



Inversão AVA de onda P para estimativa de densidades com alta precisão

Oleg Bokhonok (IAG-USP & IPECI/UNISANTOS), Liliansa Alcazar Diogo (IAG/USP)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15th 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

In this paper, with the aid of the RFDM technique, we present an innovative strategy to estimate the densities with high precision using only the information of prestack P wave amplitudes. The model used as an example is a high impedance reservoir, chosen because currently there are no approximations that allow to correctly determining the reflection coefficients for this type of model. Therefore, in this case the use of the exact Zoeppritz equations is mandatory. The results obtained in this work shows that the strategy created with the use of RFDM allows high precision estimate of P and S wave velocities, as well as the densities for first and second layer independently. Moreover, this strategy does not require a priori information about the parameters of the model.

Keywords: AVA, P wave, density, Residual Function Dispersion Map, RFDM, inversion, exact Zoeppritz equations, high impedance reservoir

Introdução

A dependência da refletividade com o ângulo de incidência permite a estimativa de parâmetros elásticos do meio em subsuperfície através da inversão AVO ou AVA (variação de amplitude do sinal refletido, respectivamente, com afastamento, ou com o ângulo de incidência). Os coeficientes de reflexão das ondas sísmicas que incidem na interface que separa dois meios distintos são fornecidos pelas equações de Zoeppritz, descritas em função de parâmetros elásticos (velocidades da onda P, velocidades da onda S e densidades).

Apesar da aparente complexidade e não linearidade, o uso das equações de Zoeppritz exatas para a estimativa dos parâmetros elásticos está se tornando uma das tendências mais importantes na indústria de exploração e produção de hidrocarbonetos. Isto porque as aproximações criadas até o momento permitem descrever com precisão a curva de coeficiente de reflexão apenas para ângulos de incidência curtos, mesmo para os modelos de baixo contraste de impedâncias (Marum et. al, 2016).

Bokhonok & Diogo (2016) debateram as controvérsias quanto a escolha adequada da parametrização do modelo usando a técnica de análise Residual Function

Dispersion Maps (RFDM). Entre distintas opções de parametrização, os autores analisaram as três opções mais comuns entre os pesquisadores nesta área: (1) as razões $\{Vp2/Vp1; Vs1/Vp1; Vs2/Vp1; \rho2/\rho1\}$, como em Ursin & Tjaland (1996) e Wei & Chen (2011), que afirmam que usando as equações de Zoeppritz só é possível estimar os contrastes da forma como parametrizados acima; (2) as velocidades das ondas sísmicas e a razão das densidades dos meios $\{Vp1; Vp2; Vs1; Vs2; \rho2/\rho1\}$, como proposto por Cervený et. al. (1977); e (3) os seis parâmetros independentes $\{Vp1; Vp2; Vs1; Vs2; \rho1; \rho2\}$, como avaliados por Bokhonok et. al. (2013) e Zong et al. (2013), que defenderam a inversão não linear multiparamétrica para estimativa direta dos seis parâmetros dos meios usando dados sísmicos multicomponente. A partir dos resultados obtidos no trabalho de Bokhonok & Diogo (2016) foi possível concluir que para as parametrizações (1) e (2) citadas acima, respectivamente com quatro e cinco parâmetros, o mínimo global da função objetivo é bem definido e não apresenta ambiguidades, permitindo estimar os parâmetros elásticos praticamente sem erro nos testes usando dados sintéticos. Já no caso da parametrização usando 6 parâmetros o mínimo global da função objetivo não está bem definido e apresenta grandes ambiguidades relativas entre os parâmetros elásticos. Isso torna a inversão extremamente complexa e provavelmente inviável em dados reais, principalmente quando estiver disponível apenas a informação de amplitude de onda P.

De acordo com as colocações anteriores percebe-se que a determinação das velocidades de onda P e onda S para camada superior e inferior é possível, mas a determinação das densidades para cada camada separadamente, principalmente usando apenas amplitudes de onda P ainda é um grande desafio.

Visando a importância da informação sobre a densidade do meio para caracterização de reservatórios de hidrocarbonetos, nesse trabalho com auxílio da técnica RFDM, apresentamos uma estratégia inovadora para estimar as densidades com alta precisão usando apenas as amplitudes de onda P.

O modelo usado como exemplo é de reservatório de alto contraste de impedância, escolhido porque atualmente não existem aproximações que permitem determinar corretamente os coeficientes de reflexão para esse tipo modelo, o que torna a importância de metodologias que permitem o uso das equações exatas de Zoeppritz ainda maior.

Materiais e métodos

A estimativa dos parâmetros elásticos de subsuperfície, formulada pela inversão dos coeficientes de reflexão exatos de onda P é um problema não linear que consiste

em encontrar o vetor de parâmetros de modo que uma função objetivo $f(\mathbf{m})$ seja otimizada.

A formulação matemática do problema direto resolvido dentro de processo de inversão correspondeu ao cálculo dos coeficientes de reflexão Rpp usando a equação de Zoeppritz (1919) exata para ondas planas.

Para a estratégia proposta foram empregadas duas parametrizações: a de seis parâmetros independentes $\{Vp1; Vp2; Vs1; Vs2; \rho1; \rho2\}$ e a reescrita por Cervený et al. (1977) em função de cinco parâmetros $\{Vp1; Vp2; Vs1; Vs2; \rho2/\rho1\}$.

Os cálculos foram realizados usando os parâmetros do modelo de reservatório de alto contraste de impedância (Modelo N. 22) extraído de Castagna & Smith (1994) (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros de modelo.

N de camada	Vp (m/s)	Vs (m/s)	rho (kg/m ³)
1	2310	940	1900
2	3460	1850	2260

Função objetivo

O critério de mínimos quadrados (L2) foi empregado para quantificar a semelhança entre as amplitudes observadas e calculadas de onda P. Dessa forma \vec{d} são os dados sintéticos do modelo descrito acima e $h(\mathbf{p})$ os valores obtidos com a modelagem de cada modelo obtido no processo de inversão (Equação 1)

$$\phi(\vec{d}, \mathbf{p}) = \|\vec{d} - h(\mathbf{p})\| \quad (1)$$

Residual Function Dispersion Map (RFDM)

A metodologia baseia-se na análise da dispersão resultados obtidos a partir de várias execuções (*multi-start*), de um algoritmo de otimização heurístico baseado em simplex sem limitação de espaço de busca. Os parâmetros invertidos são representados em mapas bidimensionais, sem fixar outros parâmetros do modelo. A análise da dispersão das soluções é feita no formato de mapa, onde a terceira dimensão é representada pelo valor de erro RMS em escala de cores (Bokhonok et. al., 2015).

Estratégia para estimativa das densidades

A estratégia consiste em três etapas. Na primeira é efetuada a inversão para estimativa de parâmetros elásticos usando a parametrização $\{Vp1; Vp2; Vs1; Vs2; \rho2/\rho1\}$ (Cervený et. al., 1977). Na segunda, a inversão é realizada para os seis parâmetros individuais $\{Vp1; Vp2; Vs1; Vs2; \rho1; \rho2\}$, o que permite pela técnica de análise RFDM obter informações sobre as relações de dependência entre os parâmetros do modelo. Na terceira etapa, integrando os resultados das duas etapas anteriores, são estimadas as densidades das duas camadas: usando a informação das curvas de dependência entre $(Vp1 \text{ e } \rho1)$ e $(Vp2 \text{ e } \rho2)$, obtidas

durante a segunda etapa, determinamos os valores de densidade ($\rho1$ e $\rho2$) que correspondem aos valores de velocidade da onda P estimados na primeira etapa.

Resultados e Discussão

A seguir estão apresentados os resultados obtidos para modelo de alto contraste de impedância (Tabela 1). A estimativa de densidades foi efetuada de acordo com a estratégia descrita acima, em três etapas.

A primeira etapa está apresentada na figura 1, onde estão imagens de RFDM geradas a partir dos resultados de inversão para estimativa das velocidades de onda P, velocidades de onda S e razão de densidades.

Fazendo análise visual dos mapas obtidos, percebemos que apesar da topografia de função objetivo possuir grande complexidade, representada pela presença de múltiplas regiões de mínimos locais (Figura 1a,c,e), existe um mínimo global bem definido (Figura 1b,d,f). Portanto, foi possível estimar os parâmetros com alta precisão (erro na quinta casa decimal).

Na segunda etapa foram criadas imagens de RFDM pela inversão de seis parâmetros independentes $\{Vp1; Vp2; Vs1; Vs2; \rho1; \rho2\}$. A partir das quais foram identificadas as relações de dependência, indicadas como pontos de cor preta, entre as velocidades e densidades (Figura 2a,b e 3a,b).

A terceira e última etapa foi realizada usando as informações obtidas durante a primeira e segunda etapa.

O valor de $Vp1$ estimado com precisão durante a primeira etapa foi projetado sobre a relação de dependência $(Vp1 - \rho1)$, linha vermelha na figura 2a,b; e o valor de $Vp2$ sobre a relação de dependência $(Vp2 - \rho2)$, linha vermelha na figura 3a,b.

O valor de densidade é estimado pela intercessão da linha vermelha com relação de dependência marcada com pontos de cor preta (Figura 2a,b e 3a,b).

Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que a estratégia criada com uso de RFDM permite estimar com alta precisão, tanto as velocidades de onda P e onda S, como também as densidades para primeira e segunda camada de maneira independente. Além disso essa estratégia não requer informação *a priori* sobre os parâmetros do modelo.

Agradecimentos

Bokhonok O. agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Pós-doutorado (Processo: 152366/2016-4).

Bokhonok O., Diogo L.A. agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte por meio de projeto PVE (Projeto 406653/2013-5).

Referencias

Bokhonok, O., et. al., 2015. Residual function dispersion maps to evaluate multidimensional objective function topography: Near-surface geophysical inverse problems. Fourteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society.

Cerveny, V., Molotkov, LA. & Psensik, I., 1977. Ray method in seismology, Charles University Press, Prague.

Marum, V.J.O., Bokhonok, O., Diogo, L.A., Auad, I.T. 2016, Comparação de aproximações das equações de Knott- Zoeppritz para modelos com baixo contraste de impedância. VII Simpósio Brasileiro de Geofísica (SimBGf).

Ursin, B. and Tjåland, E., 1996, The information content of the elastic reflection matrix. *Geophysical Journal International* 125, 214-228.

Wei, X. C., and T. S. Chen, 2011, Joint PP and PS AVO inversion based on Zoeppritz equations: *Earth Science*, 24, 329–334.

Zoeppritz K., 1919, Erdbebenwellen VIII B, Über Reflexion ad Durchgang seismischer wellen durch Unstetigkeitsflächen: *Göttinger Nach.* 66-84.

Zong Z.Y., Yin X.Y., Wu G.C. 2013b, Multi-parameter nonlinear inversion with exact reflection coefficient equation. *Journal of Applied Geophysics*, 98, 21–32.

Bokhonok, O., Diogo, L.A., 2016, Inversão AVA de ondas PP e PSv usando equações de Zoeppritz exatas com 6, 5 e 4 parâmetros: análise RFDM VII Simpósio Brasileiro de Geofísica (SimBGf).

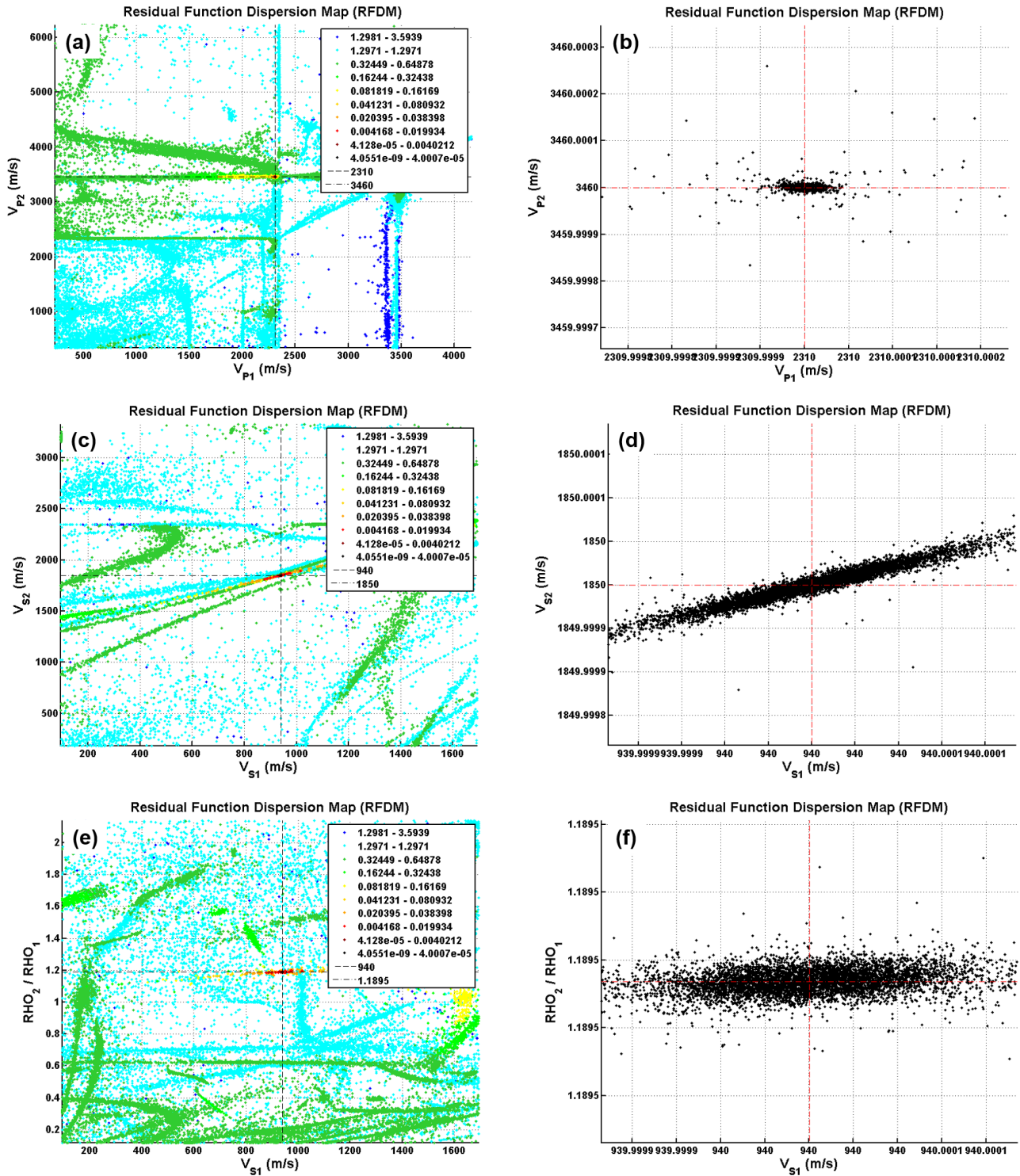


Figura 1 – Imagens de RFDM obtidos pelo mapeamento de função objetivo (norma L2) pela inversão de amplitudes de onda P usando equação de Zoeppritz exata em função de cinco parâmetros: (a) V_{p1} versus V_{p2} ; (b) V_{p1} versus V_{p2} com foco no mínimo global; (c) V_{s1} versus V_{s2} ; (d) V_{s1} versus V_{s2} com foco no mínimo global; (e) V_{s1} versus ρ_1/ρ_2 ; (f) V_{s1} versus ρ_1/ρ_2 com foco no mínimo global.

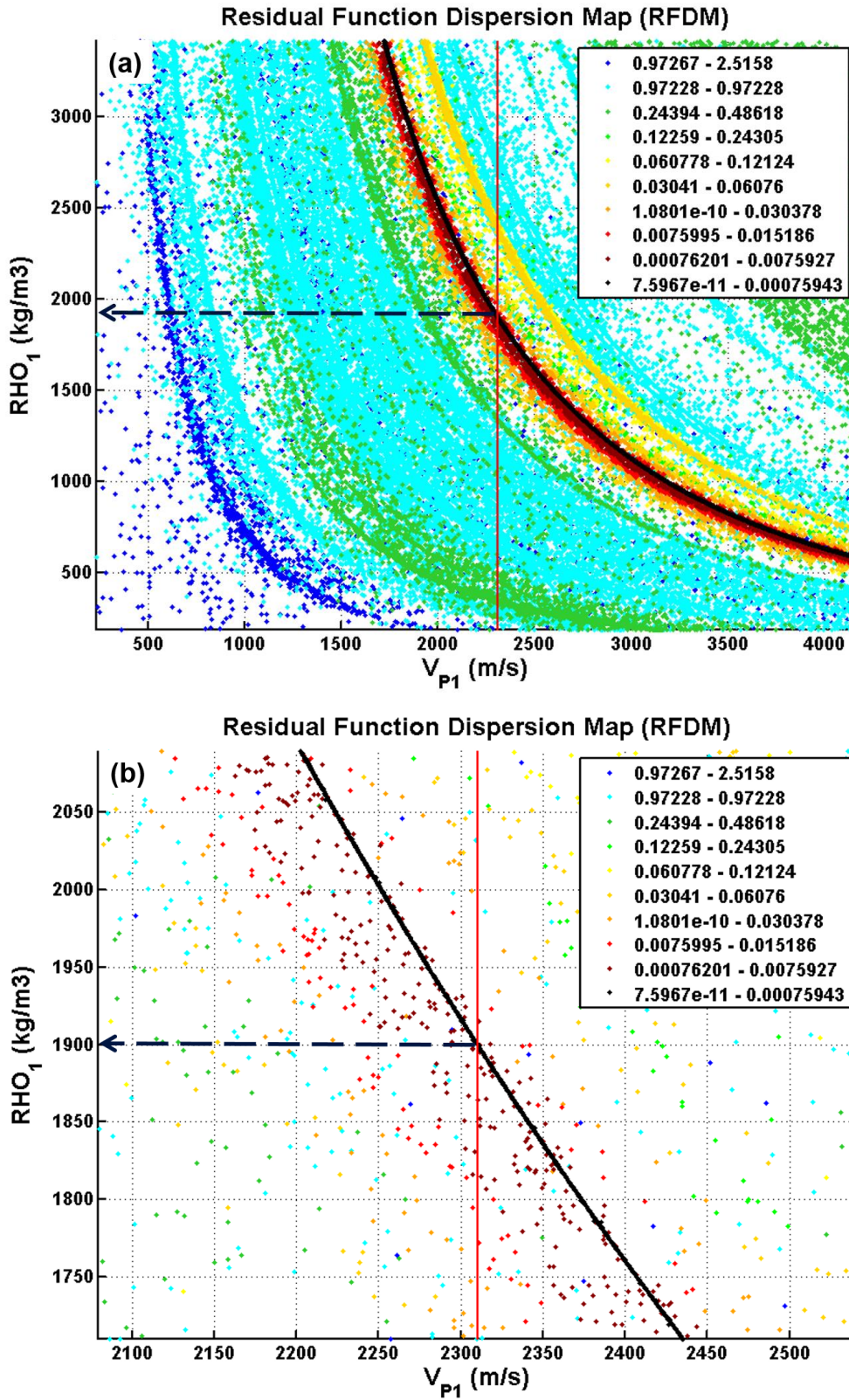


Figura 2 – Imagens de RFDM obtidos pelo mapeamento de função objetivo (norma L2) pela inversão de amplitudes de onda P usando equação de Zoeppritz exata em função de seis parâmetros: (a) V_{p1} versus ρ_{o1} ; (b); V_{p1} versus ρ_{o1} com foco na intercessão da linha vermelha com relação de dependência marcada com pontos de cor preta.

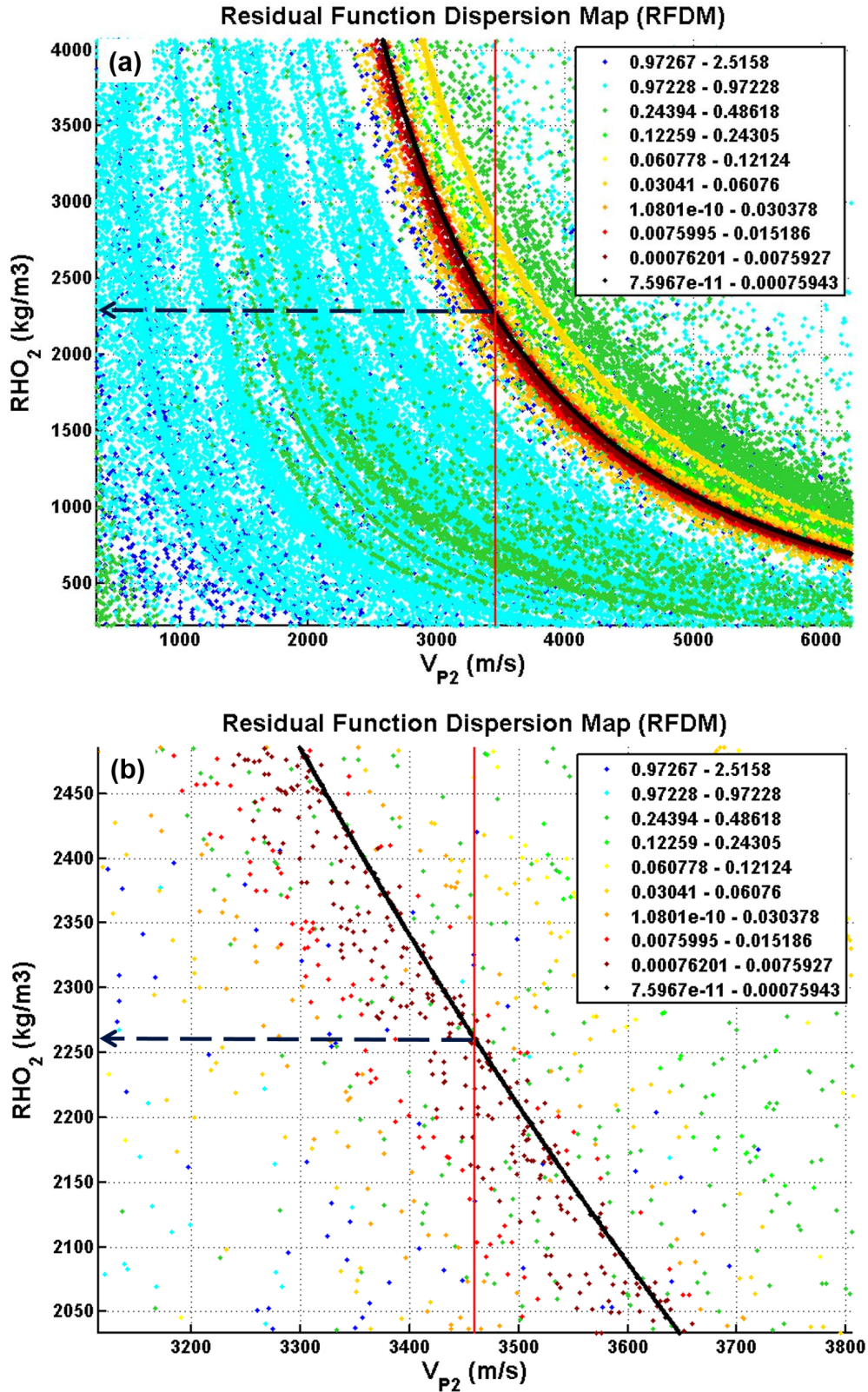


Figura 3 – Imagens de RFDM obtidos pelo mapeamento de função objetivo (norma L2) pela inversão de amplitudes de onda P usando equação de Zoeppritz exata em função de seis parâmetros: (a) V_{p2} versus ρ_{o2} ; (b); V_{p2} versus ρ_{o2} com foco na intercessão da linha vermelha com relação de dependência marcada com pontos de cor preta.