Gestão:

Reunião de Acompanhamento e Avaliação - RAA 2026

Modelagem digital de rochas por micro-CT 4D e IA para reduzir incertezas em CCUS: molhabilidade dinâmica, pinning e risco de formação e dissociação de hidratos

Gonçalves, J. F. V. [1]**; Figueiredo, J. J. S.** [2]
[1]Discente do Doutorado em Geofísica (CPGF) e bolsista do PRH-ANP 15, Universidade Federal do Pará, Belém – PA. E-mail: frankvanzeler16@gmail.com
[2]Docente do CPGF, Universidade Federal do Pará, Belém – PA. E-mail: jadsomjose@gmail.com

Motivação

- A saturação residual de óleo resulta de eventos na escala dos poros.
- A saturação final, sozinha, não mostra como esse estado se formou.
- A **micro-CT 4D** acompanha esses eventos na drenagem e na embebição, inclusive o movimento da linha de contato sobre o sólido.

Objetivos

1. Segmentar as três fases (rocha, salmoura e óleo).
2. Quantificar a saturação até o estado residual.
3. Identificar os eventos na escala de poro.
4. Caracterizar a cinemática da linha de contato.

Aplicação no Setor de Petróleo e Energia

- A saturação residual é o alvo da recuperação avançada.
- Saber onde e como o óleo é aprisionado calibra modelos de escoamento em escala de poro e curvas de permeabilidade relativa com histerese.
- Prospectivo: aprisionamento capilar no armazenamento geológico de CO_2.
- **Upscaling:** forças capilares, viscosas e de empuxo atuam no espaço poroso; a micro-CT 4D mede essa física em tempo real, que os modelos estáticos não capturam, e contribui para reduzir incertezas na recuperação e no armazenamento de CO_2.

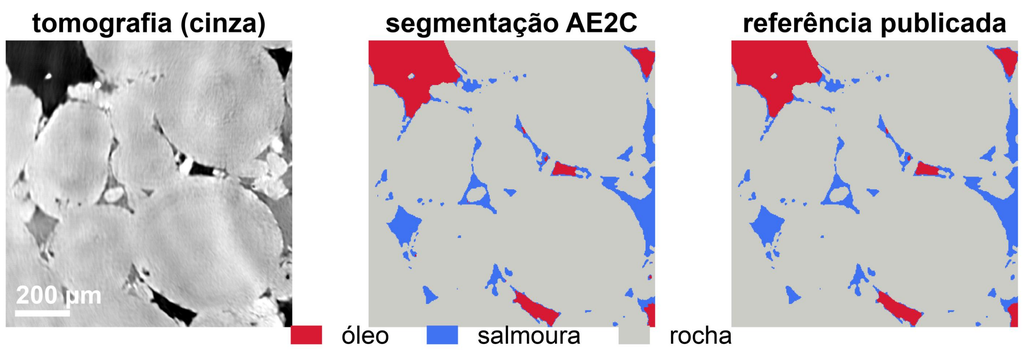
Metodologia

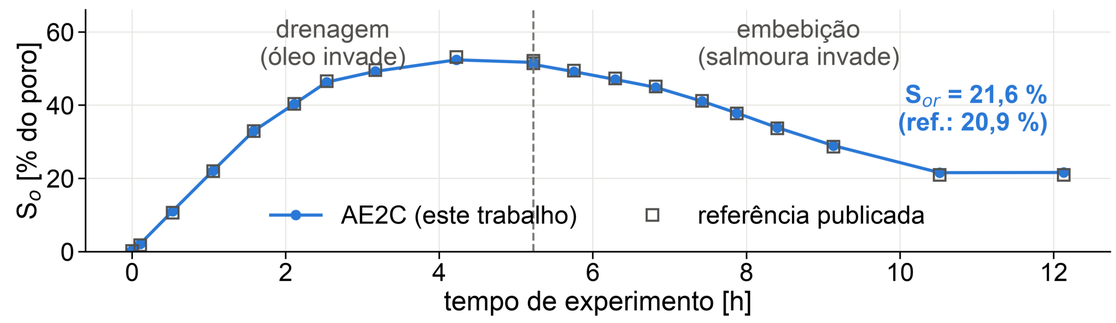


Séries públicas de Singh et al. (2018): calcário Ketton, 496 + 416 volumes, 3,28 µm/voxel, 38 s. Rede convolucional de dois canais; cada ponto da linha de contato é seguido entre volumes.

Resultados obtidos

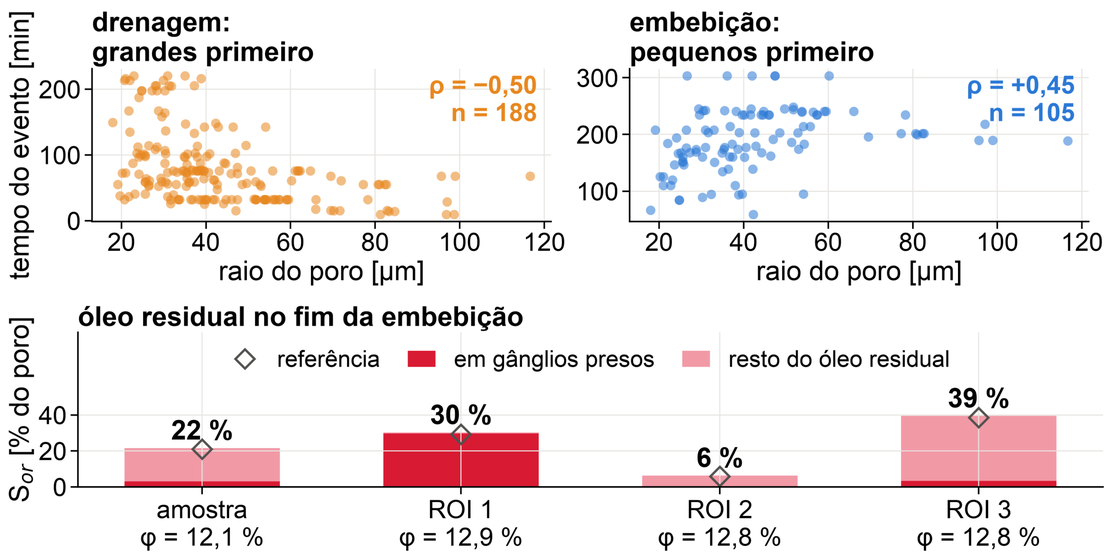
Segmentação validada contra a referência publicada (objetivos 1 e 2)

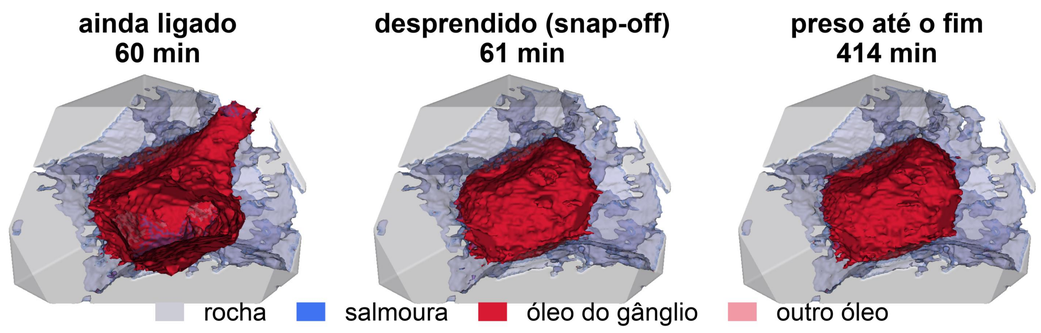




Dice **0,91–0,98**; erro de S_o de 0,28 p.p.; S_{or} = **21,6 %** (ref.: 20,9 %).

Eventos na escala de poro (objetivos 2 e 3)



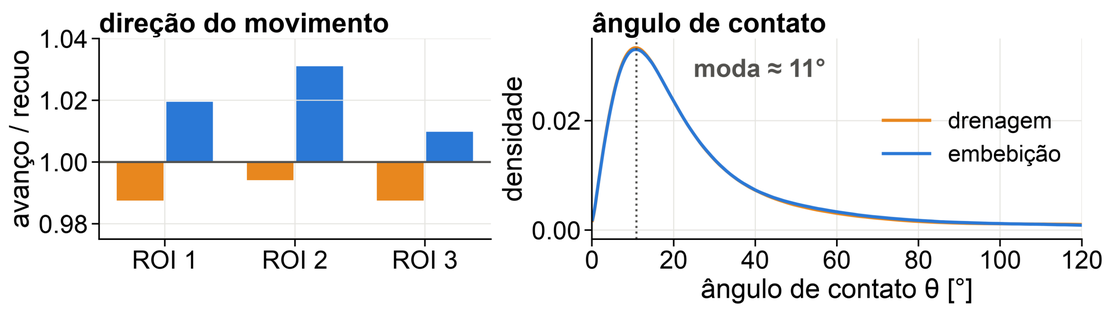


Ordem: na drenagem (saltos de Haines) os poros grandes são invadidos primeiro; na embebição os pequenos enchem primeiro, de forma cooperativa.

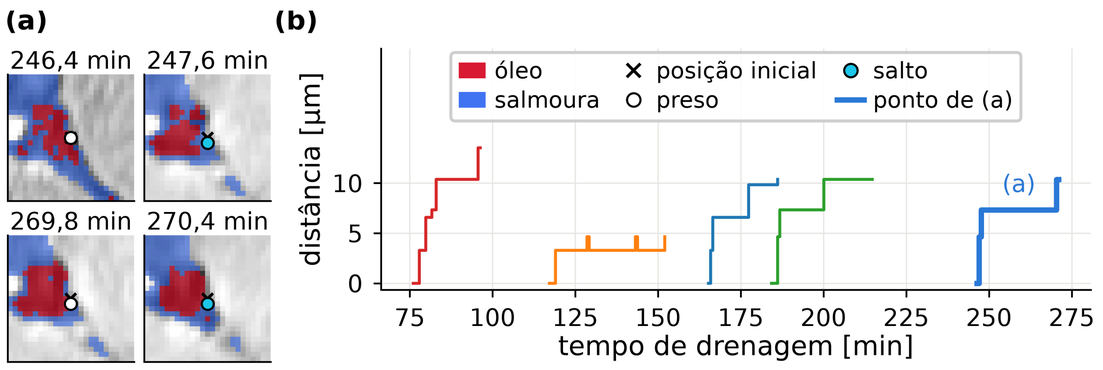
Gânglio aprisionado por snap-off. Os 67 gânglios presos somam ~14 % do óleo residual; P_c mediano 1,9 kPa (publicado: 1,68 kPa). Óleo residual de 6 % (ROI 2) a 39 % (ROI 3); na ROI 1, 98 % em gânglios presos.

Linha de contato: direção, ângulo e stick-slip (objetivo 4)

$\Delta s_n = \Delta x \cdot m > 0$: salmoura avança; $|\Delta s_n| < 0{,}75$ voxel: preso.



Avanço/recuo **< 1 na drenagem e > 1 na embebição**; moda de θ ≈ **11°**: fortemente molhável à água.



Stick-slip *(exemplos selecionados)*: 96–98 % dos intervalos presos. **Histerese detectada:** θ ~3–4° maior em avanço, abaixo da resolução (~5°).

Conclusões

1. Três fases segmentadas e validadas (Dice 0,91–0,98).
2. S_{or} = 21,6 % (ref.: 20,9 %), de 6 a 39 % entre regiões.
3. Haines, enchimento cooperativo, snap-off e gânglios presos.
4. Linha de contato em stick-slip, na direção de cada processo.

Próximos passos e material

- Interface subvoxel; extensão ao sistema CO_2–salmoura.
- Aplicação do modelo de Cox–Voinov.
- Permeabilidade absoluta e relativa por LBM.

Agradecimentos: PRH-ANP 15, ANP e UFPA.

Referências e animações: escaneie o código ao lado.