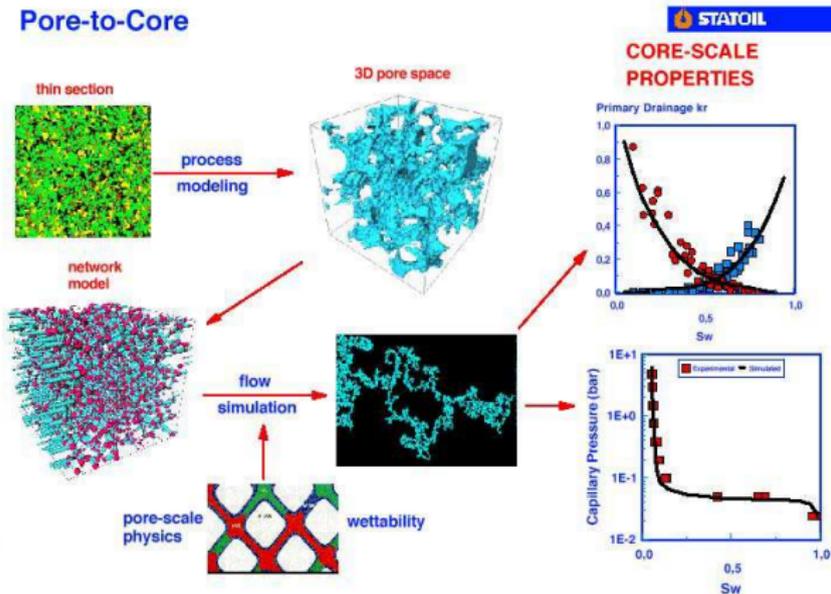


Figura 8: Pore to Core (M. Blunt, 2001 SPE101451)

1º Aplicación del MRP

Permeabilidad absoluta en una dirección

Permeabilidad absoluta: Flujo en el MRP

Consideraciones:

- Fluido newtoniano e incompresible con propiedades constantes
- Flujo laminar con simetría axial
- Tubería circular uniforme (sección transversal más larga que su diámetro)
- Flujo estacionario
- El fluido no presenta aceleración
- Gradiente de presión constante aplicado en los extremos de la tubería
- El fluido no se adhiere a la pared de la tubería
- No hay puntos fuente/sumidero

Permeabilidad abs: Modelo de Flujo I

Relación Hagen-Poiseuille

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\mu L} \quad (1)$$

Balance de masa

$$\sum q_{ij} = 0 \quad (2)$$

Donde q_{ij} es flujo volumétrico entre los poros i y j , r radio del conducto, μ viscosidad del fluido, L distancia entre los poros i y j , p presión en el poro.

Considerando la conductancia de un fluido newtoniano en una garganta cilíndrica:

$$\kappa_{ij} = \frac{\pi r^4}{8\mu L} \quad (3)$$

Permeabilidad abs: Modelo de Flujo II

El modelo de flujo para un MRP es

$$\sum q_{ij} = \sum \kappa_{ij}(p_i - p_j) = 0 \quad (4)$$

Al desarrollar la Ec. 4 se conforma un sistema de ecuaciones de la forma:

$$\mathbb{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$$

Donde \mathbb{A} es una matriz bandeda conformada por las conductividades κ , \mathbf{x} es el vector de presiones en los poros de la red y \mathbf{b} contiene los valores de las condiciones de frontera.

Permeabilidad absoluta

De la Ley de Darcy

$$K = \frac{\mu Q L}{A(p_{in} - p_{out})}$$

Donde A y L son el área de la sección transversal y la longitud del MRP, respectivamente, p_{in} es la presión de entrada y p_{out} la presión de salida.

Q se obtiene de la ecuación de flujo.

2º Aplicación del MRP

Curva de Presión Capilar

Curva P_c : Drene Primario-Percolación I

El MRP modela drene primario mediante percolación de invasión.

- **Fluido defensor**, inicialmente ocupa la red
- Probabilidad $\mathbb{P} \implies$ **Presión capilar**
- Crecimiento del camino \implies **Avance del fluido invasor**
- Camino continuo desde puntos definidos \implies **Fuente de invasión**

Del camino del fluido invasor se calculan:

- ✓✓ Presiones capilares debido a la invasión
- ✓✓ Volúmenes de las fases

Curva de Presión Capilar

Cálculo de presiones capilares

Para un MRP con gargantas cilíndricas, se tiene que:

$$p_c = \frac{-2\sigma \cos \theta}{r} \quad (5)$$

Donde p_c es la presión capilar, σ la tensión interfacial, θ el ángulo de contacto y r el radio del conducto.

Cálculo de saturaciones

Para la fase no mojante (nwp) o invasora

$$S_{nwp} = \frac{\sum \text{Volmen de poros y gargantas invadidos}}{\sum \text{Volumen de todos los elementos de la red}} \quad (6)$$

Para la fase mojante (wp) o defensora

$$S_{wp} = 1 - S_{nwp} \quad (7)$$

Descripción del MRP

para el cálculo de permeabilidad
y curva de presión capilar

Descripción del MRP: Red y Geometría

Dimensión	10x10x10
Espaciado	$40.5 \times 10^{-6} [m]$
Número de coordinación	6
Sección Transversal	Circular
Nodos	Esferas
Enlaces	Cilindros
Total poros	1,000
Total gargantas	2,700

Sistema de referencia: cartesiano

Descripción del MRP: Red y Geometría

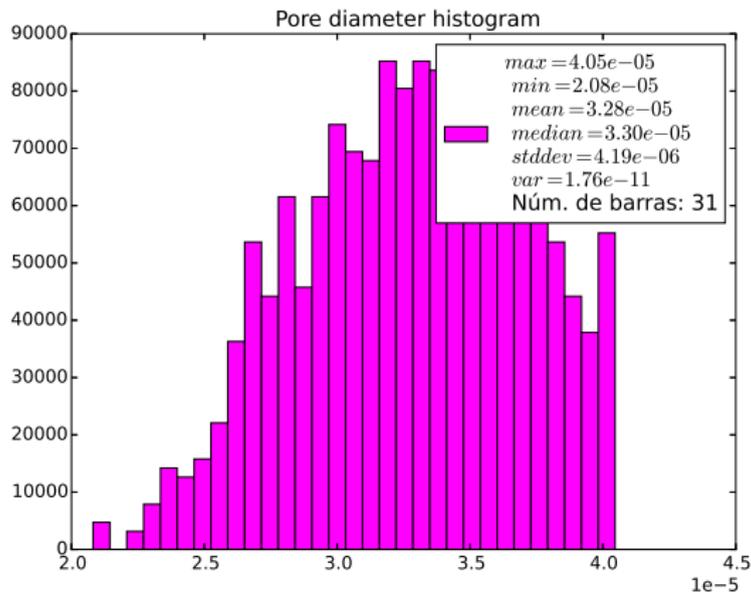


Figura 11: Histograma de los diámetros de poro. Datos tomados de Gostick et al. 2007

Descripción del MRP: Red y Geometría

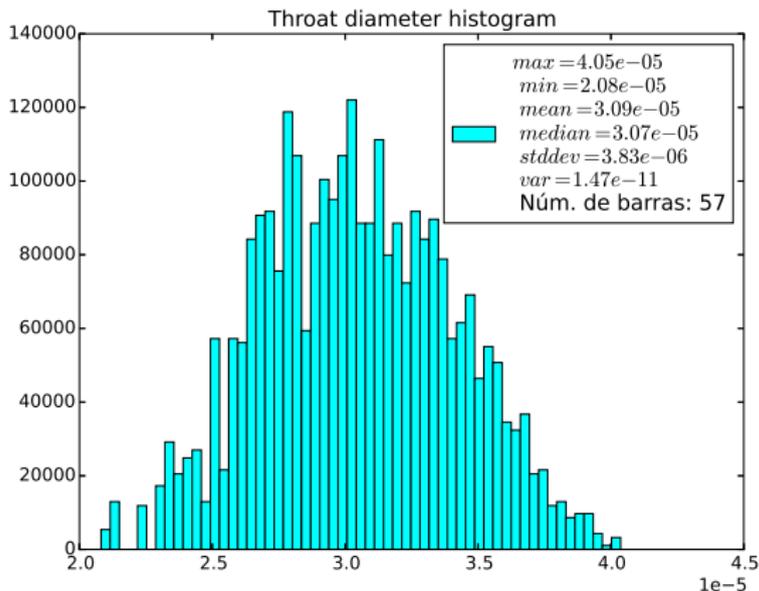


Figura 12: Histograma de los diámetros de garganta. Datos tomados de Gostick et al. 2007

Descripción del MRP: Red y Geometría

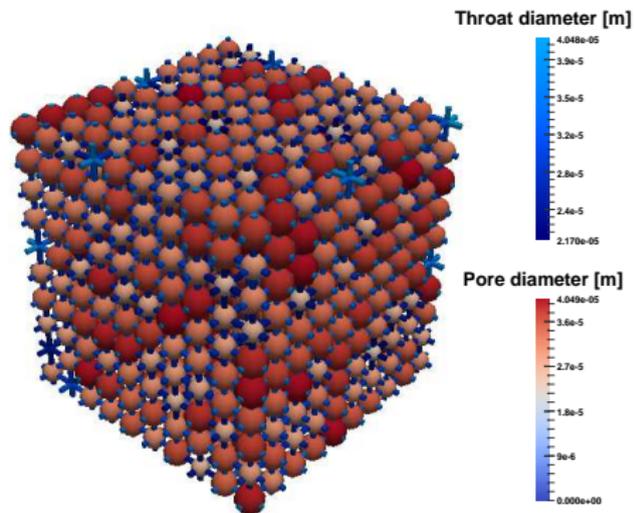


Figura 13: MRP empleado en este trabajo

Descripción del MRP: Fases Agua y Aire

Fase invasora (no mojante): agua

Fase defensora (mojante): aire

Propiedad	Agua	Aire	Unidad
Viscosidad	8.9319×10^{-4}	1.8444×10^{-5}	kg/m.s
Tensión superficial	0.07199		N/m
Ángulo de contacto	100		°
Presión crítica	22064000	3786000	Pa
Temperatura crítica	647.1	132.5	K
Densidad	996.952	1.1843	kg/m ³
Peso molecular	0.018	0.02896	kg/mol
Temperatura	298	298	K

Leyes constitutivas y Algoritmos

Leyes constitutivas

Conductancia hidráulica

Presión capilar, con σ y θ constantes

Algoritmos

Flujo de Stokes \implies Permeabilidad absoluta

Percolación de invasión \implies Curva de presión capilar

Resultados: Permeabilidad Absoluta

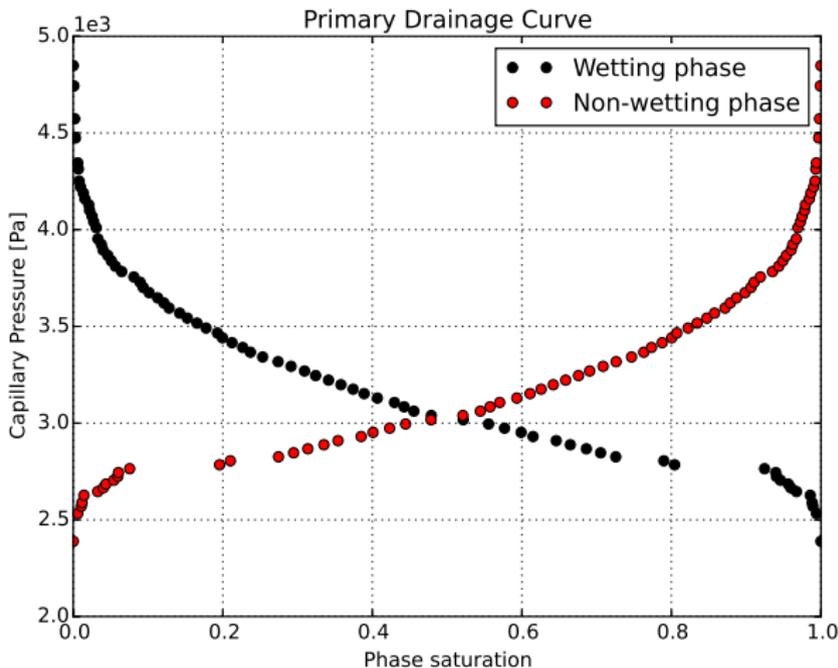
Resultados: Permeabilidad Absoluta

Dirección del flujo: eje de las abscisas

Propiedad	Valor	Unidades
Área	1.64E-07	m^2
Longitud	0.0003645	m
Gasto	1.62E-12	$\frac{m^3}{s}$
Permeabilidad en dirección x	1.61E-11	m^2

Resultados: Curva de Presión Capilar

Resultados: Curva de Presión Capilar II



Observaciones y conclusiones

- Los tamaños de poros y gargantas son **cruciales** en los MRP: influyen directamente en los procesos simulados
- Este trabajo considera **condiciones ideales y controladas**: para fines ilustrativos
- La metodología de MRP en su totalidad, conforma una **alternativa para caracterizar un medio poroso**

Trabajo en curso

- Incorporación de distribuciones de tamaños de poro y gargantas **provenientes de muestras de rocas**
- Emplear redes provenientes de reconstrucciones: **topología más compleja**
- Comparativas con trabajos experimentales, para **ajustar** el MRP
- Curvas de **permeabilidades relativas**

Bibliografía I

-  B. Berkowitz and R. Ewing.
Percolation theory and network modeling applications in soil physics.
Surveys in Geophysics, (19):23–72, 1998.
-  R. Chandler, J. Koplik, K. Lerman, and J. Willemsen.
Capillary displacement and percolation in porous media.
J. Fluid Mech., 119:248–267, 1982.
-  P.J. Flory.
Molecular size distribution in three dimensional polymers. i. gelation.
J. Am. Chem. Soc., (3083), 1941.
-  Gostick, M.A. J.T., Ioannidis, M.W. Fowler, and M.D. Pritzker.
Pore network modeling of fibrous gas diffusion layers for polymer electrolyte membrane fuel cells.
Journal of Power Sources, (177):277–290, 2007.
-  Fatt I.
The network model of porous media 1: Capillary pressure characteristics.
Society of Petroleum Engineers SPE, (574):1–38, 1956.

Bibliografía II

-  R. Lenormand and S. Boris.
Acad. Sci., (B291):279, 1980.
-  Blunt M.J., Jackso M.D.n, Piri M., and Valvatne P.H.
Detailed physics, predictive capabilities and macroscopic consequences for pore-network models of multiphase flow.
Advances in Water Resources, (25):1069–1089, 2002.
-  Oren P.E., Bakke S., and Arntzen O.J.
Extending predictive capabilities to network models.
Society of Petroleum Engineers SPE, (52052):324–336, 1998.
-  Muhammad Sahimi.
Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock.
Wiley-VCH, second edition, 2011.
-  W.H. Stockmayer.
Theory of molecular size distribution and gel formation in branched-chain polymers.
J. Chem. Phys., (45), 1943.

Agradecimientos

- Gracias al Dr. Martín A. Díaz Viera
- Grupo de Modelación Estocástica Espacial
- Instituto Mexicano del Petróleo

¡Gracias por su atención!

¿Preguntas y Comentarios?