



## Erros no posicionamento de refletores sísmicos causados pela análise de velocidades na migração em profundidade

Felipe Vieira Capucci<sup>1</sup>, Marco Antonio Cetale Santos<sup>1</sup>, Luiz Alberto Santos<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LAGEMAR/UFF, <sup>2</sup> CENPES/PETROBRAS

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

The conventional velocity analysis (VELAN) is based on common mid points (CMP) concepts which shows errors when used in areas of geological complexity. This work studies those errors presented in the position and shape of seismic reflectors when depth migration and a velocity field recovered by conventional VELAN.

The aim of this work is to analyze the conventional VELAN techniques used to build a velocity macro model to process the depth migration. The results show that advanced techniques are necessary to build an optimal macro model in complex regions.

### Introdução

O método sísmico consiste na propagação e reflexão de ondas elásticas proveniente de uma fonte controlada. A energia se propaga através das camadas geológicas e uma parte é refletida e pode ser registrada em receptores na superfície.

As seções sísmicas processadas provenientes das aquisições sísmicas são muito utilizadas para a exploração de novas jazidas e acumulações de hidrocarbonetos. Porém a seção sísmica em tempo nem sempre é suficiente para um mapeamento de qualidade da região a ser explorada, já que podem ocorrer distorções da geometria das estruturas no domínio do tempo. Uma possível solução para esse problema é a seção sísmica migrada em profundidade, que é capaz de posicionar os refletores em suas posições corretas. Entretanto torna-se necessário uma boa estimativa das velocidades das ondas sísmicas nas camadas geológicas.

A técnica padrão para a estimativa de velocidades das ondas sísmicas é através da inversão de Dix. Dix (1955) desenvolveu uma técnica para estimar as velocidades de propagação de ondas sísmicas utilizando apenas as informações dos receptores na superfície. Ele demonstra em seu trabalho que a velocidade de empilhamento é muito próxima da velocidade média quadrática ( $V_{rms}$ ) quando o afastamento entre fonte e receptor é muito

pequeno, e também relaciona a velocidade intervalar ( $V_{int}$ ) com a  $V_{rms}$ . Essa relação proposta por Dix apenas é válida quando são respeitadas as premissas do ponto médio comum (CMP), que são: camadas planas, paralelas e com velocidades constantes.

Após a publicação do trabalho de Dix, diversos autores publicaram trabalhos testando a eficiência do método em diversas situações geológicas. Mesmo sendo baseada nos conceitos de CMP, a técnica de Dix pode obter resultados satisfatórios para camadas pouco inclinadas e que apresentem pouca variação de velocidade. Blackburn (1980) publica uma compilação dos erros gerados quando se usa a técnica de Dix em regiões de geologia complexa, e também demonstra através de *raytracing* que a relação entre a  $V_{int}$  e a  $V_{rms}$  publicada por Dix é incorreta quando existe a presença de camadas inclinadas, acunhamentos e falhas.

Os dados geofísicos coletados em poços podem ser usados em conjunto com a inversão de Dix. Porém, não é trivial extrapolar os dados de poços e garantir que essas informações possuem continuidade lateral. Desde Dix, para se construir melhores macros modelos de velocidade para migração, têm-se desenvolvido novas técnicas para superar os desafios impostos pela migração em profundidade e pela busca de hidrocarbonetos em regiões com complexidade geológica. Essas técnicas incluem levantamentos sísmicos 3-D, novas técnicas e algoritmos de migração, inversão e tomografia sísmica (Tarantola, 1984), FWI (Virieux e Operto, 2009), VSP e outros. A inversão de Dix continua sendo utilizado em grande escala devido a seus resultados satisfatórios e porque as técnicas mais avançadas ainda estão em desenvolvimento e possuem alto custo computacional.

O objetivo desse trabalho consiste em mostrar que quando há camadas inclinadas, falhas ou acunhamentos a técnica de Dix é muito sensível para preservar a posição e a forma dos refletores sísmicos.

### Metodologia

O fenômeno físico que rege a sísmica pode ser aproximado por formulações da equação da onda. Dessas formulações matemáticas, a formulação acústica da onda é a mais simples e considera o meio acústico e de densidade constante. E é dada pela fórmula:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 U$$

$$V_{rms,n}^2 = \sum_{i=1}^n v_i^2 t_i$$

Onde  $U$  é o campo de pressão,  $c$  é a velocidade de propagação da onda sísmica no meio,  $\nabla^2$  são as derivadas segundas do campo de pressão em relação às dimensões espaciais e  $t$  é a dimensão temporal.

A solução analítica da equação da onda acústica é dependente das condições de contorno e muitas vezes a solução não existe ou, quando existe, é muito restrita. Devido à dificuldade de encontrar uma resposta analítica, recorre-se a uma solução numérica para simular um campo de ondas que se propaga. No presente trabalho foi utilizado o método de diferenças finitas, que assume o meio limitado e discreto.

Uma vez que o domínio utilizado para a propagação de ondas pelo método de diferenças finitas não é ilimitado e dependendo do tempo de simulação, haverá um momento em que o campo de ondas chegará ao contorno do domínio. Esse contorno agirá como um refletor e haverá reflexão total do campo de onda de volta para o interior da simulação. Para evitar esse problema Cerjan et al (1985) sugeriram a implementação de bordas de amortecimentos no contorno do domínio. Tal solução, embora aumente o tempo de processamento devido ao acréscimo de malha para as bordas não-reflexivas, atenua satisfatoriamente o problema.

Para a modelagem sísmica é necessário resolver a equação da onda. Para tal, foram utilizadas aproximações de derivada de quarta ordem para as dimensões espaciais e de segunda ordem no tempo (Palermo, 2002; Bulcão, 2004). O algoritmo de migração sísmica foi implementado na linguagem de programação C e foi utilizado para simular uma aquisição sísmica e obter os sismogramas sintéticos usados nos testes.

Utilizou-se o pacote de programas *Seismic Unix* (SU) para a organização de dados em famílias CMPs e o programa *suvelan* para o *picking* das velocidades de empilhamento.

Os VELANs estimam velocidades de empilhamento, que segundo Dix, quando os afastamentos são curtos e as camadas planas e paralelas a velocidade de empilhamento é muito próximo da  $V_{rms}$  e, sendo assim, é possível utilizar a seguinte relação estabelecida por Dix:

Onde  $n$  é o número de camadas,  $V_{rms}$  é a velocidade média quadrática,  $t$  é o tempo duplo de chegada da onda e  $v$  é a velocidade intervalar.

Ao se aplicar a relação de Dix nos valores de  $V_{rms}$  estimadas através do VELAN convencional pode-se obter um campo de velocidades em tempo. Para que esse campo seja utilizado como dado de entrada para a migração RTM (Reverse Time Migration) é necessário primeiro que haja uma conversão de tempo para profundidade.

Durante a execução do algoritmo de migração RTM pode-se gerar reflexões múltiplas que resultaram em falsos refletores na imagem final. Faria (1986) demonstra que é possível melhorar a imagem final ao aplicar um filtro de média móvel no campo de vagarosidades (inverso da velocidade) antes de efetuar a migração. O campo de vagarosidade suavizado atenua as reflexões múltiplas que poderiam ser geradas durante a migração.

Uma vez que a migração RTM é realizada no domínio do tiro, torna-se dispendioso computacionalmente modelar e efetuar a migração de cada tiro individualmente para obter os tempos de trânsito. Para tal empregou-se um somatório dos sismogramas de forma a simular uma onda plana e horizontal na superfície. Esse somatório de sismogramas é abordado e empregado de forma mais ampla em Boechat (2007). O somatório de sismogramas permite realizar a migração apenas uma vez, diminuindo o tempo de processamento necessário para a migração da seção sísmica.

A migração realizada com o campo de velocidades recuperado do VELAN será comparada com a migração RTM utilizando o campo de velocidades original, que posiciona todos os refletores em sua posição correta.

### Aplicação e Resultados

Para gerar os sismogramas sintéticos foi feita uma modelagem sísmica acústica utilizando o campo de velocidades da Figura 1, sendo composto de uma malha com espaçamento entre pontos equivalente a 5 m e uma matriz de 400 linhas por 800 colunas. O refletor mais profundo será o refletor utilizado para testar a sensibilidade da migração em profundidade ao campo de velocidades obtido através do VELAN convencional.

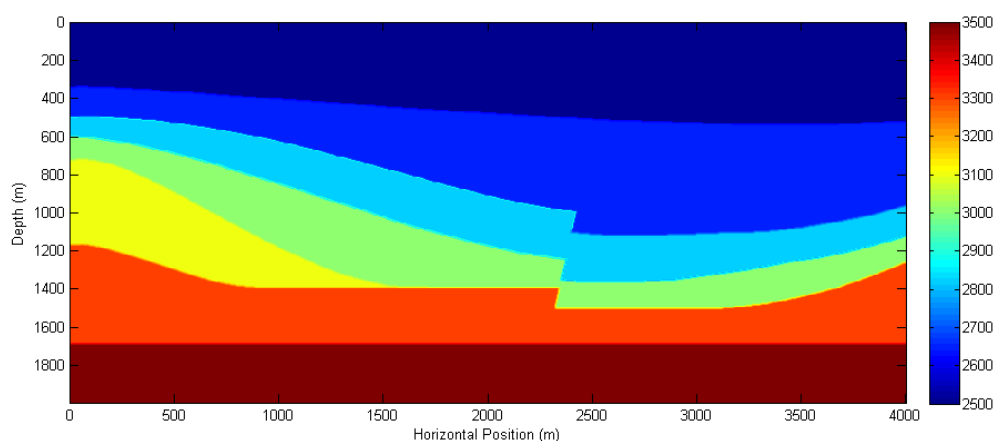


Figura 1: Modelo de velocidades em profundidade.

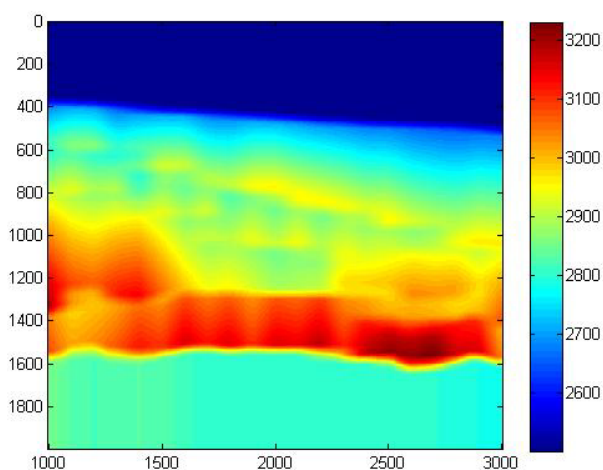


Figura 2: Modelo de velocidades em profundidade obtido através da análise de velocidades.

A simulação da aquisição sísmica consistiu na modelagem sísmica de 60 tiros afastados de 50 m, sendo o primeiro tiro iniciado na posição 500 m e o último na posição 3500 m do campo de velocidades da Figura 1. O arranjo de receptores é *split-spread* constituído de 50 receptores e com afastamento entre os receptores de 20 m. A fonte sísmica utilizada é o pulso de Ricker com frequência de corte de 60 Hz.

A modelagem sísmica resultou em 60 sismogramas no domínio do tiro que foram organizados em famílias CMPs. O VELAN foi realizado utilizando CMPs a cada 100 m e, devido à cobertura, foram feitos VELANs das posições 1000 m até 3000 m.

Para a suavização do campo de vagarosidades utilizou-se um filtro de média móvel de 25 m (5 pontos da malha) e esse valor mostrou-se suficiente para atenuar satisfatoriamente as reflexões múltiplas na migração e na modelagem para a obtenção dos tempos de trânsitos.

A Figura 2 ilustra o campo de velocidades obtido após a aplicação da metodologia.

O campo de velocidade verdadeiro (Figura 1) e o campo de velocidade obtido através do picking de velocidades de empilhamento (Figura 2) foram dados de entrada para a migração reversa no tempo. O resultado de cada uma das migrações está na Figura 3.

Para uma melhor comparação do posicionamento dos refletores nas duas imagens escolheu-se quatro posições: a posição 1200, por estar na região do acunhamento; a posição 1800 por ser uma região com pouca influência do acunhamento ou da falha; as posições 2200 e 2500 por estarem situadas na falha; e a posição 2750 por estar após a falha.

A Figura 4 mostra um perfil nas posições citadas na migração em profundidade a partir do modelo original de velocidades (Figura 3a) e a migração efetuada utilizando o campo obtido através do *picking* (Figura 3b).

Os refletores nas duas imagens, em sua maioria, não estão posicionados na mesma profundidade, sendo uma diferença maior nos refletores mais profundos. Para obter uma análise mais quantitativa da diferença entre as profundidades a Tabela 1 apresenta as profundidades e diferenças encontradas em cada refletor para as duas migrações.

Os perfis na Figura 4 e os dados na Tabela 1 mostram que o campo de velocidades recuperado pelo VELAN convencional não foi suficiente para manter a profundidade correta da maior parte dos refletores. Na posição 1200 o acunhamento afetou os refletores provocando diferenças de até 50 m. Já na posição 1800 os erros nos refletores mais profundos é de apenas 5 m (um erro desprezível, uma vez que a malha tem espaçamento de 5 m), entretanto, os refletores acima se encontram com variações em relação a seção migrada com a velocidade original do modelo. Isso indica que embora o refletor posicionou-se numa profundidade satisfatória a velocidade ideal não foi encontrada através do VELAN.

Os perfis localizados nas proximidades da falha foram os que obtiveram maiores variações, chegando a 70 m. O último refletor encontra-se deformado indicando um campo de velocidades incorreto. As difrações causadas

pela falha não se encontram colapsadas, sendo esse, outro indicativo que o campo de velocidades obtido através do VELAN não é ideal.

### Conclusões

As técnicas de análise de velocidades convencionais para estimar as  $V_{rms}$  baseadas nos arranjos de CMP em

ambientes de camadas plano-paralelas, bem como a determinação das velocidades intervalares através das formulações propostas se mostram deficientes para representar satisfatoriamente ambientes lateralmente heterogêneos. No presente trabalho faz-se uma análise da sensibilidade da migração em profundidade à esses erros.

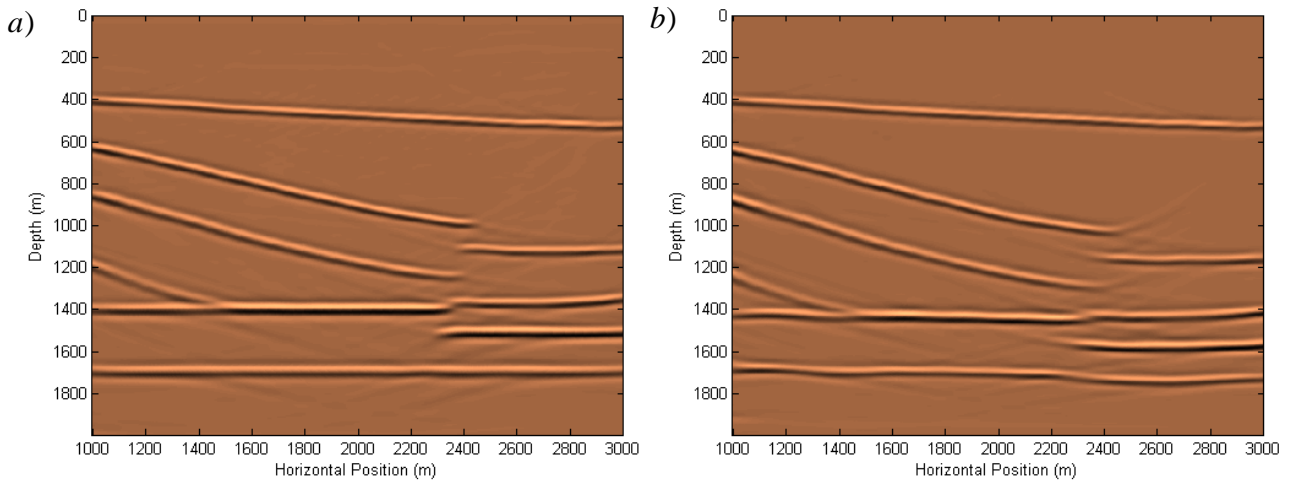


Figura 3: Seções sísmicas em profundidade utilizando (a) o campo de velocidades original e (b) obtido através do VELAN.

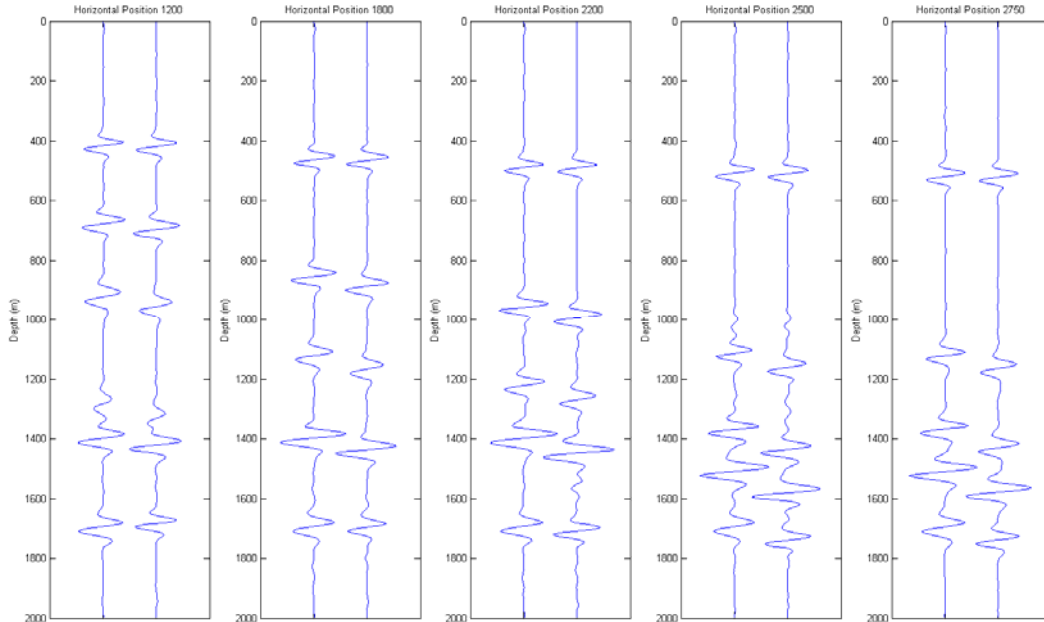


Figura 4: Perfis das duas migrações em algumas posições. O perfil da esquerda é proveniente da seção sísmica migrada utilizando a velocidade original enquanto que a da direita é a seção sísmica migrada utilizando o campo de velocidades obtido através da análise de velocidades.

| Posição 1200 |                  |                    |           |
|--------------|------------------|--------------------|-----------|
| Refletor     | Posição Original | Posição encontrada | Diferença |
| 1            | 410              | 410                | 0         |
| 2            | 670              | 690                | 20        |
| 3            | 910              | 945                | 35        |
| 4            | 1270             | 1320               | 50        |
| 5            | 1390             | 1410               | 20        |
| 6            | 1685             | 1675               | -10       |
| Posição 1800 |                  |                    |           |
| Refletor     | Posição Original | Posição encontrada | Diferença |
| 1            | 455              | 460                | 5         |
| 2            | 845              | 880                | 35        |
| 3            | 1115             | 1155               | 40        |
| 4            | 1390             | 1430               | 40        |
| 5            | 1685             | 1690               | 5         |
| Posição 2200 |                  |                    |           |
| Refletor     | Posição Original | Posição encontrada | Diferença |
| 1            | 480              | 485                | 5         |
| 2            | 950              | 985                | 35        |
| 3            | 1215             | 1260               | 45        |
| 4            | 1390             | 1440               | 50        |
| 5            | 1685             | 1700               | 15        |
| Posição 2750 |                  |                    |           |
| Refletor     | Posição Original | Posição encontrada | Diferença |
| 1            | 515              | 515                | 0         |
| 2            | 1115             | 1155               | 40        |
| 3            | 1360             | 1420               | 60        |
| 4            | 1500             | 1570               | 70        |
| 5            | 1685             | 1730               | 45        |
| Posição 2500 |                  |                    |           |
| Refletor     | Posição Original | Posição encontrada | Diferença |
| 1            | 500              | 505                | 5         |
| 2            | 1105             | 1155               | 50        |
| 3            | 1365             | 1425               | 60        |
| 4            | 1500             | 1570               | 70        |
| 5            | 1685             | 1730               | 45        |

Tabela 1: Tabelas comparativas entre a posição em profundidade dos refletores da seção migrada utilizando o campo de velocidade original (Depth Original) e o campo de velocidade recuperado através do VELAN (Depth VELAN) e a diferença em metros (Variation). Diferença negativa indica que o refletor encontrado é menos profundo que o original.

Para obter as velocidades de empilhamento utiliza-se a ferramenta gráfica de *semblance* que é baseado em somatários de energia. Foram selecionados os pares de velocidade-tempo cujos valores de energia sejam mais altos, para que, os refletores sísmicos fossem horizontalizados de forma satisfatória. Entretanto notou-se a existência de diversos pares velocidade-tempo que satisfazem essa condição, tornando mais difícil de determinar a velocidade ideal para a migração em profundidade. A existência de ruídos coerentes no dado sísmico, tais como difrações e reflexões múltiplas podem interferir no *semblance* e induzir falsas análises de velocidades. Assim, para uma boa estimativa de velocidade para migração em profundidade, não se deve avaliar a velocidade apenas com o VELAN convencional.

Para o modelo de velocidades utilizado, o VELAN convencional preservou as feições principais do modelo.

Ocorreu a deformação de alguns refletores, mas não foram suficientes para uma descaracterização em relação ao campo original de velocidades. Entretanto a existência de deformações variando em 50 m, como aconteceu com o refletor mais profundo nesse trabalho, pode determinar o sucesso ou o fracasso de um poço.

Assim, para geologias mais complexas são necessárias técnicas mais avançadas para a estimativa de velocidades mais acuradas, tais como MVA e tomografia. Adicionalmente dados de poços podem ser utilizados para melhor calibração do modelo de velocidades.

### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Geologia da UFF pela infraestrutura e aos alunos de mestrado e doutorado Kristoffer Hallam, Samuel Silva e David Freitas pelo incentivo, sugestões e revisões do texto. O primeiro autor gostaria de agradecer a CAPES pela bolsa auxílio de mestrado.

### Referências

- BLACKBURN, G., Errors in stacking velocity – True velocity conversion over complex geologic situations, *Geophysics*, Vol. 45, No 10, P. 1465-1488, 1980.
- BOECHAT, J., Migração Reversa no Tempo 3-D orientada ao alvo por síntese de frentes de onda. Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- BULCAO A., Modelagem e Migração Reversa no Tempo empregando operadores elásticos e acústicos, Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- CERJAN C., KOSLOFF D., KOSLOFF R. E RESHEF M., A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations, *Geophysics*, 4, 705-708, 1985.
- DIX, C., Seismic velocities from surface measurements, *Geophysics*, Vol. 20, No. 1, 62-86, 1955.
- FARIA. E., Migração Antes do Empilhamento Utilizando Propagação Reversa no Tempo, Dissertação de Mestrado – UFBA, Salvador, 1986.
- PALERMO L., Migração Reversa no Tempo: Uma abordagem multifocal, Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- VIRIEUX J. OPERTO S., An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics, *Geophysics*, Vol. 74, No. 6, WCC1-WCC26, 2009.
- TARANTOLA A., Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation, *Geophysics*, Vol. 49, No. 8, 1259-1266, 1984.