

Determinação do intervalo temporal entre tiros em aquisições sísmicas OBN

Cristiano Ícaro Rego Nunes, Danilo Pinheiro Furtado, José Borba da Silva Junior, Felipe Andrade Apolonio, Mario Sergio Costa, Claudio de Melo Falcao – Petrobras

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 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

Este trabalho apresenta um fluxo para determinação do intervalo temporal entre tiros (tempo *intershot*) de uma aquisição sísmica do tipo OBN (*Ocean-Bottom Nodes*), visando garantir que não haja sobreposição entre os últimos eventos de interesse de um tiro com as primeiras chegadas do tiro seguinte. São apresentados e discutidos detalhes do algoritmo, bem como os resultados obtidos na parametrização de dois levantamentos na bacia de Santos. A determinação do tempo *intershot* é importante para otimizar as operações de aquisição, visando levantamentos mais eficientes em termos de tempo e custo, bem como para subsidiar a opção por tecnologias que implicam em menores intervalos temporais entre tiros, como a utilização de fonte tripla (*triple-source*).

Introdução

A aquisição de dados sísmicos é uma das etapas fundamentais na cadeia de exploração e produção de hidrocarbonetos. Com a crescente complexidade e profundidade dos ambientes geológicos explorados no Brasil e importantes avanços tecnológicos nas aquisições sísmicas de fundo oceânico, tem sido empregada cada vez mais a tecnologia OBN (*Ocean-Bottom Nodes*) (Bruhn et al 2020; Cruz et al, 2021). Tal tecnologia consiste na deposição de receptores autônomos no fundo do mar, que registram o sinal emitido por fontes sísmicas disparadas próximas à superfície.

Aquisições sísmicas OBN exigem um investimento alto, portanto é importante otimizar a parametrização do levantamento para que o custo seja o menor possível, sem prejudicar os objetivos geológicos do projeto. Nesse sentido, a partir de uma área de interesse geológico previamente definida, os estudos de *survey design* (Vermeer, 2012; Monk, 2020) procuram determinar parâmetros como os polígonos de receptores e de tiros, as direções das linhas de tiro e de receptores, os espaçamentos (*inline* e *crossline*) entre receptores e entre tiros, as distâncias tiro-receptor (*offsets*) que devem ser garantidos no levantamento, entre outros.

Um parâmetro com grande impacto sobre a operação é o intervalo temporal entre tiros, também conhecido como tempo *intershot* ou *pop interval*. Ele é definido pelo intervalo de tempo entre dois tiros consecutivos e depende fundamentalmente do intervalo espacial entre tiros e da velocidade do navio sísmico. O tempo *intershot* deve ser grande o suficiente para que os primeiros

eventos de um tiro sejam registrados após os últimos eventos de interesse do tiro anterior, mas não deve se exceder ao ponto de limitar demais a velocidade de navegação do navio sísmico.

Em uma aquisição típica empregando fonte dupla (*dual-source*) atirando em modo *flip-flop* com intervalo entre tiros de 25 metros e velocidade do navio entre 3,6 e 4,8 nós, o tempo *intershot* fica entre 10,12 e 13,50 segundos. Em geral, esse tempo é suficiente para evitar a interferência entre os últimos eventos de interesse de um tiro e os primeiros eventos do tiro seguinte. No entanto, desenvolvimentos recentes na indústria de aquisição sísmica têm promovido tecnologias que implicam em menores intervalos (espacial e temporal) entre tiros. Uma dessas inovações é a utilização de fonte tripla (*triple-source*) (Langhammer & Bennion, 2015; Rocke & Fontana, 2019). A Figura 1 apresenta um esquema comparativo entre *dual-source* (DS) e *triple-source* (TS), destacando como uma aquisição com fonte tripla permite obter a mesma cobertura que uma aquisição com fonte dupla com apenas dois terços das linhas de navegação, trazendo maior eficiência operacional e potencial redução de custos.

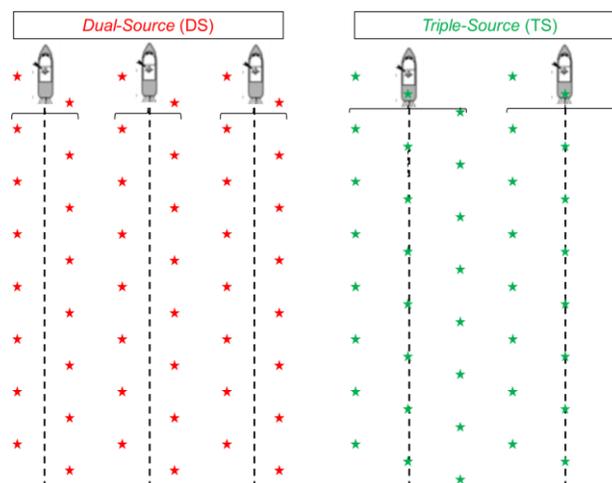


Figura 1 – Comparação esquemática entre a utilização de *dual-source* (DS) e *triple-source* (TS). A fonte tripla permite obter a mesma cobertura que a fonte dupla com apenas dois terços das linhas de navegação (tracejadas).

Em aquisições com fontes triplas, os disparos ocorrem sequencialmente em modo *flip-flop-flap* com um intervalo tipicamente em torno de 16,67 metros. Com a velocidade do navio entre 3,6 e 4,8 nós, o tempo entre disparos fica entre 6,75 e 9 segundos. Nesse caso, é preciso analisar se esse tempo é suficiente para não haver sobreposição entre os últimos eventos de interesse de um tiro e os primeiros eventos do tiro posterior.

A Figura 2 apresenta um sismograma esquemático de uma aquisição OBN contendo a onda direta (OD) e a última reflexão de interesse (tipicamente o campo de ondas descendentes gerado pela reflexão no embasamento) de dois tiros consecutivos (s_1 e s_2) representados em vermelho e azul, respectivamente. O objetivo deste trabalho é apresentar um fluxo para determinação do mínimo intervalo de tempo que deve ser respeitado entre dois tiros consecutivos em uma aquisição OBN para que não haja sobreposição entre o último evento de interesse do tiro s_1 e o primeiro evento do tiro s_2 .

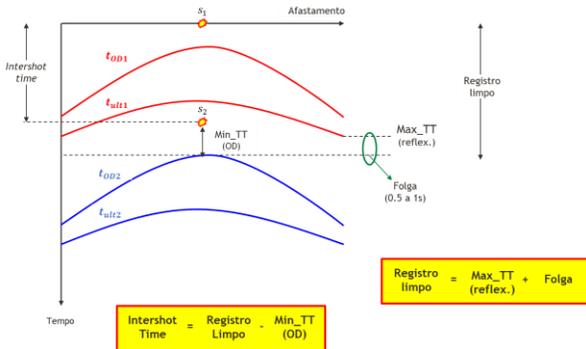


Figura 2 - sismograma esquemático de uma aquisição OBN. Deve-se evitar sobreposição entre o último evento de interesse do tiro s_1 (t_{ult1}) e o primeiro evento do tiro s_2 (t_{OD2}).

Metodologia

O fluxo utiliza como entrada os tempos de trânsito calculados previamente por traçado de raios. É necessário construir um modelo geológico, contendo propriedades e horizontes (no mínimo o Fundo do Mar e o último horizonte de interesse), que seja, ao mesmo tempo, representativo da área em questão e suficientemente suave para o funcionamento eficiente do traçado de raios (Cerveny et al, 1988).

Com esse modelo e a geometria de aquisição, calculam-se, para cada par fonte-receptor do projeto, o tempo de trânsito da onda direta e o tempo de trânsito do último evento de interesse. Em cada par fonte-receptor, o mínimo tempo entre disparos deve ser maior que a diferença entre os dois eventos adicionada de uma folga (tipicamente de 0,5 a 1 segundo), que procura acomodar as aproximações intrínsecas ao método de traçado de raios e as incertezas do modelo geológico construído. Para cada tiro, seleciona-se o maior valor obtido entre todos os receptores ativos, de modo que o resultado será um vetor-coluna onde cada elemento representa o mínimo tempo intershot necessário para que não haja sobreposição entre os eventos desse tiro e os eventos do tiro seguinte. Opcionalmente, podem ser armazenadas ainda informações como o *offset* e o azimute em que o mínimo tempo intershot armazenado ocorre para cada tiro. A Figura 3 esquematiza o fluxo descrito.

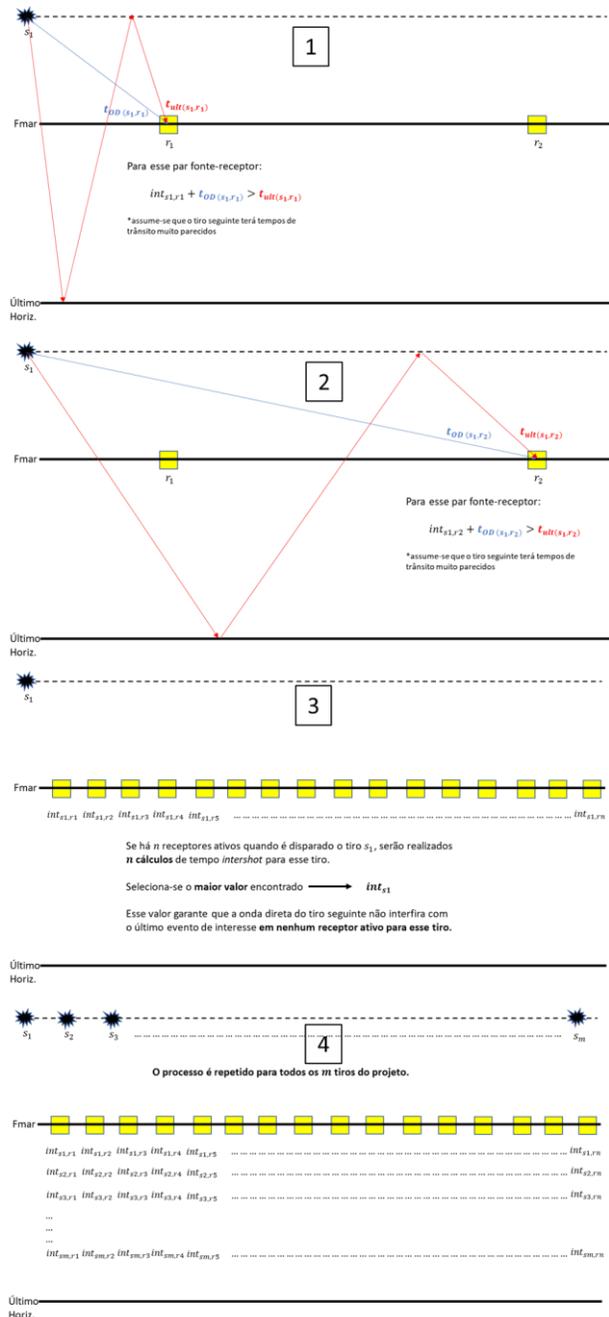


Figura 3 - fluxo para determinação via traçado de raios do mínimo tempo intershot de uma aquisição OBN. O resultado é um vetor-coluna onde cada elemento representa o mínimo tempo intershot calculado para que não haja interferência em nenhum receptor ativo para o respectivo tiro. Adiciona-se ainda uma folga (de 0,5 a 1s) para conferir maior segurança ao resultado.

Dessa maneira, é possível determinar um valor de tempo intershot que atenda a todo o projeto e a máxima velocidade à qual o navio sísmico poderá chegar durante o levantamento. Com as coordenadas dos tiros e os respectivos valores de tempo intershot, é possível ainda visualizar os resultados em mapa, o que permite

identificar eventuais regiões onde a operação deve ser mais rígida no controle do intervalo entre disparos e outras onde os requisitos contratuais, se necessário, podem ser relaxados.

O algoritmo descrito foi inicialmente escrito no ambiente Scilab, mas ganhou um salto de eficiência ao ser reescrito em Python, utilizando o pacote *pandas*. Resultados ainda mais rápidos foram obtidos utilizando o pacote *DataFrames*, em linguagem Julia. Nos resultados que serão apresentados na próxima seção, por exemplo, o algoritmo em Python levou cerca de 2m15s para analisar aproximadamente 23 milhões de eventos em um caso, e 12m40s para analisar cerca de 148 milhões de eventos em outro projeto. Com o algoritmo em Julia, os tempos foram de aproximadamente 37s e 2m20s, respectivamente. Estes tempos foram obtidos em uma *workstation* HP Z8 com 256 GB de memória e processador Intel Xeon Gold 6244 3.6 GHz.

Os resultados obtidos pelo algoritmo são ainda ratificados por sismogramas sintéticos no domínio do receptor gerados com diferentes intervalos temporais entre tiros. A modelagem é feita por diferenças finitas utilizando a aproximação de Born (Yang & Zhang, 2019). São modeladas separadamente as componentes ascendente e descendente do campo de ondas e depois elas são somadas para compor o sismograma sintético. Ao modelar a equação completa da onda para alguns receptores representativos, é possível superar as limitações do traçado de raios, especialmente quanto aos requisitos de suavização das propriedades e horizontes, e verificar a presença de eventos mais complexos.

Resultados

A Figura 4, à esquerda, apresenta o mapa e o histograma do intervalo temporal entre disparos, calculado via traçado de raios pelo algoritmo descrito na seção anterior, para uma aquisição OBN com objetivos pré-sal na bacia de Santos. O máximo valor calculado foi de 7,93 segundos, que já seria suficiente para não haver sobreposição entre a reflexão descendente proveniente do embasamento e a onda direta do tiro seguinte. Supondo que se defina um intervalo de 8 segundos entre disparos para o projeto, isso permitiria ao navio sísmico alcançar uma velocidade de até 4,3 nós, considerando o espaçamento entre tiros definido para o levantamento.

Nota-se ainda que a área mais restritiva para o projeto em termos de tempo *intershot* é a região Sudeste do levantamento. Nas demais áreas, o projeto pode ser executado com tempos *intershot* menores, permitindo alguma flexibilidade operacional de acordo com as condições de campo durante a aquisição.

À direita da Figura 4, são apresentados dois conjuntos de sismogramas sintéticos modelados por diferenças finitas. Na coluna de referência, são apresentados os sismogramas “limpos”, sem interferência dos respectivos tiros posteriores. Na segunda coluna, os sismogramas foram gerados com um intervalo de 8 segundos entre tiros e, na terceira coluna, com um intervalo de 10

segundos. Com 8 segundos entre tiros, observa-se no sismograma de baixo uma pequena sobreposição de alguns eventos profundos com as primeiras chegadas do tiro posterior. Com 10 segundos, essa sobreposição não acontece. Já nos sismogramas da parte de cima, mesmo 8 segundos entre tiros já são suficientes, com folga, para evitar sobreposição.

Após análises de alguns outros conjuntos de sismogramas, verificou-se que a sobreposição com eventos profundos ocorria apenas em uma pequena parte dos tiros, de modo que a aquisição foi parametrizada com fonte tripla e 8 segundos de tempo *intershot*. Caso a opção fosse pelo intervalo de 10 segundos, dificilmente seria viável a utilização de fonte tripla, mas ainda assim essa análise seria valiosa para otimizar a operação com fonte dupla.

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para outro levantamento com objetivo pré-sal na bacia de Santos. Na esquerda, são apresentados o mapa de tempo *intershot* e seu histograma, e, à direita, os sismogramas modelados por diferenças finitas. O maior valor calculado pelo mapa foi de 6,55 segundos. No entanto, o sismograma inferior modelado com 6,5 segundos de intervalo entre tiros mostra alguma sobreposição entre eventos profundos do primeiro tiro, provavelmente não modelados pelo traçado de raios, e os primeiros eventos do tiro seguinte. Com 7,5 segundos, essa sobreposição é eliminada. Por esse motivo, optou-se nesse projeto por uma aquisição com fonte tripla e tempo *intershot* de 7,5 segundos.

Pelo menos três projetos de aquisição OBN no Brasil, suportados por análises como as exemplificadas, foram executados ou estão em execução com fonte tripla. Na prática, os equipamentos utilizados com a configuração de fonte tripla são os mesmos da configuração com fonte dupla, sendo necessários apenas alguns ajustes (Rocke & Fontana, 2018). Isso significa que o número de elementos por fonte e, consequentemente, o volume da fonte tripla é geralmente menor, mas não significa menor razão sinal-ruído (Musser & Dunbar, 1984; Laws et al, 2008).

Os ganhos da fonte tripla têm sido notoriamente comprovados na prática, com a redução no tempo dos projetos em torno de 30%, o que também reduz a exposição a riscos operacionais e a emissão de gases poluentes. Um ponto de atenção observado em campo é a necessidade de um bom sistema de controle de posicionamento das fontes, já que a largura do arranjo de fontes rebocado pelo navio sísmico é maior, o que pode provocar maiores desvios no posicionamento em relação ao pré-plote, além de um tempo maior nas trocas de linhas.

Conclusões

A determinação do intervalo temporal entre tiros de uma aquisição sísmica OBN é importante para aumentar a eficiência operacional ao projeto, bem como subsidiar a opção por tecnologias que implicam em menores tempos

intershot, como a utilização de fontes triplas (*triple-source*). O algoritmo apresentado calcula em poucos minutos o tempo *intershot* necessário para cada tiro previsto no projeto a partir dos tempos de trânsito previamente modelados por traçado de raios. Os resultados obtidos pelo algoritmo são ainda ratificados por sismogramas modelados pela equação completa da onda, que pode identificar eventos não modelados pelo traçado de raios.

Os resultados expostos mostram aplicações práticas do fluxo apresentado e ajudaram a viabilizar a utilização de fontes triplas em levantamentos OBN no pré-sal da bacia de Santos, possibilitando a redução em cerca de 30% no tempo de operação dos projetos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os geofísicos da gerência de Aquisição Geofísica da Petrobras que ajudaram a desenvolver e aplicar o fluxo apresentado neste trabalho.

O primeiro autor registra também seu eterno agradecimento a Isadora Macedo, entusiasta da linguagem Julia, brilhante geofísica e queridíssima amiga.

Referências

Bruhn, C.; Sansonowski, R.; Freire, E. & Johann, P., 2020. The Importance of Geosciences in the Brazilian Pre-Salt Development. In: Second HGS and EAGE Conference on Latin America. European Association of Geoscientists & Engineers.

Cerveny, V., Klimes, L. & Psencik, I., 1988. Applications of dynamic ray tracing. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 51: 25-35.

Cruz, N.M.; Cruz, J.M; Teixeira, L.M.; Costa, M.M.; Oliveira, L.B.; Urasaki, E.N.; Bispo, T.P.; Jardim, M.S.; Grochau, M.H. & Maul, A., 2021. Tupi Nodes pilot: A successful 4D seismic case for Brazilian presalt reservoirs. *The Leading Edge*, 40: 886–896.

Langhammer, J. & Bennion, P., 2015. Triple-Source Simultaneous Shooting (TS3), A Future for Higher Density Seismic? In: 77th EAGE Conference & Exhibition. European Association of Geoscientists & Engineers, Madrid, Spain.

Laws, R.M.; Kragh, E., Morgan, G., 2008. Are seismic sources too loud? In: 70th EAGE Conference & Exhibition. European Association of Geoscientists & Engineers, Rome, Italy.

Monk, D.J., 2020. Survey design and seismic acquisition for land, marine, and in-between in light of new technology and techniques. 1st ed., Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA.

Musser, J.A.; Dubar, J.A., 1984. A quantitative study of source-related noise. In: SEG Technical Program Expanded Abstracts: pp. 262-264.

Rocke, M. & Fontana, P., 2019. A multi-source towed streamer test in the Pre-Salt. In: Sixteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, Brasil.

Vermeer, G.J.O., 2012. 3D seismic survey design. 2nd ed., Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA.

Yang, K. & Zhang, J., 2019. Comparison between Born and Kirchhoff operators for least-squares reverse time migration and the constraint of the propagation of the background wavefield. *Geophysics*, 84: 725-739.

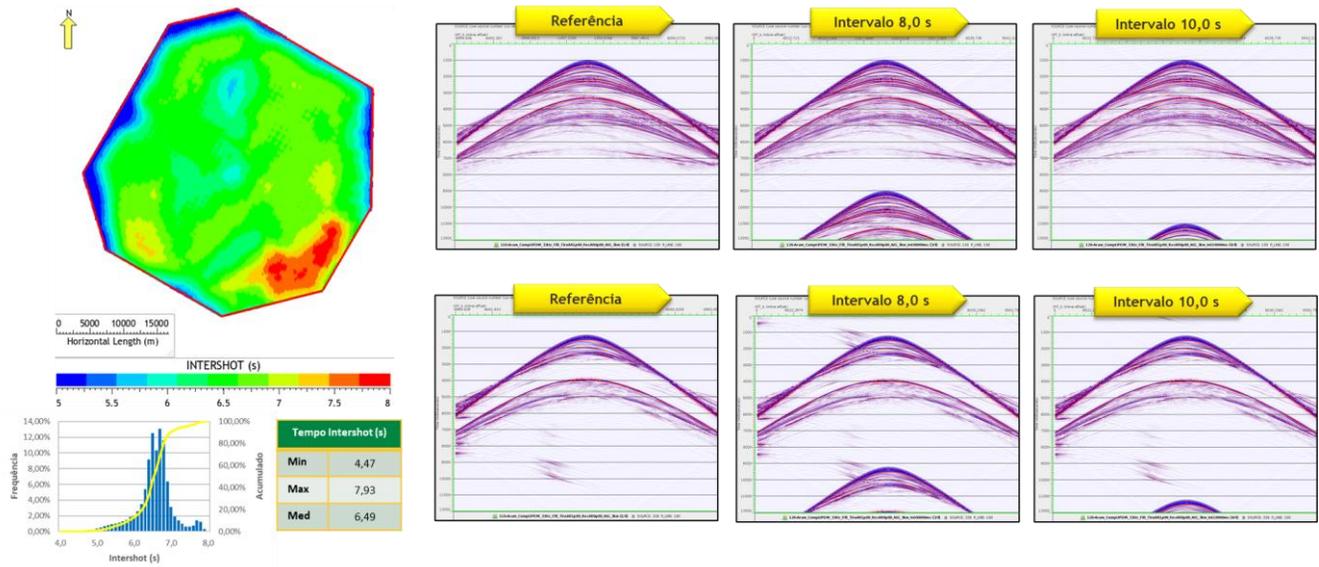


Figura 4 - à esquerda, mapa e histograma de tempo intershot calculado via traçado de raios para uma aquisição OBN com objetivos pré-sal na bacia de Santos. À direita, dois conjuntos de sismogramas sintéticos no domínio do receptor com diferentes intervalos entre tiros. Os sismogramas foram modelados via diferenças finitas com aproximação Born. Com base nos resultados, optou-se por uma aquisição com fonte tripla e intervalo entre disparos de 8 segundos.

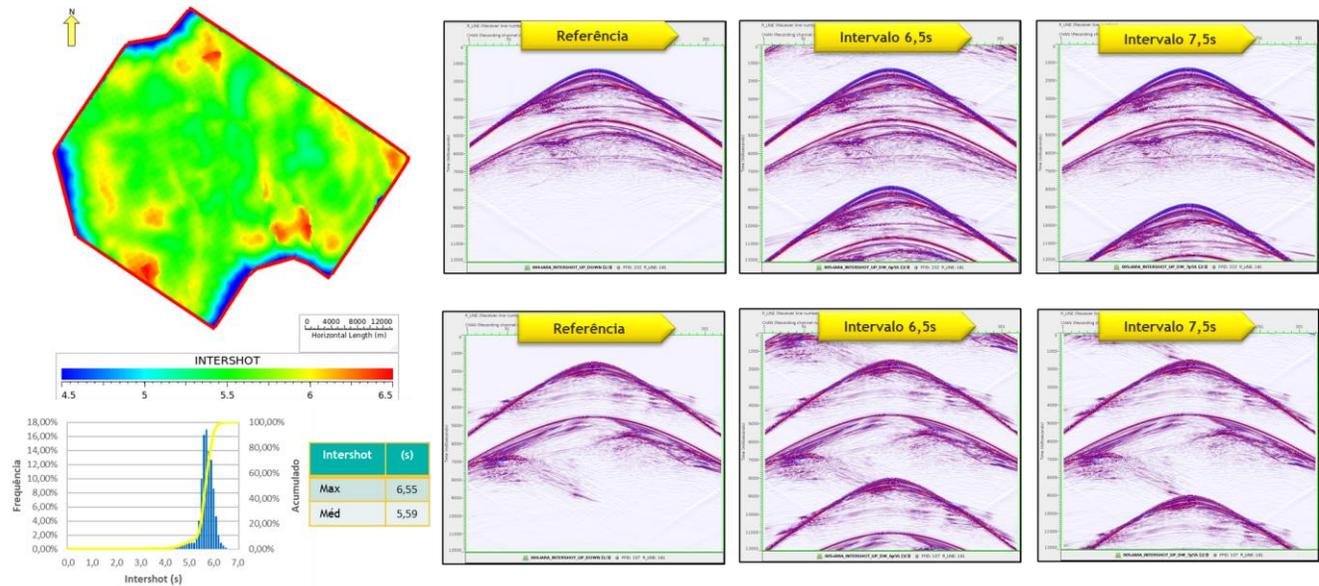


Figura 5 - à esquerda, mapa e histograma de tempo intershot calculado via traçado de raios para outra aquisição OBN no pré-sal da bacia de Santos. À direita, dois conjuntos de sismogramas sintéticos no domínio do receptor com diferentes intervalos entre tiros. Com base nos resultados, decidiu-se estabelecer o intervalo temporal entre disparos em 7,5 segundos.