

Imageamento de difrações sísmicas baseado em métodos de alta-resolução

Marcos Ricardo Covre, Tiago Barros, André K. Takahata e Renato da Rocha Lopes

Resumo— O propósito da técnica de imageamento sísmico é a de reconstruir a estrutura da subsuperfície de um terreno em questão a partir de dados obtidos por meio da aquisição sísmica. A técnica clássica para este procedimento é chamada de migração. A mesma possui resolução limitada por fatores como tamanho da cobertura da aquisição e banda de frequência dos dados. Como alternativa para a obtenção de imagens com maior resolução, usamos ferramentas de alta resolução derivadas do método conhecido como classificação de sinais múltiplos (MUSIC). Neste trabalho realizamos uma breve revisão dos principais tópicos do assunto e propomos o uso da variante temporal deste método (T-MUSIC) no contexto do imageamento de difrações sísmicas.

Palavras-Chave— migração, MUSIC, difração

Abstract— Seismic imaging is a tool to reconstruct the substructure of a given ground from the data collected in a seismic acquisition. The standard technique for this purpose is called migration. This technique has resolution, i.e., the capacity to differentiate two nearby elements, limited by factors such as the size of the acquisition coverage and the frequency bandwidth of the data. As an alternative to produce higher resolution images, we used high resolution tools derived from the technique known as Multiple Signal Classification (MUSIC). In this work, we present a brief review and propose the use of the temporal variation of MUSIC (T-MUSIC) in the context of seismic diffraction imaging.

Keywords— migration, MUSIC, diffraction

I. INTRODUÇÃO

A principal forma de obtenção de informações de subsuperfície para a exploração de gás e petróleo é pelo uso de dados obtidos por meio da aquisição sísmica. Na figura 1 observamos o cenário de uma aquisição terrestre e alguns dos termos envolvidos nesse tipo de aquisição estão presentes. Podemos observar que o sistema é composto de uma fonte (transmissor) e vários geofones (receptores). Basicamente, o processo de aquisição se dá com a detonação da fonte sísmica. Ao propagar na subsuperfície a onda sísmica resultante sofre fenômenos como refração, reflexão e difração. O campo de onda resultante que retorna à superfície é medido pelos geofones dispostos em posições pré-definidas. Repete-se o procedimento deslocando-se o conjunto de fontes e receptores com o intuito de se obter uma cobertura adequada da subsuperfície. Cada detonação da fonte é denominada *tiro* e o sinal captado em cada um dos geofones é denominada *traço*.

Marcos Ricardo Covre, Tiago Barros, André K. Takahata e Renato da Rocha Lopes, Departamento de Comunicações, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil, e-mails: {marcosrc, tbarros, kazuo, rlopes}@decom.fee.unicamp.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e pelo CNPq.

Os traços resultantes serão processados posteriormente, tendo como objetivo a reconstrução da estrutura geológica do terreno com base nas leituras dos geofones. Assim, cada traço adquirido por um geofone contém: reflexões primárias (aquelas que sofrem somente uma reflexão), múltiplas reflexões, difrações, ondas que se propagam na superfície, além de fontes de ruído [2].

As difrações são causadas por elementos difratores, que são elementos menores que o comprimento de onda principal da onda gerada pela fonte. Podemos interpretar um difrator como um ponto que espalha uma onda incidente (energia) em todas as direções. Na prática, difratores carregam informação de detalhes do terreno como *pinch-outs*, falhas e *wedge-outs* [3].

Nosso objetivo neste trabalho é criar uma imagem contendo os pontos difratores no subsolo. Como as difrações são mais fracas que as reflexões, podemos amplificá-las [4] ou além de amplificá-las, isolá-las retendo as informações contidas nelas [5].

A técnica utilizada em geofísica para recuperar a posição de elementos difratores é a migração [3], sendo limitada quando estes localizam-se muito próximos. Para melhor localizar a posição destes elementos podemos utilizar técnicas de alta-resolução. Em [6] foi utilizado o método MUSIC (*MUltiple SIgnal Classification* [7]) com base na matriz de correlação espacial para imageamento de difrações. Neste trabalho propomos uma diferente utilização do método MUSIC para o imageamento de difrações sísmicas. Tomamos como base o MUSIC obtido a partir da matriz de correlação temporal, anteriormente utilizado em [8] para o cálculo de espectros de velocidades de empilhamento. Nossa proposta consiste no uso do MUSIC proposto em [8] como alternativa para o imageamento de difrações, proposto em [6].

O trabalho está organizado da seguinte forma: Em II apresentamos uma breve revisão de migração sísmica e descrevemos qual tipo de migração utilizaremos neste trabalho. Na seção III descrevemos a técnica de alta-resolução MUSIC e as características próprias para o emprego desta com as matrizes de correlação espacial e temporal. Na seção IV apresentamos o cenário de testes e simulações em que o uso de técnicas de alta-resolução se faz necessária. Finalmente, na seção V apresentamos comentários e conclusões sobre o método proposto e o cenário utilizado.

II. MIGRAÇÃO

Cada traço pode ser visto como um conjunto de tempos de trânsito, ou seja, o registro dos tempos entre o instante do tiro e a chegada dos eventos sísmicos no receptor. Com o uso deste

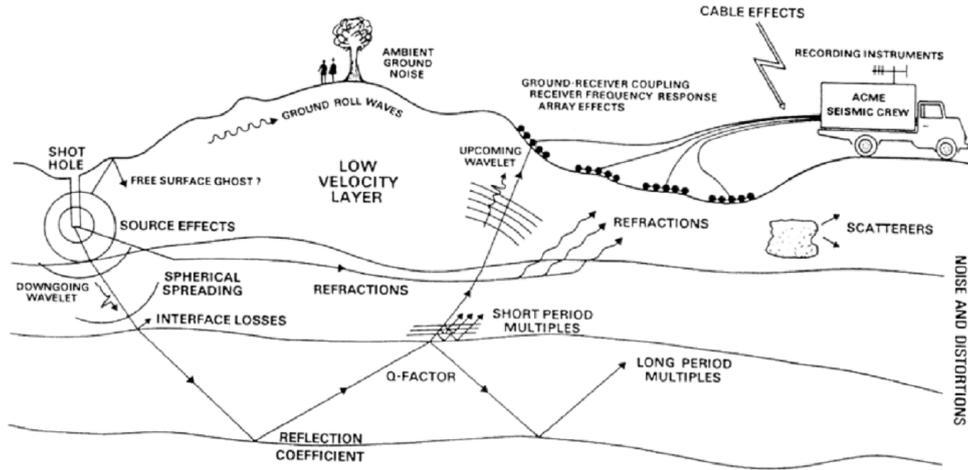


Fig. 1. Ilustração de um levantamento sísmico e das diversas distorções sofridas pela onda sísmica. Reproduzida de [1].

registro e de posse do modelo de velocidades de propagação na subsuperfície é possível determinar em profundidade a posição das estruturas geológicas. A obtenção deste modelo de velocidades é possível por meio de inúmeras técnicas [3]. e em nossas simulações, admitimos que essa análise foi feita e a migração é realizada com a velocidade correta. Notemos que identificada uma energia incidente no receptor, existe uma ambiguidade na direção da origem dessa energia. Na figura 2, o pulso mostrado pode ter sido originado em qualquer uma das posições ao longo da isócrona, que é a curva em que todos os pontos resultam em um mesmo tempo de trânsito (No caso apresentamos a situação hipotética em que a posição da fonte e receptor são as mesmas, ou seja, uma configuração de deslocamento zero entre fonte e receptor, conhecida como *Zero Offset* [3]). Portanto, não é possível dizer se o refletor está logo abaixo do receptor ou se em outra direção com a mesma distância.

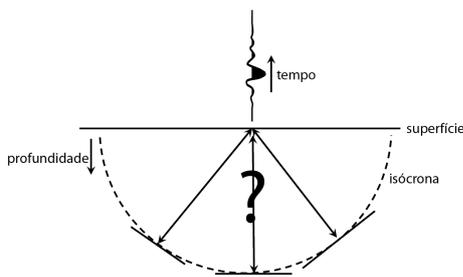


Fig. 2. Indeterminação quanto à direção de uma reflexão recebida.

A correção da indeterminação mostrada na figura 2 é feita pela migração, que pode ser definida como um rearranjo da informação sísmica de elementos refletores e difratores em suas reais posições [9].

Em particular, na figura 3, pode-se observar que uma difração se manifesta como uma hipérbole na seção *Zero Offset*. O papel da migração será colapsar essa curva para um ponto correspondente à posição original do difrator. Pode-se dizer que um dos objetivos do imageamento é detectar o difrator na posição correta a partir da seção sísmica disponível.

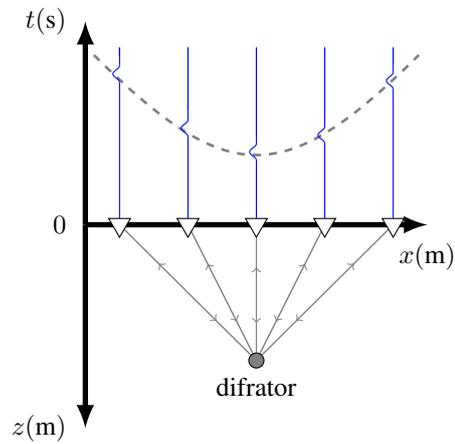


Fig. 3. Resultado da aquisição dos tempos de trânsito de um difrator.

A. Migração por Empilhamento de Difrações

O tipo de migração que utilizaremos é uma variação da migração Kirchhoff, chamada de empilhamento de difrações (*Diffraction Stack*) [9].

Este procedimento pode ser utilizado tanto para o imageamento de difrações como para dados que contenham difrações e reflexões, que na realidade é o caso mais corrente. A migração por empilhamento de difrações tem como base o princípio de Huygens, em que os pontos pertencentes a uma frente de onda se comportam como fontes secundárias. Assim pode-se interpretar um refletor como um conjunto infinito de difratores. Cada ponto a ser imageado pela migração possui uma coordenada espacial associada. Assim, a primeira etapa do algoritmo de migração consiste em calcular o tempo de trânsito referente a um hipotético difrator na respectiva posição, como mostrado na figura 7. Como pode ser observado na figura 3, caso o ponto imageado coincida com um ponto em que há um evento, observamos que a curva de tempo de trânsito irá acompanhar o registro nos traços. A operação de empilhamento, então, consiste em somar as amplitudes ao longo da curva de tempo de trânsito de difrações e associar o resultado ao ponto a ser imageado. Observamos que caso

o ponto contenha um evento, irá haver uma interferência construtiva e, conseqüentemente, uma alta amplitude associada ao ponto. Caso contrário, a curva de tempo de trânsito não irá acompanhar nenhum evento e não haverá uma alta amplitude associada ao ponto. A imagem sísmica é formada ao se varrer a região de interesse repetindo esse procedimento e formar uma figura a partir das amplitudes calculadas.

O processo permite, de certa forma, colapsar toda energia recebida de um difrator em um único ponto da imagem migrada. Entretanto, a capacidade de se observar a ocorrência de dois difratores próximos depende de uma característica dita resolução.

B. Resolução

A resolução pode ser definida como a capacidade de separar duas características muito próximas umas das outras [9]. Portanto, se houver dois difratores separados por uma distância menor que a resolução a migração não será capaz de separá-los. Um dos critérios que podemos seguir é o de Rayleigh [10], definido por

$$\Delta l = \frac{L\lambda}{D}, \quad (1)$$

em que Δl é o limite da resolução espacial, L é a distância do objeto de interesse, λ é o comprimento de onda dominante e D é a abertura do arranjo de sensores.

Podemos utilizar técnicas de arranjo de sensores para obter imagens com maior resolução do que na migração de modo que seja possível distinguir dois difratores separados por menos do que Δl . Uma dessas técnicas é o MUSIC, desenvolvido por [7] e apresentado na próxima seção.

III. MUSIC

Nesta seção apresentaremos uma breve descrição do algoritmo MUSIC e de seu uso para imageamento de difrações. O MUSIC consiste em uma técnica de alta-resolução largamente utilizada em estimação de direção de chegada (DOA, *Direction of Arrival*) e proposta em [7]. Em processamento sísmico utiliza-se o MUSIC para obtenção de espectros de velocidade de alta-resolução [11], [12]. Nestes trabalhos o método MUSIC é baseado na matriz de correlação espacial do dado sísmico, por isso é também chamado de S-MUSIC [8]. Pode-se também escrever o MUSIC em função da matriz de correlação temporal do dado sísmico e a este podemos chamar de T-MUSIC [8]. Nas próximas subseções descreveremos brevemente os métodos S e T-MUSIC.

A. Janelamento

A aplicação do MUSIC no contexto de imageamento sísmico é feito ao substituir a operação de empilhamento ao longo de uma curva de difração, descrita na seção II-A, pelo uso da medida fornecida pelo MUSIC em uma janela de dados centrada na curva de difração. Os dados desta janela são agrupados em uma matriz \mathbf{D} de dimensão $N_r \times N_t$, cujas colunas são as amostras temporais (N_t) e as linhas os receptores (N_r). Para formar o conjunto das amostras

temporais calcula-se o tempo de trânsito para o par fonte-receptor e selecionam-se L amostras acima e abaixo deste ($N_t = 2L + 1$). O tempo de trânsito está relacionado à curva de migração da seção II-A. De fato, o centro da janela é o tempo de trânsito que obteríamos na hipótese de haver um difrator no ponto em questão.

Se o centro da janela coincidir com o padrão de espalhamento de uma difração, as linhas da matriz contêm repetições da forma de onda refletida mais um termo de erro que contém ruído, resíduos dos traços, reflexões interferentes, etc. Neste caso matriz \mathbf{D} pode ser escrita na forma

$$\mathbf{D} = \mathbf{1}\mathbf{s}^H + \mathbf{N}, \quad (2)$$

em que \mathbf{s} é um vetor de tamanho $N_t \times 1$ que contém amostras da forma de onda refletida, $\mathbf{1}$ é um vetor de uns de tamanho $N_r \times 1$ e \mathbf{N} é uma matriz $N_r \times N_t$ contendo ruído. Uma representação gráfica da equação (2) é apresentada na figura 4.

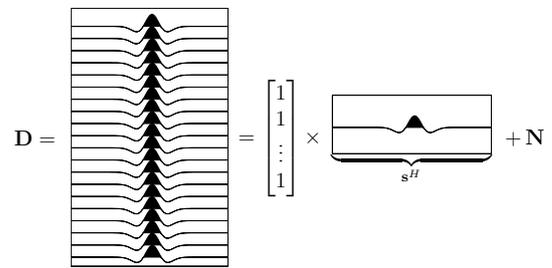


Fig. 4. Representação gráfica da matriz de dados janelada \mathbf{D} .

A partir de \mathbf{D} , o MUSIC determina a presença ou ausência de difrator na janela a partir da decomposição em autovetores da matriz de autocorrelação dos dados. Na realidade, podemos calcular duas matrizes de autocorrelação dos dados, o que dá origem a dois métodos, o S-MUSIC e o T-MUSIC, conforme veremos a seguir.

B. S-MUSIC

Para calcular a matriz de autocorrelação chamada espacial devemos selecionar o vetor

$$\mathbf{d}(n) = [d_1(n) d_2(n) \dots d_{N_r}(n)]^H, \quad (3)$$

com dimensão $N_r \times 1$ representando a n -ésima coluna da matriz \mathbf{D} , correspondendo à n -ésima amostra temporal nos i -ésimo receptores.

A matriz de autocorrelação espacial pode ser escrita como

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}\{\mathbf{d}(n)\mathbf{d}(n)^H\}, \quad (4)$$

com dimensão $N_r \times N_r$. Note que esta matriz mede a correlação entre os sinais em diferentes receptores, daí o nome correlação espacial. A equação (4) pode ser estimada através da matriz de correlação amostral, dada por

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}} &= \frac{1}{N_t} \sum_{n=-L}^L \mathbf{d}(n)\mathbf{d}(n)^H \\ &= \frac{1}{N_t} \mathbf{D}\mathbf{D}^H, \end{aligned} \quad (5)$$

esta operação pode ser representada graficamente como mostrado na figura 5.

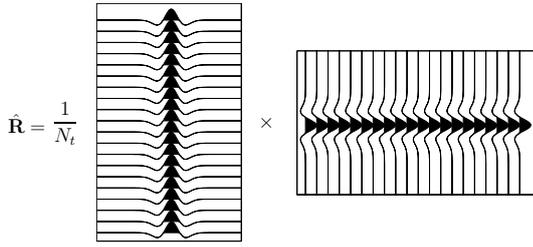


Fig. 5. Representação gráfica de $\hat{\mathbf{R}}$.

Conforme a equação (2), considerando a matriz \mathbf{N} tendo média zero, componentes independentes e identicamente distribuídos e decorrelacionada de \mathbf{s} , podemos aproximar a equação (5), resultando em

$$\hat{\mathbf{R}} \approx \frac{\|\mathbf{s}\|^2}{N_t} \mathbf{1}\mathbf{1}^T + \sigma_n^2 \mathbf{I}, \quad (6)$$

em que σ_n^2 é a variância do ruído, \mathbf{I} é uma matriz identidade e $\|\mathbf{s}\|^2$ é a energia da forma de onda.

Assim, se houver evento, o autovetor \mathbf{v} associado ao maior autovalor de $\hat{\mathbf{R}}$ é proporcional ao vetor $\mathbf{1}$. Pode-se escrever o indicador da presença de um difrator no ponto imageado, dado pelo S-MUSIC como

$$P_s = \frac{N_r}{N_r - |\mathbf{1}^T \mathbf{v}|^2}. \quad (7)$$

Quanto mais próximo o vetor \mathbf{v} for de $\mathbf{1}$ menor será o denominador da equação (7), pois $\mathbf{1}^T \mathbf{1} = N_r$. Isto ocorre se o janelamento do dado sísmico produzir um alinhamento do sinal, resultando em valores altos de P_s .

C. T-MUSIC

Para calcular a matriz de autocorrelação temporal devemos selecionar o vetor

$$\mathbf{d}_i = [d_i(1)d_i(2) \dots d_i(N_t)], \quad (8)$$

com dimensão $1 \times N_t$, este vetor corresponde a i -ésima linha da matriz de dados janelada \mathbf{D} e contém todas as amostras temporais na janela para o i -ésimo receptor. Podemos definir a matriz de correlação temporal como

$$\mathbf{r} = E\{\mathbf{d}_i^H \mathbf{d}_i\}. \quad (9)$$

A dimensão de \mathbf{r} é $N_t \times N_t$. Esta matriz contém a correlação entre diferentes instantes de amostragem do dado janelado por isso o nome temporal. Lembre-se que N_t é o número de amostras, que geralmente é menor que o número de receptores, N_r . Portanto, a dimensão de \mathbf{r} é normalmente menor que a de \mathbf{R} .

Podemos estimar a equação (9) como

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{r}} &= \frac{1}{N_r} \sum_{n=-L}^L \mathbf{d}_i^H \mathbf{d}_i \\ &= \frac{1}{N_r} \mathbf{D}^H \mathbf{D}, \end{aligned} \quad (10)$$

esta operação pode ser representada graficamente como mostrado na figura 6.

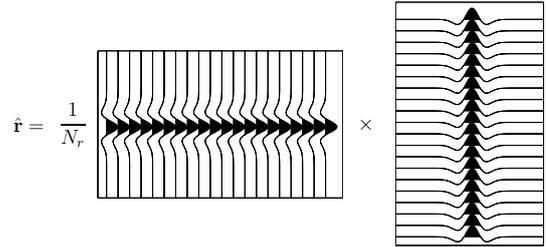


Fig. 6. Representação gráfica de $\hat{\mathbf{r}}$.

Como antes, podemos aproximar a equação (10) utilizando a equação (2) e considerando o ruído com média zero, independente e decorrelacionado de \mathbf{s} , tendo assim a matriz de correlação temporal escrita como

$$\hat{\mathbf{r}} \approx \mathbf{s}\mathbf{s}^H + \sigma^2 \mathbf{I}. \quad (11)$$

Na equação (11), σ^2 é a variância do ruído para a matriz de correlação temporal, não necessariamente igual à σ_n^2 da matriz de correlação espacial. Note que os termos cruzados são desconsiderados da multiplicação, devido à suposição que o ruído tem média zero e é decorrelacionado com \mathbf{s} e que as amostras de tempo são independentes.

Em [8] mostra-se que o autovetor \mathbf{u} associado ao maior autovalor de $\hat{\mathbf{r}}$ é proporcional a forma de onda média, estimada como $\hat{\mathbf{s}} = \frac{1}{N_r} \mathbf{D}^H \mathbf{1}$. Pode-se escrever o indicador da presença de um difrator no ponto imageado, dado pelo T-MUSIC como

$$P_t = \frac{\|\hat{\mathbf{s}}\|^2}{\|\hat{\mathbf{s}}\|^2 - |\hat{\mathbf{s}}^H \mathbf{u}|^2}. \quad (12)$$

Analogamente ao S-MUSIC, a versão do MUSIC para a matriz de correlação temporal mede quão alinhados estão os vetores \mathbf{u} e $\hat{\mathbf{s}}$ e se o vetor \mathbf{u} for próximo da estimativa média da forma de onda os valores de P_t serão elevados.

IV. SIMULAÇÕES

Nosso cenário de testes, representado na figura 7, é o imageamento de uma subsuperfície composta de dois difradores. Estes estão separados pelo Δl mínimo, de acordo com a equação (1), a $L = 2000$ m de profundidade. Consideramos a velocidade do meio como $c = 2000$ m/s, um arranjo de geofones com $D = 3200$ m (a separação entre eles é de 10 m), a frequência central da forma de onda $f_0 = 25$ Hz e o comprimento de onda dessa frequência $\lambda_0 = 80$ m. Com essas características, resultamos em uma separação de $\Delta l = 50$ m.

Com esse cenário, realizamos a migração por empilhamento de difrações e aplicamos os métodos S-MUSIC e T-MUSIC para imageamento e localização de difrações. Podemos observar na figura 8 que não houve sucesso em separar os difradores utilizando a migração. Enquanto que, observando as figuras 9 e 10, conseguimos distinguir os dois elementos difradores. Ainda podemos destacar um melhor desempenho do T-MUSIC, provavelmente devido a um melhor condicionamento da matriz estimada de correlação temporal, pois na matriz o número de receptores é maior que o número de amostras.

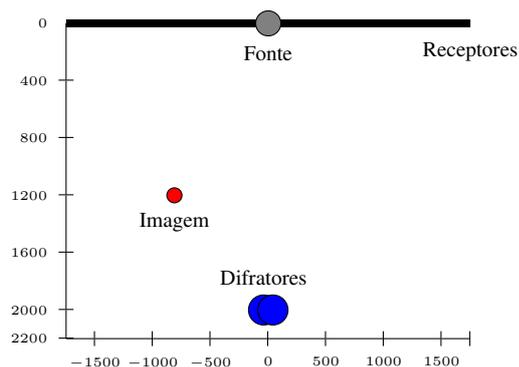


Fig. 7. Cenário da Simulação.

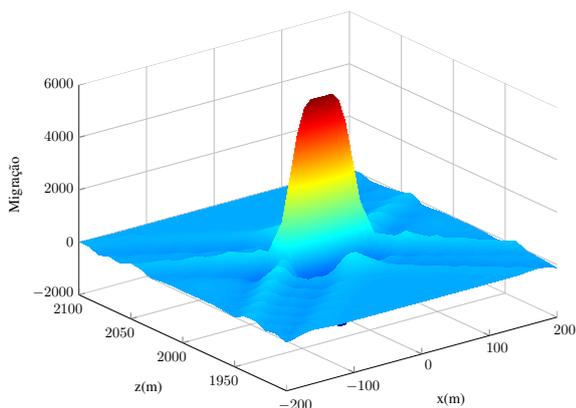


Fig. 8. Resultado da Migração por empilhamento de difrações.

V. CONCLUSÕES

A migração é a técnica corrente para o imageamento de difrações. Entretanto, fatores como o conteúdo frequencial do dado disponível e a geometria da aquisição impõem limites à capacidade de resolução da técnica. Em nossas simulações, dispusemos dois difradores no limite da resolução da migração e não houve sucesso em separá-los. Utilizando a técnica de alta-resolução MUSIC, comumente empregada em processamento de sinais, conseguimos distinguir os dois elementos na imagem migrada. Utilizamos duas variações desta técnica, uma que leva em conta a matriz de autocorrelação espacial, S-MUSIC, e outra com a matriz de autocorrelação temporal, T-MUSIC. Observamos um melhor desempenho do T-MUSIC, com o benefício de que é necessário um menor número de operações para calcular seu espectro, pois o tamanho da matriz temporal é menor do que o da espacial.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] J. M. Reynolds, *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley and Sons, 1998.
- [2] J. M. T. Romano, R. R. Lopes, and M. Tygel, "Processamento digital de sinais geofísicos," in *XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBRT 11*, 2011.

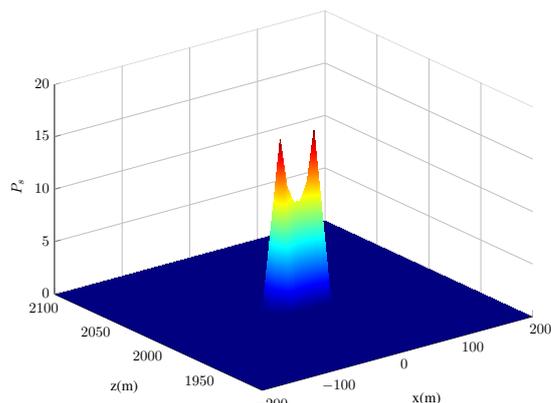


Fig. 9. Resultado do imageamento de difrações utilizando S-MUSIC.

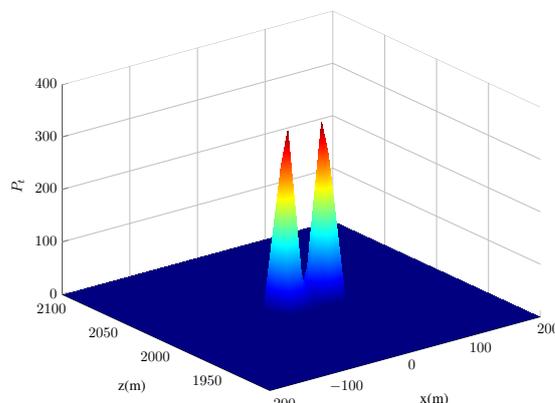


Fig. 10. Resultado do imageamento de difrações utilizando T-MUSIC.

- [3] O. Yilmaz, *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data, Volume 1*, 2nd ed. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2001.
- [4] E. G. Asgedom, L.-J. Gelius, J. Faccipieri, and M. Tygel, "2-d pre-and post-stack diffraction separation and imaging," in *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012*. Society of Exploration Geophysicists, 2012, pp. 1–5.
- [5] J. H. Faccipieri, D. R. Serrano, L.-J. Gelius, and M. Tygel, "Recovering diffractions in crs stacked sections," *First Break*, vol. 31, pp. 65–69, 2013.
- [6] E. Asgedom, L. Gelius, and M. Tygel, "Seismic coherency measures in case of interfering events: A focus on the most promising candidates of higher-resolution algorithms," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 29, no. 3, pp. 47–56, 2012.
- [7] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 34, no. 3, pp. 276–280, 1986.
- [8] T. Barros, R. Lopes, M. Tygel, and J. Romano, "Implementation aspects of eigenstructure-based velocity spectra," in *74th EAGE Conference & Exhibition*, 2012.
- [9] R. E. Sheriff, *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, 3rd ed. Society of Exploration Geophysicists, 2002.
- [10] E. G. Asgedom, L.-J. Gelius, A. Austeng, S. Holm, and M. Tygel, "Time-reversal multiple signal classification in case of noise: A phase-coherent approach," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 130, no. 4, pp. 2024–2034, 2011.
- [11] B. L. Biondi and C. Kostov, "High-resolution velocity spectra using eigenstructure methods," *Geophysics*, vol. 54, no. 7, pp. 832–842, 1989.
- [12] R. L. Kirlin, "The relationship between semblance and eigenstructure velocity estimators," *Geophysics*, vol. 57, no. 8, pp. 1027–1033, 1992.