



## Comparação dos Métodos de Migração Kirchhoff e Migração Reversa no Tempo utilizando dados sintéticos do Pré-Sal, Campo de Búzios

Hugo E. de Araújo<sup>1</sup>, Marco Cetale<sup>2</sup>, Marília da Silva R. Carneiro<sup>2</sup>, Felipe Timóteo da Costa<sup>2</sup>.

UFF/GISIS<sup>1</sup>. UFF/DOT/GISIS<sup>2</sup>.

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

O atual trabalho possui como objetivo realizar uma comparação qualitativa entre duas técnicas de imageamento sísmico bem conhecidas, a migração de Kirchhoff e a migração reversa no tempo (RTM). Para isso, simulações sísmicas utilizando dois modelos geológicos distintos foram executadas, em seguida migrações em profundidade. Inicialmente, um modelo com 5 camadas plano paralelas foi usado para validar os parâmetros de modelagem e migração, em seguida, foi utilizado um modelo que representa as estruturas geológicas complexas típicas do Pré-Sal brasileiro, como no campo de Búzios. O resultado da migração reversa no tempo com base nas estruturas do pré-sal demonstrou uma melhor acurácia ao imagear os refletores com mergulhos mais acentuados, proporcionando maior destaque destas interfaces ao focalizar suas amplitudes refletidas, conforme esperado. Este resultado pôde ser alcançado devido ao correto modelo de velocidade utilizado, em troca também de maior custo computacional.

### Introdução

O processamento de dados sísmicos é uma etapa crucial no desenvolvimento de campos de petróleo e gás. Dentre as tecnologias mais importantes durante o processamento, as técnicas de imageamento sísmico como as migrações se destacam devido seu papel na interpretação estrutural e caracterização de reservatórios. Atualmente, duas técnicas de migração apresentam resultados notáveis na indústria de exploração sísmica, a Integral de Kirchhoff (Schneider, 1978; French, 1974; Berkhout, 1984) e a Migração Reversa no Tempo (RTM) (Hemon, 1978; Baysal, Kosloff & Sherwood, 1983; McMechan, 1983; Whitmore, 1983). Os métodos têm como fundamento a equação da onda acústica, descrita matematicamente pelo fenômeno de propagação das ondas sísmicas. Zhu & Lines (1996) realizaram uma comparação usando dados pré-empilhados, e obtiveram uma migração mais precisa em reflexões de mergulhos íngremes para a RTM diante do método da Integral de Kirchhoff. Resultados semelhantes foram alcançados usando migrações em profundidade com dados empilhados com diversos métodos de imageamento, incluindo abordagens no domínio da frequência e no domínio do tempo (Whitmore et al., 1988).

O presente trabalho compara os métodos da Integral de Kirchhoff e RTM para avaliar suas aplicações com o imageamento em profundidade de estruturas complexas na subsuperfície com dados pré-empilhados. A discussão teve foco na avaliação dos algoritmos com a precisão das migrações ao colapsar as amplitudes relacionadas as interfaces refletoras. Não obstante, um breve resumo sobre estas técnicas também foi incluído neste trabalho para sua integralidade.

### Teoria

O método de migração a partir da Integral de Kirchhoff se baseia no teorema da função de Green (Green, 1835), utilizando a solução integral da equação da onda escalar (Aki & Richards, 1990 apud Zhu & Lines, 1996), também chamada *one-way wave equation*. O método apresenta limitações ao se considerar regiões mais complexas em que as energias sofrem mais de uma única reflexão até seu caminho de retorno à superfície. Atualmente a técnica possibilita implementações tanto para dados 2D quanto para 3D, seja para dados pré-empilhados ou pós-empilhados, no domínio da profundidade ou no domínio do tempo (Dondurur, 2018), e por sua vez, contemplam bem regiões com variações de velocidade lateral suaves (Zhu & Lines, 1996; Hertweck, Jäger, Goertz & Schleicher, 2003).

A Migração Reversa no Tempo, por sua vez, é um algoritmo baseado na equação completa da onda escalar (do inglês, *full scalar wave equation*), ou simplesmente *two-way wave equation*. Neste método, as imagens geradas tendem a ser mais precisas na presença de fortes contrastes de velocidade, verticalmente e horizontalmente, ou em regiões com características geológicas complexas, como em tectônicas de sal, com domos salinos e overhangs (estruturas salina que se estendem além do flanco do domo de sal), (Baysal et al., 1983 apud Dondurur, 2018), considerando mais do que um único caminho de propagação da onda. Esse fato torna a RTM, uma migração sísmica adequada para o *offshore* do Brasil, e o Golfo do México, por exemplo, onde as estruturas de sal distorcem severamente a propagação das frentes de onda e imagens sísmicas (Whitmore, 1983).

Em suma, ambas as técnicas são capazes de migrar refletores com mais mergulhos acentuados (Zhu & Lines, 1996). Entretanto, a migração Kirchhoff demonstra melhor eficiência em ambientes com estruturas geológicas mais simples. Além disso, levando em consideração um conteúdo de número de ondas elevado e, respeitando o parâmetro de Nyquist do dado, a migração Kirchhoff

geralmente pode ser realizada com frequência máxima útil de cerca de 125Hz. Por sua vez, a RTM é bem aplicada a ambientes geológicos mais complexos, com altos contrastes de velocidade (Whitmore, 1983), porém possui maior demanda computacional em virtude da faixa de frequência adotada em sua implementação, e por esse motivo a migração se limita na maioria dos casos a frequências máximas em torno de 45Hz.

**Metodologia**

Para a avaliação dos métodos foram modelados dados em um cenário simples de 5 camadas plano paralelas e um cenário de geologia complexa do Pré-Sal brasileiro. Os dados foram obtidos por meio de simulação sísmica elástica através do método das diferenças-finitas utilizando um algoritmo desenvolvido pelo grupo de pesquisa GISIS (Grupo de Imageamento e Inversão Sísmica) da Universidade Federal Fluminense. As técnicas de migração foram aplicadas utilizando algoritmos de migração do software ECHOS-Paradigm da Emerson Solutions.

A fonte sísmica adotada foi uma *wavelet* de Ricker de fase zero, com frequência de corte de 30,0 Hz. Em ambos os casos, os mesmos parâmetros de modelagem foram utilizados, sendo possível se obter informações qualitativas, comparáveis entre as técnicas de migração (Araújo, 2022). Os parâmetros da malha do modelo bem como das especificações da aquisição estão dispostos nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 – Principais parâmetros dos modelos

Malha do modelo	
Número de amostras	701x851
Largura do modelo	35000,0 m
Profundidade	8500,0 m
Intervalo dx	50,0 m
intervalo dz	10,0 m

Tabela 2 – Principais parâmetros da modelagem elástica

Fonte		Registro	
Pulso	Ricker	Arranjo	<i>streamer</i>
$f_{corte}$	30,0 Hz	Cabo	8087,5 m
Delay fonte	0,20 s	Interv. canais	12,5 m
Interv. de tiro	25,0 m	Prof.	10,0 m
Prof.	10,0 m	N. de canais	648
N. de tiros	1071	Registro	9,074 s
Injeção	$\tau_{xx} + \tau_{zz}$	Amostragem	0,0004 s
		Offset mín.	150,0 m

A Figura 1 mostra o modelo simples de 5 camadas, com camadas plano paralelas (Tabela 3). O segundo modelo mostrado na Figura 2, representa estruturas de geologia complexa do pré-sal no campo de Búzios, contendo falhas com rejeitos expressivos e flancos salinos com

velocidades características da região, apresentado por Karsou et al. (2019) (Tabela 4).

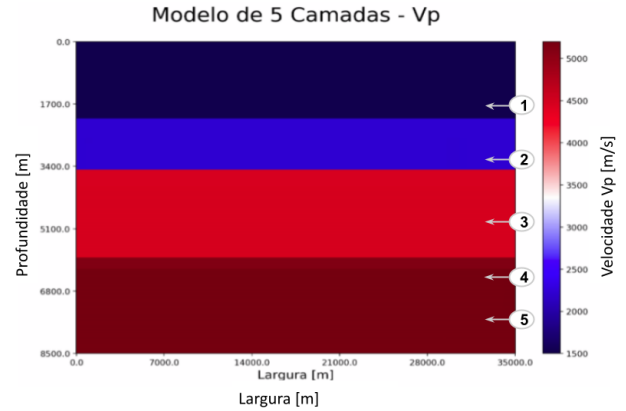


Figura 1 – Modelo de velocidades  $V_p$  5 Camadas.

Tabela 3 – Propriedades elásticas do Modelo de 5 Camadas

Camada	$V_p$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	1500,0	0	1000,0
2	2200,0	990,0	1575,2
3	4450,0	2002,5	1878,5
4	5100,0	2295,0	1943,7
5	5200,0	2340,0	1953,1

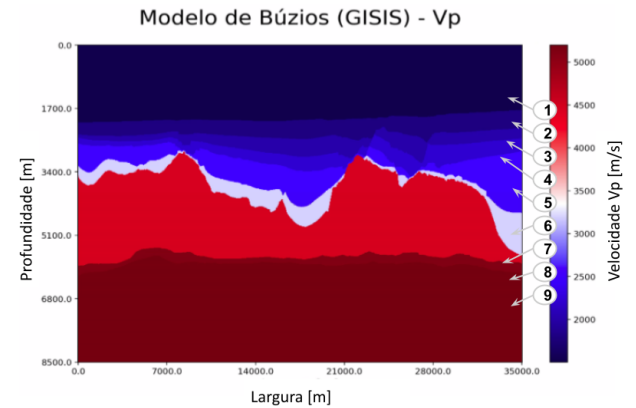


Figura 2 – Modelo de velocidades  $V_p$  Búzios.

Para as migrações vale destacar os principais parâmetros utilizados como a abertura de migração (12.750 m), profundidade máxima de migração (8.500 m), e canais utilizados por tiro (216 canais - 2650 m).

**Resultados e Discussões**

Nesta seção são apresentados os resultados das migrações realizadas com o método de Kirchhoff e RTM,

Tabela 4 – Propriedades elásticas do Modelo Búzios.

Camada	$V_p$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	1500,5	0	1020,0
2	1780,0	801,0	1700,0
3	2000,0	900,0	1800,0
4	2200,0	990,0	1900,0
5	2500,0	1125,0	2150,0
6	3200,0	1440,0	2400,0
7	4450,0	2002,5	2100,0
8	5100,0	2295,0	2520,0
9	5200,0	2340,0	2600,0

em ambos os modelos apresentados. O primeiro modelo de 5 camadas serviu como validação dos parâmetros da migração devido sua simplicidade. O segundo, modelo de Búzios, possibilitou se avaliar a capacidade dos algoritmos de migrações focalizar corretamente amplitudes de eventos mais complexos associados à geologia de sal.

#### *Migrações com o modelo de 5 Camadas*

As duas primeiras seções, foram geradas a partir do Modelo de 5 Camadas, os resultados da migração Kirchhoff e RTM são apresentados na Figura 3 e Figura 4, respectivamente. As duas técnicas de migração utilizadas colapsaram as energias de modo coerente e reposicionaram os refletores contidos no modelo geológico de modo consistente, validando de modo qualitativo os parâmetros utilizados nos métodos. Verticalmente, as amplitudes migradas demonstraram ser condizentes com as impedâncias acústicas propostas no modelo. Desse modo, observa-se que ambos os resultados foram capazes de colapsar as reflexões registradas de modo satisfatório, reposicionando corretamente as interfaces do modelo de 5 camadas, conforme se esperava.

#### *Migrações com o modelo de Búzios*

As duas seções geradas a partir do Modelo de Búzios migrada pelo Método de Kirchhoff e pela RTM são apresentadas na Figura 5 e 6, respectivamente. As migrações também representaram os refletores contidos no modelo de modo satisfatório, reforçando a boa adequação dos parâmetros de migração destacados na metodologia. Ambos os resultados se mostraram consistentes com o reposicionamento correto dos refletores em profundidade. Vale destacar artefatos observados na imagem gerada pela técnica da migração Kirchhoff (*smiles*), indicadas pela seta laranja na Figura 5, os quais representam energias que não foram completamente colapsadas com a migração (Zhu et al., 1998), e que por sua vez não ocorrem com a técnica RTM. Observa-se que os refletores íngremes também foram contemplados em ambos os métodos. Porém, nota-se diferenças relacionadas a focalização das amplitudes nos flancos salinos, por exemplo, indicados pelas setas em azul na Figura 6, atendendo o propósito

deste trabalho com a comparação qualitativa.

### **Conclusões**

As seções imageadas do modelo de Búzios possibilitaram uma comparação das migrações em um cenário de maior interesse, com estruturas complexas associadas a região do Pré-Sal brasileiro. Além disso, as seções imageadas no modelo simples, se mostraram importantes para um controle de qualidade na geração das imagens, possibilitando uma otimização para os parâmetros da migração utilizados nas técnicas. Os métodos de migração mostraram ser eficientes para o contexto geológico do Modelo Búzios, onde as estruturas mais complexas como os domos salinos, e estruturas abaixo do sal, foram posicionadas corretamente com resolução adequada para interpretação estrutural. De modo geral, apesar do correto posicionamento dos refletores e semelhança entre os resultados para ambas as técnicas, destaca-se a maior precisão com a RTM ao focalizar as energias refletidas das regiões de maior variação lateral, em troca de um maior custo computacional. Todavia, mesmo que diante da diferente demanda computacional entre os métodos avaliados, ressalta-se a importância de se ter em mãos uma boa estimativa para o modelo de velocidades.

### **Agradecimentos**

O autor gostaria de agradecer ao Grupo de Imageamento e Inversão Sísmica (GISIS) e seus pesquisadores pelo apoio teórico na elaboração deste trabalho. Agradecimento especial à PETROBRAS pelo bolsa de estudos fornecida em parceria com a Fundação Euclides da Cunha. Nossos agradecimentos à Emerson Solutions pela licença acadêmica do software e apoio técnico. Agradecimento à Universidade Federal Fluminense por todo suporte acadêmico.

Pessoalmente, gostaria de agradecer aos Pesquisadores Dr. Marco Cetale, Dr. Felipe Timóteo e a Dra. Marília Carneiro pelas orientações atenciosas e suas contínuas ajudas.

### **Referências**

- Aki, K. & Richards, P. G., 1990. Quantitative Seismology, Second Edition, 2nd ed., University Science Books.
- Araújo, H. E. d., 2022. Comparação dos métodos de migração kirchhoff e migração em reversa no tempo utilizando dados sintéticos do pré-sal.
- Baysal, E., Kosloff, D. D. & Sherwood, J. W. C., 1983. Reverse time migration, GEOPHYSICS, vol. 48(11): 1514–1524.
- Berkhout, A. J., 1984. Seismic Migration: Imaging of Acoustic Energy by Wave Field Extrapolation, Elsevier.
- Dondurur, D., 2018. Acquisition and Processing of Marine Seismic Data, Elsevier.

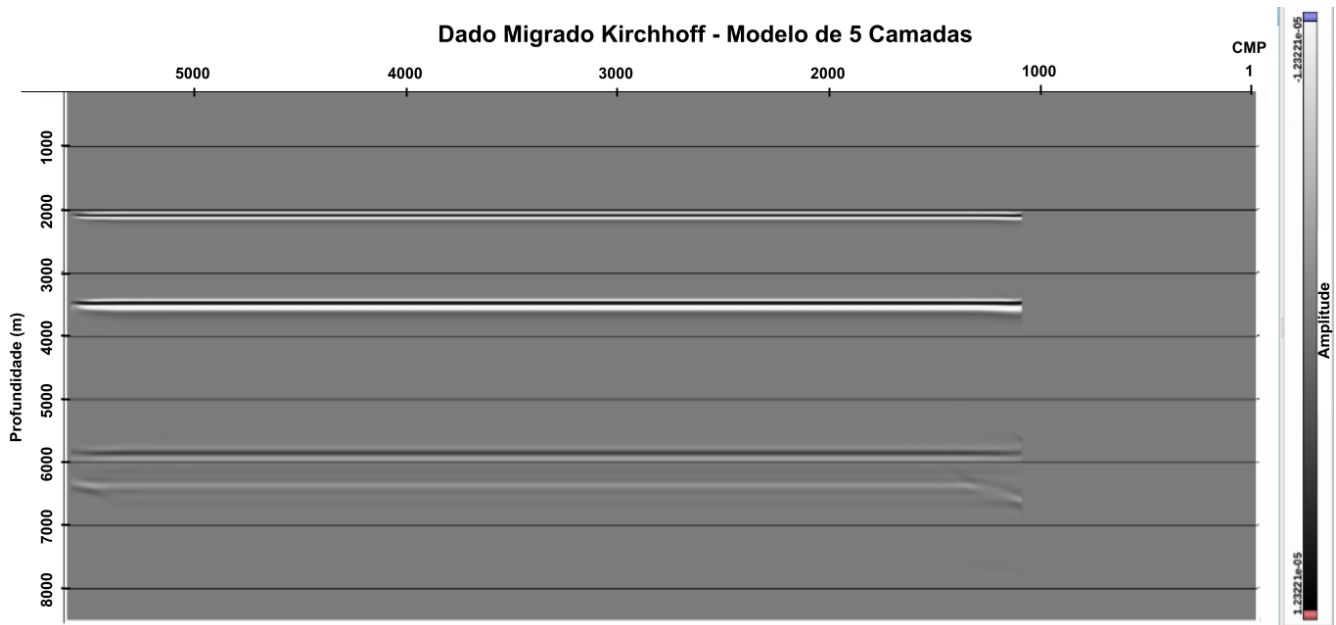


Figura 3 – Migração método Kirchhoff com dados do Modelo de 5 Camadas

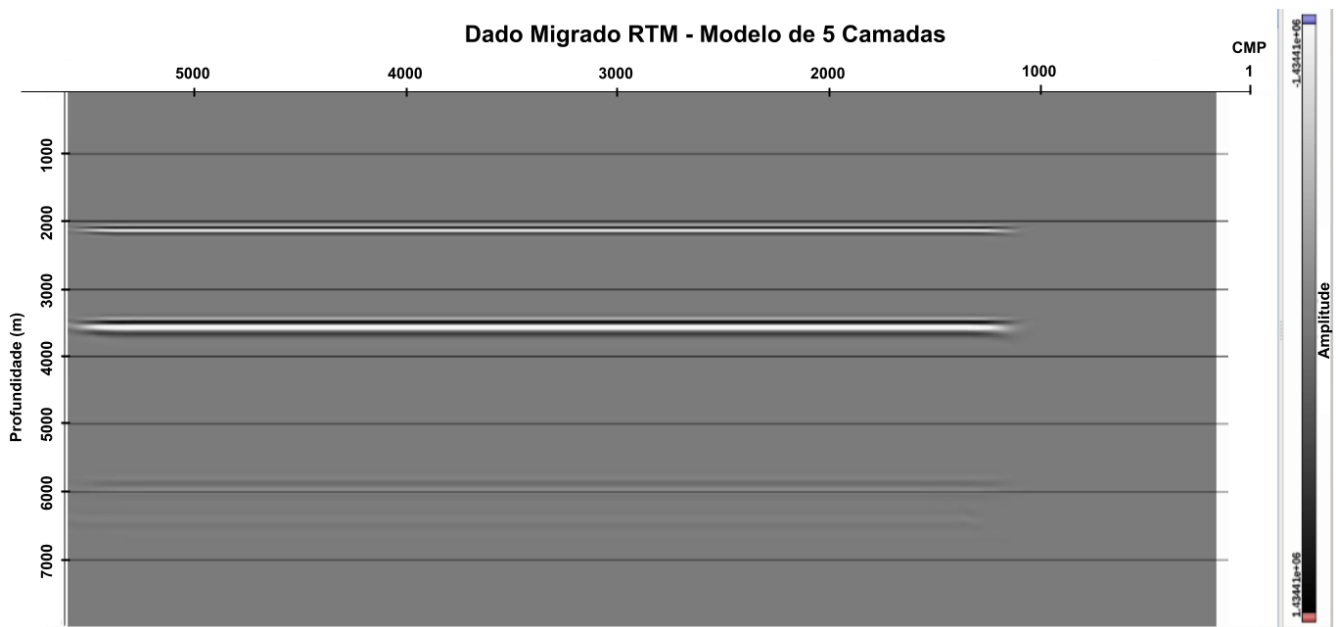


Figura 4 – Migração método RTM com dados do Modelo de 5 Camadas.

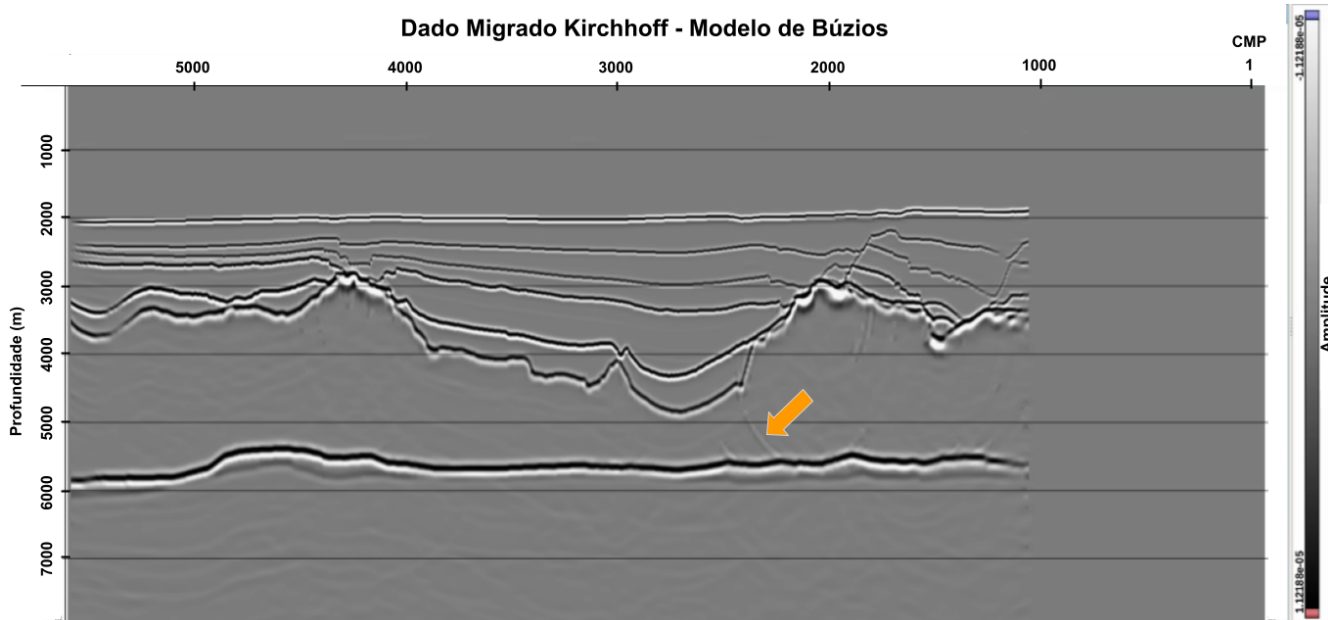


Figura 5 – Migração método Kirchhoff com dados do Modelo de Búzios. A seta em laranja aponta para artefato ("smile") gerado com a migração.

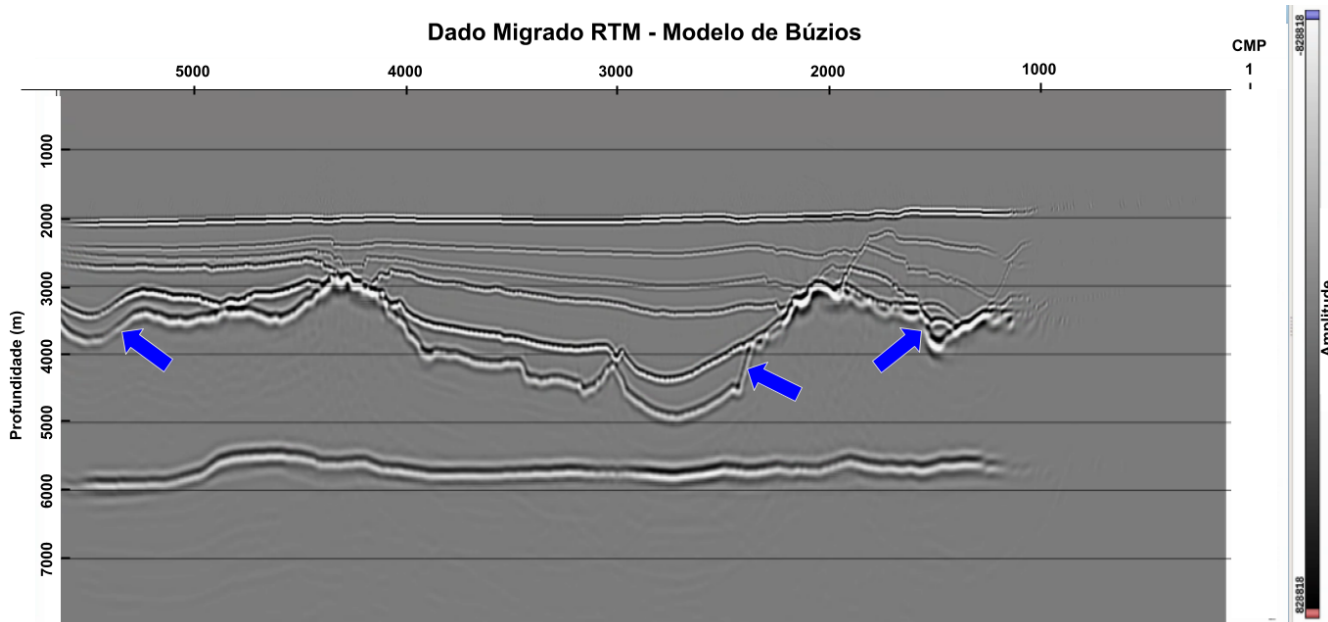


Figura 6 – Migração método RTM com dados do Modelo de Búzios. As setas em azul apontam para as regiões com inclinações mais acentuadas nos refletores, onde se nota uma melhor focalização das amplitudes com a técnica RTM.

French, W. S., 1974. Two-dimensional And Three-dimensional Migration Of Model-experiment Reflection Profiles, *GEOPHYSICS*, vol. 39(3): 265–277.

Green, G., 1835. V. researches on the vibration of pendulums in fluid media, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* vol. 13 iss. 1, vol. 13.

Hemon, C., 1978. Equations d'onde et modeles, *Geophysical prospecting*, vol. 26(4): 790–821.

Hertweck, T., Jäger, C., Goertz, A. & Schleicher, J., 2003. Aperture effects in 2.5D Kirchhoff migration: A geometrical explanation, *Geophysics*, vol. 68(5): 1673–1684.

Karsou, A. A. et al., 2019. Construction of a velocity model of the brazilian pre salt based on buzios field-preliminary results.

McMechan, G. A., 1983. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values\*, *Geophysical Prospecting*, vol. 31(3): 413–420.

Schneider, W. A., 1978. Integral formulation for migration in two and three dimensions, *GEOPHYSICS*, vol. 43(1): 49–76.

Whitmore, N., Gray, S. H. & Gersztenkorn, A., 1988. Two-dimensional post-stack depth migration: a survey of methods, *First Break*, vol. 6(6).

Whitmore, N. D., 1983. Iterative depth migration by backward time propagation, in: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1983*, Society of Exploration Geophysicists, 382–385.

Zhu, J., Lines, L. & Gray, S., 1998. Smiles and frowns in migration/velocity analysis, *Geophysics*, vol. 63(4): 1200–1209.

Zhu, J. & Lines, L. R., 1996. Comparison of Kirchhoff and reverse-time migration methods with applications to prestack depth imaging of complex structures, 1996 SEG Annual Meeting: 539–542.