



Tomografia 2D da camada d'água utilizando traçado de raios

Oliveira, Anderson M. R. de; Cetale, Marco; Alves, Paulo H. B.; Capuzzo, Felipe V.;

UFF/DOT/GISIS

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 4 a 6 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGF, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Esse trabalho tem como objetivo analisar os resultados da tomografia 2D por traçado de raios da camada d'água utilizando geometria do tipo OBN (*Ocean Bottom Nodes*). Foi utilizado a equação eikonal na implementação do traçado de raios e obtenção dos tempos de trânsito da onda acústica. Para a solução do problema inverso, foi utilizada a técnica do gradiente conjugado, além da regularização de Berryman (1991).

Introdução

O uso da sísmica 4D vem se demonstrando eficiente na diminuição dos riscos de perfuração e na maximização do fator de recuperação nos reservatórios de hidrocarbonetos. A qualidade de um levantamento sísmico 4D baseia-se na repetibilidade entre o levantamento base e o monitor. A geometria de aquisição, por exemplo, é um parâmetro replicável. Porém, um elemento que não pode ser controlado são as variações das velocidades sísmicas na camada de água.

Tais variações podem ser causadas por diferenças locais e sazonais de salinidade, causadas por afloramentos salinos e proximidade com desembocaduras de rios, além de variações de temperatura causadas por correntes marinhas (Bertrand & MacBeth, 2003). Por tanto, é necessário um modelo de velocidade da lâmina d'água acurado, a fim de mitigar erros temporais entre o levantamento base e o levantamento monitor (Lacombe et al., 2009).

Uma forma precisa de se obter um modelo de velocidade é através de perfis locais de salinidade e temperatura, onde obtém-se a velocidade por meio de equações diretas, como foi demonstrado por Mackenzie (1981) e outros autores. Porém, perfilagens são medidas pontuais e custosas. No entanto, a tomografia sísmica é uma técnica capaz de obter um modelo de velocidade com elevada acurácia, de forma rápida e barata, se comparado com medidas diretas onerosas e espacialmente limitadas (BULHÕES, 2020).

Sendo assim, o objetivo desse trabalho é avaliar a eficácia da tomografia em identificar anomalias de velocidade na camada d'água, utilizando uma geometria do tipo OBN (*Ocean Bottom Nodes*). Para isso, foram utilizados dados sintéticos gerados por um modelo de velocidade

construído através da equação de Mackenzie (1981).

Metodologia

Foi utilizado no trabalho a tomografia de ondas diretas por tempo de trânsito. O objetivo dessa técnica é resolver o sistema inverso apresentado na Equação 1, onde G é a matriz de sensibilidade, m são valores de vagarosidade e t são os tempos de trânsito da onda. Como a vagarosidade é o inverso da velocidade, ao obtê-las, reconstrói-se o modelo de velocidade da camada d'água desejado.

$$\Delta m = [G^T G]^{-1} G^T \Delta d \quad (1)$$

O método utilizado para resolver o sistema foi o Gradiente Conjugado Linear, proposto por Hestenes & Stiefel (1952). Uma grande vantagem desse método é o pouco consumo de memória e processamento computacional (Wright et al., 1999).

A matriz de sensibilidade G foi construída utilizando o traçado de raios, onde para isso, utilizou-se o gradiente descendente da função eikonal para um meio isotrópico, calculada através do algoritmo proposto por Podvin & Lecomte (1991). A matriz G armazena os caminhos percorridos pelo raio ao longo do modelo, onde cada linha contém as distâncias que um raio específico percorreu em cada célula do modelo de velocidade. Como normalmente um raio percorre um número bem inferior a quantidade total de células, é comum que a matriz G seja uma matriz esparsa, implicando, nesse caso, em um problema mal-posto. Para contornar isso, utilizou-se a regularização de Berryman (1991).

Além de ajudar a solucionar o traçado de raios, a solução da equação eikonal entrega os tempos de trânsito da primeira chegada de uma frente de onda para todos os pontos discretizados em um modelo de velocidade (Capucci, 2013). Sendo assim, utilizou-se essa técnica para simular o dado observado d_{obs} em campo, assim como o dado calculado d_{calc} , obtendo assim o Δd da Equação 1. A equação eikonal para um meio isotrópico é dada por:

$$[\nabla t(x)]^2 = m(x)^2, \quad (2)$$

onde $m(x)$ é a vagarosidade do meio e $t(x)$ é o tempo de chegada da frente de onda no ponto x .

O algoritmo de tomografia utilizado consiste em um método iterativo que envolve todas as etapas descritas acima. O objetivo de cada iteração é atualizar o modelo de vagarosidade m_i ao obter o Δm através da inversão apresentada pela Equação 1. O novo modelo m_{i+1} busca

diminuir o resíduo dado por $\|d_{obs} - d_{calc}\|$. Após o resíduo atingir uma tolerância δ estabelecida, o fluxo ilustrado na Figura 1 é interrompido e o modelo de velocidade final obtido (Capucci, 2013).

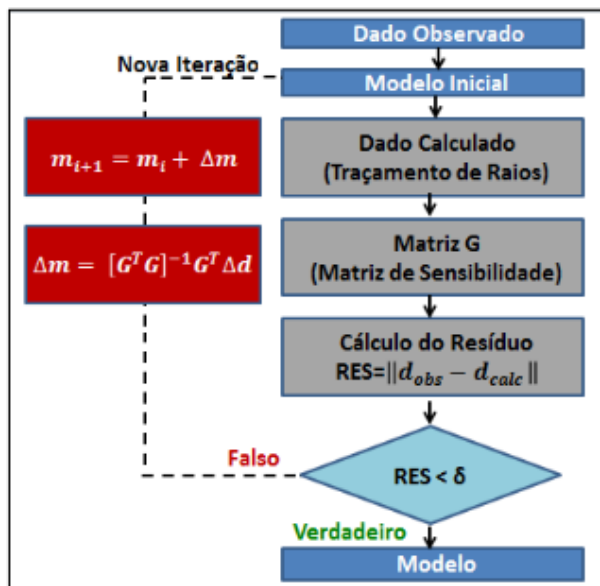


Figura 1 – Fluxo da tomografia utilizado. Fonte: adaptado de BULHÕES (2020)

Tanto o modelo de velocidade sintético utilizado para reproduzir um dado observado em campo (Figura 5a), quanto o modelo inicial (Figura 5b), foram gerados a partir da equação de Mackenzie (1981), onde descreve a velocidade da onda acústica na água como uma função da salinidade s , temperatura T e profundidade z . A equação de Mackenzie (1981) é dada por:

$$v(T, s, z) = \eta + \chi T + \delta T^2 + \varphi T^3 + \sigma(s - 35.0) + \mu z + \gamma z^2 + \alpha T z^3 + \beta T(s - 35.0), \quad (3)$$

onde as letras gregas são constantes empíricas mostradas na Tabela 1. Utilizou-se uma salinidade de 35 PSU (i.e. por volta da salinidade média dos oceanos) e um perfil de temperatura média, obtido por medições na costa brasileira, e uma profundidade de 0 a 2000 metros.

Todavia, o modelo de velocidade verdadeiro possui uma anomalia central gerada por uma função gaussiana, sendo a única diferença entre o modelo verdadeiro e o inicial. O objetivo da tomografia será detectar a anomalia de velocidade. As dimensões dos modelos são de 2 km de profundidade e 8 km de largura, onde foram discretizados em 80×320 células possuindo um espaçamento de malha regular de 25 metros.

Vale destacar que para a aplicação da tomografia na camada d'água, é essencial a utilização de uma geometria do tipo OBN (*Ocean Bottom Nodes*) ou OBC (*Ocean Bottom Cables*), pois o dado utilizado são os tempos de

Tabela 1 – Valores das constantes empíricas da fórmula de Mackenzie (1981), que relaciona velocidade sonora com salinidade, profundidade e temperatura da água oceânica.

Parâmetro	Valor empírico
η	1448,96
χ	4,591
δ	$-5,304 \times 10^{-2}$
φ	$2,374 \times 10^{-4}$
σ	1,340
μ	$1,630 \times 10^{-2}$
γ	$1,675 \times 10^{-7}$
α	$-7,139 \times 10^{-13}$
β	$-1,025 \times 10^{-2}$

chegada da onda direta que se propagou por toda a coluna de água.

Resultados

Primeiramente, avaliou-se o funcionamento do algoritmo, utilizando uma geometria não-convenção, onde foram posicionadas fontes na superfície com o espaçamento de 25 metros e fontes verticais com o espaçamento de 100 metros, como em uma tomografia poço a poço. Os receptores foram posicionados no fundo (1950 metros) com um espaçamento de 400 metros. Também foram dispostos receptores verticais no lado esquerdo com um espaçamento de 100 metros, totalizando 337 fontes e 39 receptores. O resultado pode ser visto na Figura 5c, onde a anomalia foi muito bem reconstituída, tanto em amplitude como em geometria. A curva de resíduo preta na Figura 2 mostra que as diferenças dos tempos de propagação da onda, entre o modelo verdadeiro e o modelo calculado, foram reduzidas.

O teste final foi averiguar a eficácia da tomografia utilizando uma geometria realista do tipo OBN. Foram utilizadas 318 fontes na superfície com o espaçamento de 25 metros, totalizando 318 fontes. Os receptores foram colocados a 1950 metros, com um espaçamento de 400 metros, totalizando 20 receptores. Avaliando a curva vermelha da Figura 2, nota-se que o resíduo diminuiu similarmente à geometria não-convenção. Porém, ao observar a Figura 5d, observa-se que a anomalia não foi bem reconstituída em amplitude e suas fronteiras não foram bem delimitadas, principalmente na parte inferior.

Um dos motivos do modelo de velocidade calculado não ter apresentado um resultado tão bom quanto o modelo de teste pode ser observado através das matrizes de iluminação. Elas representam a soma acumulada, em cada célula, das distâncias percorridas pelos raios, isto é, quanto mais raios passaram pela mesma célula, maior será a distância acumulada. Melhores iluminações favorecem a estimativa da vagariedade no processo de inversão. A Figura 3 mostra a matriz de iluminação da geometria não-convenção e a Figura 4 a matriz da

geometria do tipo OBN. Como esperado, a geometria não-convencional aumentou a iluminação em todas as células, gerando um resultado melhor.

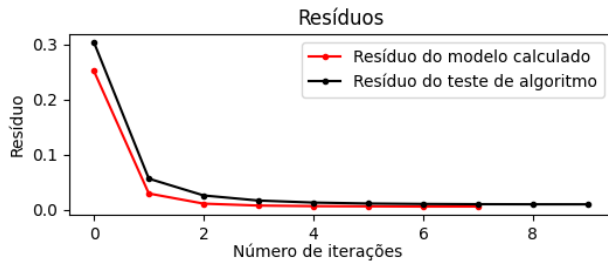


Figura 2 – Resíduos $\|d_{obs} - d_{calc}\|$ de cada iteração da tomografia: curva preta) resíduo do teste de algoritmo; curva vermelha) resíduo do modelo de velocidade final calculado. Fonte: próprio autor.

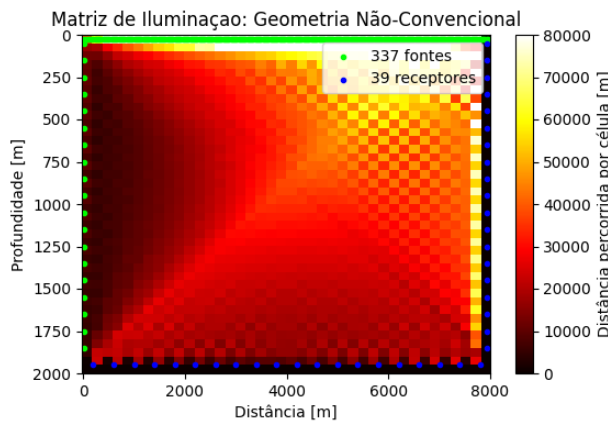


Figura 3 – Matriz de iluminação utilizando geometria não-convencional. Percebe-se uma alta iluminação através das cores entre o tom branco e o amarelo. Quanto mais claro, mais iluminado e mais informação se tem sobre aquela célula. Fonte: próprio autor.

Discussão e Conclusões

Os testes demonstram que é possível detectar as anomalias de velocidade com geometria do tipo OBN, sendo muito importante para melhorar o resultado final da sísmica 4D. Porém, observa-se que os erros ainda são grandes e que novas metodologias devem ser abordadas para melhorar as estimativas. Geometrias que circundam de forma completa o alvo delimitam e estimam melhor os valores de velocidade. Como próximos passos, novos testes serão realizados utilizando diferentes regularizações (e.g. regularização de Tikonov) e adicionando informações adicionais geradas pelas múltiplas da lâmina d'água.

Agradecimentos

Eu gostaria de agradecer a Shell por dar suporte a minha carreira acadêmica através de uma bolsa de iniciação científica. Também gostaria de agradecer as pessoas do

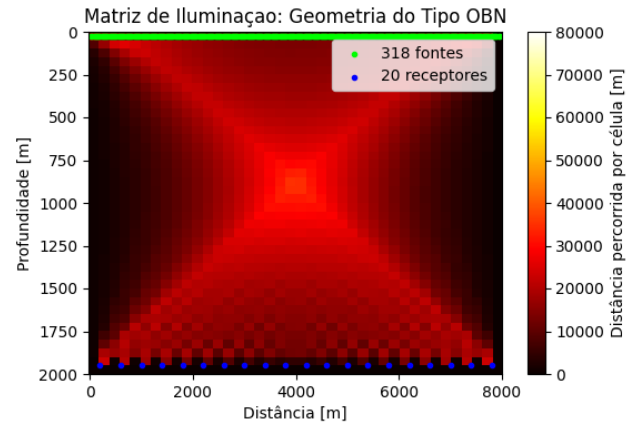


Figura 4 – Matriz de iluminação utilizando geometria do tipo OBN. A predominância de preto e vermelho indica uma baixa iluminação se comparado a geometria não-convencional. Fonte: próprio autor.

grupo GISIS (Grupo de Imageamento e Inversão Sísmica) que me ajudam diariamente a evoluir o meu conhecimento. Por fim, agradeço a UFF por me fornecer uma boa graduação com todo suporte necessário.

Referências

- Berryman, J. G., 1991. Lecture notes on nonlinear inversion and tomography: 1, borehole seismic tomography. revision 1, Tech. rep., Lawrence Livermore National Lab., CA (United States).
- Bertrand, A. & MacBeth, C., 2003. Seawater velocity variations and real-time reservoir monitoring, *The Leading Edge*, vol. 22(4): 351–355, doi:10.1190/1.1572089.
- BULHÕES, F. C., 2020. Efeitos da regularização na tomografia de refração.
- Capucci, F. V., 2013. Tomografia sísmica por tempos de trânsito poço-à-poço, Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- Hestenes, M. R. & Stiefel, E., 1952. Methods of conjugate gradients for solving linear systems, *Journal of research of the National Bureau of Standards*, vol. 49: 409–436.
- Lacombe, C., Butt, S., Mackenzie, G., Schons, M. & Bornard, R., 2009. Correcting for water-column variations, *The Leading Edge*, vol. 28(2): 198–201.
- Mackenzie, K. V., 1981. Nine-term equation for sound speed in the oceans, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 70(3): 807–812.
- Podvin, P. & Lecomte, I., 1991. Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools, *Geophysical Journal International*, vol. 105(1): 271–284.
- Wright, S., Nocedal, J. et al., 1999. Numerical optimization, Springer Science, vol. 35(67-68): 7.

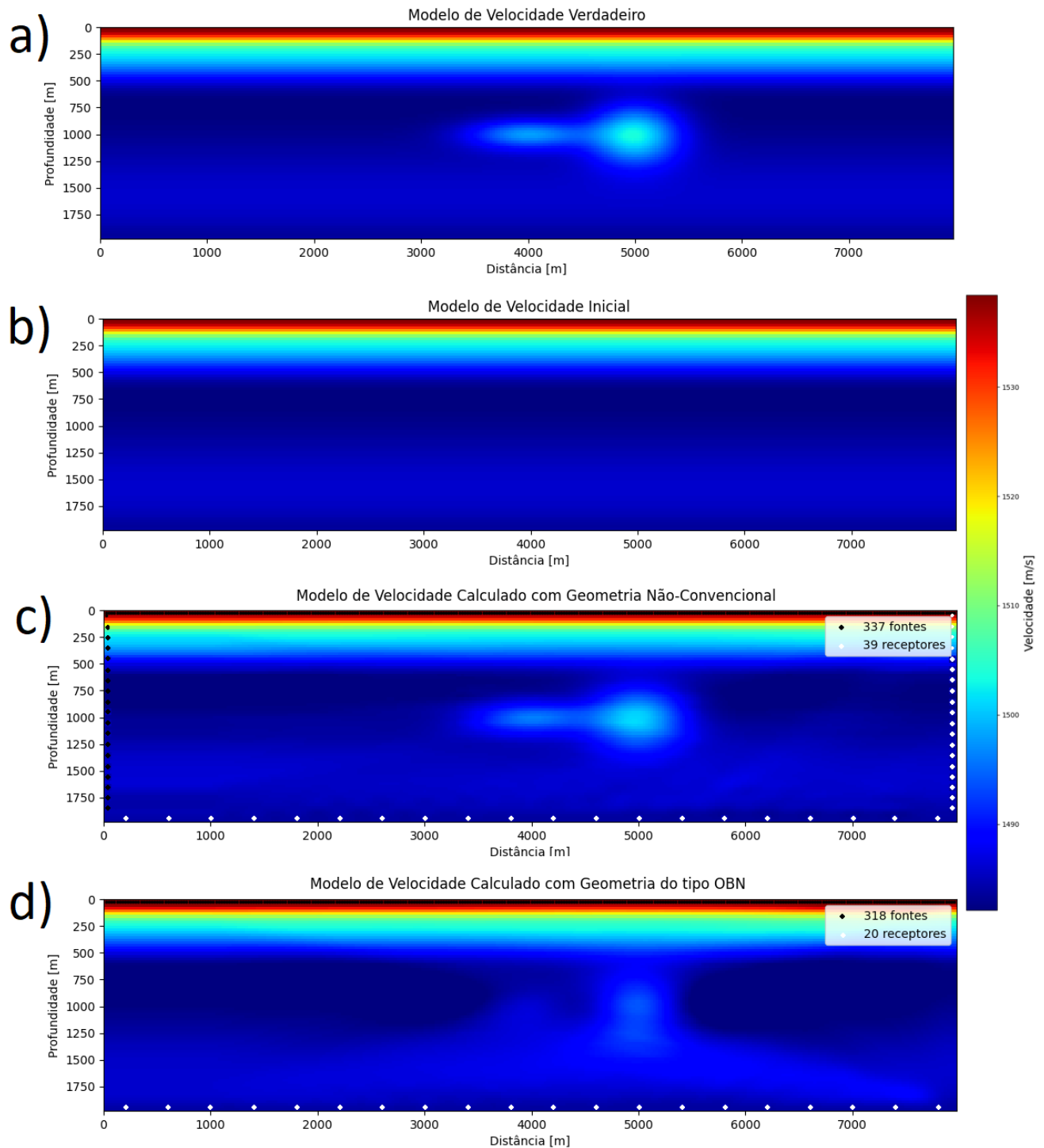


Figura 5 – Modelos de velocidade da camada d'água e geometria de aquisição: **a)** modelo verdadeiro, ou seja, simula as condições da velocidade da camada d'água no momento da aquisição; **b)** modelo inicial usado como entrada no fluxo da tomografia; **c)** modelo calculado utilizando uma geometria não convencional. Apresenta boa reconstrução da anomalia; **d)** modelo calculado utilizando uma geometria do tipo OBN. A anomalia foi detectada porém não foi bem delimitada espacialmente e não recuperou tão bem os valores de velocidade.