

Desenvolvimento e análise de desempenho de algoritmo para modelagem sísmica utilizando método da esfera

Bruno V. P. Silva¹, Dayalla M. P. Almeida², Samuel Xavier-de-Souza², Ítalo A. S. Assis¹

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

bruno.silva53331@alunos.ufersa.edu.br

dayalla.marques.089@ufrn.edu.br

samuel@dca.ufrn.br

italo.assis@ufersa.edu.br

Resumo. A modelagem sísmica é amplamente usada na exploração de petróleo e gás para gerar imagens da subsuperfície. Apesar de eficaz, exige alto poder computacional. Este trabalho propõe um método mais eficiente, reduzindo tempo de execução e uso de recursos. A técnica tradicional resolve a equação da onda em todo o domínio, o que gera alto custo. A proposta limita a simulação a um volume esférico ao redor da fonte sísmica, definido pelo raio de propagação. O algoritmo foi desenvolvido com essa geometria e testado em diferentes cenários. Os resultados mostram redução significativa no tempo de execução em comparação ao método tradicional.

1. Introdução

O levantamento sísmico é uma das técnicas mais reconhecidas e utilizadas na geofísica [Kearey et al. 2013]. O objetivo do levantamento sísmico é obter imagens da subsuperfície que identifiquem falhas e camadas geológicas presentes nas estruturas. Três etapas compõem o levantamento sísmico: a aquisição, o processamento e a interpretação [Yilmaz 2001]. A etapa de aquisição envolve a emissão de ondas que são geradas a partir de explosões próximas à superfície. Essas ondas se propagam pela subsuperfície até serem refletidas de volta à superfície e registradas por detectores [Abdelkhalek et al. 2012]. A fase de processamento consiste em transformar os dados sísmicos adquiridos na etapa anterior em informações úteis para a interpretação geológica. Dentro dessa etapa, a modelagem sísmica é utilizada para estimar as amplitudes das ondas e o tempo que elas levam para se propagar, conforme interagem com as distintas camadas geológicas da subsuperfície. A modelagem sísmica torna-se mais precisa com a inclusão de um maior número de parâmetros. Contudo, essa melhoria vem acompanhada de um aumento na complexidade e no tempo necessário para o processamento. A simulação das ondas sísmicas demanda cálculos intensivos, exigindo alto desempenho computacional. Alguns estudos têm se dedicado à criação de métodos que visam diminuir os custos computacionais. Um exemplo é o trabalho de [Nogueira et al. 2020], que apresenta um filtro empírico 3D capaz de mapear cada passo de tempo do campo de onda. Outro trabalho introduz uma

abordagem dinâmica que considera a esparcida do campo de onda nos períodos de propagação [Nogueira and Porsani 2021]. O trabalho de [Witte et al. 2019] apresenta um algoritmo de migração por mínimos quadrados utilizando transformadas de Fourier. O presente artigo tem como objetivo desenvolver e analisar um algoritmo que aplica a modelagem sísmica limitando o domínio de propagação à área de uma esfera 3D cujo raio é definido pela distância percorrida pelo sinal à velocidade máxima do modelo. O foco principal é avaliar a eficiência desse método, buscando a redução do tempo de execução.

Neste trabalho, na Seção 2, apresentamos o Mamute, no qual são realizadas as operações relacionadas à modelagem e outros métodos geofísicos. Na Seção 3, são apresentadas as equações do método utilizado e sua implementação em código. Na Seção 4, descrevem-se os resultados obtidos de passos no tempo, velocidade máxima, posição da fonte e com o modelo de *overthrust*. Na Seção 5, apresentamos a conclusão deste trabalho e suas possíveis aplicações futuras.

2. Mamute

O Mamute é um software que fornece aplicações de métodos geofísicos baseados em equações de ondas [Fernandes et al. 2025]. O Mamute implementa aplicações como modelagem sísmica e a Inversão do Campo de Onda Completo 3D (FWI, do inglês: Full-Waveform Inversion). Ademais, o Mamute dispõe de um conjunto de ferramentas otimizadas para ambientes modernos de HPC. Dentre essas ferramentas, estão os mecanismos de tolerância a falhas, *checkpointing* e o escalonamento de carga para ambientes de memória distribuída e compartilhada.

3. Metodologia

A onda se propaga em formato esférico porque em meios homogêneos apresenta um comportamento isotrópico, isto é, suas propriedades como densidade e elasticidade são uniformes em todas as direções. A modelagem em geometria de esfera explora a propagação da onda sísmica para restringir as operações matemáticas a apenas a região onde há propagação efetiva. Neste trabalho, aplicamos o método da esfera para trabalhar com a simulação da propagação de um único disparo sísmico, originado por uma fonte localizada em um ponto específico dentro de um meio, sendo registrado pelo(s) receptor(es), no qual o volume esférico é determinado a partir de seu raio que depende da velocidade máxima e do número de interações no tempo.

A esfera é representada dentro da grade por seus limites inferiores e superiores de x, y e z, porém, as coordenadas y e z dependem dos limites de x, pois a distância permitida para y e z é determinada pela distância já calculada de x. Entretanto, para que as coordenadas sejam calculadas, é preciso calcular a distância do centro da esfera até um ponto específico ao longo do eixo x e da projeção restante do raio. A implementação do método de modelagem em esfera no Mamute, se deu por meio das equações que representam a esfera na grade nas quais os limites são percorridos por laços tridimensionais.

4. Resultados

Os testes foram escolhidos para investigar como fatores afetam o formato do domínio restrinido pela esfera e a redução do tempo de execução, sendo realizados em um nó do supercomputador Santos Dumont. Este nó possui 2x Intel Xeon Cascade Lake Gold 6252,

com 36 núcleos e 375 GB de memória RAM. Para os testes, foi utilizado um modelo cuja malha possui 101 pontos em cada dimensão espacial, além de bordas absorventes do tipo *Damping* habilitadas por padrão no Mamute com espessura de 50 pontos, uma frequência de pico de 20 Hz, resoluções espaciais de $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = 10m$ e um intervalo de amostragem temporal de 0,5 ms. O modelo de velocidades foi mantido constante em todos os testes, com uma velocidade de 2500 m/s. Foram definidos testes variando o número de passos no tempo, as velocidades máximas, e a posição da fonte.

4.1. Passos no tempo

Os testes de passos no tempo escolhidos para analisarmos a redução do tempo de execução com diferentes números de passos no tempo em comparação com a abordagem tradicional. Considerando os seguintes valores: 401, 802, 1203, 1604 e 2005, para cada execução. A Tabela descreve os resultados.

Table 1. Percentual de diferença dos tempos de execução da modelagem com e sem o método da esfera dos testes de passos no tempo.

<i>ns</i>	401	802	1203	1604	2005
Percentual de diferença	32.73%	31.19%	21.88%	16.35%	12.21%

4.2. Velocidade máxima

Os testes de velocidade máxima foram selecionados para analisarmos o tempo de execução com diferentes valores de velocidade da propagação da onda em relação com e sem o uso da geometria da esfera. Consideramos os seguintes valores em m/s: 1500, 2500, 3500, 4500, 5500. A Tabela 2 descreve os resultados.

Table 2. Percentual de diferença para os testes de velocidade máxima com e sem o método da esfera.

Velocidade	1500	2500	3500	4500	5500
Percentual de diferença	36.36%	34.55%	33.93%	31.58%	25.00%

4.3. Posição da fonte

Os testes variando a posição da fonte designados para verificarmos o desempenho do tempo de execução com partes subdivididas da geometria esférica dentro do domínio. O teste foi aplicado na esfera completa, 1/2, 1/4 e 1/8 de esfera. A Tabela 3 indica os resultados

Table 3. Percentual de diferença para os testes da posição da fonte.

Posição	Esfera inteira	1/2 de esfera	1/4 de esfera	1/8 de esfera
Percentual de diferença	33.9%	35.7%	34.5%	36.4%

4.4. Teste com Overthrust

O teste foi realizado no supercomputador NPAD (Nucleo de Pesquisa de Alto Desempenho) da UFRN, em 1 nó contendo 2 (duas) CPUs Intel Xeon Sixteen-Core E5-2698v3 de 2.3 GHz e 256GB de memória RAM. Foi utilizado um modelo cuja malha 3D possui 600 pontos em x , 400 pontos em y , e 187 pontos em z , além de bordas CPMIL com espessura de 25 pontos, uma frequência de pico de 5 Hz, e resoluções espaciais de $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = 25m$ e um intervalo de amostragem temporal de 1,53139 ms e 2500 passos no tempo. Obtivemos uma redução do tempo de **39,36%** em relação a abordagem tradicional.

5. Conclusão

Dado o alto custo computacional da modelagem sísmica, é necessário desenvolver soluções que otimizem o tempo de processamento com a utilização de ambientes de (Computação de Alto Desempenho e o aproveitamento dos recursos computacionais disponíveis [Yan et al. 2015]. Notamos que, foi possível avaliar a eficiência do método em diferentes cenários variando o número de passos no tempo, a velocidade máxima, posição da fonte e com o *overthrust*. Os resultados indicam que o uso do método da esfera proporciona uma redução significativa no tempo de execução em comparação com a abordagem tradicional. Para trabalhos futuros, propõe-se realizar testes com múltiplos disparos sísmicos, além de expandir o método para outras aplicações geofísicas, como a migração e o FWI.

References

- Abdelkhalek, R., Calandra, H., Coulaud, O., Latu, G., and Roman, J. (2012). Fast seismic modeling and reverse time migration on a graphics processing unit cluster. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 24(7):739–750.
- Fernandes, J. B., Oliveira, A. D., Silva, M. C., Santos-da Silva, F. H., Rodrigues, V. H., Schneider, K. A., Bianchini, C. P., de Araujo, J. M., Barros, T., Assis, I. A., et al. (2025). Mamute: high-performance computing for geophysical methods. *arXiv preprint arXiv:2502.12350*.
- Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I. (2013). *An introduction to geophysical exploration*. John Wiley & Sons.
- Nogueira, P., Leite, V., and Porsani, M. J. (2020). A wavefield domain dynamic approach: application in reverse time migration. *Journal of Applied Geophysics*, 177:104036.
- Nogueira, P. and Porsani, M. J. (2021). 3d reverse time migration using a wavefield domain dynamic approach. *Journal of Applied Geophysics*, 190:104345.
- Witte, P. A., Louboutin, M., Luporini, F., Gorman, G. J., and Herrmann, F. J. (2019). Compressive least-squares migration with on-the-fly fourier transforms. *Geophysics*, 84(5):R655–R672.
- Yan, Y., Huang, L., and Yi, L. (2015). Is apache spark scalable to seismic data analytics and computations? In *2015 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, pages 2036–2045. IEEE.
- Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Society of exploration geophysicists.