



**Universidade  
Federal  
Fluminense**

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA  
GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

HENRIQUE CAVALCANTI PEQUENO

## **Aspectos teóricos e práticos da Migração Kirchhoff**

MONOGRAFIA

Rio de Janeiro  
30 de Dezembro de 2022

HENRIQUE CAVALCANTI PEQUENO

## **Aspectos teóricos e práticos da Migração Kirchhoff**

Monografia apresentada ao curso de graduação em Geofísica, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de bacharel em Geofísica.

Orientador: Rogerio de Araujo Santos

Coorientador: Caio de Souza Barros; Victor Alberoni Araujo de Oliveira

Rio de Janeiro  
30 de Dezembro de 2022

Este trabalho é dedicado aos meus familiares, por estarem ao meu lado sempre que precisei.

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus orientadores, por todo o suporte dado ao longo do desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Victor Oliveira, por agregar muito com o conhecimento da indústria, transmitido com muito profissionalismo e didática ímpar, de forma a tornar esse trabalho possível.

Especialmente ao Caio Barros, pela paciência na correção de toda a monografia, por agregar em muito com o conhecimento compartilhado.

|Não menos importante, ao professor Rogerio Santos, por fazer essa conexão com Caio, tornando possível esse projeto que tanto almejei. Também pela sua paciência, conselhos e ensinamentos, que foram essenciais para o desenvolvimento do TCC.

Enfim, a todos, que de alguma forma tornaram este caminho mais viável de ser percorrido.



*Ex malo bonum.*

## Resumo

A indústria do petróleo apresenta uma ampla gama de algoritmos de migração de dados sísmicos marinhos. Uma razão para essa grande variedade, é a constante busca por um meio de migrar a sísmica da melhor forma possível, uma vez que nenhum desses algoritmos atende totalmente aos critérios importantes de se lidar com todas as quedas e variações de velocidade sem deixar de ser econômico. A migração baseada na solução integral de Kirchhoff, ou simplesmente migração de Kirchhoff, pode lidar com mergulhos de até 90 graus. Ainda assim, o fato é que dados advindos desses tipos de algoritmos ainda são predominantes na indústria, sendo usados nos principais fluxos de processamento de sísmica marinha multicanal, ao ponto de serem indispensáveis em diversas fases desses fluxos de processamento. Por meio dos dados gerados, é possível fazer avaliações de forma comparativa, com custo computacional e tempo relativamente baixos.

O presente trabalho se propõe a fazer uma revisão bibliográfica de alguns dos principais artigos publicados sobre o assunto nas últimas duas décadas. Apesar de suas limitações de imageamento, as vantagens e aplicações que esse tipo de dado oferece são inúmeras e serão discutidas por meio da presente revisão bibliográfica baseada em referências advindas de diversas fontes, passando por algumas das clássicas às mais recentes e relevantes. Posteriormente, algumas questões de parametrização serão explanadas e discutidas a fim de um melhor entendimento desse tipo de migração e sobre como usá-lo da melhor forma possível.

**Palavras-chave:** Migração. Kirchhoff. Difração. Processamento Sísmico. Imageamento Sísmico.

## **Abstract**

The oil industry features a wide range of marine seismic data migration algorithms. One reason for such wide variety is the constant search for a way to migrate the seismic in the best possible way since none of these algorithms fully meets the important criteria of dealing with all velocity variations while still being economical. Migration based on Kirchhoff's integral solution for the scalar wave equation, or simply Kirchhoff migration, can resolve dips of up to 90 degrees. Fact is that data from this type of algorithms is still dominant in the industry, being used in the main marine seismic processing flows, to the point of being indispensable in several steps of these processing workflows. Through the generated data, it is possible to make evaluations comparatively, with relatively low computational cost and time.

This thesis proposes to carry out a bibliographic review of some of the main articles published on the subject in the last two decades. Despite its imaging limitations, the advantages and applications that this type of data offers are numerous and will be discussed through this bibliographic review based on references from different sources, ranging from some of the classics to the most recent and relevant. Later, some parameterization issues will be explained and discussed to better understand this type of migration and how to use it in the best possible way.

**Keywords:** Migration. Kirchhoff. Diffraction. Seismic Processing. Seismic Imaging.

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Os dados sísmicos sob uma ótica mais geral, desde a aquisição até a interpretação. . . . .	17
Figura 2 – Hipérboles de difração indicadas pelas setas azuis. . . . .	20
Figura 3 – Desenho esquemático sobre como a difração ocorre em bordas de falhas geológicas. . . . .	21
Figura 4 – Desenho esquemático de uma frente de ondas gerada na camada superior se expandindo pelo meio subjacente. . . . .	22
Figura 5 – Perfilagem <i>CMP</i> ( <i>common mid-point</i> ). (a) um arranjo de raios de diversos tiros em um mesmo ponto-médio ( <i>CMP</i> ) e profundidade ( <i>CDP</i> ou <i>common depth point</i> ). (b) os quatro pontos de reflexão não se encontram no mesmo domínio <i>CDP</i> quando se trata de um refletor inclinado. . . . .	23
Figura 6 – Dois <i>gathers</i> consecutivos, (A) antes, e (B) depois da correção NMO. No gráfico (C), a velocidade RMS (azul) é usada para a correção NMO, assim como a função da velocidade intervalar (vermelho), calculada a partir da fórmula de Dix . . . . .	24
Figura 7 – O <i>shot gather</i> (a) pode ser corrigido corretamente (b), ou equivocadamente com velocidade superestimada (c) ou subestimada (d). . . . .	25
Figura 8 – Exemplo de um <i>shot gather</i> (A) e seus eventos (B), representados de forma esquemática (acima). . . . .	27
Figura 9 – Shot gather (esquerda) com painel FK correspondente. A representação esquemática (direita) mostra os principais eventos do shot gather em cores distintas. O evento verde possui diversos mergulhos, daí a forma de leque no domínio FK. . . . .	28
Figura 10 – Shot gathers (esquerda) e seus respectivos gráficos no domínio FK. O espaçamento de 12.5 m (a) não apresenta falseamento, de acordo com o esquema. Contudo, o espaçamento de 25m (b) resulta em falseamento no quadrante negativo ( $K < 0$ ). . . . .	29
Figura 11 – A Zona de Fresnel é a parte do refletor onde a energia emitida por uma determinada fonte compreende metade do comprimento da onda refletida	30
Figura 12 – Sorriso de migração, resultante da ausência de traços no dado sintético, usado como entrada para a migração Kirchhoff. Em outras palavras, dados irregulares podem gerar artefatos como o referido. . . . .	36

Figura 13 – Representação esquemática do colapso de uma hipérbole de difração na migração de Kirchhoff. (A) Uma hipérbole de difração em uma seção de <i>offset</i> zero e velocidade constante. O ápice e os flancos da hipérbole são indicados por A e B, respectivamente. (B) Resultado da migração de (A). (C) Amplitudes ao longo dos flancos B são movidas para o ponto de ápice A após a migração. . . . .	37
Figura 14 – Ondas propagadas no plano x-z a partir da fonte secundária de Huygens e gravadas no plano x-t. . . . .	38
Figura 15 – Superposição (b) de fontes secundárias (discretas) de Huygen (a). . . .	39
Figura 16 – Superposição (b) de fontes secundárias (contínuas) de Huygen (a). . . .	39
Figura 17 – Resposta à migração (b) do impulso ou traço sísmico (a). . . . .	40
Figura 18 – O efeito da restrição do <i>dip</i> máximo no dado de saída pós-migração de Kirchhoff no domínio do tempo em um dado empilhado. . . . .	42
Figura 19 – (A) A abertura da migração é o número máximo de traços ou a distância lateral máxima envolvida no cálculo da migração. (B) A curvatura da hipérbole é controlada pela velocidade do meio. Em um campo de velocidade que aumenta com a profundidade, teremos aberturas menores para hipérboles com velocidades mais baixas em profundidades rasas. . . .	43
Figura 20 – A migração de Kirchhoff é eficaz em uma área cônica dos dados de entrada (zona sombreada) porque as hipérboles de difração, ao longo das quais a soma é realizada, se alargam para as partes mais profundas da seção devido à velocidade verticalmente crescente. . . . .	44
Figura 21 – Testes para largura de abertura na migração de Kirchhoff: (a) uma seção de deslocamento zero que contém eventos inclinados com velocidade de 3500 m/s, (b) migração desejada usando o método de mudança de fase; Migração de Kirchhoff usando (c) 35 traços, (d) 70 traços, (e) largura de meia abertura de 150 traços e (f) largura de meia abertura de 256 traços. . . .	45
Figura 22 – O efeito da abertura em um dado resultante de uma migração de Kirchhoff pós- <i>stack</i> no domínio do tempo. Aberturas desnecessariamente pequenas causam perda de eventos de mergulho acentuado, como os flancos da estrutura diapírica no centro. . . . .	47
Figura 23 – Em um dado de entrada da Bacia de Santos, temos a linha sísmica na qual será performado o teste de regularização. . . . .	49
Figura 24 – Dado de saída, resultante da remoção de um traço do dado de entrada, localizado na região indicada pela seta vermelha. . . . .	50
Figura 25 – A migração do traço retirado do dado de entrada resulta em um sorriso de migração. . . . .	51

Figura 26 – Espaçamento entre os traços de entrada para migração: 12.5mx12.5m. O gráfico (direita) no domínio FK - Frequência vs. Número de Onda - representa dados do polígono (amarelo) na linha sísmica (esquerda). Nota-se que a classe em vermelho - que mergulha do lado direito ( $F>0$ ) até as frequências e K iguais a zero - corresponde aos refletores de maior dip na região da parede do sal. . . . .	53
Figura 27 – Espaçamento entre os traços de entrada para migração: 25mx25m. O gráfico (direita) no domínio FK - Frequência vs. Número de Onda - representa dados do polígono (amarelo) na linha sísmica (esquerda). Nota-se que a classe em vermelho - que mergulha do lado direito ( $F>0$ ) até as frequências e K iguais a zero - corresponde aos refletores de maior dip na região da parede do sal. . . . .	54
Figura 28 – Espaçamento entre os traços de entrada para migração: 50mx50m. O gráfico (direita) no domínio FK - Frequência vs. Número de Onda - representa dados do polígono (amarelo) na linha sísmica (esquerda). Nota-se que a classe em vermelho - que mergulha do lado direito ( $F>0$ ) até as frequências e K iguais a zero - corresponde aos refletores de maior dip na região da parede do sal. . . . .	55
Figura 29 – Espectro de frequências de uma parte do polígono vermelho (7.1) referente aos dados de amostragem 50x50m (vermelho), 25x25m (azul) e 12.5x12.5m (verde) dos quais o último apresenta maior conteúdo de frequências altas (60Hz -100Hz). . . . .	56
Figura 30 – Plano de <i>offset</i> regularizado cuja migração foi feita com amostragem vertical a cada 3ms. . . . .	58
Figura 31 – Plano de <i>offset</i> regularizado cuja migração foi feita com amostragem vertical a cada 4ms. . . . .	59
Figura 32 – Espectros de frequência dos planos de offset com amostragens verticais de 3ms (azul) e 4ms (verde) mostram que o conteúdo de frequências cai significativamente nas frequências mais altas para o plano com taxa de amostragem mais baixa. . . . .	61
Figura 33 – Resposta a um impulso sísmico migrado sem restrição de mergulho. . .	63
Figura 34 – Resposta a um impulso sísmico migrado com restrição de mergulho equivalente a 50°. . . . .	64
Figura 35 – Resposta a um impulso sísmico migrado com restrição de mergulho equivalente a 60°. . . . .	65
Figura 36 – Resposta a um impulso sísmico migrado com restrição de mergulho equivalente a 70°. . . . .	66
Figura 37 – Resposta a um impulso sísmico migrado com restrição de mergulho equivalente a 80°. . . . .	67

Figura 38 – Plano de <i>offset</i> do qual um traço foi usado para análise das respostas aos impulsos sísmicos migrados com ou sem as restrições acima descritas.	69
Figura 39 – A mesma <i>inline</i> usada como dado de entrada anteriormente, agora refletindo o resultado da migração de Kirchhoff com limite de restrição equivalente a 50°.	71
Figura 40 – A mesma <i>inline</i> usada como dado de entrada anteriormente, agora refletindo o resultado da migração de Kirchhoff com limite de restrição equivalente a 60°.	72
Figura 41 – A mesma <i>inline</i> usada como o dado de entrada anteriormente, agora refletindo o resultado da migração de Kirchhoff com limite de restrição equivalente a 70°.	73
Figura 42 – A mesma <i>inline</i> usada como o dado de entrada anteriormente, agora refletindo o resultado da migração de Kirchhoff com limite de restrição equivalente a 80°.	75
Figura 43 – Atributo <i>Semblance</i> à imagem parcial de zero graus (a) e 15°(b).	77
Figura 44 – Imagem inicial e <i>gather</i> no domínio de ângulo de <i>dip</i> correspondente à distância de 6,1 km.	78
Figura 45 – Após a migração Kirchhoff com limitação da abertura: imagem e <i>gather</i> no domínio de ângulo de <i>dip</i> .	79
Figura 46 – Após a migração Kirchhoff com otimização na limitação da abertura: imagem e <i>gather</i> no domínio de ângulo de <i>dip</i> .	80
Figura 47 – Esquema da arquitetura do algoritmo de <i>deep learning</i> , com as 3 camadas: entrada, transição e saída. As setas azuis de dois lados indicam o compartilhamento dos parâmetros para as três camadas mais profundas. Os blocos verdes depois de alguns decodificadores significam camadas com convolução 2D e função de ativação sigmóide, adicionadas antes do <i>output</i> da rede neural.	83
Figura 48 – Horizontes interpretados manualmente. Externamente, temos o polígono do horizonte do <i>TOS</i> proveniente do dado <i>legacy</i> .	85
Figura 49 – (A) imagem sísmica com predição de máscara de sal (vermelho) pela rede mais simples, usada a fim de comparação; (B) imagem sísmica com previsão de máscara de sal (vermelho) e <i>TOS</i> (azul) por nova abordagem; (C) imagem sísmica com previsão de máscara de sal (vermelho) e <i>TOS</i> (azul) pela nova abordagem com re-treinamento em horizontes do <i>legacy</i> selecionados automaticamente; (D) imagem sísmica do sal com previsão de máscara de sal (vermelho), <i>TOS</i> (azul) e <i>BOS</i> (verde) por nova abordagem. (Dados sísmicos sob licença e cortesia de CGG e PGS.)	86
Figura 50 – Uma revisão do <i>workflow</i> de análise de dados sísmicos implementado para a análise do reservatório e contenção para <i>CCS</i> .	88

Figura 51 – Seção sísmica com os horizontes sísmicos interpretados (topo). E uma visão em mapa do atributo de incoerência para mapeamento de descontinuidades no selo (abaixo). . . . .	90
Figura 52 – Esquema com interpretações sísmicas (esquerda) de decomposição espectral (acima) e espessura do reservatório (abaixo). Ao centro, temos uma estimativa dos atributos elásticos de impedância relativa (acima) e razão $V_p/V_s$ (abaixo). Por fim, os dados anteriormente citados foram usados como entrada para porosidade total do reservatório. . . . .	91
Figura 53 – Desenho esquemático com a trajetória e tempos $t_s$ e $t_g$ de um raio sísmico, da fonte (s) ao receptor (g), passando pelo ponto de imagem ( $\xi$ ). . . . .	93
Figura 54 – Fluxo de trabalho de migração <i>KDMIG</i> ( <i>Kirchhoff Depth Migration</i> ). . . . .	94
Figura 55 – (a) Modelo de Velocidade 3D SEAM Arid. (b) migração Kirchhoff em profundidade usando o <i>AKMIG</i> . . . . .	97
Figura 56 – Métricas de eficiência do <i>AKMIG</i> . . . . .	98



## Lista de tabelas

Tabela 1 – Alguns dos principais algoritmos de migração usados no processamento de dados sísmicos marinhos, diferenciados na tabela por seus prós e contras, além de outras características importantes. . . . .	32
Tabela 2 – Essa tabela é uma revisão das diferentes estratégias de migração aplicadas a diversos tipos de dados (2D, 3D, poststack, prestack, etc) . . . . .	33
Tabela 3 – Há diversos tipos de migração, cada qual com seus prós e contras. Muitos serão usados de acordo com a necessidade. Nessa tabela temos algoritmos de migração para dados sísmicos marinhos multicanal e suas respectivas finalidades. . . . .	34
Tabela 4 – Essa tabela mostra que os <i>cross-spread gathers</i> podem alcançar o melhor desempenho entre os tipos de <i>gathers</i> . . . . .	95

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Estrutura</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Migração</b>	<b>16</b>
2.0.1	Fluxo Básico de Processamento	16
2.0.2	Propagação de Ondas Acústicas em Formações Rochosas	19
2.0.3	Correção <i>NMO</i> e Empilhamento	22
2.0.4	Filtro F-K	26
<b>2.1</b>	<b>Tipos de Migração Sísmica</b>	<b>29</b>
2.1.1	Migração de Kirchhoff	35
2.1.1.1	Resposta Impulsiva	40
2.1.1.2	A Importância do <i>Dip</i> (mergulho)	41
2.1.1.3	Abertura	42
<b>3</b>	<b>Testes</b>	<b>48</b>
<b>3.1</b>	<b>Porque um Dado Precisa Ser Regularizado</b>	<b>48</b>
<b>3.2</b>	<b>Espaçamento dos Dados de Entrada</b>	<b>52</b>
<b>3.3</b>	<b>Amostragem Vertical</b>	<b>57</b>
<b>3.4</b>	<b>Resposta Impulsiva</b>	<b>62</b>
3.4.1	Restringindo o <i>Dip</i> Máximo	70
<b>4</b>	<b>O que se Publicou Recentemente</b>	<b>76</b>
<b>4.1</b>	<b>Abertura Otimizada em Dados Kirchhoff</b>	<b>76</b>
4.1.1	Analisando a Consistência dos Mergulhos	77
4.1.2	Exemplos de Dados Sintéticos	78
4.1.3	Conclusões	80
<b>4.2</b>	<b>Dados Kirchhoff para ML de Interpretação de Corpos de Sal</b>	<b>80</b>
4.2.1	Introdução	81
4.2.2	Arquitetura da Rede Neural	82
4.2.2.1	Codificador	82
4.2.2.2	Módulo de Transição	83
4.2.2.3	Vantagens da Rede Proposta	84
4.2.3	Aplicações em Dados de Campo Brasileiros	84
<b>4.3</b>	<b>CCUS (Captura, Armazenamento e Utilização de Carbono)</b>	<b>86</b>
4.3.1	Dados Kirchhoff para Caracterização de Locais de <i>CCUS</i>	86
4.3.1.1	Introdução	87
4.3.1.2	Fluxograma Integrado	88

4.3.1.3	Base de Dados e Avaliação . . . . .	89
<b>4.4</b>	<b>Performance Computacional . . . . .</b>	<b>91</b>
4.4.1	Migração de Kirchhoff em Profundidade Acelerada em Sistemas Computacionais Heterogêneos <i>CPU-GPU</i> . . . . .	91
4.4.1.1	<i>KDMIG</i> . . . . .	92
4.4.1.2	<i>KDMIG</i> Acelerada . . . . .	94
4.4.1.3	Exemplos . . . . .	96
<b>5</b>	<b>Discussão e Considerações Finais . . . . .</b>	<b>99</b>
<b>5.1</b>	<b>Discussão Sobre os Testes . . . . .</b>	<b>99</b>
<b>5.2</b>	<b>Revisão Bibliográfica . . . . .</b>	<b>100</b>
5.2.1	Abertura Otimizada em Dados Kirchhoff . . . . .	100
5.2.2	Dados Kirchhoff para <i>ML</i> de Interpretação de Corpos de Sal . . . . .	100
5.2.3	Dados Kirchhoff para Caracterização de Locais de <i>CCUS</i> . . . . .	100
5.2.4	Migração Kirchhoff Acelerada em Sistemas Computacionais Heterogêneos <i>CPU-GPU</i> . . . . .	101
<b>6</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>102</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>104</b>

## 1 Introdução

Algumas décadas atrás, no Golfo do México dos anos 80, a migração *prestack* era boa o suficiente para a exploração de plataformas de águas rasas. Depois fomos mais fundo, trabalhando com os flancos de sal, e o algoritmo padrão usado para imageamento sísmico foi a equação de Kirchhoff. Indo ainda mais além, abaixo do sal, onde Kirchhoff tinha limitações, foi desenvolvida a migração da equação das ondas, ou *WEM (Wave Equation Migration)*. Agora, por causa das particularidades geológicas nos atuais *plays* exploratórios, foi desenvolvida a migração no tempo reverso, ou *RTM (Reverse Time Migration)*, que foi possível graças ao poder de computação em uma ordem de magnitude maior do que o disponível quando se usava a migração das ondas (DURHAM, march/2010).

Contudo, a migração de Kirchhoff ainda é um dos algoritmos mais comuns usados na indústria de processamento sísmico. São baseados na solução integral da equação da onda escalar e podem lidar com variações de velocidade horizontal e vertical. E pode ser implementada em dados 2D e 3D para estágios de processamento pré-empilhamento e pós-empilhamento, seja no domínio do tempo ou da profundidade. A maioria dos aplicativos de migração *prestack* em profundidade usa a migração de Kirchhoff (DONDURUR, 2018). Dito isso, o presente trabalho busca demonstrar por meio das mais relevantes fontes recentemente publicadas, a tamanha importância desses algoritmos e aplicações na indústria do petróleo para o processamento de dados marinhos sísmicos.

### 1.1 Estrutura

Primeiramente, o trabalho passa pela fundamentação teórica por trás do conceito de migração sísmica, com base em referências que vão das clássicas às mais recentes e relevantes dentro do contexto de processamento sísmico multicanal. Em seguida, serão revisados alguns dos trabalhos mais relevantes sobre o assunto, publicados nas últimas duas décadas, a fim de demonstrar importantes tendências, aplicações e como se dá a relevância desses algoritmos na indústria do petróleo até os dias atuais para o processamento de dados sísmicos marinhos.

## 2 Migração

Para se chegar à etapa de migração ou imageamento sísmico, o dado sísmico passa por uma série de processos de condicionamento e controle de qualidade prévios e algumas vezes concomitantes. Os mesmos serão descritos de acordo com sua devida importância para a migração, desde o pré-processamento até a fase de remoção de múltiplas. Contudo, alguns conceitos básicos precisam ser explicados inicialmente.

### 2.0.1 Fluxo Básico de Processamento

Em geral, os principais objetivos do processamento de dados sísmicos são melhorar a resolução sísmica e aumentar a razão sinal-ruído (*SNR* ou *signal-to-noise ratio*) dos dados. Esses objetivos são alcançados por meio de três etapas principais. Em sua ordem usual de aplicação, são eles (YILMAZ, 2008 apud MOUSA, 2019).

1. Deconvolução, que aumenta a resolução vertical dos dados sísmicos.
2. Empilhamento, que aumenta o *SNR* dos dados sísmicos.
3. Migração, que aumenta a resolução horizontal dos dados sísmicos.

Além desses estágios primários, processos secundários podem ser implementados em certos estágios para condicionar os dados e melhorar o desempenho desses três processos (figura 1). As etapas são listadas a seguir:

1. A análise dos dados sísmicos adquiridos é essencial para um processador de dados sísmicos antes de avançar. Este processo visa analisar cuidadosamente os parâmetros de aquisição, a geometria utilizada, o tipo de fontes e receptores, e o estado dos dados. A primeira etapa envolvida é examinar o cabeçalho do dado sísmico - adquirido na campanha de aquisição sísmica - e extrair informações úteis sobre os dados. Como, por exemplo:

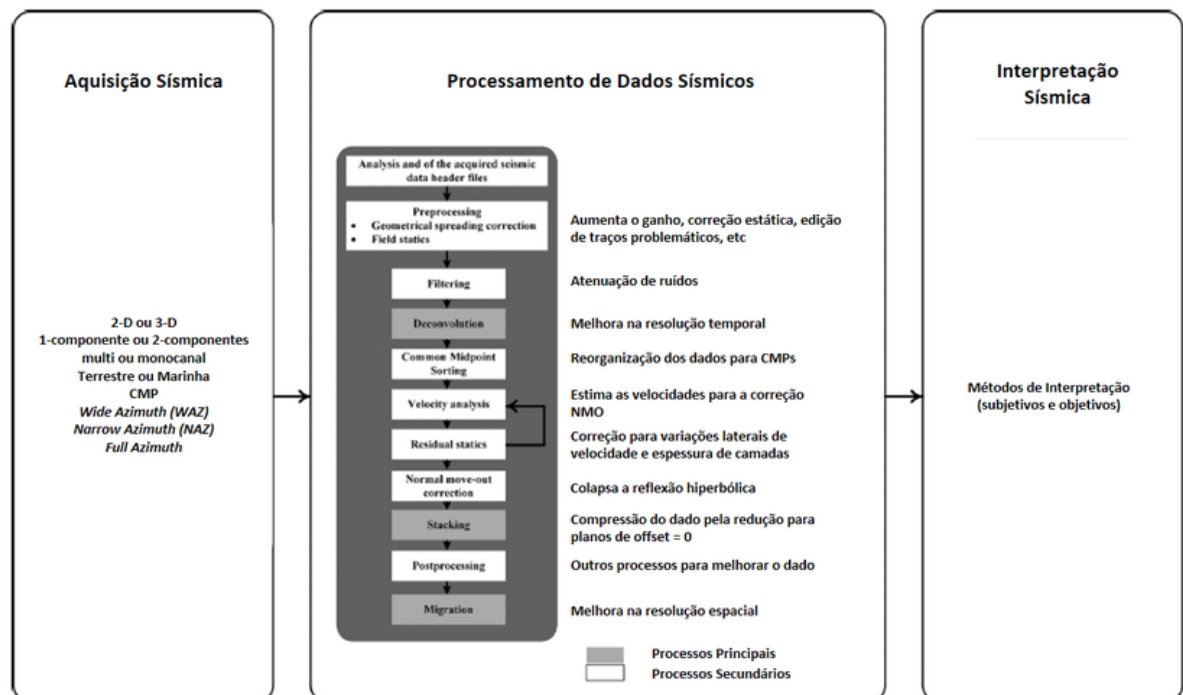
- Número de tiros
- Tipo de fonte
- Número de canais por disparo
- Tipo de receptor
- Número de traços na linha
- Intervalo do receptor.
- Intervalo de amostragem em tempo
- Número de amostras por traço
- Formato de dados (geralmente SEG-Y)
- Nome do arquivo de dados
- Quais filtros foram previamente aplicados.

Estas (acima) são algumas das variáveis geométricas obtidas do cabeçalho sísmico. Os levantamentos de reflexão sísmica de superfície são comumente adquiridos usando o

método de ponto médio comum (*CMP* ou *Common Mid Point*), onde os dados são adquiridos na configuração de famílias ou *gather*s de tiros (MOUSA, 2019).

2. O pré-processamento é uma etapa que envolve uma série de etapas para condicionar os dados sísmicos e prepará-los para posterior aprimoramento e processamento. Inclui demultiplexação, reformatação, edição de traços, aplicação de ganho, etc. Dependendo dos dados, algumas etapas de pré-processamento são realizadas ou não.

3. A filtragem normalmente é usada para atenuar os componentes de frequência/número de onda dos dados sísmicos com base em alguma propriedade mensurável. Esse é um passo importante para prosseguir com as demais etapas de processamento. Por exemplo, o uso de filtro passa banda de cada traço sísmico, em um *gather* de tiros, pode servir para atenuar componentes de baixa frequência, como ruído de onda de superfície, ou atenuar a energia indesejada de componentes de alta frequência.



**Figura 1 – Os dados sísmicos sob uma ótica mais geral, desde a aquisição até a interpretação.**

Modificado de Mousa, 2019

4. Em seguida vem a deconvolução sísmica. Ela é realizada ao longo do eixo do tempo para aumentar sua resolução vertical comprimindo a *wavelet* da fonte para aproximadamente uma função de amostra unitária, atenuando ruído e energia coerente indesejada, como sinais de múltiplos caminhos. Existem diversos tipos de deconvolução.

5. A classificação *CMP* ocorre através da transformação dos dados da configuração de famílias de tiro para a organização em *gather*s de *CMP*s, usando as informações de geometria de campo.

6. Para empilhar os dados sísmicos, uma família de *CMPs* deve ter alinhamento horizontal para cada evento de reflexão. Para fazer isso, a análise de velocidade é realizada em conjuntos *CMP* selecionados para estimar as velocidades

- de empilhamento
- raiz média quadrática (*RMS* ou *Root Mean Square*)
- *NMO* (*Normal Moveout*)

Para cada refletor. As velocidades são interpoladas entre os *CMPs* analisados. Eles são então usados para realizar a correção *NMO*.

7. As velocidades de empilhamento são então usadas para horizontalizar as reflexões e deixá-las prontas para o empilhamento. Isso é conhecido como correção *NMO*. O *NMO* também vem com o silenciamento (ou *mute*), onde basicamente são zeradas as partes dos traços corrigidos por *NMO* que sofreram muito *stretch* devido à correção de *NMO*.

8. Os traços corrigidos e silenciados por *NMO* em cada *gather* de *CMPs* são somados (empilhados) por *offset* para produzir um único traço. Esse processo é conhecido como empilhamento. O empilhamento de *M* traços em um *CMP* aumenta a relação sinal-ruído (*SNR*) desse *CMP* em *M* (YILMAZ, 2008 apud MOUSA, 2019). De fato, o empilhamento produzirá a primeira aproximação da imagem geológica da subsuperfície.

9. O processamento pós-empilhamento ou *poststack* inclui filtragem passa-banda variante no tempo, filtragem por *dip* e outros processos para aprimorar a seção empilhada, quando necessário.

10. A migração (ou imageamento) é um passo importante para melhorar a resolução horizontal da seção sísmica empilhada ou pré-empilhada. Na migração, as reflexões inclinadas são movidas para suas verdadeiras posições de subsuperfície e as difrações são resolvidas ao migrar a seção. Pode-se escolher entre os vários tipos de migração sísmica:

- tempo
- profundidade
- pós-empilhamento
- pré-empilhamento

a depender da complexidade da geologia do subsolo (CLAERBOUT, 1985 apud MOUSA, 2019).

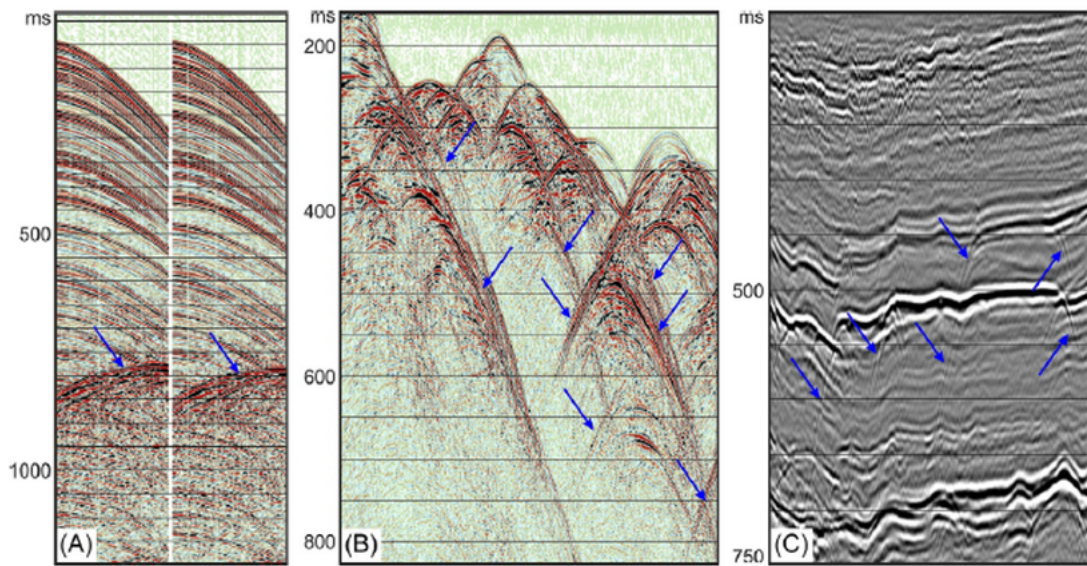
É importante ressaltar que uma boa prática a ser aplicada antes da migração sísmica, é a regularização dos dados, a depender do tipo do algoritmo de imageamento implementado. Mais precisamente, a regularização é o processo de criar um dado de entrada para a migração que seja regular, ou seja, com distribuição espacial, temporal, de

*offset* e azimute regulares. Na prática, nem sempre os dados terão diversas classes de azimute, como no caso dos dados do tipo *NAZ* (*Narrow Azimuth*), mas essa limitação não torna a regularização inviável. Por outro lado, *surveys WAZ*, *OBC* e terrestres costumam apresentar uma rica distribuição desses tipos de dados.

## 2.0.2 Propagação de Ondas Acústicas em Formações Rochosas

Em uma interface entre duas camadas de rocha, geralmente há uma mudança na velocidade de propagação resultante da diferença nas propriedades físicas das duas camadas. Em tal interface, a energia dentro de um pulso sísmico incidente é particionada em pulsos transmitidos e refletidos. As amplitudes relativas dos pulsos transmitidos e refletidos dependem das velocidades e densidades das duas camadas e do ângulo de incidência na interface. Para fins didáticos, nas definições superficiais sobre reflexão e transmissão de energia sísmica nessas interfaces, é implicitamente assumido que elas são contínuas e aproximadamente planares. Em descontinuidades abruptas de interfaces, ou estruturas cujo raio de curvatura é menor do que o comprimento das ondas incidentes, as leis de reflexão e refração não se aplicam mais. Tais fenômenos dão origem a um espalhamento radial da energia sísmica incidente conhecida como difração. Fontes comuns de difração incluem as bordas das camadas com falhas (Figura 3) e pequenos objetos isolados, como blocos rochosos, em uma camada homogênea. Fases difratadas são comumente observadas em dados sísmicos e às vezes são difíceis de discriminar das fases refletida e refratada (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002). As difrações ocorrem a partir da morfologia irregular do fundo do mar ou de camadas em subsuperfície. Essas irregularidades atuam como pontos difratores e as ondas difratadas desses pontos produzem hipérboles de difração nos registros de *shots* (tiros) e nas seções pós-empilhamento (figura 2).

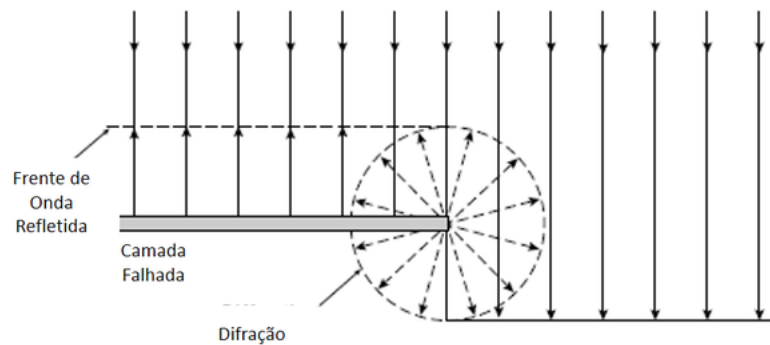




**Figura 2 – Hipérboles de difração indicadas pelas setas azuis.**

Dondurur (2018)

Hipérboles de difração semelhantes também são obtidas de camadas terminadas repentinamente, como em planos de falha e cunhas geológicas (ou *pinch-outs*). Portanto, os planos de falha nas seções empilhadas não migradas são caracterizados por uma série de hipérboles de difração. Essas hipérboles podem ser completamente corrigidas por um algoritmo de migração adequado, que soma a energia de difração ao ponto de ápice, desde que se conheça um campo de velocidade correto para toda a linha sísmica (DONDURUR, 2018).



**Figura 3 – Desenho esquemático sobre como a difração ocorre em bordas de falhas geológicas.**

Kearey et al., 2002

De acordo com Kearey, Brooks e Hill (2002), quando a velocidade é maior na camada subjacente ( $v_2$ ) existe um ângulo de incidência particular, conhecido como ângulo crítico ( $\theta_c$ ), para o qual o ângulo de refração é de  $90^\circ$ . Em qualquer ângulo de incidência maior há reflexão total da energia incidente (além dos raios de onda S convertidos em uma faixa adicional de ângulos). O ângulo crítico é dado por:

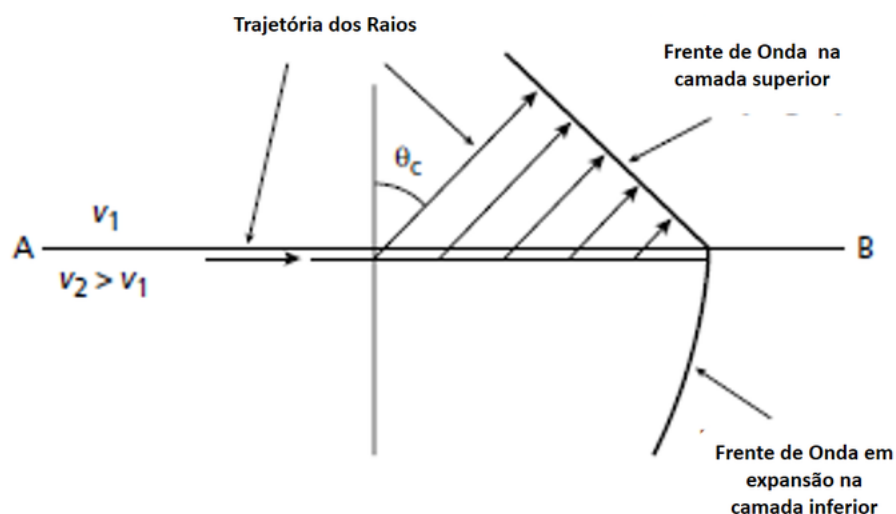
$$\frac{\sin \theta_c}{v_1} = \frac{\sin 90^\circ}{v_2} = \frac{1}{v_2}$$

Então:

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{v_1}{v_2}$$

onde  $v_1$  é a camada superior e  $v_2$  a inferior.

A passagem do raio criticamente refratado ao longo do topo da camada inferior causa uma perturbação na camada superior. A situação é análoga à de um projétil viajando pelo ar a uma velocidade maior que a velocidade do som no ar e o resultado é o mesmo, a geração de uma onda de choque ou frente de ondas, no caso sísmico, e passa obliquamente através da camada superior em direção à superfície (figura 4). Qualquer raio associado à frente de ondas é inclinado no ângulo crítico  $i_c$ . Por meio da frente de onda, a energia sísmica é devolvida à superfície após refração crítica em uma camada subjacente de maior velocidade.



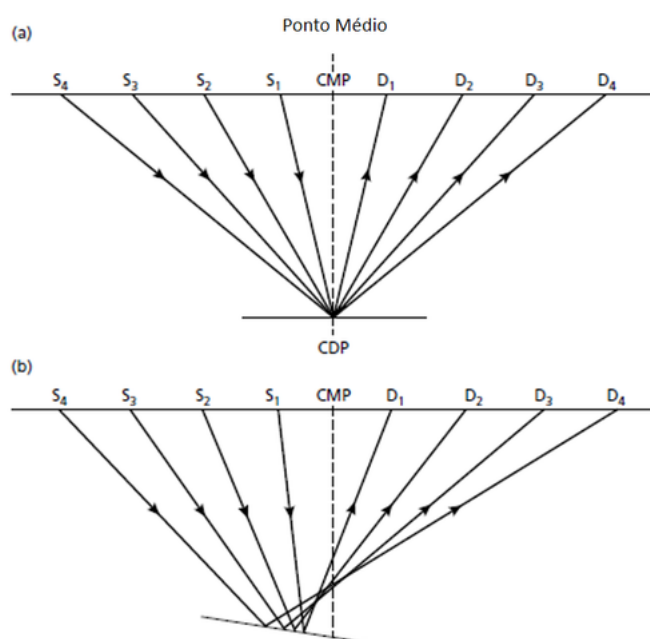
**Figura 4 – Desenho esquemático de uma frente de ondas gerada na camada superior se expandindo pelo meio subjacente.**

Kearey et al., 2002

Uma vez gravados, os sinais são analisados pelo processador e passam por fluxos de processamento que objetivam melhorar a razão sinal ruído por meio de uma série de processos em algoritmos adaptados às particularidades do dado em questão. Dentre eles, um dos mais importantes seria o empilhamento.

### 2.0.3 Correção NMO e Empilhamento

Um traço sísmico representa a resposta combinada das camadas do solo e do sistema de registro a um pulso sísmico. Uma família de traços que representa as respostas de uma série de detectores à energia de um disparo é chamada de *shot gather* ou família de tiros. Uma coleção dos traços relativos à resposta sísmica em um ponto médio da subsuperfície é denominada uma família de *CMPs* (*Common Mid Points*) ou simplesmente *CMP gather*. A família de traços sísmicos para cada *CMP* e sua transformação em um componente da imagem de uma seção sísmica é a principal tarefa do processamento sísmico (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).



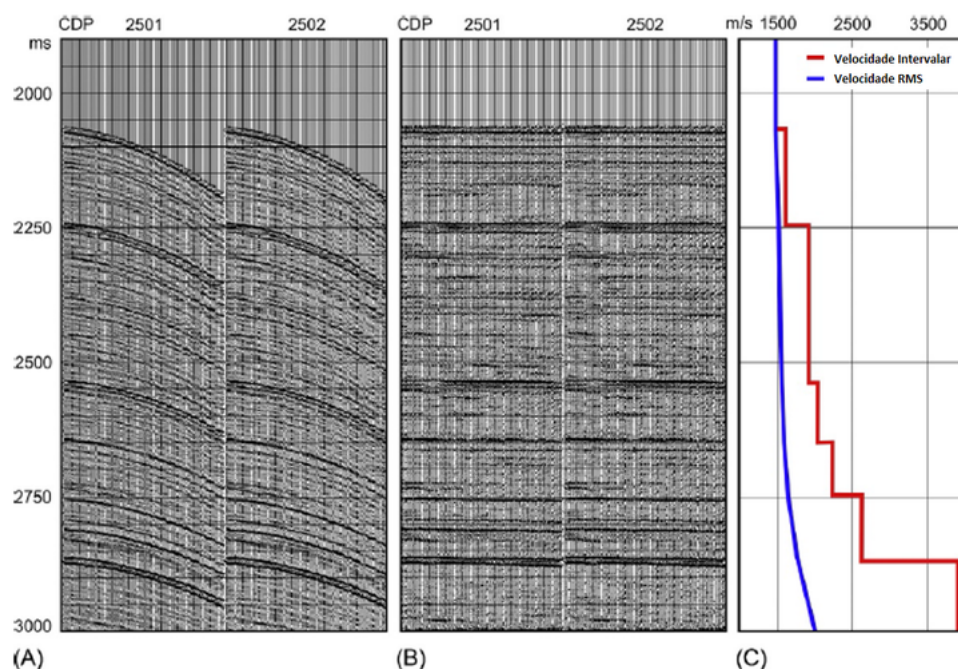
**Figura 5 – Perfilagem *CMP* (*common mid-point*). (a) um arranjo de raios de diversos tiros em um mesmo ponto-médio (*CMP*) e profundidade (*CDP* ou *common depth point*). (b) os quatro pontos de reflexão não se encontram no mesmo domínio *CDP* quando se trata de um refletor inclinado.**

Modificado de Kearey et al. (2002).

De acordo com Mousa (2019), o processamento de dados sísmicos pode ser considerado uma sequência de operações em cascata que visa atenuar o ruído que acompanha os dados sísmicos, bem como fazer correções geométricas tal que a imagem final mostrará verdadeiramente uma imagem de subsuperfície. O processamento de dados sísmicos inclui mas não se limita a filtragem, classificação de famílias *CMP*, análise de velocidade, correção *NMO* e empilhamento. Cada traço sísmico tem três fatores geométricos primários que determinam sua natureza: posição do tiro, posição do receptor e a posição em subsuperfície do ponto de reflexão, que é considerado o mais crítico (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002 apud MOUSA, 2019). Antes do processamento, esta posição é desconhecida, mas uma boa aproximação pode ser feita assumindo que este ponto de reflexão encontra-se verticalmente sob o ponto médio entre o tiro e o receptor.

Os dados inicialmente adquiridos em uma campanha de aquisição sísmica, se encontram organizados em família de tiros (*shot gathers*) ou pontos de profundidade comum (*CDPs*). Por meio deles, é possível notar que os sinais de reflexão chegam mais cedo aos receptores próximos ao ponto de origem (*offsets* pequenos) do que as reflexões registradas em locais distais (*offsets* altos). A diferença entre o tempo de chegada de uma reflexão em um deslocamento especificado e o tempo de *offset* zero dessa reflexão é definida como o tempo *NMO* (*normal moveout*) desse evento de reflexão. O tempo *NMO* varia por receptor para cada hipérbole de reflexão e é igual à diferença do tempo de chegada  $t(x)$  no *offset*  $x$  (para uma reflexão específica) e o tempo de chegada com deslocamento zero

$t(0)$ . A correção *NMO* remove os tempos normais de deslocamento de cada hipérbole de reflexão em cada família *CDP*, usando as velocidades quadráticas médias (*RMS*) obtidas da análise de velocidade. Após a correção *NMO*, espera-se que todas as hipérboles de reflexão primária nos *CDPs* sejam achatadas de modo que todos os eventos de reflexão sejam reposicionados em seu tempo de chegada de *offset* zero, desde que um campo de velocidade correto seja usado. A figura 6 mostra exemplos de famílias *CDP* antes e depois da correção *NMO* e a função de velocidade usada. Praticamente, a correção *NMO* é um processo que remove a distância de tempo quando a distância entre a fonte e os receptores é diferente de zero para que todas as chegadas de reflexão sejam reduzidas ao tempo  $t(0)$  de deslocamento zero bidirecional vertical em uma família *CDP*. A figura 6 mostra o sentido geométrico da correção tanto nos caminhos dos raios quanto em uma família *CDP* sintética (DONDURUR, 2018).

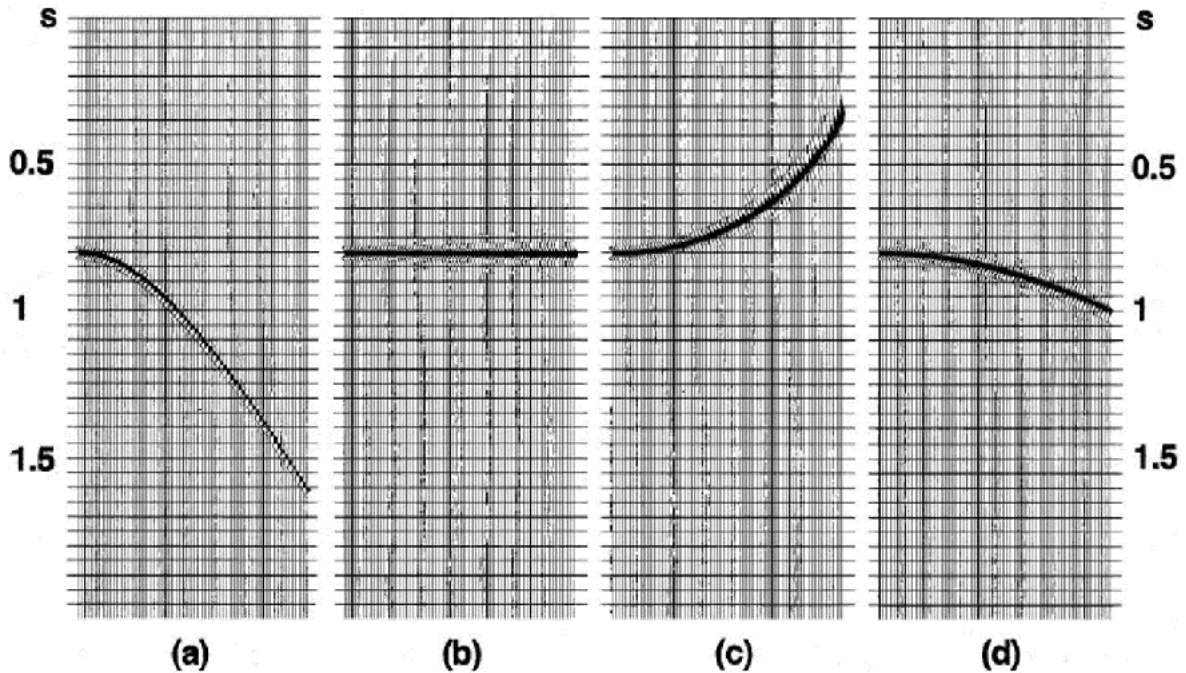


**Figura 6 – Dois *gathers* consecutivos, (A) antes, e (B) depois da correção *NMO*. No gráfico (C), a velocidade *RMS* (azul) é usada para a correção *NMO*, assim como a função da velocidade intervalar (vermelho), calculada a partir da fórmula de Dix .**

Modificado de DONDURUR (2018)

Em um *shot gather*, as hipérboles de reflexão podem ser corrigidas para *offset* se as velocidades médias corretas forem usadas na equação *NMO*. Se for usada uma velocidade maior do que a velocidade média real, então a hipérbole não é achatada completamente (figura 7), resultando em uma correção subestimada. Por outro lado, se uma velocidade menor for usada, será superestimada (figura 7). A correção *NMO* é aplicada ao *gather* *CMP* de entrada usando velocidades constantes de teste. A velocidade que melhor nivela a hipérbole de reflexão é a velocidade que melhor corrige para *NMO* antes de empilhar os

traços na coleta. Além disso, para um caso simples de um único refletor horizontal, esta velocidade também é igual à velocidade do meio acima do refletor (YILMAZ, 2008).



**Figura 7 – O *shot gather* (a) pode ser corrigido corretamente (b), ou equivocadamente com velocidade superestimada (c) ou subestimada (d).**

Yilmaz (2008)

Usando a equação empírica de Dix, é possível calcular as velocidades intervalares a partir da distribuição de velocidades *RMS* em subsuperfície exemplificada na figura 6. Essa equação pode ser usada para converter a velocidade *RMS* em velocidade intervalar, que é usada por alguns dos algoritmos de migração, como a migração *prestack* de Kirchhoff no domínio da profundidade. Se as velocidades *RMS* de duas reflexões com tempos de chegada de  $t_2$  e  $t_1$  são  $V_2$  e  $V_1$ , a velocidade do intervalo Dix pode ser expressa como (Dix, 1955):

$$V_{DIX}^2 = \frac{V_2^2 t_2 - V_1^2 t_1}{t_2 - t_1}$$

Uma vez que a velocidade é conhecida, os traços nos *gathers CMP* passam pela referida correção *NMO*, que é basicamente uma maneira de corrigir as diferenças de tempo que ocorrem devido aos diversos *offsets* em um *gather* (ou família) de *CMPs*, ou seja, para obter o equivalente a um traço cujo deslocamento ou *offset* entre a fonte e o receptor seja zero. Isso implica que todos os traços terão os mesmos pulsos refletidos nos mesmos tempos, mas com diferentes ruídos sejam eles coerentes ou aleatórios. Portanto, combinar todos os traços em um *gather* de *CMPs* fará a média do ruído e o *SNR* aumentar. Este processo é conhecido como empilhamento (MOUSA, 2019).



#### 2.0.4 Filtro F-K

O principal objetivo do pré-processamento é aumentar a razão sinal-ruído para preparar o dado para importantes fases do processamento, como a migração, por exemplo. E o filtro f-k tem um importante papel na remoção dos ruídos coerentes durante essa fase inicial, permitindo delimitar os ruídos em polígonos para sua remoção através do produto com escalares próximos a zero.

De acordo com YILMAZ (2008), eventos lineares coerentes no domínio tx podem ser separados no domínio fk por seus mergulhos. Isso nos permite eliminar dos dados certos tipos de energia indesejada. Ondas guiadas e energia espalhada lateralmente são alguns exemplos de ruídos que podem ser mitigados. Definir um polígono de rejeição - em forma de leque - no domínio fk é conhecido como filtragem fk por mergulho. Contudo, a filtragem por *dip* é apenas um dos tipos de filtragem fk. A zona de rejeição no domínio fk pode ser definida não apenas como um leque, mas também como uma forma adequada ao objetivo em mente. Por exemplo, pode ser apenas metade de um quadrante, no caso de um filtro *anti-aliasing* espacial. A seguir estão as etapas da filtragem fk:

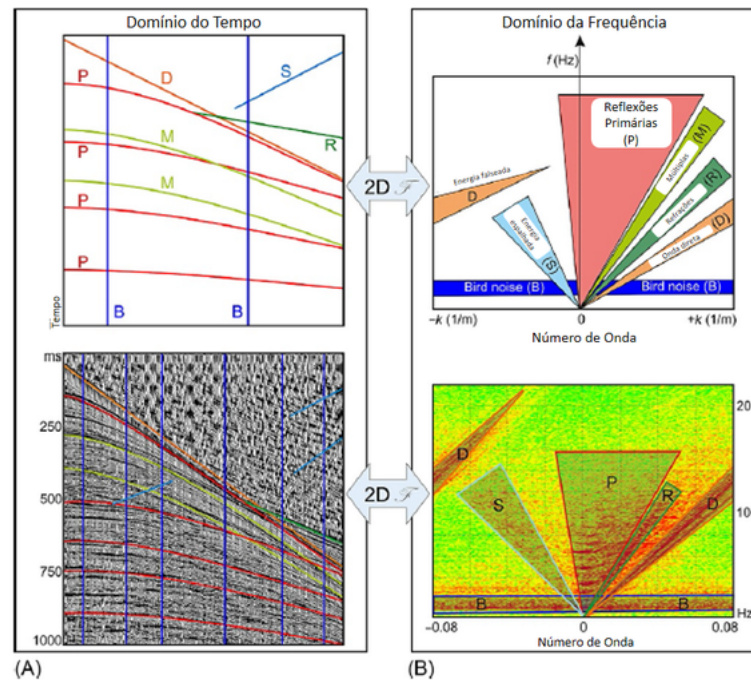
(a) Começando com uma família *CMP*, ou uma seção *stack CMP*, se aplica a transformada de Fourier 2-D para se transferir os dados para o domínio f-k.

(b) É definida uma zona de rejeição 2-D no domínio fk se ajustando o espectro de amplitude 2-D do filtro fk para zero dentro dessa zona e é definido o espectro de fase para zero.

(c) Se aplica o filtro 2-D fk multiplicando seu espectro de amplitude pelo do conjunto de dados de entrada.

(d) Retorna-se para o domínio distância-tempo pela aplicação da transformada inversa de Fourier 2-D nos dados filtrados .

DONDURUR (2018) explica que no domínio do tempo, eventos complexos de vários mergulhos diferentes podem ser facilmente diferenciados quando convertidos para o domínio f-k, uma vez que as amplitudes de cada evento correlacionado surgem em diferentes porções do espectro f-k dependendo de seus mergulhos nos dados sísmicos. Se o mergulho for de perto para longe na família de *shots*, isso significa que o evento tem um *dip* positivo e suas amplitudes surgem no quadrante de número de onda positivo do espectro f-k. Se o *dip* for dos *far offsets* para os *near*, ocorre a situação oposta. À medida que a inclinação de um evento aumenta no domínio do tempo, as amplitudes desse evento no domínio da frequência se aproximam do eixo horizontal do número de onda (k). As amplitudes de eventos horizontais no domínio tempo-distância são agrupadas próximas ao eixo vertical (f) no domínio f-k. Um evento vertical no domínio do tempo, como *bird noise* nos *shot gathers*, aparece completamente horizontal no domínio f-k (figura 8).



**Figura 8 – Exemplo de um *shot gather* (A) e seus eventos (B), representados de forma esquemática (acima).**  
Modificado de Dondurur (2018)

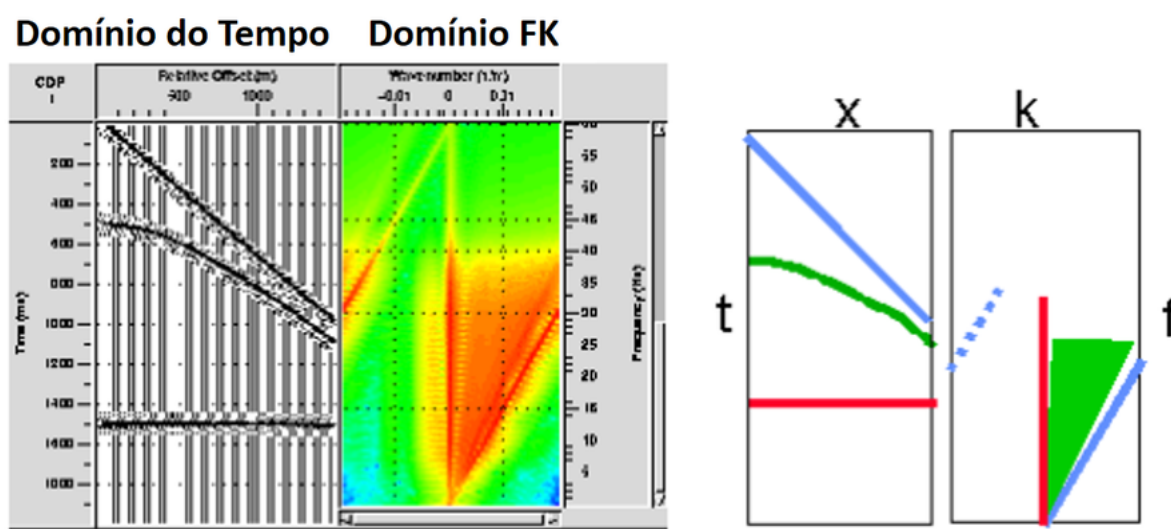
O espectro f-k consiste em dois painéis: um negativo e outro positivo, representado por números de onda negativos e positivos em relação à frequência, respectivamente. Em *shot gathers*, o painel positivo envolve as amplitudes de reflexões primárias e múltiplas, onda direta e refrações, enquanto o painel negativo compreende sinais espacialmente falseados, amplitudes retro-espalhadas e eventos com mergulho negativo, como ruído de *tail buoy*. As amplitudes do *bird noise* e do ruído mecânico do cabo estão localizadas em ambos os painéis. Em geral, não é possível reconhecer as amplitudes de reflexões múltiplas como um pacote de amplitude isolado nos espectros f-k.

A transformada de Fourier 2D nos permite filtrar os dados sísmicos em 2D e suprimir alguns tipos de ruído específicos. Basicamente, cada espectro f-k apresenta todos os eventos de um mergulho específico em uma determinada área do painel f-k. A fim de remover um determinado evento nos dados de domínio do tempo, a área no domínio f-k que contém as amplitudes do evento a ser removido é multiplicada por um pequeno coeficiente (ou escalar) próximo de zero. A razão pela qual as amplitudes não são multiplicadas por zero é baseada na teoria de Fourier: Se multiplicarmos o espectro de amplitude por uma constante no domínio da frequência, isso significa que a função é escalada pelo inverso dessa constante no domínio do tempo, ou seja, infinito. Em seguida, os dados são transferidos de volta para o domínio do tempo por uma transformada inversa de Fourier 2D. Agora os dados filtrados não contêm as amplitudes dos eventos indesejados no domínio do tempo.

A refração mostrada em azul na figura 9, mapeia um evento azul que torna-se espacialmente falseado acima de 30 Hz, onde mostra mergulho reverso (observe que o



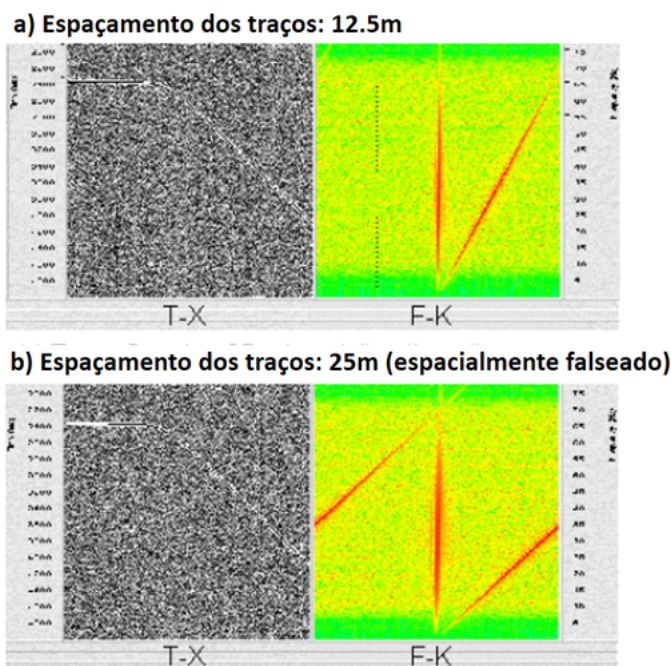
conteúdo de frequência total é o mesmo, pois é a mesma wavelet sintética). O domínio FK mostra claramente o *aliasing* (ou falseamento) espacial, enquanto no domínio do tempo é mais difícil de detectar a olho nu. O evento curvo mostrado em verde mapeia uma variedade de mergulhos em FK. Portanto, a transformada FK pode ser descrita como decompondo os dados de entrada em uma série de linhas retas no espaço FK, portanto, uma faixa de mergulhos no tempo pode ser identificada em FK e suprimida por silenciamento (HARDY, March 2021).



**Figura 9 – Shot gather (esquerda) com painel FK correspondente. A representação esquemática (direita) mostra os principais eventos do shot gather em cores distintas. O evento verde possui diversos mergulhos, daí a forma de leque no domínio FK.**

<http://www.xsgeo.com/course/basic.htm>

O *aliasing* (ou falseamento) espacial é um problema comum a ser considerado ao realizar o processamento de dados sísmicos. Uma maneira de limitar o *aliasing* espacial da figura anterior seria remover frequências acima de 30 Hz. Mas isso seria um desperdício de sinal primário. O espaçamento entre traços também é importante. Considere a figura adjacente (a) e (b) mostrando um evento de 70 Hz caindo a 20 graus. A amostragem a cada 12,5 m mostra o sinal corretamente, mas a 25 m o sinal torna-se espacialmente falseado e parece mostrar um dip reverso que confunde a interpretação (assim como muitos algoritmos de processamento, como a migração).



**Figura 10 – Shot gathers (esquerda) e seus respectivos gráficos no domínio FK. O espaçamento de 12.5 m (a) não apresenta falseamento, de acordo com o esquema. Contudo, o espaçamento de 25m (b) resulta em falseamento no quadrante negativo ( $K < 0$ ).**

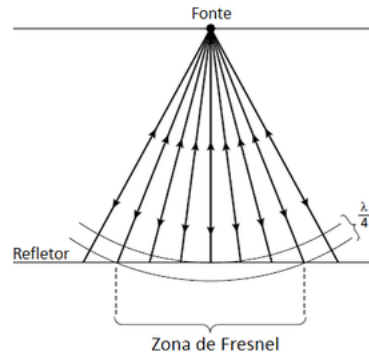
<http://www.xsgeo.com/course/basic.htm#contents>

## 2.1 Tipos de Migração Sísmica

Migrações são rodadas diversas vezes em um projeto de imageamento sísmico, com propósitos específicos. Uma vez que o dado e o modelo de velocidade finais são obtidos, as migrações finais podem então serem rodadas.

Segundo SCHNEIDER (1978), a migração computacional de dados sísmicos surgiu no final da década de 1960 como uma consequência natural das técnicas de migração manual baseadas em gráficos de frente de onda e curvas de difração. A soma (integração) ao longo de uma hipérbole de difração foi reconhecida como uma maneira de automatizar a transformação de coordenadas ponto a ponto realizada por intérpretes no mapeamento de reflexões do domínio x-t (ou tempo de viagem) para o domínio x-z (ou domínio da profundidade).

A migração sísmica é o processo de reconstrução de uma seção sísmica para que os eventos de reflexão sejam reposicionados sob sua localização correta na superfície e em um tempo de reflexão vertical corrigido. A migração também melhora a resolução de seções sísmicas concentrando a energia espalhada por uma zona de Fresnel e colapsando padrões de difração produzidos por refletores pontuais e camadas com falhas geológicas. Na migração em tempo, as seções sísmicas migradas ainda possuem o tempo como dimensão vertical. Na migração em profundidade, os tempos de reflexão migrados são convertidos em profundidades de refletor usando as velocidades apropriadas (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).



**Figura 11 – A Zona de Fresnel é a parte do refletor onde a energia emitida por uma determinada fonte compreende metade do comprimento da onda refletida**

Modificado de Kearey et al. (2002).

Existem vários tipos de migração implementados nos domínios de tempo ou profundidade, aplicados em diversos estágios de processamento, como antes ou depois do empilhamento, usando os mais variados algoritmos. Por exemplo, os tipos de migração que usam velocidades *RMS* e não consideram a flexão do raio através dos limites de camadas são conhecidos como migrações em tempo. Por outro lado, aqueles que usam velocidades intervalares e consideram a flexão do raio são denominados migrações em profundidade. Apesar da migração em tempo ter sido amplamente utilizada como algoritmo de imageamento na indústria do petróleo até as últimas duas décadas, a imagem em profundidade tornou-se mais atraente nos últimos anos com os mais recentes desenvolvimentos em tecnologia de computadores e capacidade computacional de nova geração (DONDURUR, 2018).

Antes da introdução dos computadores no processamento de dados sísmicos, a migração era realizada graficamente. Hoje, existem vários algoritmos diferentes, que podem ser agrupados em três categorias principais, cada um resolvendo a equação da onda escalar usando as seguintes abordagens:

- 1) Métodos baseados na solução de diferenças finitas
- 2) Métodos de soma integral ou de difração
- 3) Métodos da transformada de Fourier.

Os algoritmos de migração que utilizam essas três abordagens geralmente levam os nomes de seus autores ou do tipo de solução que aplicam. Seguindo as implementações computacionais, foi desenvolvido o método de soma de difração para resolver a equação de onda no domínio digital. A base deste método é somar as amplitudes ao longo de uma hipérbole de difração cuja curvatura é controlada pela velocidade do meio. SCHNEIDER (1978 apud DONDURUR, 2018) implementou o método de soma de Kirchhoff baseado na solução integral da equação de onda escalar, que é um dos algoritmos mais comuns usados pela indústria e pela academia atualmente. Claerbout e Doherty (1972 apud DONDURUR, 2018), se basearam na continuação descendente do campo de ondas sísmicas, conhecida como migração de diferenças finitas, fundamentada na solução numérica da equação de onda escalar pelo método das diferenças finitas. Stolt (1978 apud DONDURUR, 2018) introduziu a migração por transformada de Fourier como o algoritmo de migração mais rápido usado hoje, conhecida como migração de Stolt ou migração de número de onda de frequência ( $f$ - $k$ ). Outra migração  $f$ - $k$  é a migração de mudança de fase, ou migração Gazdag, implementada por Gazdag (1978 apud DONDURUR, 2018). Hoje, um dos algoritmos de migração mais comuns e robustos usados pela indústria para imagear áreas estruturalmente complexas, como zonas com intrusões de sal, é a migração de tempo reverso (*RTM*), introduzida por (BAYSAL; KOSLOFF; SHERWOOD, 1983 apud DONDURUR, 2018), na qual o campo de ondas é extrapolado para trás no tempo, empregando um modelo de refletor explosivo para migração *poststack*. Na última década, a aplicação de *RTM* a levantamentos sísmicos 3D tornou-se possível em conjunto com um rápido aumento na potência dos hardwares dos computadores.

Os algoritmos de migração mais comuns usados na indústria de petróleo e em ambientes acadêmicos hoje com base nessas abordagens estão listados na Tabela 1. Cada um desses algoritmos tem suas próprias vantagens e deficiências. Por exemplo, a migração de Kirchhoff produz bons resultados mesmo para mergulhos estruturais de 90 graus, mas tem restrições quanto às variações de velocidade lateral. As migrações de diferenças finitas produzem resultados aceitáveis apenas com mergulhos estruturais de até 35 graus; no entanto, elas não são afetadas por variações de velocidade lateral (YILMAZ, 2001 apud DONDURUR, 2018). Embora as migrações  $f$ - $k$ , como o algoritmo Stolt, sejam mais rápidas do que outros métodos, elas não podem lidar com variações de velocidade vertical e horizontal. Um profissional deve selecionar o tipo de migração mais apropriado com base nos requisitos e complexidade, bem como na relação S/R, de seus dados de entrada.

**Tabela 1 – Alguns dos principais algoritmos de migração usados no processamento de dados sísmicos marinhos, diferenciados na tabela por seus prós e contras, além de outras características importantes.**

Algoritmo	Método	Domínio	Tipo de Velocidade	V(x)	V(z)	Mergulho Inclinado
Stolt	Frequência - Número de Onda	Tempo	$V_{Rms}$	0	0	1
Mudança de Fase (Gazdag)	Frequência - Número de Onda	Tempo	$V_{Rms}$	-	2	2
Omega-x	Diferença Finita	Tempo	$V_{int}$	1	2	2
Diferença Finita Explícita - tempo	Diferença Finita	Tempo	$V_{int}$	1	2	1
Diferença Finita Explícita - profundidade	Diferença Finita	Profundidade	$V_{int}$	2	2	2
Kirchhoff - tempo	Soma de Difração	Tempo	$V_{Rms}$	1	2	2
Kirchhoff - velocidade	Soma de Difração	Profundidade	$V_{int}$	2	3	3
Kirchhoff <i>prestack</i> - tempo	Soma de Difração	Tempo	$V_{Rms}$	2	2	2

Algoritmo	Método	Domínio	Tipo de Velocidade	V(x)	V(z)	Mergulho Inclinado
Kirchhoff <i>prestack</i> - velocidade	Soma de Difração	Profundidade	$V_{int}$	2/3	3	3
Tempo Reverso	Diferença Finita	Tempo	$V_{int}$	2	3	3
Tempo Reverso TK	Diferença Finita	Tempo	$V_{int}$	-	3	3

Modificado de DONDURUR (2018).

Para YILMAZ (2008) a migração de um dado sísmico requer um processo de tomada de decisão, no que diz respeito a:

- a) uma estratégia de migração apropriada
- b) um algoritmo de migração compatível com a estratégia
- c) velocidades de migração

Estratégias de migração incluem:

- a) migração 2D *versus* 3D
- b) migração pós *versus* pré-empilhamento
- c) migração em tempo *versus* profundidade

**Tabela 2 – Essa tabela é uma revisão das diferentes estratégias de migração aplicadas a diversos tipos de dados (2D, 3D, poststack, prestack, etc)**

Caso	Migração
Eventos inclinados	Migração em tempo
Mergulhos conflitantes com diversas velocidades de empilhamento	Migração <i>prestack</i>
Comportamento 3D em planos de falhas e flancos de sal	Migração 3D
Fortes variações laterais de velocidade associadas com complexas estruturas	Migração em profundidade

Caso	Migração
<i>Moveout</i> complexo não-hiperbólico	Migração <i>prestack</i>
Estruturas 3D	Migração 3D

YILMAZ (2008)

Migrações são rodadas diversas vezes durante um mesmo projeto de imageamento sísmico com as finalidades de QC e construção de modelos de velocidade. Uma vez que o modelo de velocidade final e o dado resultante estão prontos, as migrações finais são geradas. Dentro do referido contexto, temos diversos tipos de migração, cada qual com suas vantagens e desvantagens:

**Tabela 3 – Há diversos tipos de migração, cada qual com seus prós e contras. Muitos serão usados de acordo com a necessidade. Nessa tabela temos algoritmos de migração para dados sísmicos marinhos multicanal e suas respectivas finalidades.**

Objetivo	Algoritmo	Por que?
QC	Kirchhoff <i>PSTM</i> ( <i>Pre Stack Time Migration</i> )	rápida, barata, modelo suave
VMB (tomografia)	<i>BEAMPSTM</i> ( <i>Pre Stack Depth Migration</i> )	rápida e barata
VMB(FWI)	Equação da Onda	<i>mecanismo da Equação da Onda</i>
Interpretação e Final	<i>KirchhoffPSTM</i> ( <i>Pre Stack Depth Migration</i> )	alta resolução, barata
Interpretação e Final	Equação da Onda	alternativa para o Kirchhoff
Interpretação e Final	<i>RTM</i>	usada para o sub-sal, dipsíngremes, geologia complexa

Objetivo	Algoritmo	Por que?
----------	-----------	----------

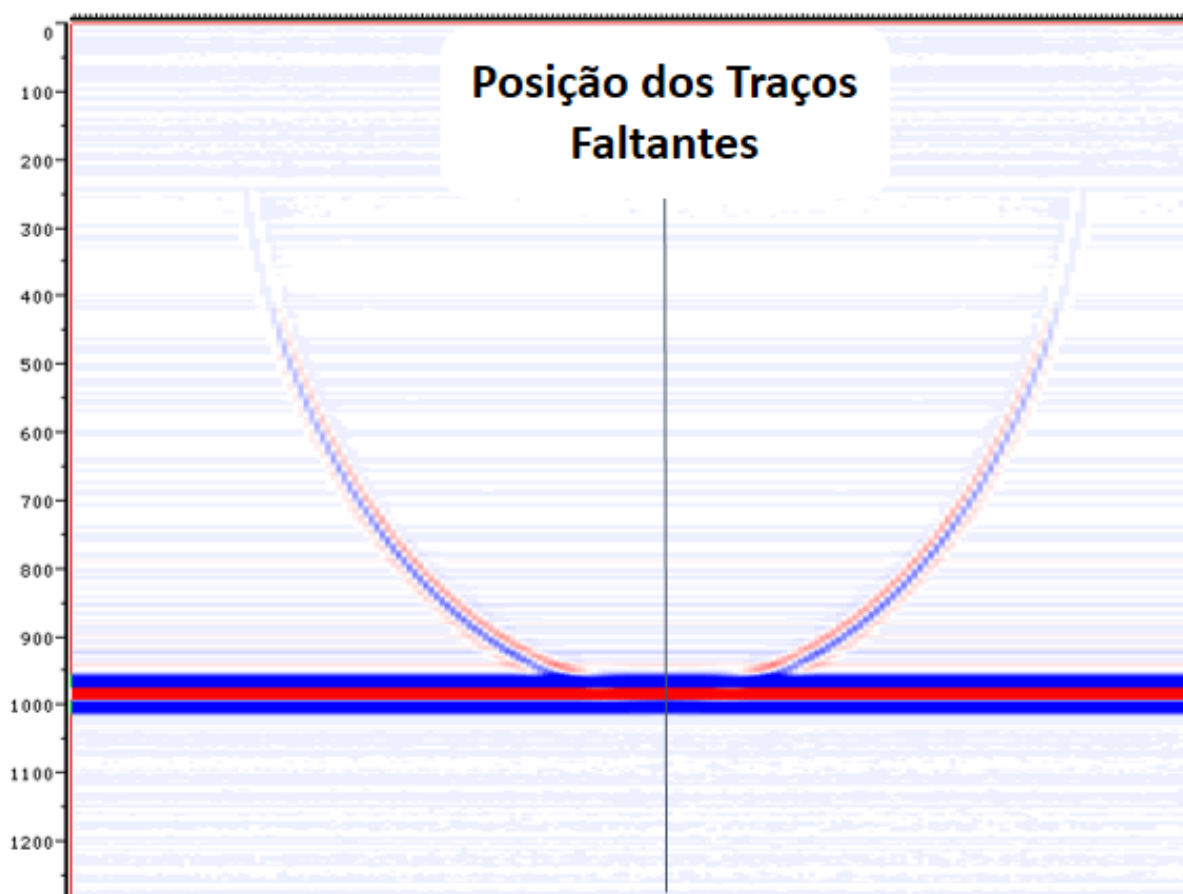
Cortesia: Petroleum Geo-Services

Nas últimas décadas houveram avanços significativos na aplicação desses algoritmos no processamento de dados sísmicos marinhos, mas as migrações que se enquadram dentro do referido método de soma de Kirchhoff seguem sendo muito usadas em diversos fluxos de processamento. E, dentro desse contexto, o presente trabalho tem como principal proposta a revisão bibliográfica de alguns dos trabalhos mais relevantes para a indústria que tenham aplicações da migração de Kirchhoff.

### 2.1.1 Migração de Kirchhoff

Migrações Kirchhoff requerem dados de entrada que sejam regulares, ou seja, com distribuição regular no espaço, tempo, *offset* e, se possível, azimuth. A regularização é o processo de criação de um volume de entrada que seja regular. Veremos mais a frente que a migração Kirchhoff depende da interferência construtiva do sinal e destrutiva de ruído. E para tal, uma geometria regular se faz mais do que necessária. Sem dados de entrada regulares, obtemos interferência do operador de migração Kirchhoff não otimizada. Em outras palavras, regularização envolve re-criar os traços das células vazias. Caso contrário, são gerados sorrisos de migração:





**Figura 12 – Sorriso de migração, resultante da ausência de traços no dado sintético, usado como entrada para a migração Kirchhoff. Em outras palavras, dados irregulares podem gerar artefatos como o referido.**

Cortesia: PGS

De acordo com DONDURUR (2018) para regularizar, os traços nos dados de entrada são interpolados em intervalos regulares. Tal recurso resulta em um intervalo de traço constante, indo de zero ao *offset* máximo de entrada, particularmente para compensar os traços ausentes nos *near-offsets*.

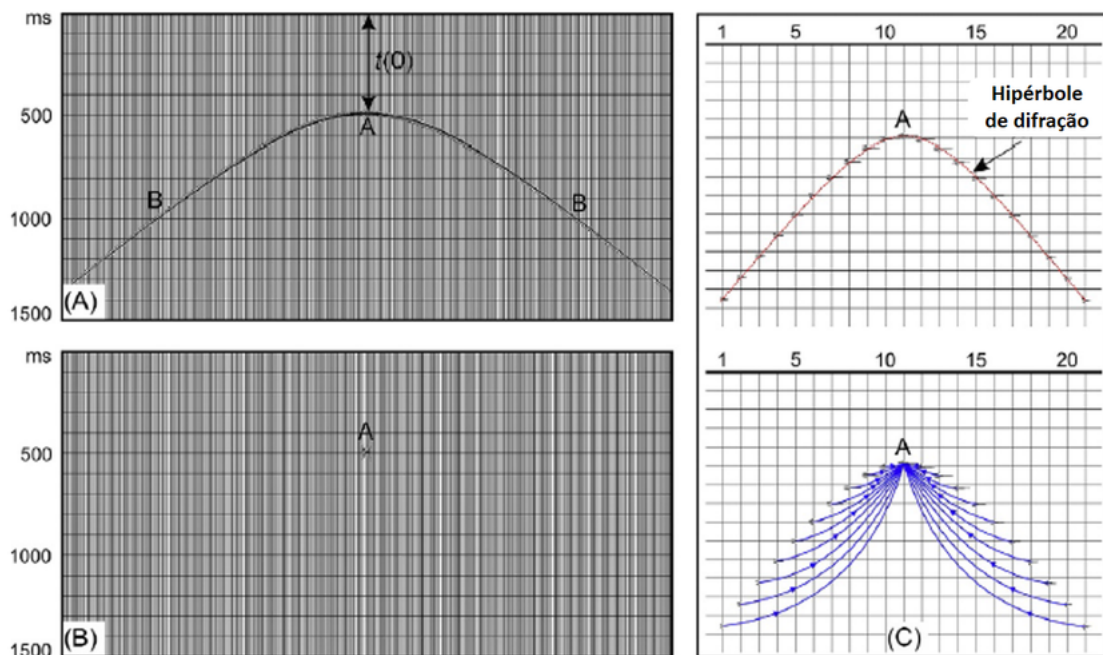
Das três categoriais de algoritmos de migração citadas na seção 2.0.4, SCHNEIDER (1978) desenvolveu uma visão da migração de equações de onda em que a questão é colocada como um problema de valor de contorno, o que leva naturalmente a um algoritmo integral ou de soma para migração em duas ou três dimensões (2). O autor mostra a forte ligação histórica que esse tipo de algoritmo tem com a teoria por trás da soma de difração “convencional” do final dos anos 60, fornecida no trabalho de Hagedoom (1954 apud SCHNEIDER, 1978)

Para DONDURUR (2018), a migração de Kirchhoff é um dos algoritmos de migração mais comuns usados na indústria de processamento atualmente e pode ser implementado em dados 2D e 3D para estágios de processamento pré-empilhamento e pós-empilhamento, seja no domínio do tempo ou da profundidade. A maioria dos *softwares* de migração *prestack* em profundidade usa a migração Kirchhoff. Em geral, o princípio de Huygens é

usado para definir na fundamentação teórica da migração de Kirchhoff. Em outras palavras, os refletores na subsuperfície podem ser considerados como consistindo de várias fontes pontuais contíguas, cada uma gerando uma hipérbole de difração registrada nos receptores em superfície. Assume-se que as seções de *offset* zero são a soma dessas hipérboles após interferência construtiva ou destrutiva entre amplitudes de cada hipérbole originada para cada fonte pontual. A migração de Kirchhoff soma as amplitudes de cada hipérbole de difração e atribui essa soma ao ápice da hipérbole correspondente. A curvatura das hipérboles de difração é controlada pela velocidade *RMS* no ápice e pode ser calculada pela equação abaixo:

$$t^2 = t^2(0) + \frac{x^2}{V^2}$$

Este processo é ilustrado esquematicamente na figura 13, onde as amplitudes ao longo dos flancos da hipérbole (B) são somadas para atribuir o ponto de vértice (A), e este processo é repetido para todas as amostras de todos os traços na seção de entrada. A relação de amplitude e fase na saída migrada é calculada pela solução integral da equação da onda.

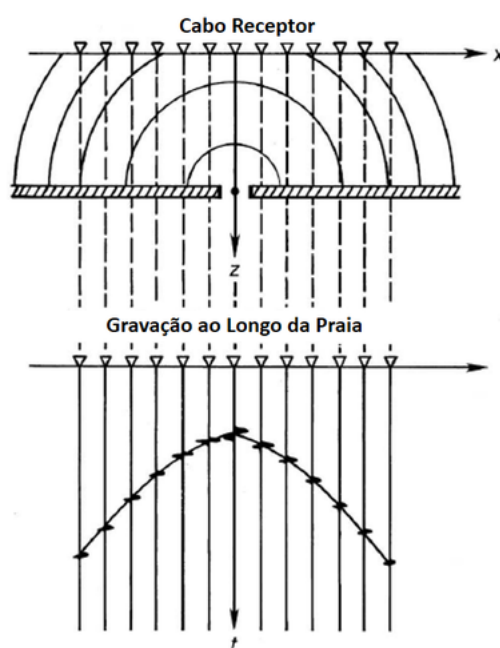


**Figura 13 – Representação esquemática do colapso de uma hipérbole de difração na migração de Kirchhoff. (A) Uma hipérbole de difração em uma seção de *offset* zero e velocidade constante. O ápice e os flancos da hipérbole são indicados por A e B, respectivamente. (B) Resultado da migração de (A). (C) Amplitudes ao longo dos flancos B são movidas para o ponto de ápice A após a migração.**

Dondurur (2018)

Claerbout (1985 apud YILMAZ, 2001) usa o exemplo do porto na figura 14 para descrever a migração. Suponha que exista uma barreira contra tempestades na praia e que haja uma lacuna na barreira. Imagine que vem do oceano uma onda plana incidente. O hiato na barreira de tempestade atuou como fonte secundária e gerou a frente de onda

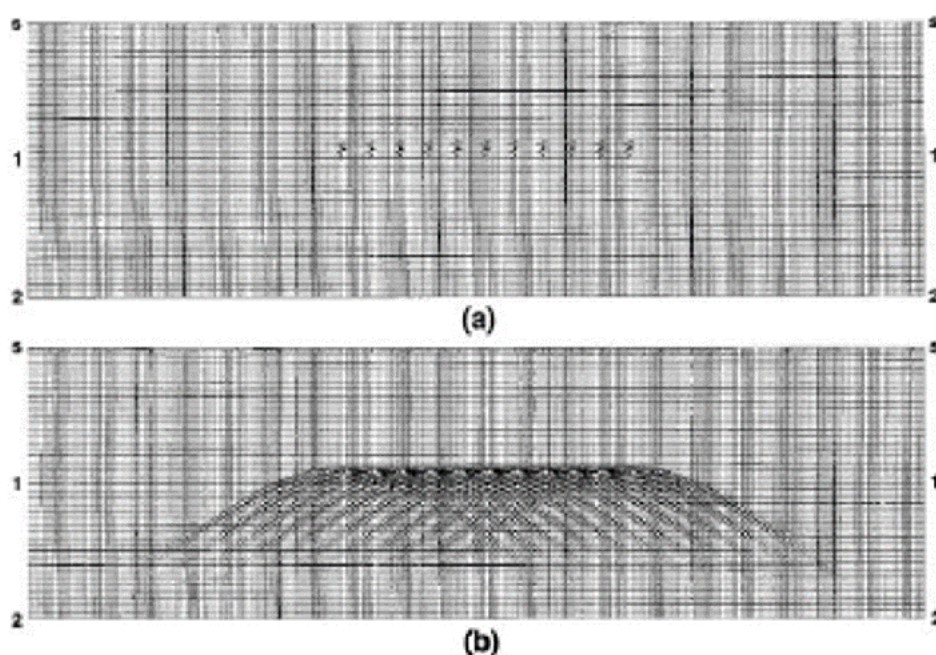
semicircular que se propaga em direção à praia. O *gap* na barreira é conhecido como abertura pontual (ou *point aperture*). É um pouco semelhante a uma fonte pontual, pois ambas geram frentes de onda circulares. No entanto, as amplitudes na frente de onda de uma fonte pontual são isotrópicas, enquanto as de uma abertura pontual são dependentes do ângulo. A abertura pontual na barreira atua como uma fonte secundária de Huygens. A partir do referido experimento de praia, nota-se que a fonte secundária de Huygens responde a uma onda incidente plana e gera uma frente de onda semicircular no plano  $x-z$ . A resposta no plano  $x-t$  é a hipérbole de difração mostrada na seção inferior da figura 14.



**Figura 14 – Ondas propagadas no plano  $x-z$  a partir da fonte secundária de Huygens e gravadas no plano  $x-t$ .**

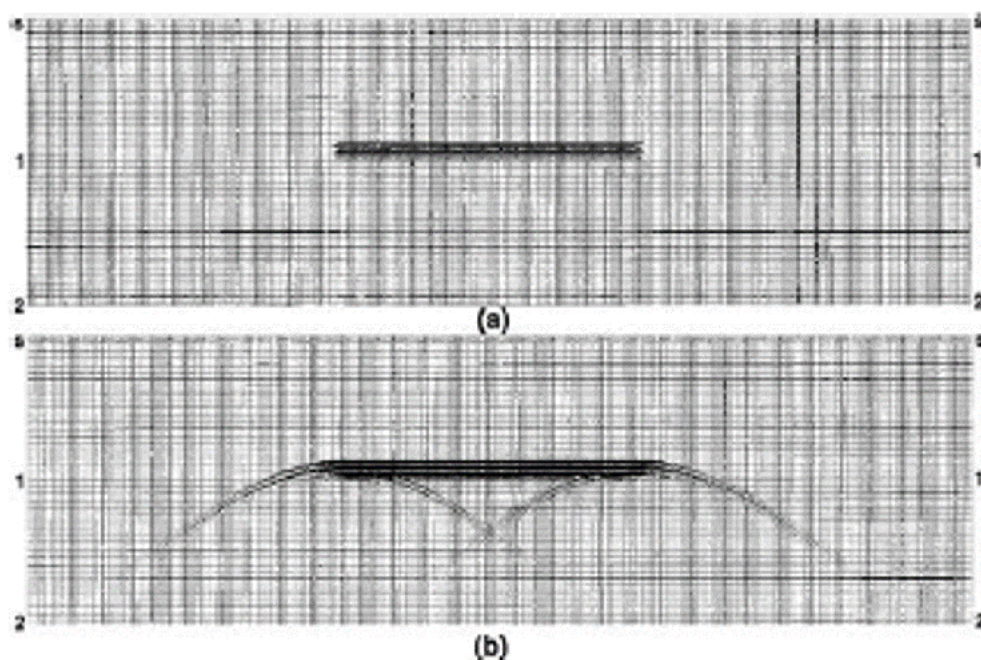
Modificado de Yilmaz (2001).

Imagine que a subsuperfície consiste em pontos ao longo de cada horizonte refletor sísmico que se comportam como a referida lacuna na barreira de tempestade. Da figura 15, esses pontos atuam como fontes secundárias de Huygens e produzem trajetórias de tempo de viagem hiperbólicas.



**Figura 15 – Superposição (b) de fontes secundárias (discretas) de Huygen (a).**  
Yilmaz (2001).

Além disso, à medida que as fontes (ou pontos na interface refletora) se aproximam, a superposição das hipérboles produz a resposta da interface refletora real (figura 16).



**Figura 16 – Superposição (b) de fontes secundárias (contínuas) de Huygen (a).**  
Yilmaz (2001).

No entanto, as hipérboles de difração, que são causadas por falhas acentuadas em ambas as extremidades do refletor na figura 16, permanecem. Essas hipérboles são equivalentes às difrações vistas em limites de falhas em seções empilhadas (*poststack*).



Em outras palavras, os refletores na subsuperfície podem ser visualizados como sendo constituídos de muitos pontos que atuam como fontes secundárias de Huygens. Além disso, a seção de *offset* zero consiste em uma superposição das muitas respostas hiperbólicas em tempo. Contudo, quando há descontinuidades (falhas) ao longo do refletor, as hipérboles de difração geralmente se destacam (YILMAZ, 2008).

#### 2.1.1.1 Resposta Impulsiva

A assinatura da fonte secundária de Huygens é um semicírculo no plano  $x-z$  e uma hipérbole no plano  $x-t$ . Esta caracterização de fontes pontuais leva a dois esquemas de migração:

- 1) A figura 17 mostra uma seção de *offset* zero que consiste em um único sinal de energia sísmica traduzida no único traço sísmico da figura 17 (a). Este evento migra para o semicírculo da figura 17 (b). Da figura 17, observe que a seção de deslocamento zero registrada por um modelo geológico de velocidade constante consistindo de uma interface refletora semicircular gerada por um único impulso sísmico. Como essa seção registrada consiste em um impulso, a seção migrada na figura 17 (b) pode ser chamada de resposta ao impulso.
- 2) Em um esquema alternativo para migração, uma seção de *offset* zero consistindo de uma única hipérbole de difração migra para um único ponto.

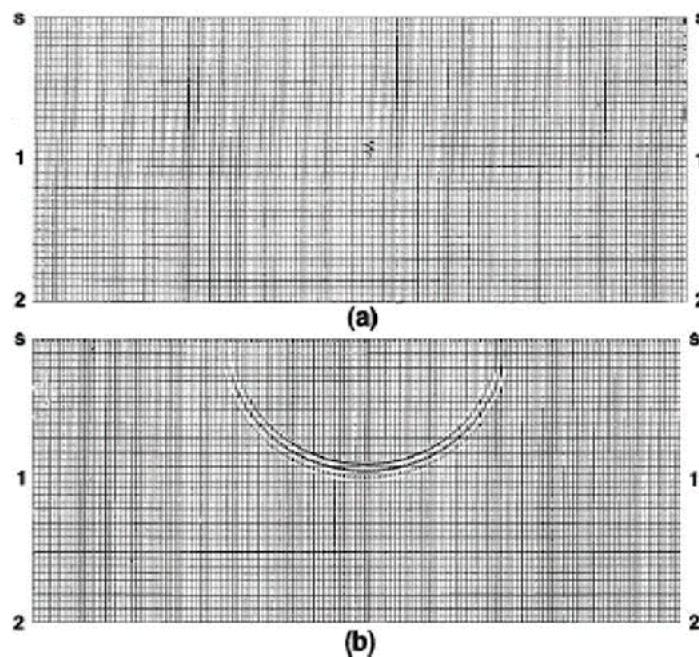


Figura 17 – Resposta à migração (b) do impulso ou traço sísmico (a).

Yilmaz (2008)

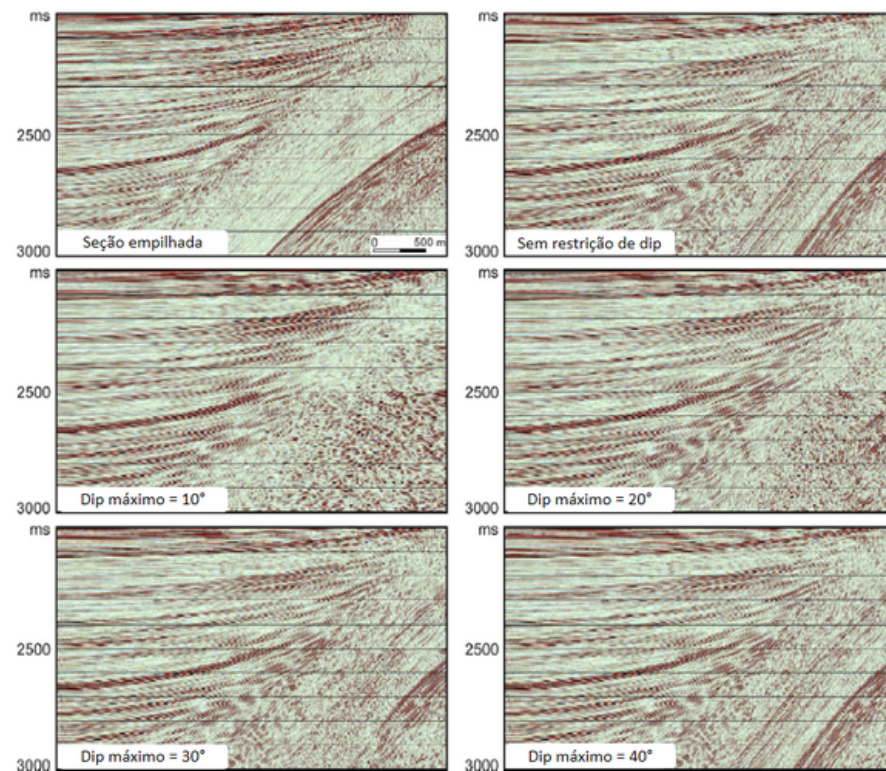
O primeiro método de migração é baseado na superposição de semicírculos, enquanto o segundo método é baseado na soma de amplitudes ao longo de caminhos hiperbólicos. O primeiro método foi usado antes da era dos computadores digitais. O segundo método, conhecido como método de soma de difração (figura 16), foi a primeira implementação computacional da migração.

O esquema de migração baseado na superposição de semicírculos consiste em mapear a amplitude em uma amostra no plano de entrada  $x-t$  da seção de tempo não migrada em um semicírculo no plano de saída  $x-z$ . A seção migrada é formada como resultado da superposição dos muitos semicírculos.

#### 2.1.1.2 A Importância do *Dip* (mergulho)

Há um *trade off* onde quanto maior o *dip* usado na migração de Kirchhoff, maior é o custo computacional, porém melhor será o imageamento de flancos de sal de alto mergulho, difíceis de se imagear. Também é importante ter em mente, que o *dip* não pode ser alto ao ponto de gerar ruído, esse *trade off* é de sumária importância na migração de Kirchhoff.

O mergulho máximo desejado no dado migrado pode ser usado para suprimir o ruído coerente de mergulho acentuado. A restrição do mergulho é um método para reduzir o tempo de execução da migração, uma vez que o parâmetro do mergulho está relacionado à abertura de migração (que será melhor explicada na seção seguinte). Quanto menor for o mergulho máximo permitido, mais estreita será a abertura de migração. Os flancos das hipérboles teóricas de difração usadas para a soma durante a migração de Kirchhoff são truncados além do valor de mergulho máximo. O efeito da restrição de *dip* é especialmente significativo em áreas de mergulhos acentuados, como os eventos localizados na parte mais à direita da seção sísmica da figura 18. Para o limite de mergulho de 10 e 20 graus, essas reflexões de mergulho são completamente filtradas pela migração. O dado de saída com limite de mergulho de 40 graus, no entanto, produz quase o mesmo resultado que a migração sem restrição de mergulho. Se a inclinação estrutural máxima nos dados for de 40 graus, então é computacionalmente eficaz aplicar uma migração de limite de mergulho de 40 graus. Testes de mergulho máximo permitidos podem ser realizados para as áreas de mergulhos acentuados nos dados sísmicos para determinar o valor de mergulho máximo adequado (DONDURUR, 2018).

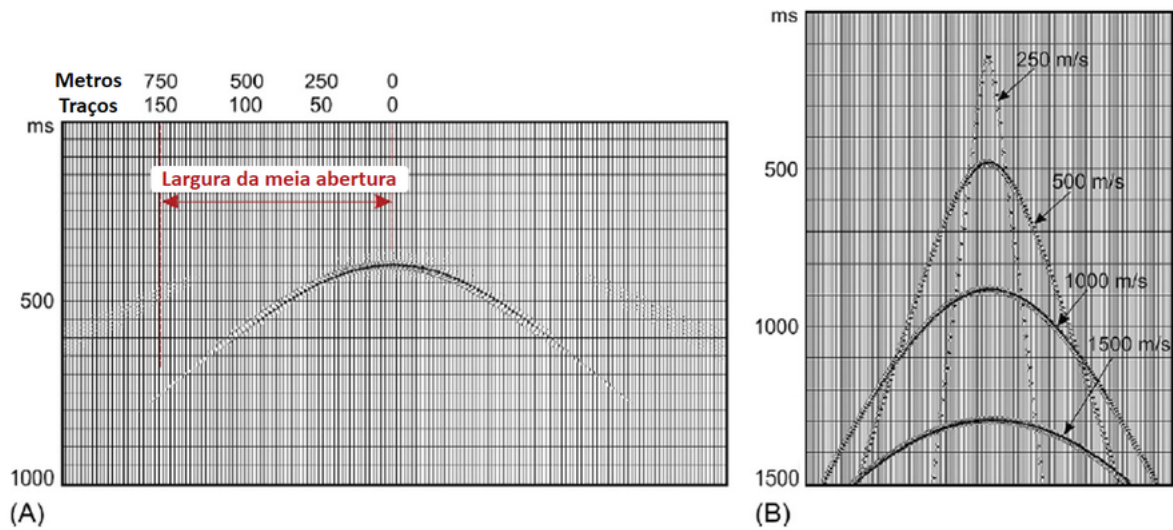


**Figura 18 – O efeito da restrição do *dip* máximo no dado de saída pós-migração de Kirchhoff no domínio do tempo em um dado empilhado.**

Modificado de Dondurur (2018).

### 2.1.1.3 Abertura

Juntamente com o *dip*, a abertura é o parâmetro mais importante para a migração de Kirchhoff. De acordo com DONDURUR (2018), a migração de Kirchhoff realiza uma soma sobre as hipérboles de difração ao longo dos dados sísmicos. No entanto, as hipérboles de difração se estendem a comprimentos e tempos infinitos. Como é impossível trabalhar com hipérboles infinitas, elas são truncadas na dimensão espacial. A extensão espacial da hipérbole de difração que realmente abrange a soma é denominada abertura de migração ou largura da abertura e é definida como o número de traços envolvidos no cálculo ou a distância horizontal máxima na qual a hipérbole de difração se estende (figura 19). A forma da hipérbole é governada pela velocidade no ápice. Para um meio simples com velocidade crescente verticalmente, uma hipérbole de difração com velocidade mais lenta também tem uma largura de abertura menor do que a hipérbole com velocidade mais rápida (figura 13). Isso significa que se a velocidade simplesmente aumenta com a profundidade, são necessárias aberturas maiores para colapsar as hipérboles de difração mais profundas pela migração de Kirchhoff.

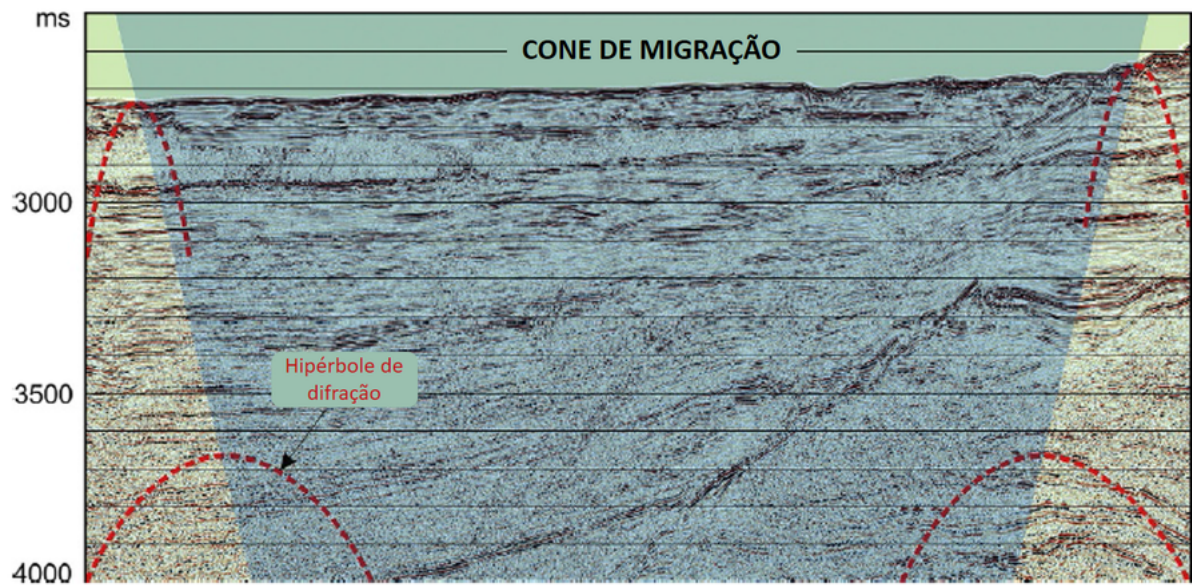


**Figura 19 – (A) A abertura da migração é o número máximo de traços ou a distância lateral máxima envolvida no cálculo da migração. (B) A curvatura da hipérbole é controlada pela velocidade do meio. Em um campo de velocidade que aumenta com a profundidade, teremos aberturas menores para hipérboles com velocidades mais baixas em profundidades rasas.**

Modificado de Dondurur (2018).

Uma vez que a abertura mais ampla, ou velocidade mais alta, denota mais migração, eventos mais profundos são migrados mais do que eventos mais rasos, proporcionando um mergulho constante. Essa situação resulta na migração de Kirchhoff sendo efetiva em uma área cônica denominada cone de migração (figura 20). Em alguns casos, degradações podem surgir em áreas próximas às bordas da seção migrada, fora do cone de migração. Como a área efetiva se estreita em direção às partes mais profundas das seções sísmicas, linhas 2D relativamente curtas são evitadas na migração de Kirchhoff, pois sua área efetiva nas partes mais profundas será extremamente estreita.





**Figura 20 – A migração de Kirchhoff é eficaz em uma área cônica dos dados de entrada (zona sombreada) porque as hipérboles de difração, ao longo das quais a soma é realizada, se alargam para as partes mais profundas da seção devido à velocidade verticalmente crescente.**

Modificado de Dondurur (2018).

A eficácia da migração Kirchhoff é diretamente proporcional à largura da abertura: aberturas maiores levam a uma melhor resolução lateral no dado de saída da migração. Por outro lado, o tempo de execução do algoritmo também aumenta significativamente à medida que a abertura aumenta. Aberturas desnecessariamente altas requerem muito tempo computacional e, portanto, podem não ser econômicas. Logo, uma abertura de migração ideal, é suficientemente grande para uma migração efetiva, mas pequena o suficiente para evitar um tempo computacional desnecessariamente longo. YILMAZ (2008) explica que a migração de pequena abertura elimina eventos de mergulho acentuado na seção 2D resultante. Em outras palavras, vemos que o uso de uma abertura muito pequena causa uma ação de filtragem por mergulho dos eventos ou *dip filtering* durante a migração, porque uma abertura pequena exclui os flancos mais íngremes do somatório da hipérbole de difração (figura 21).

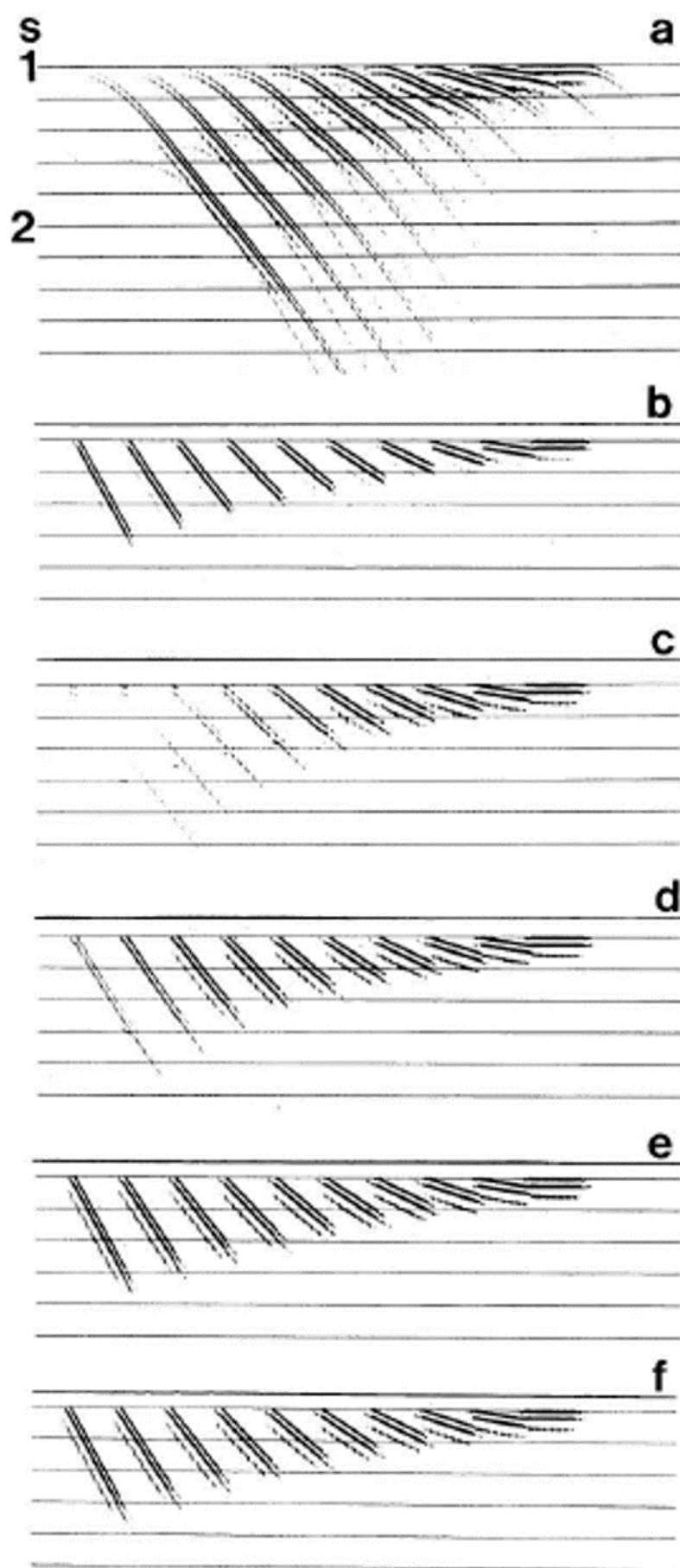


Figura 21 – Testes para largura de abertura na migração de Kirchhoff: (a) uma seção de deslocamento zero que contém eventos inclinados com velocidade de 3500 m/s, (b) migração desejada usando o método de mudança de fase; Migração de Kirchhoff usando (c) 35 traços, (d) 70 traços, (e) largura de meia abertura de 150 traços e (f) largura de meia abertura de 256 traços

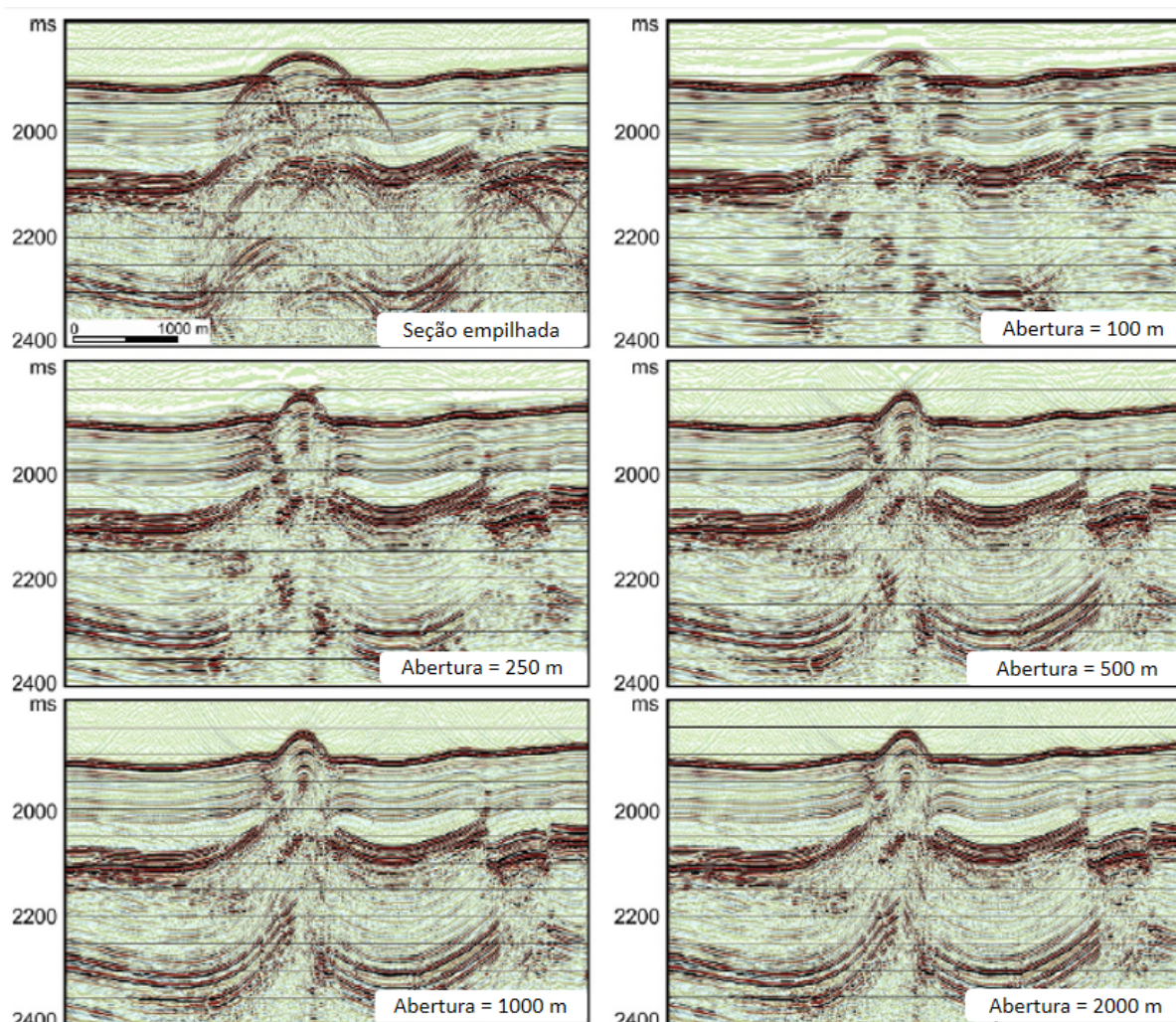
Yilmaz (2008).

Segundo DONDURUR (2018), para um evento de reflexão específico com um mergulho de  $\theta$  e uma profundidade de  $h$ , a largura da abertura  $d$  pode ser calculada a partir de:

$$d = \frac{h}{\tan\theta}$$

A figura 22 mostra o efeito da abertura de migração no colapso de difrações em dados sísmicos reais usando uma migração Kirchhoff *poststack* no domínio do tempo. Aberturas muito pequenas causam perda total de mergulhos acentuados, como os flancos da estrutura diapírica, e ruído aleatório, especialmente nas partes mais profundas dos dados, é convertido em eventos horizontais espúrios. Aberturas muito grandes simplesmente causam muito tempo computacional. Portanto, uma largura de abertura ideal deve ser selecionada para garantir a qualidade da imagem de saída, que geralmente requer vários testes antes do processamento da produção. Além disso, recomenda-se que a largura da abertura seja mantida semelhante para levantamentos inteiros em uma determinada área, para manter as especificações de amplitude de todos os levantamentos semelhantes, tornando possível comparar diferentes seções sísmicas.





**Figura 22 – O efeito da abertura em um dado resultante de uma migração de Kirchhoff pós-stack no domínio do tempo. Aberturas desnecessariamente pequenas causam perda de eventos de mergulho acentuado, como os flancos da estrutura diapírica no centro.**

Modificado de Dondurur (2018).

A migração com uma pequena abertura causa eventos sub horizontais espúrios nas partes mais profundas das seções, um processo conhecido como *smearing* (aparecimento de 'manchas' no dado). Estes são especialmente significativos em tempos tardios de uma seção, onde as amplitudes de reflexão primária diminuem e o ruído aleatório se torna dominante.

Resumidamente, YILMAZ (2008) e DONDURUR (2018) advertem que:

- pequenas aberturas causam a supressão de eventos de mergulho acentuado e resultam em eventos sub horizontais falsos, especialmente nas partes mais profundas da seção.
- uma abertura desnecessariamente grande aumenta significativamente o tempo computacional da migração e pode degradar a qualidade da imagem de saída na região mais rasa dos dados, quando a relação S/R da entrada é baixa.

### 3 Testes

Foi usado um dado da Bacia de Santos, cedido pela PGS, para testes de migração Kirchhoff, de forma a ratificar alguns dos conceitos explicados nas seções anteriores do presente trabalho. O referido dado se encontra no domínio do tempo e pré-empilhado. Os seguintes testes foram realizados:

- 1) teste de regularização: que consiste na remoção manual de um traço a fim de entender o que pode ocorrer quando um dado não foi regularizado corretamente.
- 2) teste de espaçamento dos dados de entrada: que diz respeito aos efeitos práticos do uso de diversos espaçamentos entre os traços do dado a ser migrado.
- 3) teste de amostragem vertical: sobre a frequência de Nyquist para cada amostragem.
- 4) resposta impulsiva: para análise da resposta ao impulso migrado com diferentes restrições de *dip*.
  - teste de *dip* em um plano de *offset*: no qual se analisa um mesmo plano migrado com diversas limitações de *dip*.

#### 3.1 Porque um Dado Precisa Ser Regularizado

A migração de Kirchhoff depende da interferência construtiva do sinal e destrutiva dos ruídos. Sem um dado regularizado, o processo de interferência do operador de migração fica comprometido. De forma similar ao que ocorre com falhas geológicas em refletores migrados, se um traço for removido de uma linha sísmica pré-migração de Kirchhoff (figuras 23 e 24), teremos um sorriso de miração, ao calcularmos a diferença entre o dado de entrada e o *output* do dado migrado (figura 25).

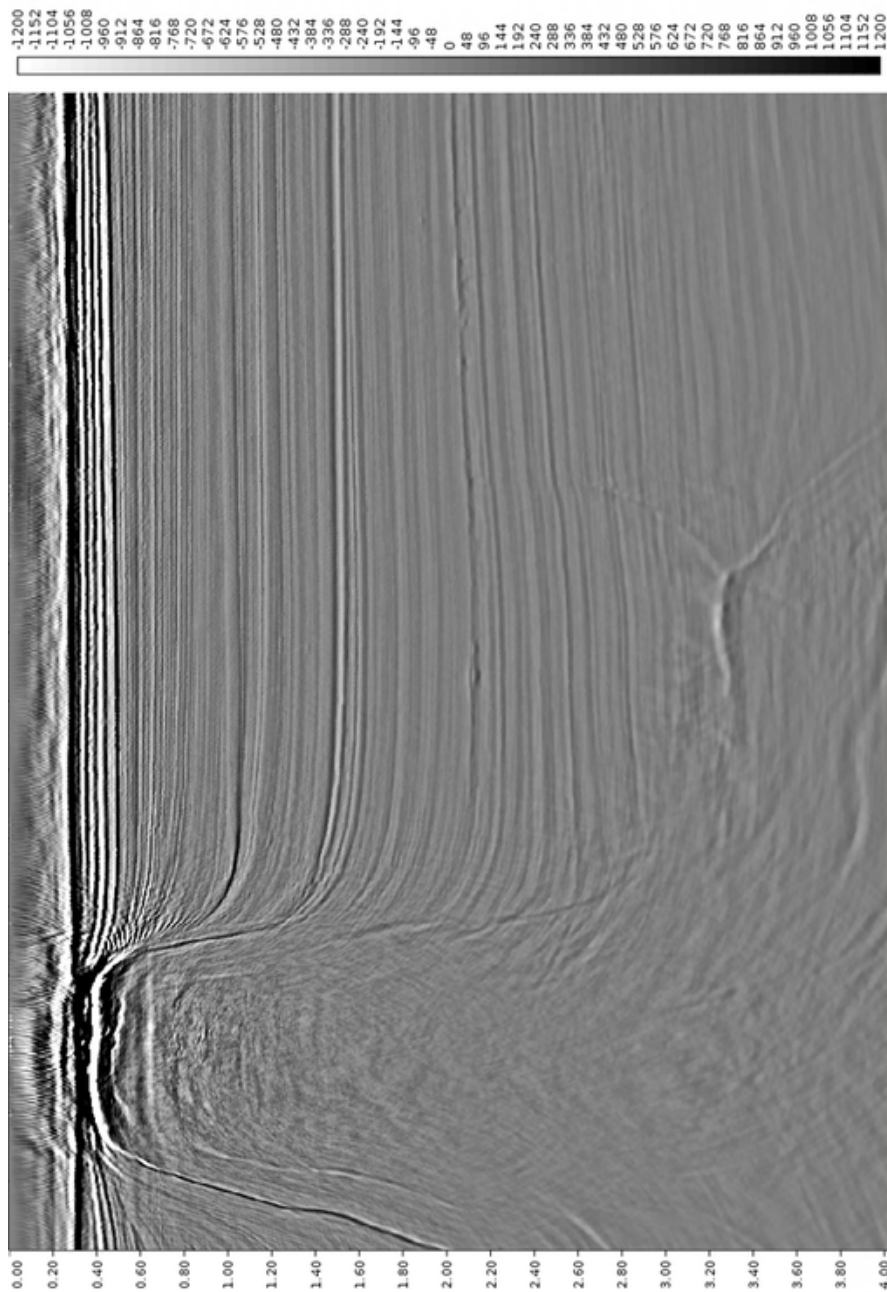


Figura 23 – Em um dado de entrada da Bacia de Santos, temos a linha sísmica na qual será performedo o teste de regularização.  
(Cortesia: PGS)



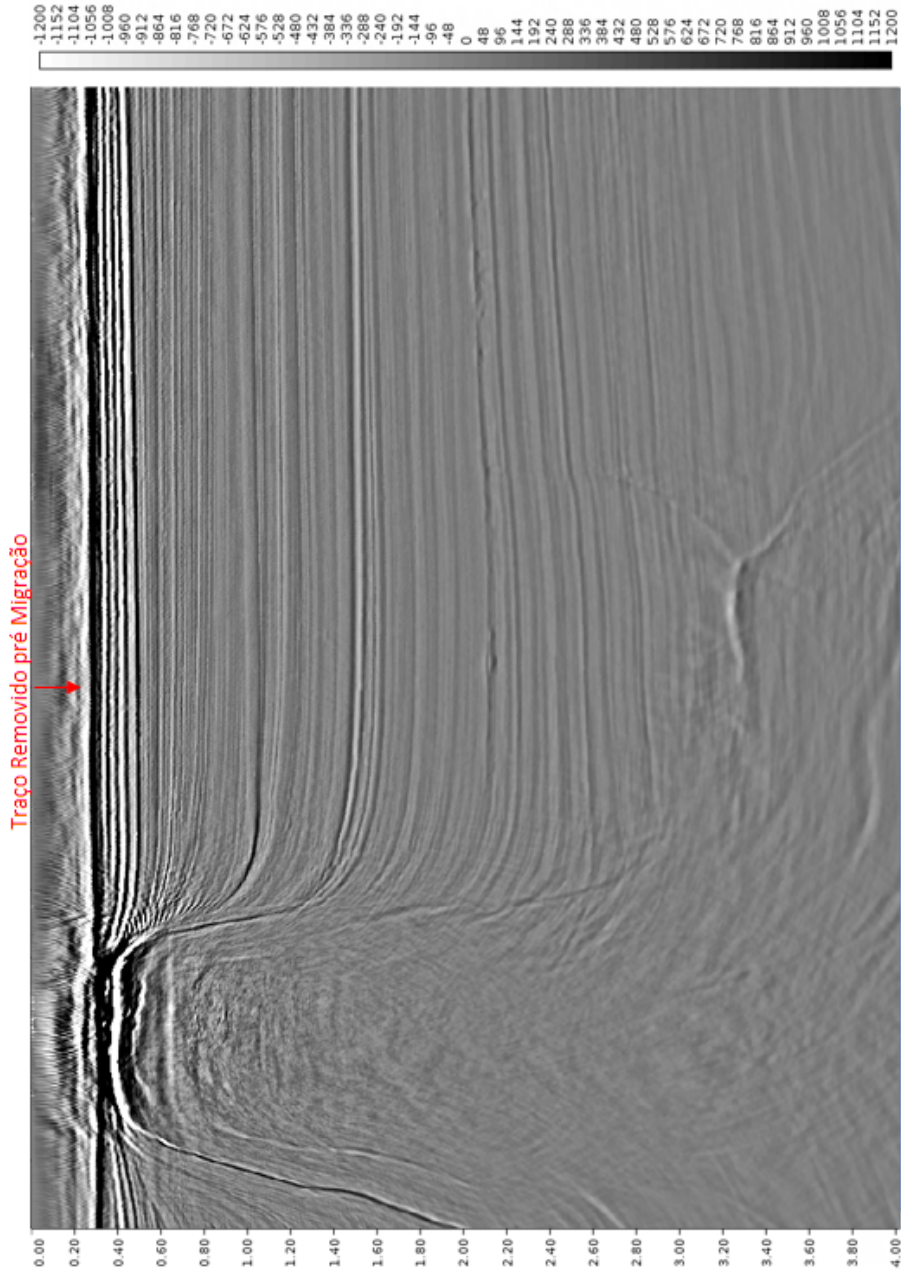


Figura 24 – Dado de saída, resultante da remoção de um traço do dado de entrada, localizado na região indicada pela seta vermelha.  
(Cortesia: PGS)

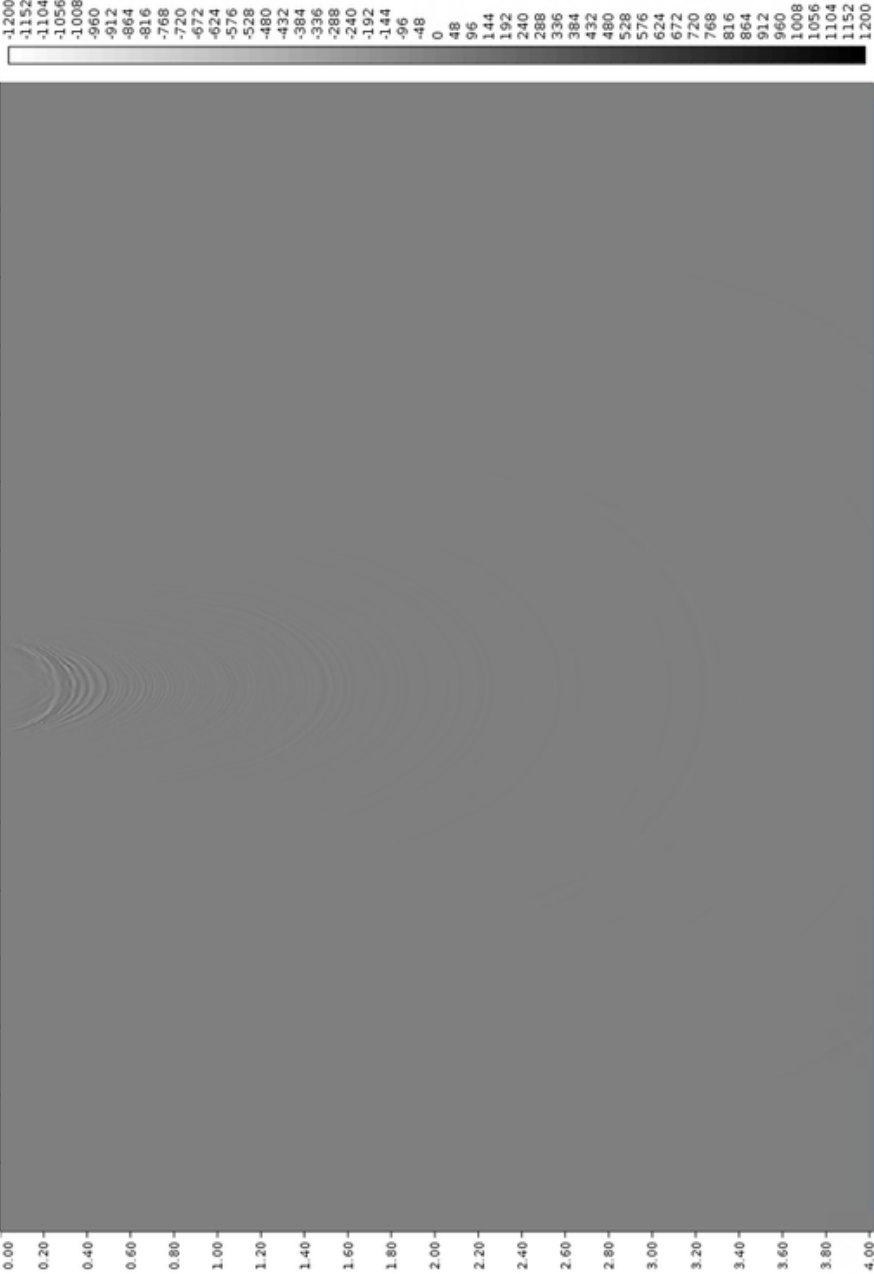


Figura 25 – A migração do traço retirado do dado de entrada resulta em um sorriso de migração.  
(Cortesia: PGS)



### 3.2 Espaçamento dos Dados de Entrada

Diferente do falseamento unidimensional muito estudado no universo de processamento de sinais acústicos, quando se diminui a amostragem de um *grid* é importante fazer mudanças no campo de número de ondas através do domínio F-K para se evitar o *aliasing* espacial. Como o espaçamento se encontrava originalmente em 12.5m x 12.5m (figura 26) não houve decimação nesse caso, e o eixo K se encontrava com os limites inferior e superior iguais a -0.5 e 0.5, respectivamente. Contudo, ao reamostrar o referido dado para 25m x 25m (figura 27), foi aplicado um filtro *anti-aliasing* para limitar o eixo K entre -0.25 e 0.25. E se for reamostrado para 50m x 50m, consequentemente o eixo K deve ser limitado entre -0.125 e 0.125, evitando assim o falseamento do dado de saída (figura 28).

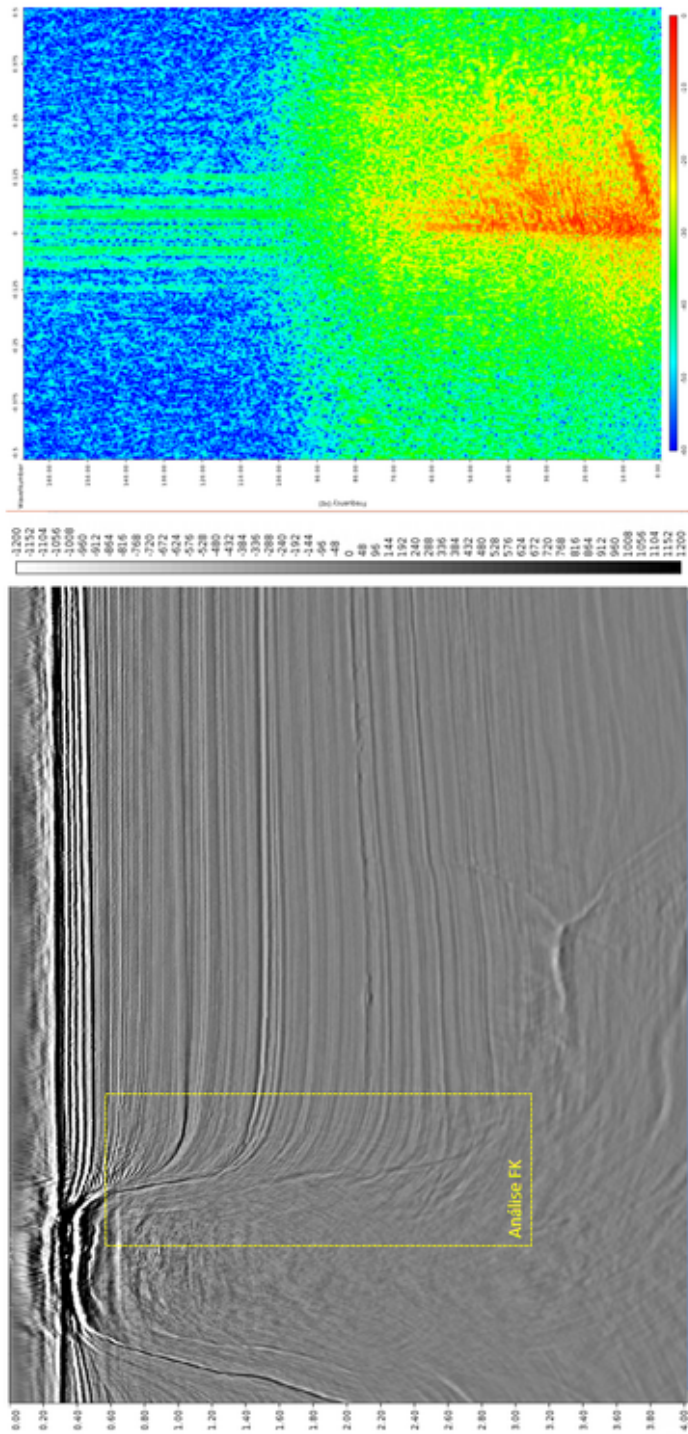


Figura 26 – Espaçamento entre os traços de entrada para migração: 12.5mx12.5m. O gráfico (direita) no domínio FK - Frequência vs. Número de Onda - representa dados do polígono (amarelo) na linha sísmica (esquerda). Nota-se que a classe em vermelho - que mergulha do lado direito ( $F > 0$ ) até as frequências e K iguais a zero - corresponde aos refletores de maior dip na região da parede do sal.

Cortesia: PGS.

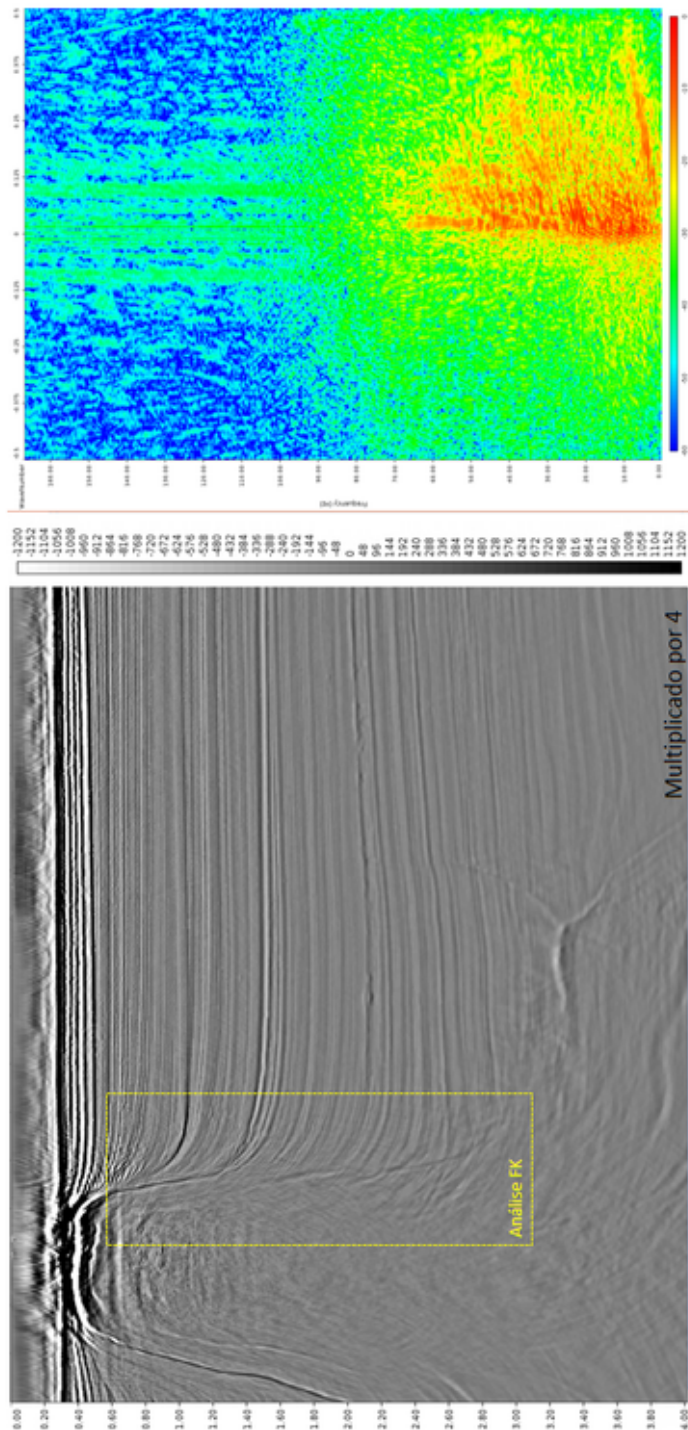


Figura 27 – Espaçamento entre os traços de entrada para migração: 25mx25m. O gráfico (direita) no domínio FK - Frequência vs. Número de Onda - representa dados do polígono (amarelo) na linha sísmica (esquerda). Nota-se que a classe em vermelho - que mergulha do lado direito ( $F > 0$ ) até as frequências e K iguais a zero - corresponde aos refletores de maior dip na região da parede do sal.

Cortesia: PGS.

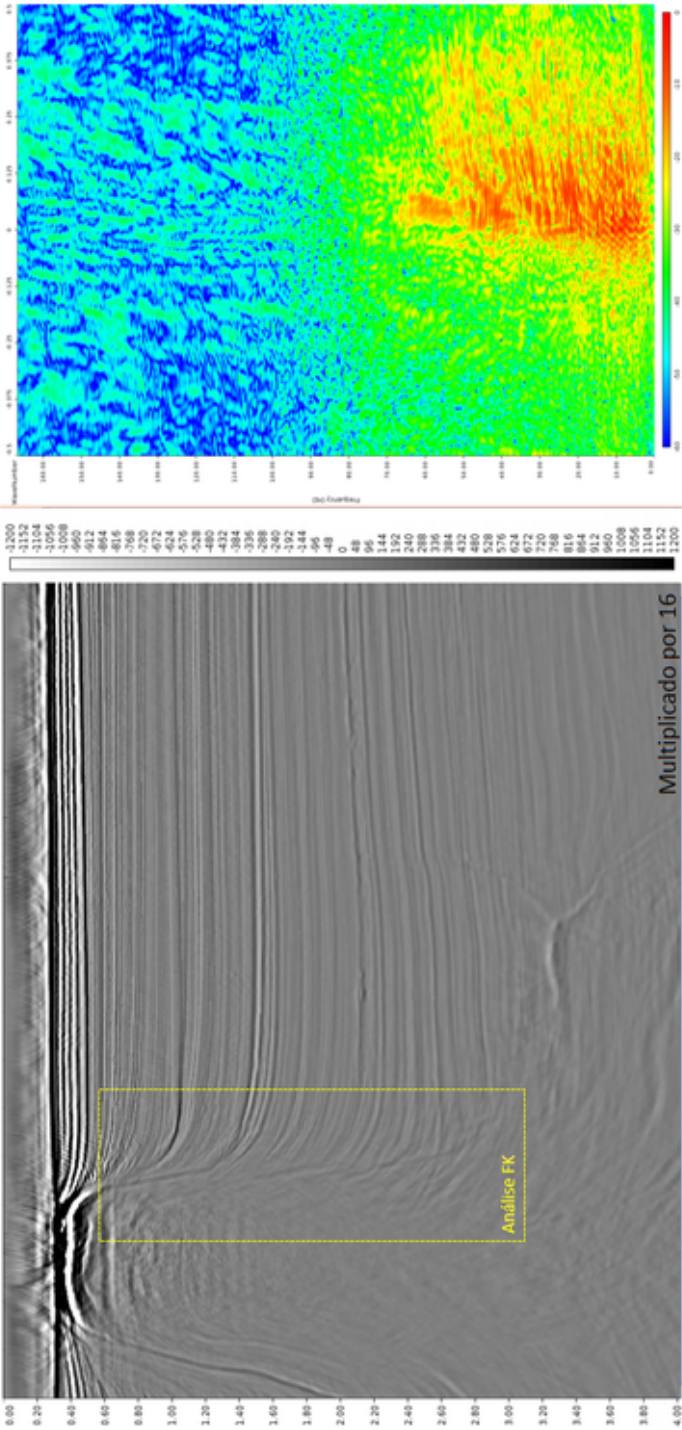


Figura 28 – Espaçamento entre os traços de entrada para migração: 50mx50m. O gráfico (direita) no domínio FK - Frequência vs. Número de Onda - representa dados do polígono (amarelo) na linha sísmica (esquerda). Nota-se que a classe em vermelho - que mergulha do lado direito ( $F > 0$ ) até as frequências e K iguais a zero - corresponde aos refletores de maior dip na região da parede do sal.

Cortesia: PGS.

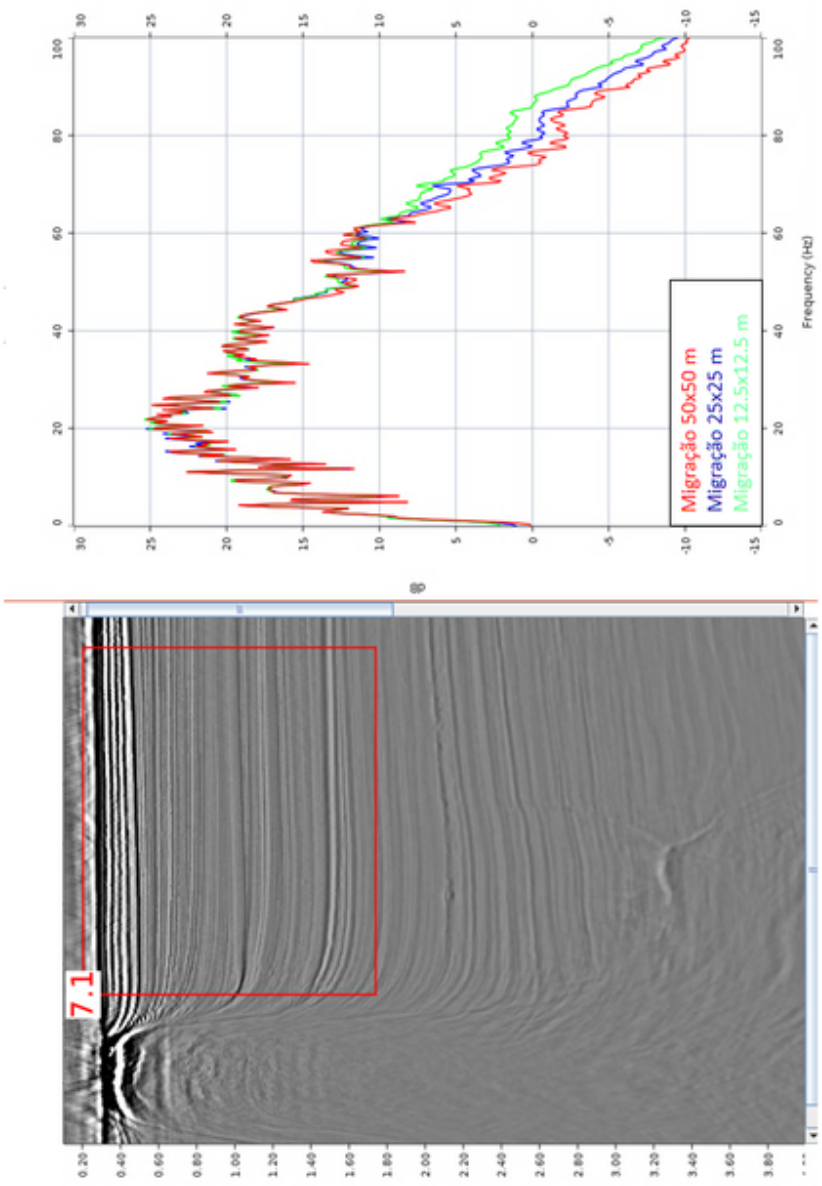


Figura 29 – Espectro de frequências de uma parte do polígono vermelho (7.1) referente aos dados de amostragem 50x50m (vermelho), 25x25m (azul) e 12.5x12.5m (verde) dos quais o último apresenta maior conteúdo de frequências altas (60Hz -100Hz).

Cortesia: PGS.

Nota-se que a classe em vermelho - que mergulha do lado direito ( $F > 0$ ) até as frequências e K iguais a zero - corresponde aos refletores de maior mergulho no flanco de sal da linha sísmica estudada. Ela diminui de mergulho em cada um dos 3 gráficos da transformada F-K devido ao aumento do espaçamento dos traços sísmicos (figuras 26, 27, 28).

### 3.3 Amostragem Vertical

Na presente seção foi usado um plano de *offset* regularizado, no qual foram testadas as amostragens verticais de 3 ms e 4 ms, cujos resultados estão expressos pelas figuras 30 e 31, respectivamente:



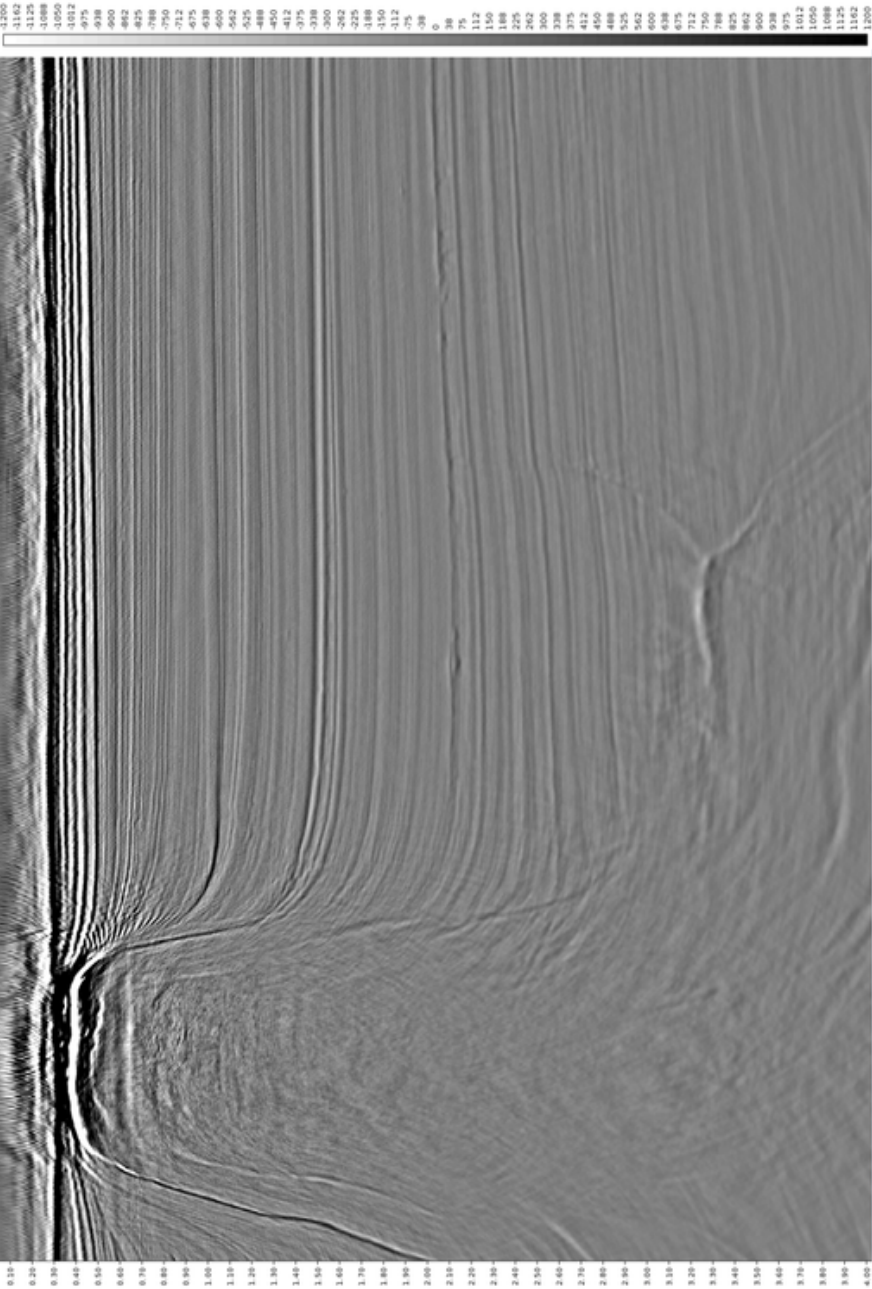


Figura 30 – Plano de *offset* regularizado cuja migração foi feita com amostragem vertical a cada 3ms.

Cortesia: PGS.

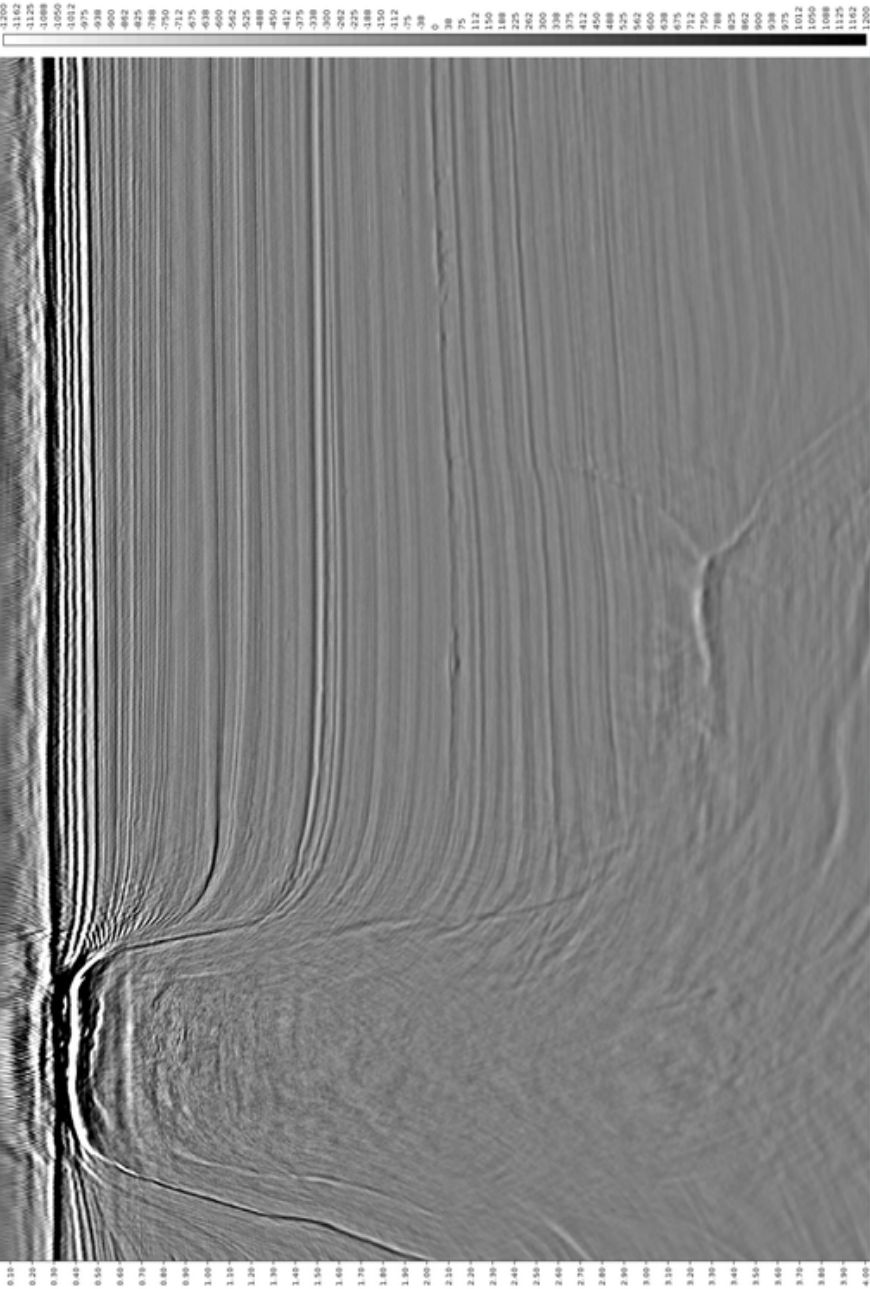


Figura 31 – Plano de *offset* regularizado cuja migração foi feita com amostragem vertical a cada 4ms.

Cortesia: PGS.



Antes da reamostragem temporal é preciso aplicar um filtro anti-aliasing para evitar o falseamento no dado de saída. Esse filtro é baseado na frequência de Nyquist:

$$f_{Nyquist} = \frac{1}{2\Delta t}$$

onde,  $\Delta t$  é o intervalo de amostragem.

Logo para

- $\Delta t = 4 \text{ ms}$  , fica  $f_{Nyquist} = 125\text{Hz}$
- $\Delta t = 3 \text{ ms}$  , fica  $f_{Nyquist} = 166,67 \text{ Hz}$

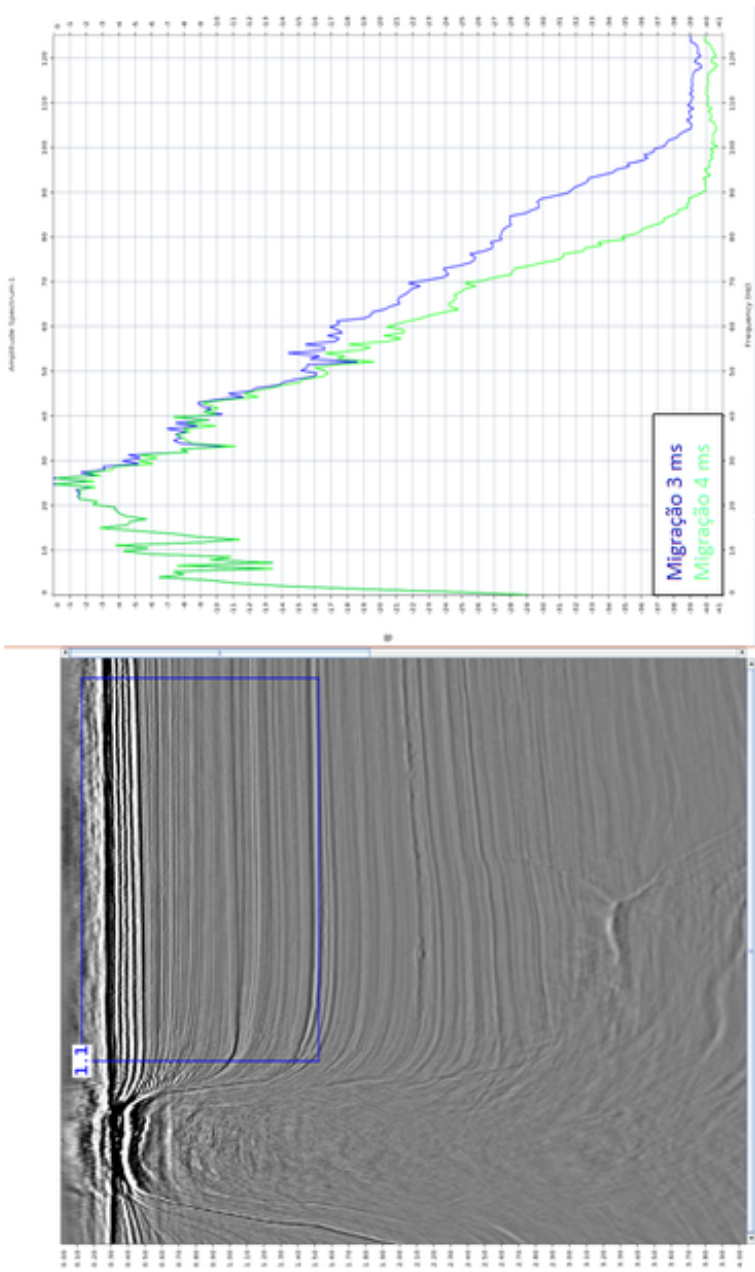


Figura 32 – Espectros de frequência dos planos de offset com amostragens verticais de 3ms (azul) e 4ms (verde) mostram que o conteúdo de frequências cai significativamente nas frequências mais altas para o plano com taxa de amostragem mais baixa.

Cortesia: PGS.

### 3.4 Resposta Impulsiva

No presente teste foi usado um traço de afastamento curto, ou *near offset*, para gerar respostas ao impulso migrado com meia abertura máxima de 6 km, e mergulhos de:

- valores ilimitados (figura 33)
- 50° (figura 34)
- 60° (figura 35)
- 70° (figura 36)
- 80° (figura 37)

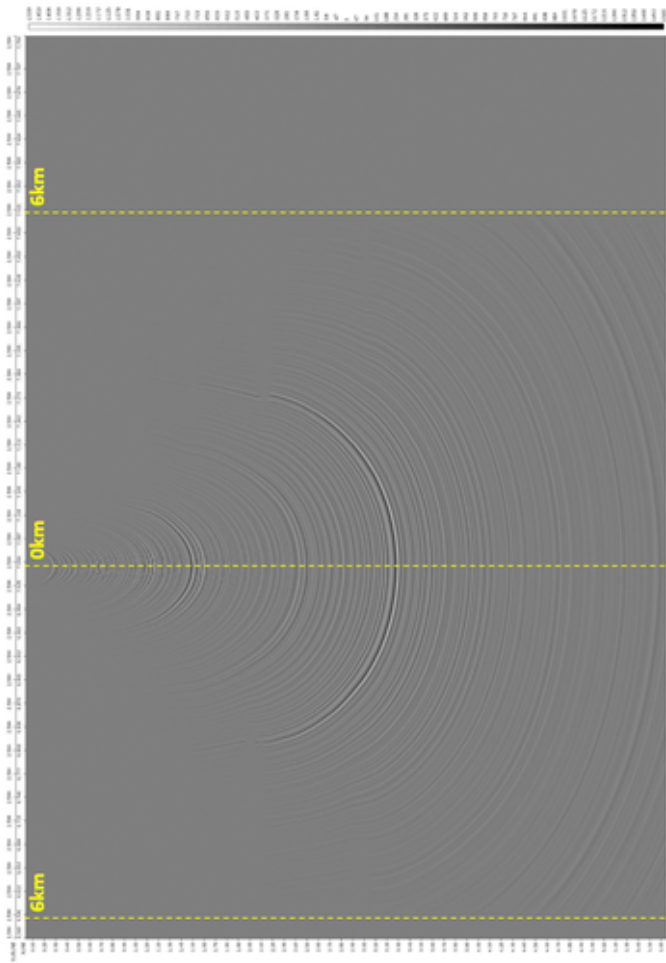


Figura 33 – Resposta a um impulso sísmico migrado sem restrição de mergulho.  
Cortesia: PGS.

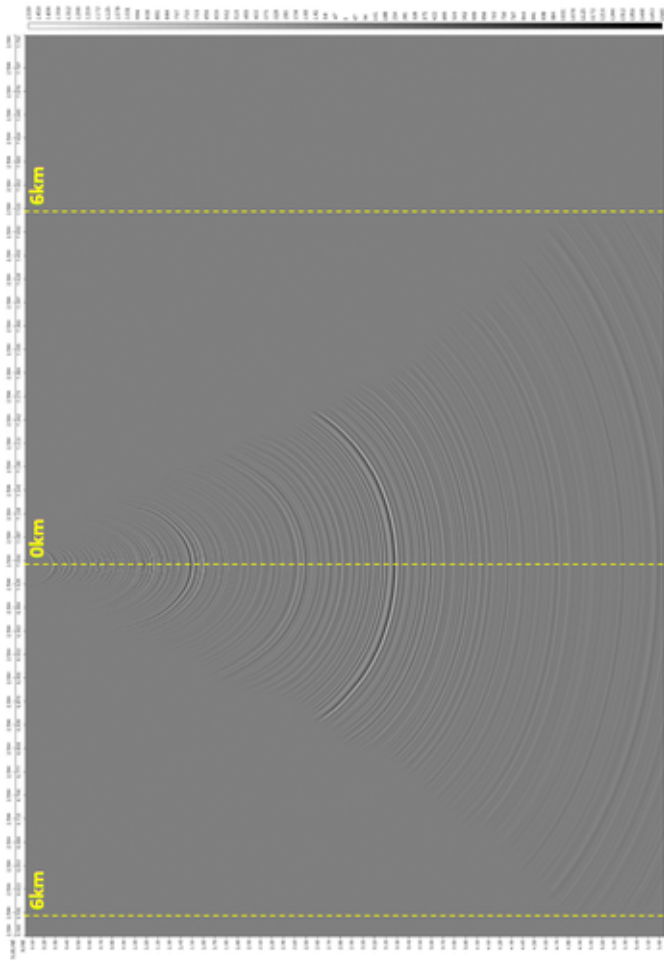


Figura 34 – Resposta a um impulso sísmico migrado com restrição de mergulho equivalente a 50°.  
Cortesia: PGS.

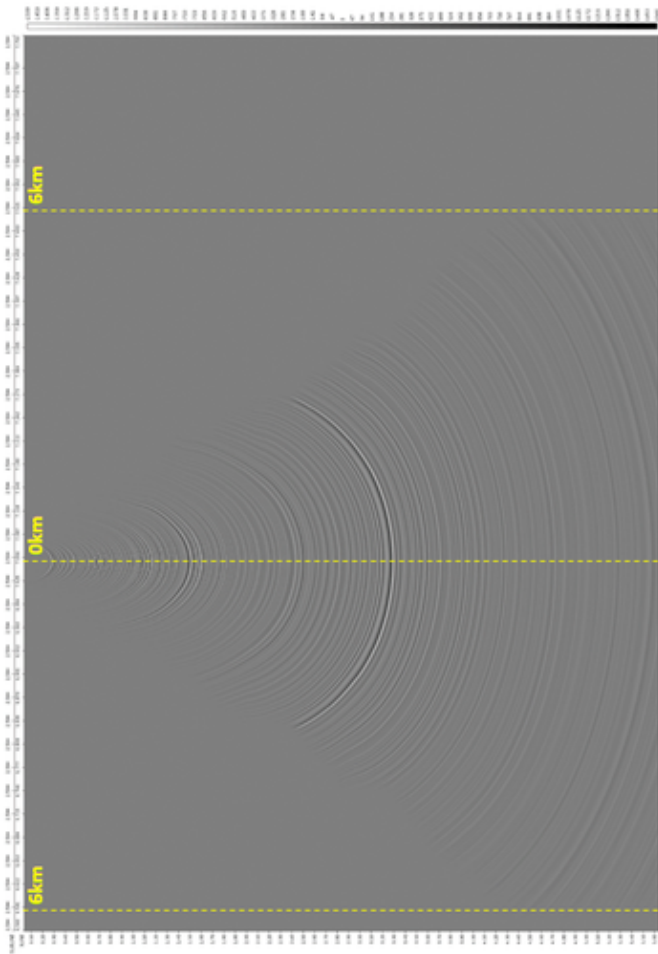


Figura 35 – Resposta a um impulso sísmico migrado com restrição de mergulho equivalente a 60°.  
Cortesia: PGS.

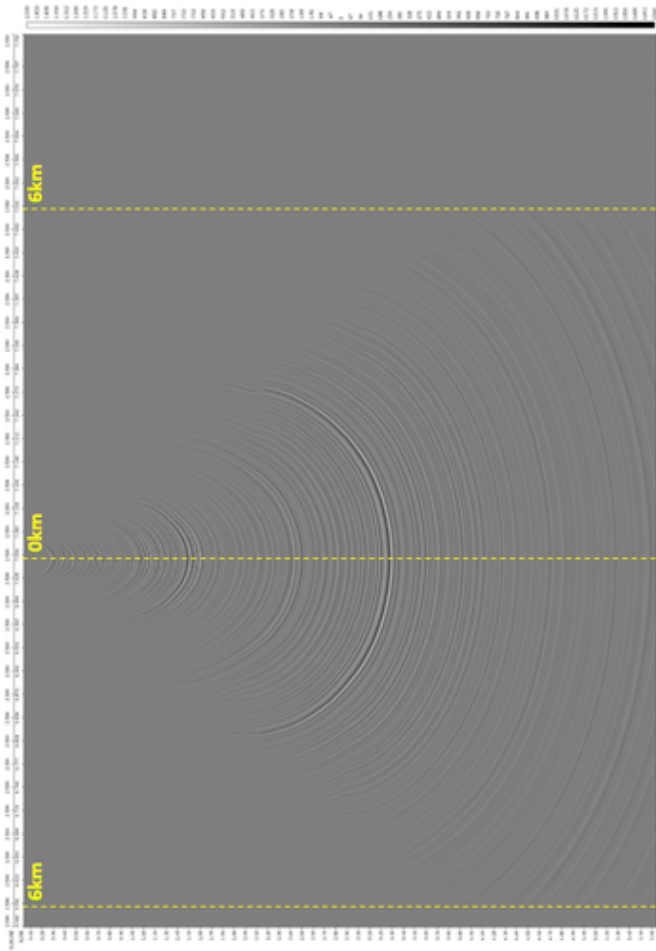


Figura 36 – Resposta a um impulso sísmico migrado com restrição de mergulho equivalente a 70°.  
Cortesia: PGS.

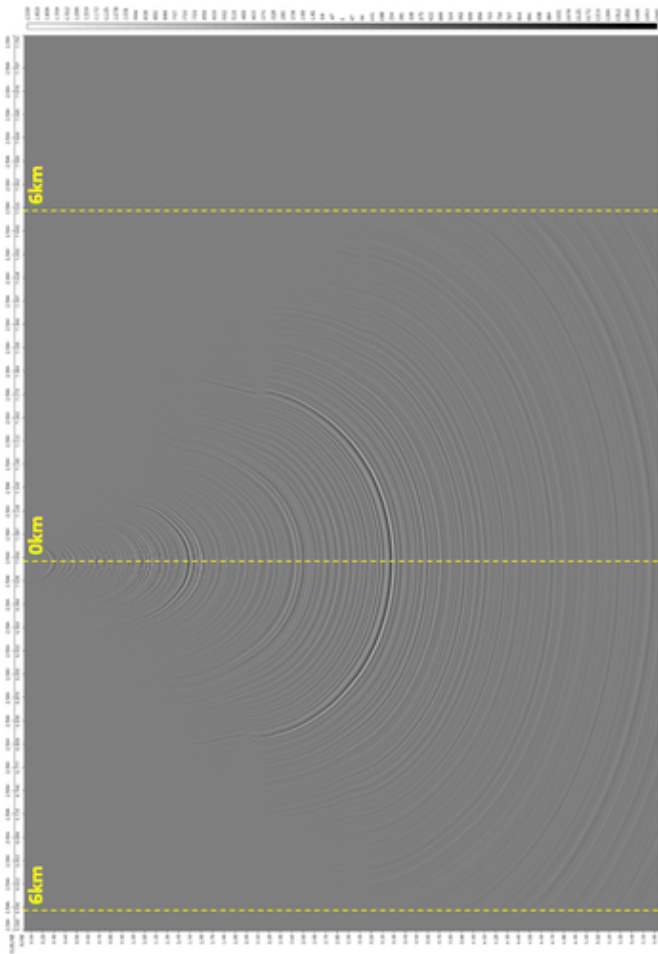


Figura 37 – Resposta a um impulso sísmico migrado com restrição de mergulho equivalente a 80°.  
Cortesia: PGS.



O traço usado foi proveniente de uma *inline* (figura 38) em plano de offset regularizado:

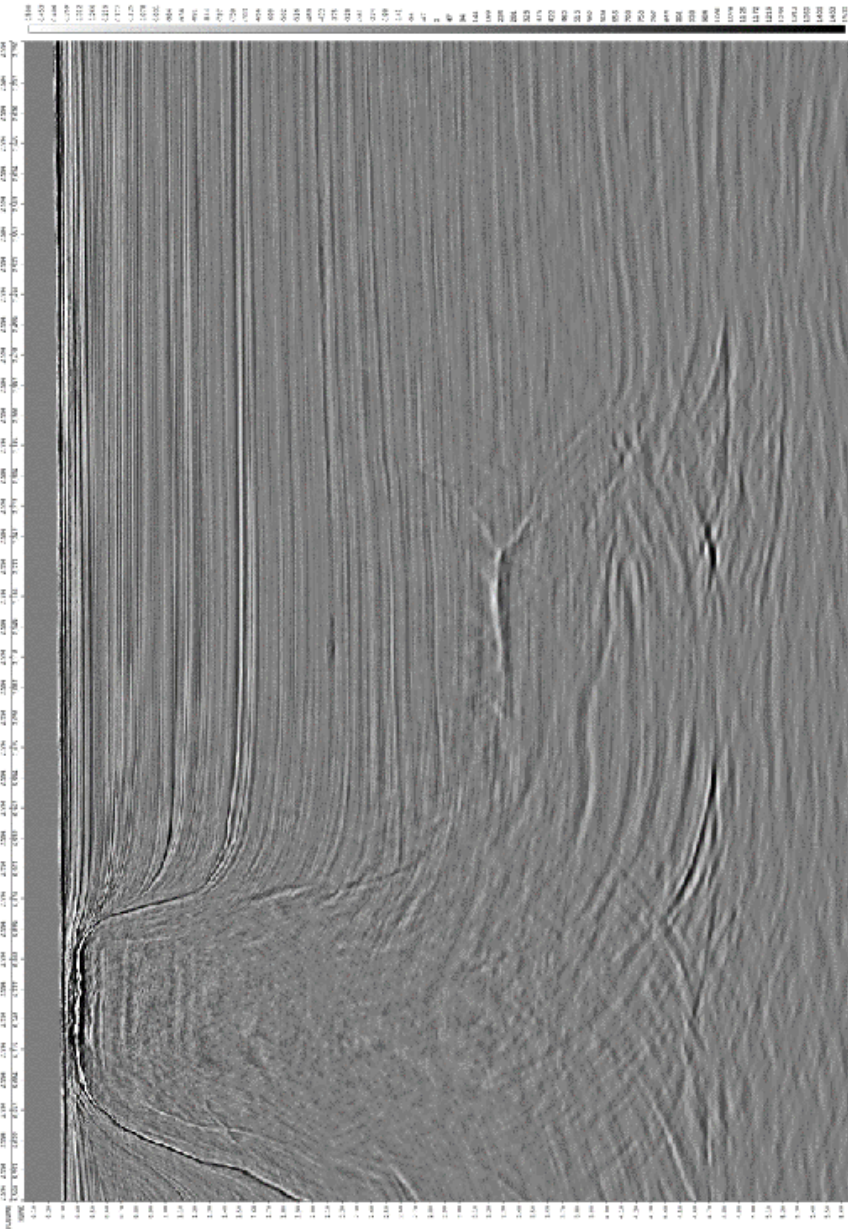


Figura 38 – Plano de offset do qual um traço foi usado para análise das respostas aos impulsos sísmicos migrados com ou sem as restrições acima descritas.  
Cortesia: PGS.

### 3.4.1 Restringindo o *Dip* Máximo

Um teste secundário, proveniente da mesma *inline* acima (figura 38), foi feito com a finalidade de comparar os resultados dos limites de *dip* no dado migrado. Os mesmos limites testados para a resposta impulsiva foram analisados agora para a *inline* em questão:

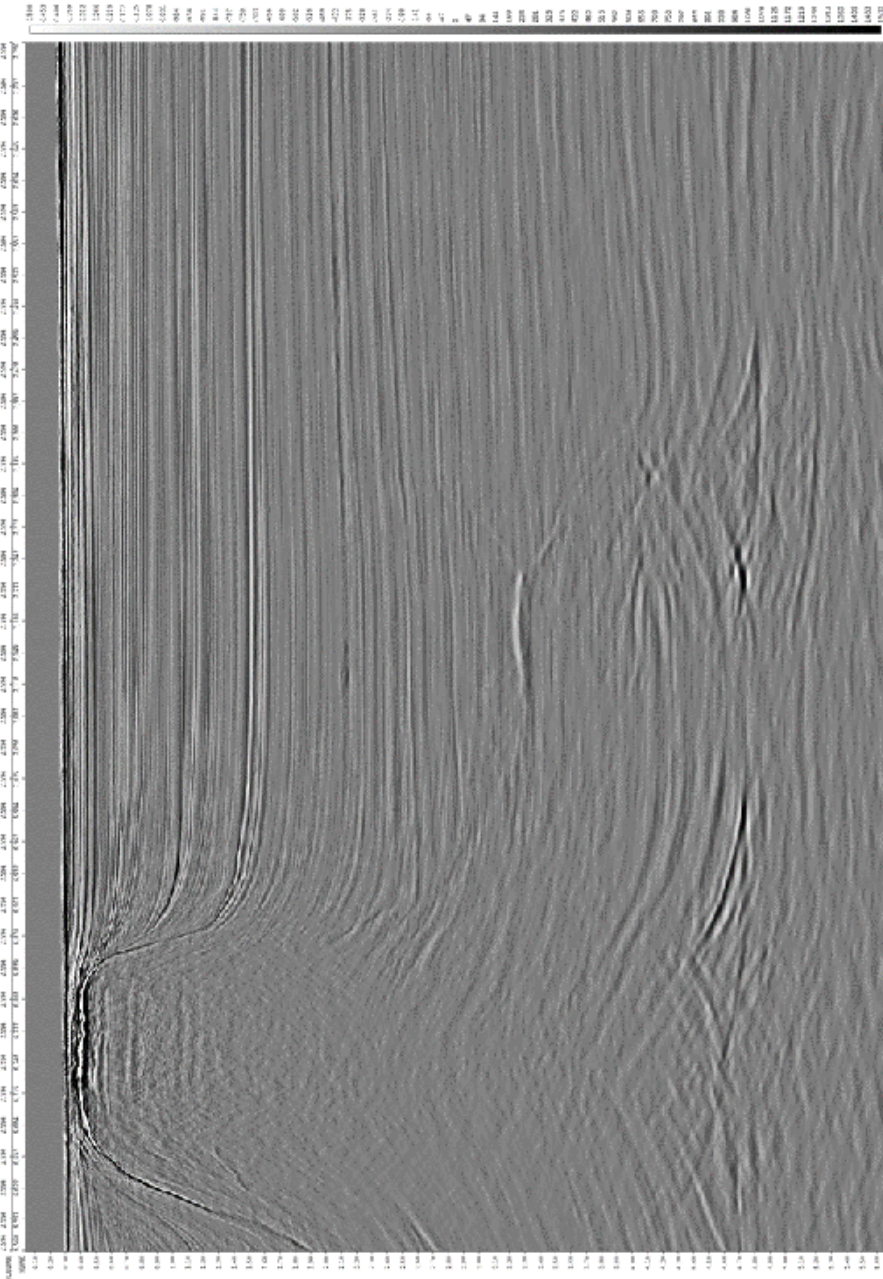


Figura 39 – A mesma *inline* usada como dado de entrada anteriormente, agora refletindo o resultado da migração de Kirchhoff com limite de restrição equivalente a 50°.  
Cortesia: PGS.

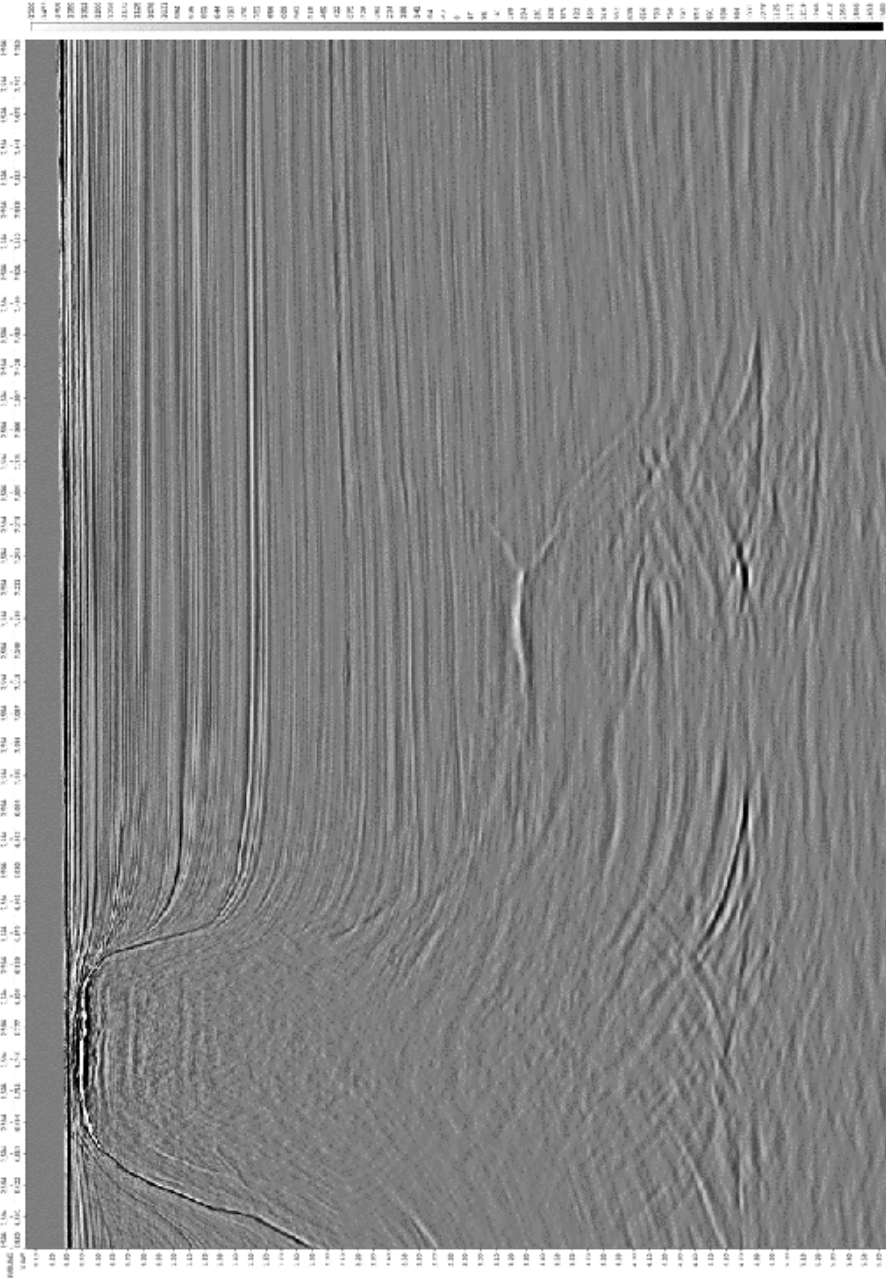


Figura 40 – A mesma *inline* usada como dado de entrada anteriormente, agora refletindo o resultado da migração de Kirchhoff com limite de restrição equivalente a 60°.  
Cortesia: PGS.



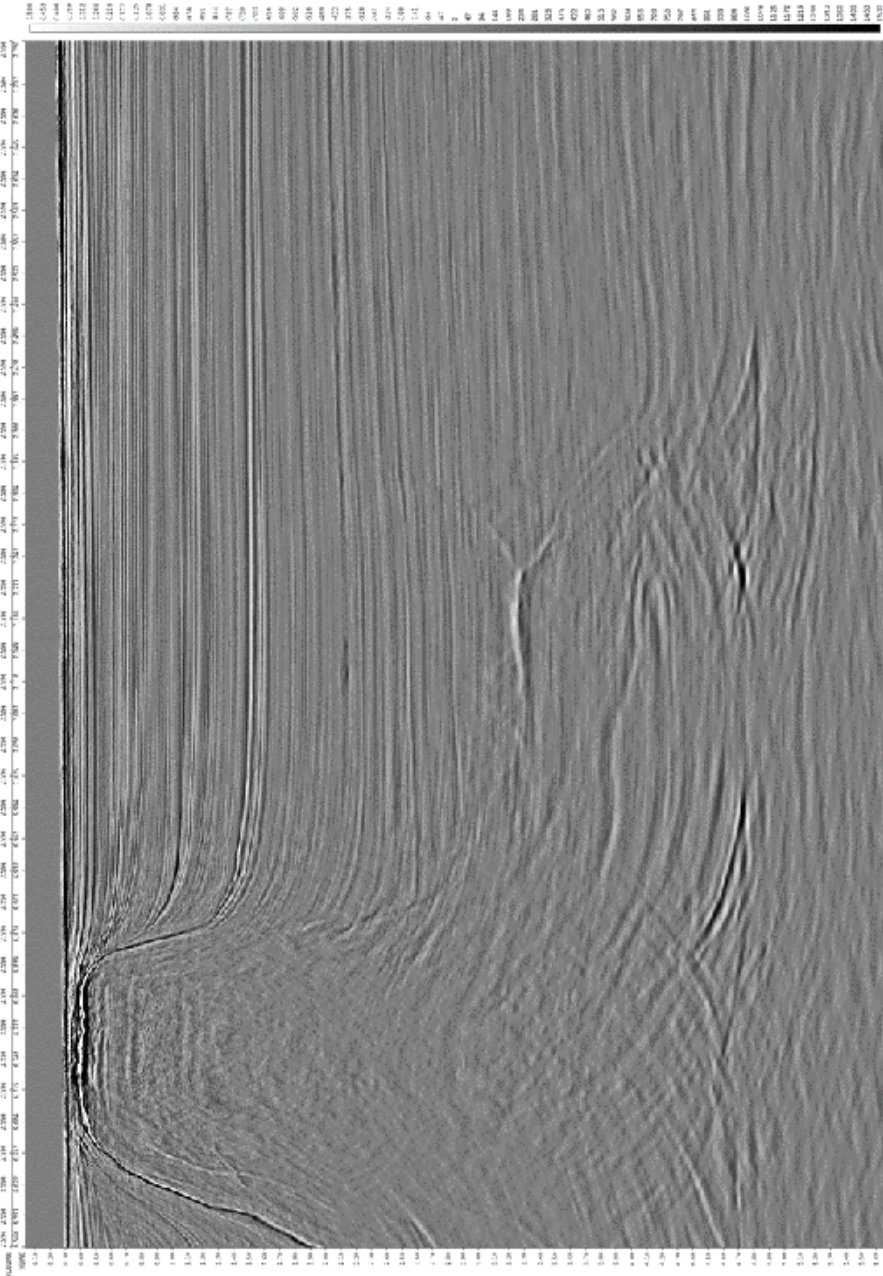


Figura 41 – A mesma inline usada como o dado de entrada anteriormente, agora refletindo o resultado da migração de Kirchhoff com limite de restrição equivalente a 70°.

Cortesia: PGS.

Os resultados mostram que o flanco de sal à esquerda não é perfeitamente resolvido quando a restrição de dip aumenta de 50 para 60 graus (figuras ?? e 40). Por outro lado, os flancos de sal melhoram sua resolução e definição a cada aumento do ângulo máximo de restrição, não só de 50° até 80° (figuras 39, 40, 41 e 42), mas também do maior limite (80°) para o dado migrado sem restrição de mergulho (figura 38). Contudo, quando o ângulo de restrição chega a 80° o nível de ruídos aumenta ao ponto de atrapalhar a interpretação da geologia da seção sísmica.



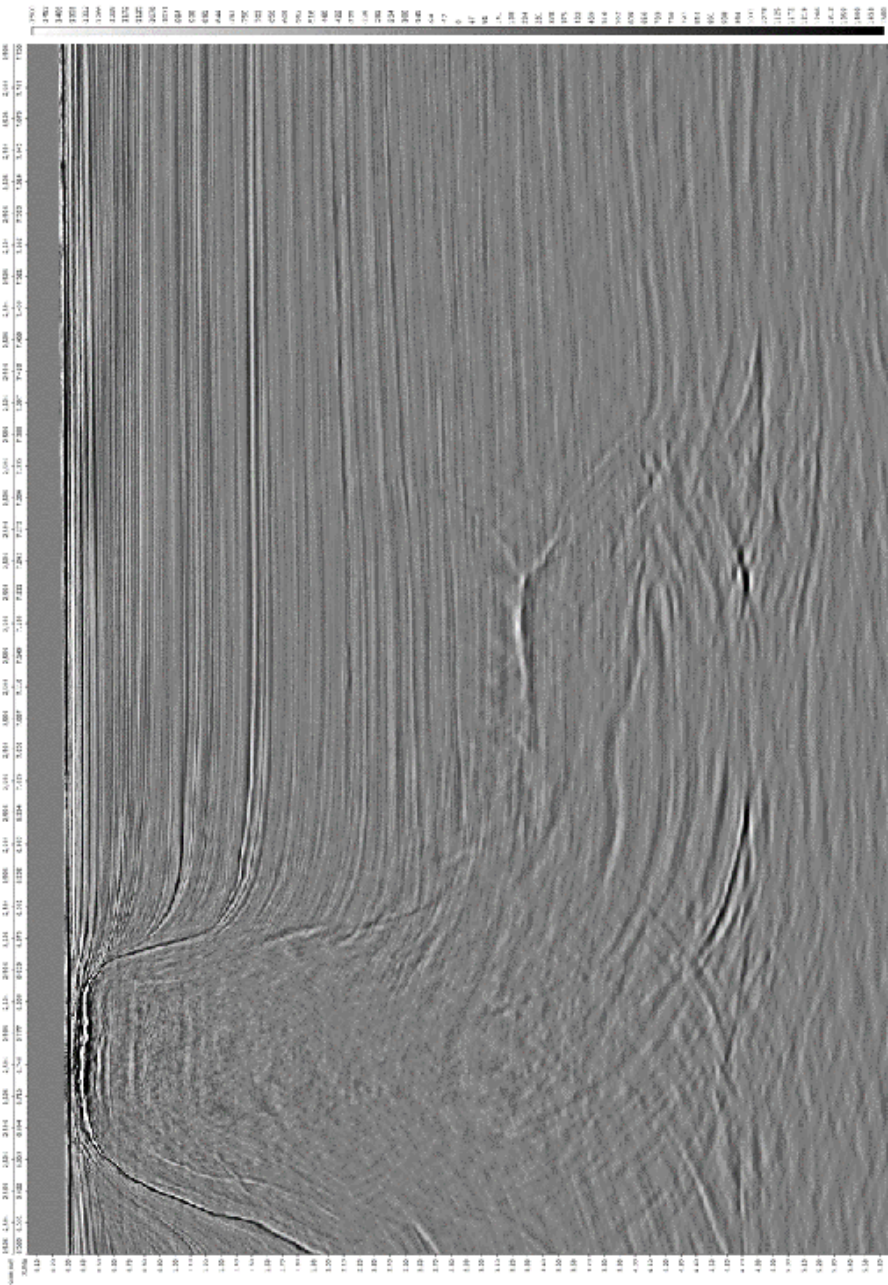


Figura 42 – A mesma *inline* usada como o dado de entrada anteriormente, agora refletindo o resultado da migração de Kirchhoff com limite de restrição equivalente a 80°.

Cortesia: PGS.

## 4 O que se Publicou Recentemente

### 4.1 Abertura Otimizada em Dados Kirchhoff

No trabalho de Klovov e Fomel (2013), é apresentado um método para selecionar a melhor abertura possível para a migração de Kirchhoff. A metodologia proposta consiste em filtrar eventos (por ângulo) cujo mergulho não corresponde ao verdadeiro *dip*. O empilhamento das imagens parciais alteradas corresponde à migração com uma abertura ideal. Exemplos de dados sintéticos e reais demonstram que essa abordagem é capaz de reduzir o ruído de migração enquanto preserva a energia de difração.

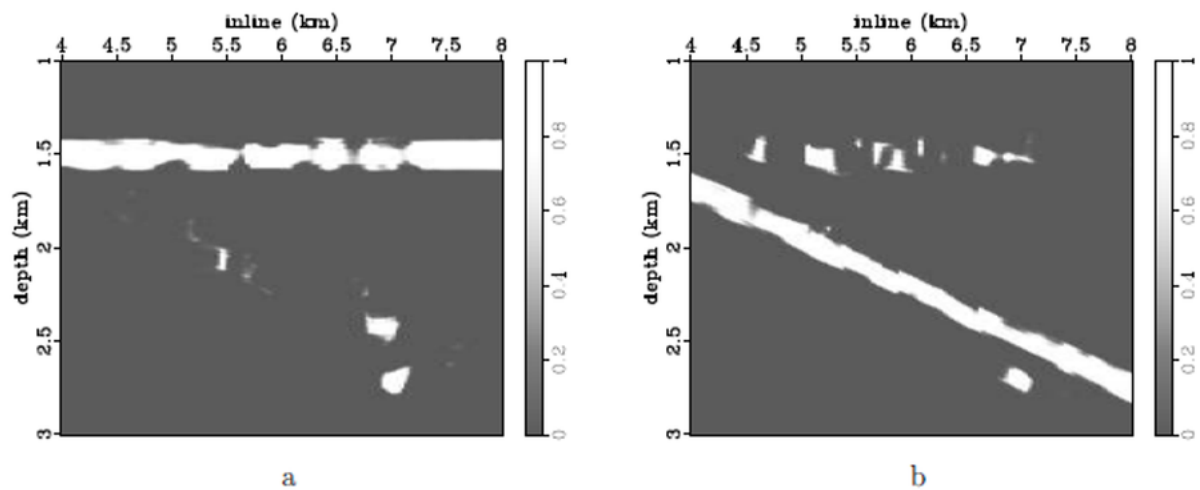
Para Leveille *et al.* (2011 apud KLOKOV; FOMEL, 2013), a migração de Kirchhoff continua sendo uma ferramenta popular para imageamento sísmico. Ela lida com cada traço de entrada separadamente, permitindo que o usuário trabalhe com conjuntos de dados de qualquer configuração (incluindo geometria irregular) e aplique análises focadas no *target*. Uma das características da migração Kirchhoff é sua abertura global. O operador de migração distribui energia por uma ampla área descrita por uma superfície de resposta ao impulso. No entanto, uma imagem sísmica é construída apenas por uma parte local da superfície que toca um refletor. O restante não traz uma contribuição construtiva e, pior ainda, pode gerar artefatos de imagem (HERTWECK *et al.*, 2003a; SUN, 1998; KLOKOV; FOMEL, 2013). O problema do artefato pode ser resolvido limitando a abertura de migração. Inicialmente, o presente artigo traça uma linha temporal com vários métodos e técnicas de imageamento usando a abertura, propostos desde a década de 1990 até 2009. Em seguida, faz-se uma análise das imagens parciais para construção de uma função *taper*. Por fim, aplica-se essa função a dados sintéticos e reais.

Um campo de ondas sísmicas pode conter reflexões e difrações. Uma das diferenças é que as reflexões requerem uma abertura de migração estreita, enquanto as difrações requerem uma abertura o mais ampla possível. Portanto, todos os métodos que implicam limitação de abertura de migração são orientados para imagens ótimas de limites de reflexão e não de objetos de difração. Difrações caracterizam objetos geológicos pequenos, mas importantes, e desempenham um papel significativo na geração de imagens de limites de reflexão (KHAIDUKOV; LANDA; MOSER, 2004 apud KLOKOV; FOMEL, 2013). Sua atenuação pode causar uma perda significativa de resolução (NEIDELL, 1997 apud KLOKOV; FOMEL, 2013). Para que a resolução da imagem seja preservada, um método de otimização de migração deve ter como objetivo proteger o componente de difração. Neste artigo, é demonstrada uma abordagem que permite alcançar um tamanho de abertura ideal para os limites de reflexão, ao mesmo tempo em que se protege o componente de difração. A idéia principal é analisar as informações de mergulho em imagens parciais de *dip* constante.

#### 4.1.1 Analisando a Consistência dos Mergulhos

Uma abordagem para analisar a consistência de uma imagem parcial de mergulho constante é medir a inclinação local e construir uma função *taper* baseada nessa medida. A função *taper* deve proteger eventos cuja inclinação esteja próxima do *dip* constante correspondente. As inclinações que diferem significativamente daquelas do mergulho constante devem ser atenuadas. O clássico *Semblance* (TANER; KOEHLER, 1969 apud KLOKOV; FOMEL, 2013), como medida de coerência, pode ser usado para definir uma função de peso. A ponderação dos dados migrados corresponde à otimização da abertura de migração.

Para ilustração, medimos a coerência dos dados empilhados e obtemos essa função de semelhança  $S(\alpha; z; x)$  apresentada na figura 43. Valores de *Semblance* altos correspondem a eventos consistentes com os mergulhos de imagens parciais. O próximo passo é transformar a função de semelhança em uma função de peso  $W(\alpha; z; x)$ , que deve lidar otimamente com amplitudes migradas.



**Figura 43 – Atributo *Semblance* à imagem parcial de zero graus (a) e 15°(b).**

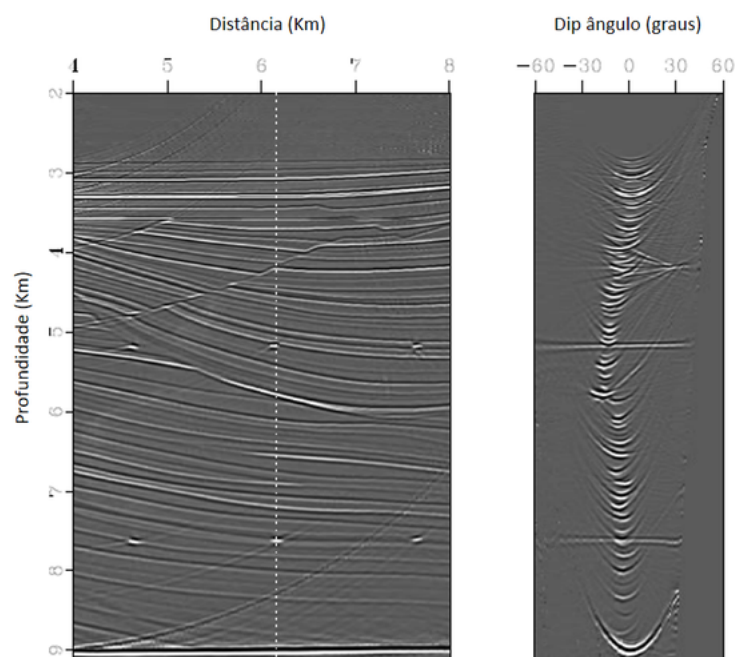
Klokov & Fomel (2013).

o peso deve atenuar suavemente longe dos ápices para que os efeitos de borda possam ser eliminados (HERTWECK *et al.*, 2003b apud KLOKOV; FOMEL, 2013).

Uma função de peso construída usando a direção do ângulo de mergulho permite apenas atenuar os eventos de reflexão em torno de suas áreas de ápice, preservando também os eventos de difração.

#### 4.1.2 Exemplos de Dados Sintéticos

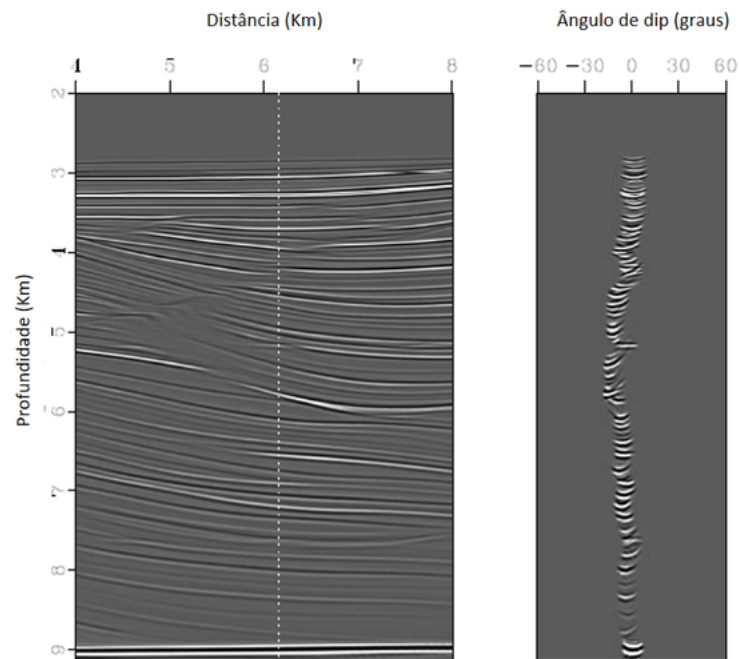
Em seguida, a abordagem apresentada foi testada na migração *prestack* dos dados de Sigsbee 2B (PAFFENHOLZ *et al.*, 2002 apud KLOKOV; FOMEL, 2013). Há uma série de falhas, que também produzem energia de difração. Portanto, o conjunto de dados é também apropriado para testar a proteção das difrações. A figura 44 mostra uma imagem sísmica da parte esquerda do modelo e um *gather* de ângulo de mergulho da posição em que estão presentes dois pontos fortes de difração, que correspondem a espalhadores artificiais. Alguma energia de difração também é encontrada a uma profundidade de 4,3 km, espalhada pela falha.



**Figura 44 – Imagem inicial e *gather* no domínio de ângulo de *dip* correspondente à distância de 6,1 km.**

Modificado de Klokov & Fomel (2013)

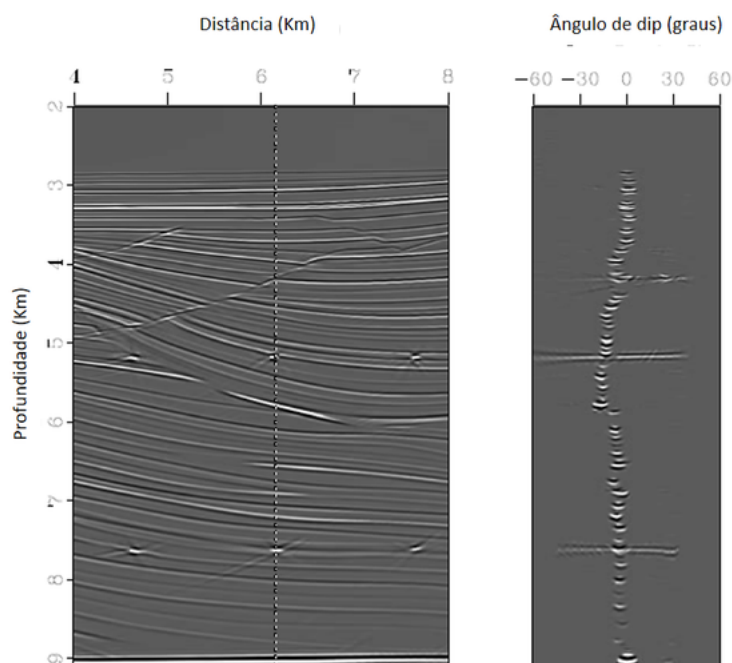
A figura 45 mostra a imagem e o *gather* de ângulo de mergulho após a limitação da abertura de migração. Primeiro, detectamos as posições do ápice de reflexão, estimamos os intervalos de mergulho efetivos ao redor deles e rejeitamos as amplitudes migradas que não correspondiam aos intervalos de mergulho efetivos. Este procedimento permite a eliminação do ruído de migração com imagens corretas dos limites de reflexão (BIENATI *et al.*, 2009 apud KLOKOV; FOMEL, 2013). No entanto, a limitação da abertura causa um encurtamento significativo dos eventos de difração e, como resultado, o enfraquecimento ou mesmo o desaparecimento dos objetos de difração na imagem.



**Figura 45 – Após a migração Kirchhoff com limitação da abertura: imagem e *gather* no domínio de ângulo de *dip*.**

Modificado de Klovov & Fomel (2013)

Para otimizar a abertura de migração usando a abordagem de consistência de inclinação proposta, realizamos a análise do *Semblance* usando uma abertura de ângulo de mergulho de 10 graus, uma base lateral de 200 m, etc (figura 46). Os eventos de reflexão ficam limitados à vizinhança de seus ápices, como no exemplo anterior. Ao mesmo tempo, o procedimento protege os eventos de difração no *gather* e, portanto, os objetos de difração correspondentes na imagem. Dispersores de pontos artificiais e falhas são visualizados corretamente.



**Figura 46 – Após a migração Kirchhoff com otimização na limitação da abertura: imagem e *gather* no domínio de ângulo de *dip*.**

Modificado de Klovov & Fomel (2013)

### 4.1.3 Conclusões

A otimização da abertura na migração de Kirchhoff no domínio do ângulo pode melhorar significativamente a qualidade de uma imagem sísmica. O método de otimização de abertura precisa eliminar artefatos de migração sem distorcer o sinal útil. O componente de difração do campo de ondas sísmicas caracteriza pequenos, mas importantes objetos geológicos e traz resolução extra para imagens sísmicas. Para uma imagem ideal de objetos de difração, deve ser usada uma abertura de migração tão ampla quanto possível. No entanto, o imageamento de reflexões requer uma abertura menor em torno do ponto tangente.

Para atender a ambos os requisitos, a proposta é a utilização de imagens parciais de mergulho constante. Uma análise da consistência entre inclinações locais e mergulhos constantes de uma imagem parcial torna possível avaliar a contribuição de qualquer parte dos dados migrados. Essa análise permite extrair eventos construtivos. O empilhamento desses eventos é equivalente à migração usando uma abertura ideal.

## 4.2 Dados Kirchhoff para ML de Interpretação de Corpos de Sal

Ye *et al.* (2022) apresenta um novo fluxo de trabalho baseado em uma rede neural convolucional de *deep learning* para detectar automaticamente a geometria do sal a partir de uma imagem sísmica. Ao desenvolver uma arquitetura de rede neural sofisticada com

vários canais de saída, permitimos que o procedimento de treinamento de predição se beneficie de um(a):

- expansão dos dados de treinamento disponíveis,
- fluxo de trabalho de treinamento semi-supervisionado,
- maneira mais flexível de fazer o *QC* da incerteza,
- condução de testes de cenários.

#### 4.2.1 Introdução

A construção de modelos de sal é considerada uma das etapas mais desafiadoras nos modelos de velocidade. Esse procedimento iterativo pode levar de vários meses a um ano de interação entre especialistas em processamento sísmico e interpretação. No ambiente salino no Brasil a presença de carbonatos, anidritas, cordilheiras vulcânicas e camadas profundas e finas de sal demonstra os principais desafios para detectar a localização correta do limite salino. Na presença de *overhangs*, um fluxo de trabalho típico para a construção de modelos de sal inclui *picking* (ou interpretação sísmica) do primeiro topo de sal (*TOS*), da primeira base de sal (*BOS*) e, em seguida, repetir para a interpretação de outros *TOS* e *BOS*. A interpretação sísmica manual é geralmente baseada em linhas 2D, contando com ferramentas de rastreamento automático para escolher os picos, vales ou zeros interpretados como horizontes sísmicos. Contudo, para um grande levantamento 3D e com descontinuidades de fase generalizadas, o *picking* manual é trabalhoso, demorado e ergonomicamente desafiador.

Recentemente, a construção de modelos de sal se beneficiou dos mais recentes desenvolvimentos de *Deep Neural Networks* (*DNNs*) para segmentação de imagens, mostrando resultados promissores em casos sintéticos e de campo (por exemplo, Gramstad e Nickel (2018 apud YE *et al.*, 2022) ; Waldeland *et al.* (2018 apud YE *et al.*, 2022)). No entanto, existem grandes desafios na ausência de dados de treinamento suficientes que cubram o espaço definido para o *dataset*. Para resolver este problema, os desenvolvimentos recentes se concentram em dois aspectos:

- 1) uma arquitetura *DNN* de última geração com estratégia de treinamento avançada para mitigar o *overfitting* e permitir a generalização em vários conjuntos de dados;
- 2) um fluxo de trabalho cuidadosamente projetado para aprimorar a qualidade da predição de *DNNs* existentes.

Quanto ao primeiro aspecto, técnicas como funções de ativação específicas (por exemplo, Zhou *et al.* (2020 apud YE *et al.*, 2022)) são implementadas. Por outro lado, a

calibração da estratégia de treinamento pode melhorar potencialmente a generalidade e a precisão da previsão, especialmente na ausência de rótulos de qualidade suficientes. Um exemplo é o aprendizado semi-supervisionado, que visa aprimorar a predição de forma automática e iterativa, escolhendo a melhor parte possível da saída da previsão como pseudo-rótulos para a próxima iteração de treinamento (SEN *et al.*, 2020 apud YE *et al.*, 2022). Enquanto isso, integrar *DNN* com outro algoritmo de inversão pode ser uma maneira eficaz de mitigar imprecisões nas previsões de *DNN* (Li *et al.* (2016 apud YE *et al.*, 2022), Lewis e Vigh (2017 apud YE *et al.*, 2022), Wu e McMechan (2018 apud YE *et al.*, 2022) ).

A abordagem a ser apresentada abrange os dois aspectos de melhorar a arquitetura de rede enquanto expande o espaço coberto pelos dados de treinamento. Com canais de saída expandidos, essa rede neural usa vários tipos de rótulos, que não apenas expandem o conjunto de dados de treinamento, mas também adicionam regularização entre diferentes canais de saída, compartilhando espaços latentes e reforçando conexões convolucionais.

#### 4.2.2 Arquitetura da Rede Neural

A arquitetura de rede proposta segue os principais elementos de uma rede de transformação de imagem (Johnson, Alahi e Fei-Fei (2016 apud YE *et al.*, 2022) , Kaur, Pham e Fomel (2019 apud YE *et al.*, 2022)). Existem três componentes básicos:

- 1) um codificador realiza extração de características e *downsampling*;
- 2) um módulo de transição;
- 3) um decodificador que constrói o *output*.

A estrutura geral da rede é demonstrada na figura 47. Em particular, o codificador tem cinco camadas, onde cada qual envolve uma convolução 2D e uma função de ativação. Cada um dos cinco decodificadores também inclui cinco camadas compostas por uma função de *up-sampling*, uma convolução 2D e uma função de ativação.

##### 4.2.2.1 Codificador

Na referida implementação, a camada de entrada de um codificador recebe um *patch* de tamanho 1x320x320 amostrado da imagem sísmica. A saída de um decodificador é do mesmo tamanho, o que produz uma transformação *pixel a pixel*. Como uma extensão com múltiplos canais de saída, foram utilizados cinco decodificadores com a mesma estrutura, que produzem a reconstrução da:

- imagem de entrada (Canal I),
- máscara de sal prevista (Canal S)



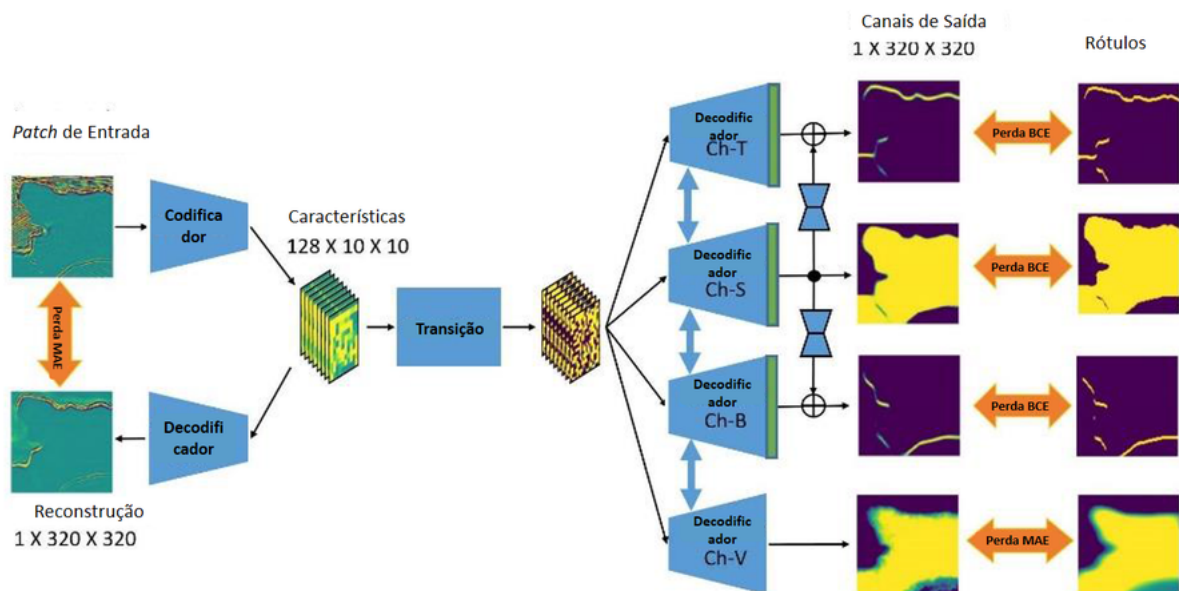
- máscara TOS (Canal T)
- máscara BOS (Canal B)
- velocidade da onda P redimensionada (Canal V).

A função de perda total é construída como uma soma de desajustes (ou *misfits*) entre cada canal de saída com o rótulo correspondente:

- perda de entropia cruzada binária (*BCE*) para os canais S, T e B,
- erro absoluto médio (ou *MAE*, também conhecido como erro *L1*) para o canal I e V.

#### 4.2.2.2 Módulo de Transição

Para reforçar ainda mais a conectividade entre os canais de saída S, T e B, que logicamente devem ser correlacionados, introduzimos duas redes leves de transformação de imagem usando essencialmente as mesmas estruturas mais rasas descritas anteriormente: cada uma tem um codificador e um decodificador com 3 camadas e nenhum bloco residual no meio. Como consequência, o fluxo gradiente passa do Canal S para os Canais B e T. Em outras palavras, ao otimizar a função de perda baseada em *TOS* ou *BOS*, o decodificador para corpo de sal também está sendo treinado.



**Figura 47 – Esquema da arquitetura do algoritmo de *deep learning*, com as 3 camadas: entrada, transição e saída. As setas azuis de dois lados indicam o compartilhamento dos parâmetros para as três camadas mais profundas. Os blocos verdes depois de alguns decodificadores significam camadas com convolução 2D e função de ativação sigmóide, adicionadas antes do *output* da rede neural.**

Modificado de Ye et al. (2022)

#### 4.2.2.3 Vantagens da Rede Proposta

Notamos vários benefícios da estrutura da rede de *ML* proposta acima. Em primeiro lugar, as cinco saídas produzem consistência na geometria e no treinamento porque, coletivamente, elas fornecem melhores restrições em comparação com a máscara de sal como única saída. Em particular, mais atenção é dada aos limites de sal, minimizando os desajustes de *TOS* e *BOS*. Em segundo lugar, a escolha de várias entradas expande significativamente a disponibilidade de dados de treinamento de qualidade. Embora apenas os dados finais com o *TOS* e o *BOS* cuidadosamente e densamente interpretados possam ser considerados dados de treinamento confiáveis na rede de *output* único, bons dados de treinamento para nossa rede proposta podem incluir dados processados intermediários, como imagens com apenas o primeiro horizonte *TOS* sendo 'pickado' de forma bem esparsa, imagem do sal com horizontes *BOS* apenas parcialmente interpretados ou mesmo velocidade derivada de *FWI* combinada com uma imagem de migração sem interpretação manual. Além disso, várias saídas fornecem informações extras que são significativas para outros testes de cenários e *QC*. Embora a previsão *TOS/BOS* mostre coerência com a previsão do corpo de sal, elas nem sempre são idênticas e vêm com diferentes mapas de incerteza. Limites diferentes em cada canal de saída podem fornecer vários cenários que podem ser testados posteriormente. Finalmente, uma arquitetura que recebe vários rótulos pode ser facilmente adotada para realizar um treinamento semi-supervisionado, dependendo se tipos específicos de rótulos parciais, como horizontes esparsamente interpretados ou modelo de velocidade invertido *FWI*, estão disponíveis. Qualquer uma dessas informações incompletas, mas significativas, melhorará os resultados da previsão. Mesmo sem os rótulos adicionais, o *loop* codificador-decodificador para reconstrução sísmica ajuda a ajustar a rede com base em dados de *target* que não foram usados no treinamento inicial.

#### 4.2.3 Aplicações em Dados de Campo Brasileiros

O referido método de Ye *et al.* (2022) foi aplicado a um conjunto de dados sísmicos 3D do Brasil contendo feições estruturais e estratigráficas em várias escalas. A geologia regional mostra carbonatos e anidritas com texturas complexas e camadas de sal finas e profundas, que são o principal desafio para um *picking* automático do sal.

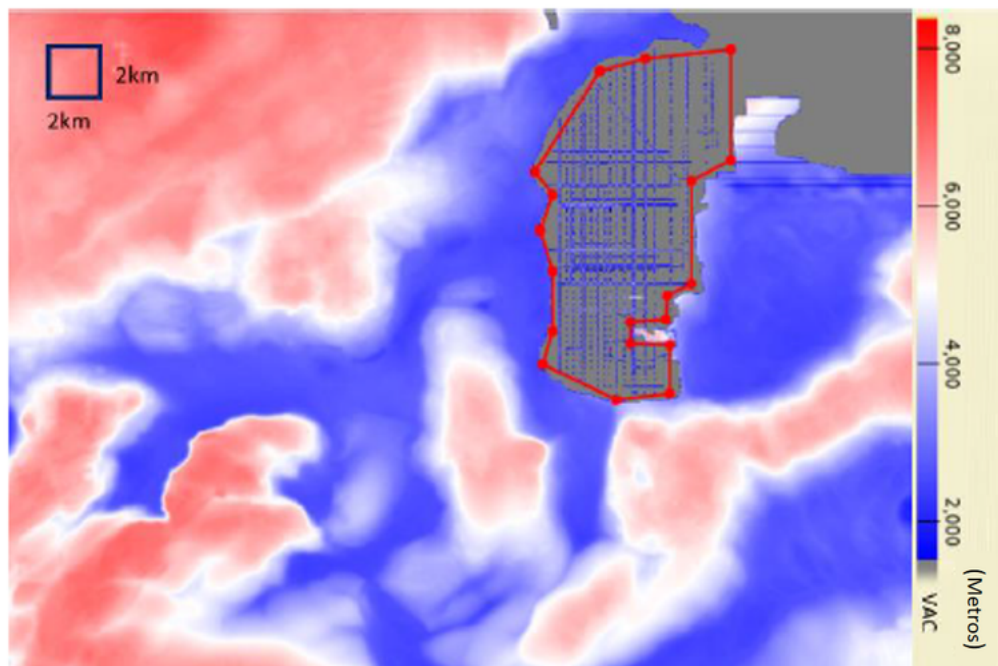
Os dados de treinamento são baseados em imagens de migração Kirchhoff empilhada para todos os ângulos e processadas até o final do fluxo, que são normalizadas para que o desvio padrão seja igual a 1, de dois blocos diferentes, um localizado adjacente ao *target* e outro distante, com estruturas geológicas significativamente diferentes. Uma imagem de migração de Kirchhoff empilhada para todos os ângulos, baseada no modelo de velocidade do *legacy* com processamento mínimo para uma pequena sub-região do *target* é usada como dado de validação, onde a máscara de sal foi obtida por limiarização

(ou *thresholding*) do modelo de velocidade correspondente. O modelo de velocidade do *legacy* também é considerado um rótulo de treinamento após a aplicação de suavização e reescalonamento gaussiano por

$$y_v = \frac{V_p - V_w}{V_s - V_w}$$

onde  $V_w$  é a velocidade de ondas p na água, e  $V_s$  no sal.

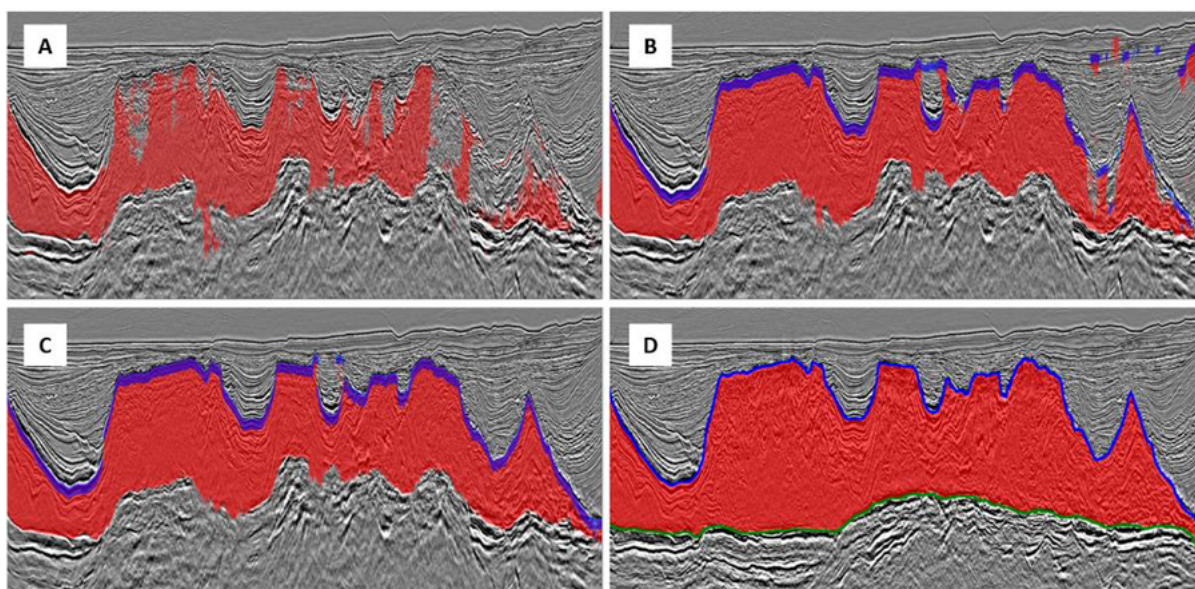
Aproveitando a funcionalidade de vários rótulos, criou-se um conjunto de dados de treinamento composto por 44 horizontes do *TOS*, 'pickados' esparsamente em um pequeno subconjunto de linhas do *target* junto com uma mesma imagem sísmica (figura 48). Para fins de comparação, uma rede mais simples é treinada no mesmo conjunto de dados de treinamento, excluindo os dados adicionais parcialmente rotulados. Há perdas de treinamento e validação, na qual há *overfitting* significativo devido à discrepância entre os dados de treinamento e validação, enquanto na nova rede não. Durante o procedimento de previsão, as imagens sísmicas do *target* são processadas em *patches* 2D ao longo de *inlines*, *crosslines* e duas linhas diagonais (45). Para cada direção de processamento, os *patches* adjacentes são sobrepostos por 50 *pixels*, onde um *taper* de cosseno ponderado é aplicado às saídas dentro da região de sobreposição. As quatro previsões 2D são agregadas posteriormente, produzindo uma previsão em 3D para cada um dos canais de saída. Para mitigar as oscilações produzidas pelo processamento 2D, um filtro mediano é aplicado em cada *depth slice*. Os canais de saída *TOS* e *BOS* são convertidos em valores binários de 0 e 1 por limiar em 0,25, e a borda superior do volume *TOS* e a borda inferior da saída do volume *BOS* são extraídas em horizontes.



**Figura 48 – Horizontes interpretados manualmente. Externamente, temos o polígono do horizonte do *TOS* proveniente do dado *legacy*.**

Modificado de Ye et al. (2022)

A figura 49 (B) mostra o dado de previsão da maneira descrita acima, que captura corpos de sal que são perdidos pela *CNN* padrão (usada a título comparativo) e gera uma interpretação mais contínua. No entanto, escolhas incorretas acontecem em torno de eventos brilhantes em sedimentos e estruturas complexas de sal. Considerando o fato de que o *TOS* previsto corresponde ao modelo do *legacy* para cerca de 50% da região, extraímos os subconjuntos concordantes do horizonte *TOS* previsto como pseudo-rótulos para uma segunda rodada de treinamento, com saída de previsão mostrada na figura 49 (C). A maioria dos artefatos e lacunas foi corrigida após esta etapa e um horizonte *TOS* contínuo pode ser extraído próximo ao produto final ilustrado na figura 49 (D). Com a abordagem em duas etapas, a 'pickagem' trabalhosa é significativamente reduzida na maioria das regiões, exceto para valores discrepantes menores, que exigem mais interação humana.



**Figura 49 – (A) imagem sísmica com predição de máscara de sal (vermelho) pela rede mais simples, usada a fim de comparação; (B) imagem sísmica com previsão de máscara de sal (vermelho) e *TOS* (azul) por nova abordagem; (C) imagem sísmica com previsão de máscara de sal (vermelho) e *TOS* (azul) pela nova abordagem com re-treinamento em horizontes do *legacy* selecionados automaticamente; (D) imagem sísmica do sal com previsão de máscara de sal (vermelho), *TOS* (azul) e *BOS* (verde) por nova abordagem. (Dados sísmicos sob licença e cortesia de CGG e PGS.)**

Ye et al. (2022)

### 4.3 CCUS (Captura, Armazenamento e Utilização de Carbono)

#### 4.3.1 Dados Kirchhoff para Caracterização de Locais de CCUS

No trabalho de Pernin *et al.* (2022) se discute a urgência em encontrar locais/instalações de captura e armazenamento de carbono (*CCS*) para atingir as metas de emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) vigentes. Uma maneira de armazenar  $\text{CO}_2$  em quantidades

significativas, é identificar locais de CCS suficientemente grandes. Para fazer isso, foram acessadas informações sísmicas de banda larga com alta qualidade e escala regional.

Um fluxo de trabalho integrado de G&G foi desenvolvido e implementado em uma área de prova de conceito (*PoC*) considerando aspectos do armazenamento CCS como: capacidade, contenção, injetividade, monitoramento, etc. O fluxo de trabalho integrado de avaliação de locais de CCS permite a validação das várias tecnologias e fluxos de trabalho disponíveis. Isso está abrindo a possibilidade deste fluxo de trabalho ser aplicado regionalmente com os objetivos de avaliar o uso de todos os dados (sísmicos e poços) para uma avaliação adequada de capacidade e contenção.

#### 4.3.1.1 Introdução

Atualmente, existem menos de 30 locais em todo o mundo armazenando cerca de 40 Mt de CO<sub>2</sub>/ano, e a expectativa é ter capacidade de armazenamento próxima a 300 Mt por ano até 2050 (Comissão Europeia, 2018). Assim, há uma necessidade imediata de identificar rapidamente os locais de armazenamento CCS viáveis. A avaliação eficiente de informações sísmicas regionais de alta qualidade seria um passo significativo nessa direção.

No artigo de Pernin *et al.* (2022), é apresentado um fluxo de trabalho de G&G recente em uma área de prova de conceito (*PoC*) considerando dois aspectos do armazenamento CCS: capacidade e contenção. O fluxo de trabalho de avaliação do local de reservatório CCS integrado permite a validação de várias tecnologias em escala local, com a opção e viabilidade de expansão regional. O principal objetivo deste estudo é avaliar o uso de dados sísmicos - migrados em Kirchhoff - e de poços para avaliação da capacidade de armazenamento e contenção de CO<sub>2</sub>.

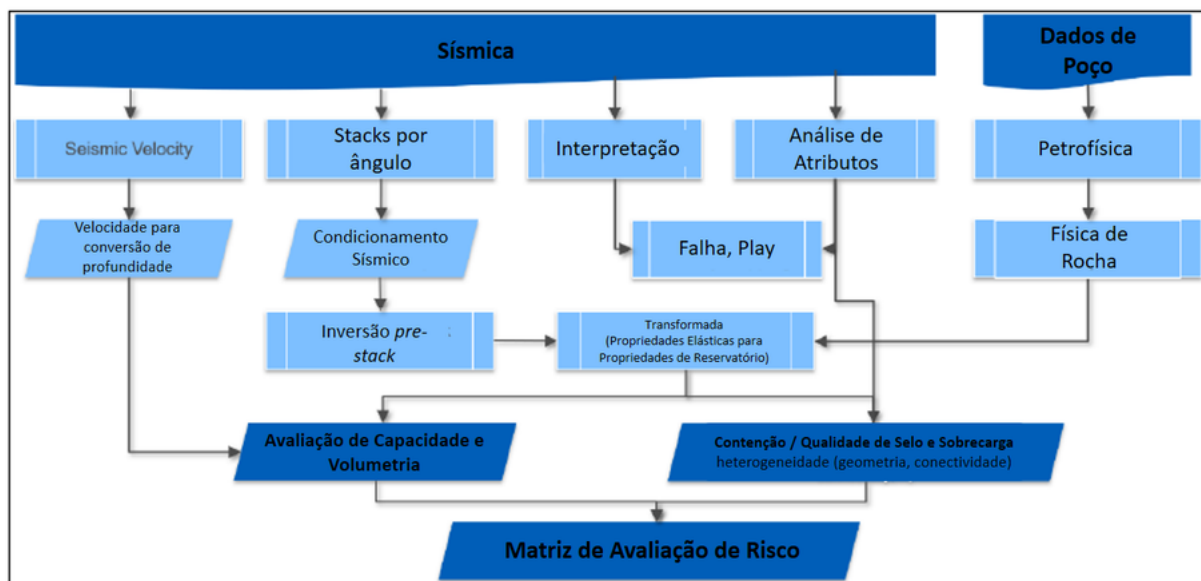
O atual *PoC* foi estabelecido usando dados multicliente de escala regional fornecidos pela PGS, abrangendo parte do Mar do Norte, que compreende um extenso conjunto de dados regionais na fronteira do Reino Unido com a Noruega. A natureza de banda larga dos dados sísmicos permite uma avaliação significativa e eficiente do local, fornecendo descrições e compreensão detalhadas da subsuperfície, incluindo atributos pré-empilhamento mais precisos/confiáveis para parâmetros-chave de armazenamento (CCS) como razão *net-to-gross*, porosidade e espessura. Tudo isso é determinado usando principalmente os dados sísmicos, com informações secundárias de alguns poços de calibração. Foram destacados os principais elementos do fluxo de trabalho a partir dos dados, interpretação, física de rocha, inversão sísmica e, mais importante, a integração de todos esses aspectos para mapeamento e caracterização do reservatório e selo de CO<sub>2</sub> (PERNIN *et al.*, 2022).



#### 4.3.1.2 Fluxograma Integrado

A área de interesse (*AOI*) está localizada na parte sul do setor norueguês no Mar do Norte. Na *AOI*, um campo produziu petróleo até 2020 do arenito da Formação Ula, do Jurássico Superior, a uma profundidade de cerca de 4.000 metros. Para este projeto em particular, o intervalo estratigráfico de interesse corresponde ao do aquífero salino do Oligoceno cujos arenitos foram depositados em um ambiente marinho raso.

O fluxo de trabalho implementado (figura 50) para a caracterização deste aquífero salino inclui etapas muito semelhantes ao que é realizado em uma caracterização de reservatório sísmico convencional de *O&G* ou fluxo de trabalho de interpretação quantitativa (*QI*), incluindo: otimização/condicionamento sísmico pré-empilhamento antes da inversão sísmica, análise petrofísica e física de rocha, inversão sísmica para estimativa de propriedades elásticas, transformação para propriedades de reservatório e integração com uma interpretação sísmica detalhada. A principal diferença para um estudo de exploração/desenvolvimento de petróleo e gás é a ênfase na contenção (selo e sobrecarga) em vez de “apenas” no aspecto do reservatório (capacidade).



**Figura 50 – Uma revisão do *workflow* de análise de dados sísmicos implementado para a análise do reservatório e contenção para CCS.**

Modificado de Pernin et al. (2022)

Para a caracterização da capacidade e da contenção na avaliação do local de *CCS*, a principal expectativa deste estudo é mapear a distribuição da porosidade do arenito, a distribuição de xisto e qualquer indicação relacionada à integridade ou “eficiência” da vedação do selo. A capacidade efetiva de armazenamento de  $\text{CO}_2$  é produto do volume bruto de rocha, da porosidade, da razão *net-to-gross*, da densidade do  $\text{CO}_2$  e da eficiência

de armazenamento para um aquífero salino, tipicamente entre 2 a 8% (MAY; MÜLLER; BERNSTONE, 2005 apud PERNIN *et al.*, 2022) e sendo 5% em média neste caso.

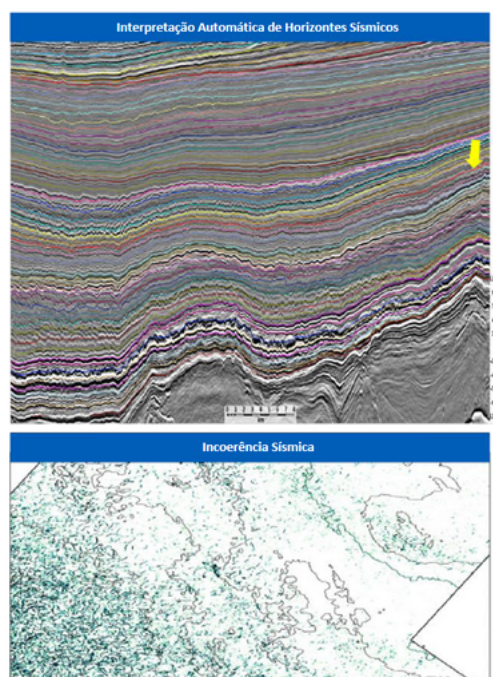
#### 4.3.1.3 Base de Dados e Avaliação

Os dados sísmicos usados para o projeto de Pernin *et al.* (2022) fazem parte de um conjunto de dados sísmicos *pre-stack* multicliente de banda larga cobrindo mais de 17.000 km<sup>2</sup> no *Graben* Central do Mar do Norte. Este conjunto de dados passou por um fluxo de trabalho de imageamento em profundidade usando construção de modelo de velocidade anisotrópica e migração Kirchhoff em profundidade. O conjunto de dados possui uma largura de banda de frequência sísmica muito ampla (próximo a 90Hz no intervalo de interesse) e uma excelente razão sinal-ruído devido à aquisição *multisensor* do *deep tow streamer*.

Nos dados sísmicos, QCs detalhados de AVA (Amplitude Versus Ângulo) foram realizados, seguidos de um processamento final orientado ao reservatório (*ResOP*) com foco no intervalo do Terciário, para otimizar os dados antes da inversão sísmica. As principais etapas do *ResOP* desse fluxo de trabalho incluíram redução de ruído, balanceamento de frequência espectral e correção de alinhamento pós-empilhamento para garantir que os dados estejam de acordo com os poços.

Como o objetivo é mapear as propriedades da rocha como porosidade e volume de folhelho/areia, é necessário estabelecer uma ligação entre a sísmica e os dados de poço. A física de rocha é crucial e o único elemento que liga esses dois domínios. Assim, um produto de modelagem de física de rocha interativa consistente regionalmente (*rockAVO*) foi desenvolvido para construir um banco de dados com dados de poços de alta qualidade que foram interpretados e condicionados. A análise petrofísica permitiu a correção e/ou previsão de perfis de poços e a derivação de informações de propriedades do reservatório, como porosidade total ( $\Phi T$ ), volume de argila ( $V_{clay}$ ) e saturação de água ( $S_w$ ). Essas propriedades do reservatório são fundamentais para avaliar a eficiência do reservatório e dos elementos de contenção no CCS.

Paralelamente ao QC dos dados sísmicos de entrada e ao estudo dos poços, foi realizada uma interpretação automática do horizonte regional (PAUGET; LACAZE; VALDING, 2009 apud PERNIN *et al.*, 2022) para definir rapidamente a contenção. O denso *grid* de interpretação vertical (figura 51, topo) permite a avaliação eficiente dos dados sísmicos e seus derivados/atributos ao definir: geometria da deposição de sedimentos (ajudando a interpretação morfológica sísmica), falhamento e/ ou mapeamento de descontinuidades sísmicas (destacando possíveis problemas com contenção).

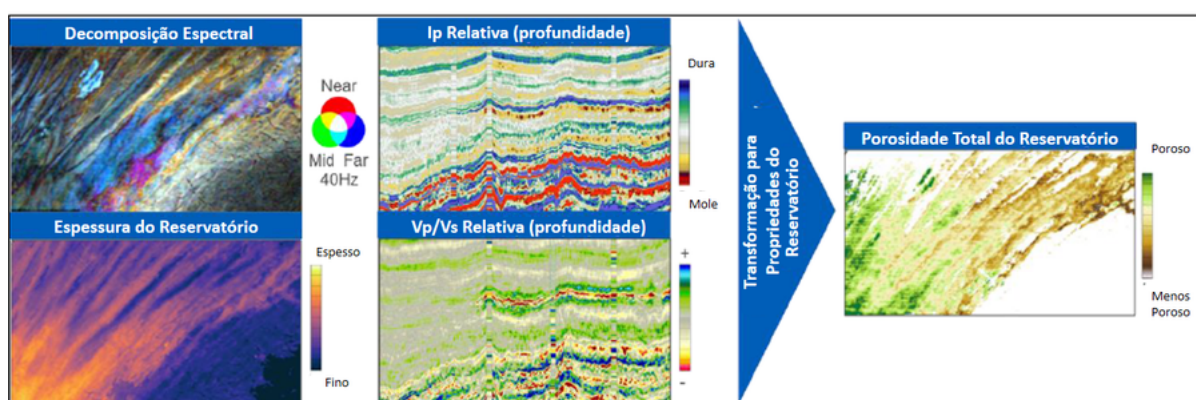


**Figura 51 – Seção sísmica com os horizontes sísmicos interpretados (topo). E uma visão em mapa do atributo de incoerência para mapeamento de discontinuidades no selo (abaixo).**

Modificado de Pernin et al. (2022)

Um dos primeiros atributos a serem mapeados foi um volume de incoerência (a medida da dissimilaridade entre traços sísmicos adjacentes) calculado para identificar áreas de maior risco para a integridade do selo (figura 51, inferior). Isso combinado com um resultado de decomposição espectral (de *AVA* e *blend* de frequências) usando a estrutura acima destacou potenciais heterogeneidades dentro do selo (figura 52, à esquerda). Do ponto de vista do reservatório de CO<sub>2</sub>, a decomposição espectral e seus atributos de *blend* de frequências revelaram geometrias de ambientes deposicionais sugerindo características de reservatório como porosidade e volume de argila a partir da interpretação geológica. Uma interpretação do reservatório superior e da base foi realizada para análise de estruturas 3D (formato da trapa, estimativa de tamanho, etc.), avaliação de espessura e mapeamento detalhado de atributos dentro do nível do reservatório.





**Figura 52 – Esquema com interpretações sísmicas (esquerda) de decomposição espectral (acima) e espessura do reservatório (abaixo). Ao centro, temos uma estimativa dos atributos elásticos de impedância relativa (acima) e razão Vp/Vs (abaixo). Por fim, os dados anteriormente citados foram usados como entrada para porosidade total do reservatório.**

Modificado de Pernin et al. (2022)

## 4.4 Performance Computacional

### 4.4.1 Migração de Kirchhoff em Profundidade Acelerada em Sistemas Computacionais Heterogêneos CPU-GPU

No trabalho de Liu *et al.* (2022), a migração Kirchhoff em profundidade (*KDMIG*) é uma das técnicas mais confiáveis de imageamento de estruturas geológicas complexas. Tem sido amplamente utilizada na indústria de processamento sísmico. No entanto, com os avanços na aquisição de dados sísmicos 3D, grandes quantidades de dados sísmicos são adquiridas, resultando em um aumento dramático do custo computacional para o *KDMIG*. Um algoritmo *KDMIG* acelerado foi desenvolvido com base no sistema de computação paralela heterogênea CPU-GPU. Para utilizar totalmente o poder do supercomputador, desenvolvemos quatro estratégias para acelerar o método *KDMIG*. Testes numéricos demonstram que a eficiência foi melhorada em até 40x em comparação com a versão da CPU, sem comprometer a precisão da imagem.

A *KDMIG* é um dos algoritmos de imageamento sísmico mais amplamente utilizados e é adequado em casos de geologia moderadamente complexa (ETGEN; GRAY; ZHANG, 2009 apud LIU *et al.*, 2022). Com uma quantidade visivelmente crescente de dados sísmicos adquiridos nas atuais campanhas de exploração sísmica 3D (BAKULIN *et al.*, 2020 apud LIU *et al.*, 2022), o custo computacional do *KDMIG* tem aumentado drasticamente,

resultando em um tempo de resposta muito maior para o processamento de dados sísmicos. Portanto, há uma crescente busca por melhorar a eficiência do *KDMIG* usando sistemas de computação de alto desempenho (*HPC*).

A arquitetura de computação paralela heterogênea *CPU-GPU* combina as vantagens de *CPUs* e *GPUs* para obter o melhor desempenho e, portanto, é o *mainstream* no mundo *HPC*. No entanto, devido ao fato de que o *KDMIG* é tanto *I/O* quanto computacionalmente intensivo, é um desafio alcançar o desempenho ideal de eficiência ao implementar o algoritmo *KDMIG* no sistema de computação heterogêneo *CPU-GPU*.

Algumas tentativas foram feitas para melhorar a eficiência do *KDMIG* usando *GPUs*. No entanto, permanece a necessidade de acelerar ainda mais o *KDMIG* usando o sistema *HPC* heterogêneo *CPU-GPU*. O objetivo do estudo de Liu *et al.* (2022) é fornecer uma solução otimizada para acelerar o algoritmo *KDMIG* com o sistema *HPC* heterogêneo *CPU-GPU*. O resumo está organizado da seguinte forma:

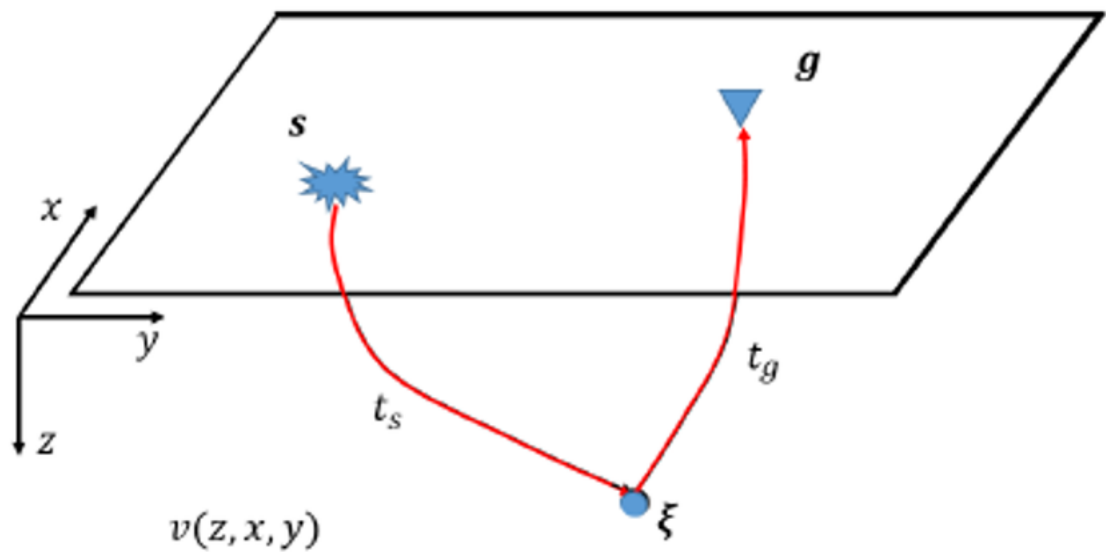
- 1) revisão da metodologia e do fluxo de trabalho do *KDMIG*,
- 2) apresentação das quatro estratégias de aceleração desenvolvidas para melhorar tanto a *I/O* quanto a eficiência computacional do *KDMIG*.
- 3) avaliação do desempenho do *KDMIG* acelerado com o modelo *SEAM Arid 3D*.

#### 4.4.1.1 *KDMIG*

Na *KDMIG*, os tempos  $t_D(\xi, g, s)$  são calculados por um algoritmo de *ray tracing* para descrever a trajetória das ondas sísmicas. A figura 53 ilustra como os raios *P-Up* e *P-Down* são traçados pela equação de velocidade intervalar  $v(x, y, z)$ . Os tempos resultantes  $t_D$  podem ser expressos por:

$$t_D(\epsilon, g, s) = t_s[\epsilon, s, v(z, x, y)] + t_g[\epsilon, g, v(z, x, y)]$$

onde  $t_s$  é o tempo registrado da fonte *S* para o ponto *E* de imagem, e  $t_g$  é o tempo obtido do mesmo ponto  $\xi$  de imagem para a localização do receptor *g*. Foram geradas tabelas de  $t_s$  e  $t_D$  para fontes ou receptores fixos com diferentes pontos de imagem.



**Figura 53 – Desenho esquemático com a trajetória e tempos  $t_s$  e  $t_g$  de um raio sísmico, da fonte (s) ao receptor (g), passando pelo ponto de imagem ( $\xi$ ).**

Liu et al. (2022)

Existem muitas implementações diferentes de uma migração em profundidade de Kirchhoff, mas elas geralmente têm as seguintes etapas principais (TEIXEIRA; YEH; GA-JAWADA, 2013 apud LIU *et al.*, 2022) :

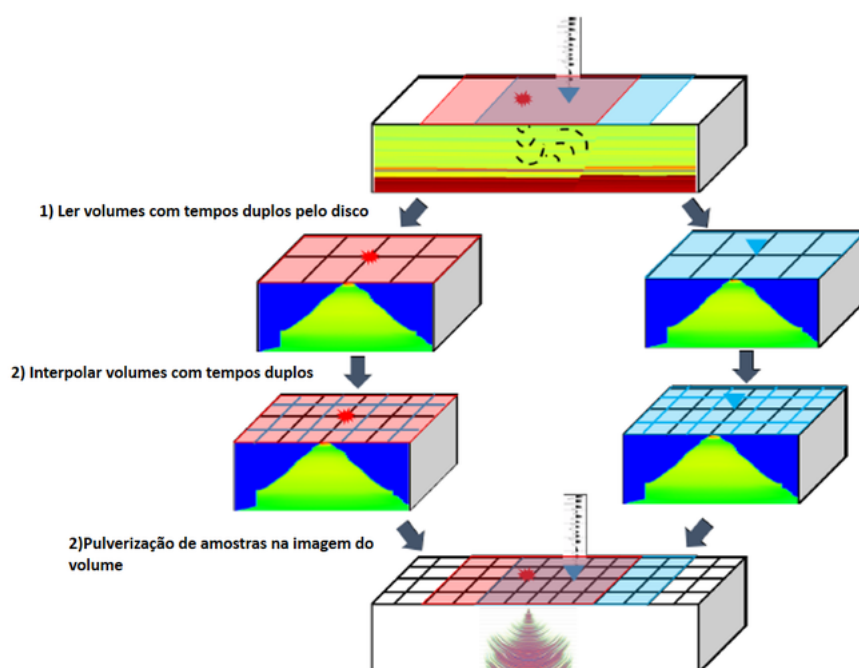
- 1) Cálculo das tabelas de tempo de viagem da fonte e do receptor para os pontos de imageamento;
- 2) Pré-processamento dos traços sísmicos de entrada;
- 3) Migração dos traços sísmicos de acordo com as informações de tempo correspondentes;
- 4) Pós-processamento e produção dos resultados da migração.

Vale ressaltar que dentre as quatro etapas acima, a terceira consome a maior parte dos recursos computacionais, portanto, Liu *et al.* (2022) foca em acelerar esta etapa. Além disso, devido à característica do algoritmo de *ray tracing*, a portabilidade do algoritmo para *GPU* não pôde ser feita de maneira eficiente. Portanto, as tabelas de tempo de viagem são pré-computadas em um *grid* de subsuperfície com amostragem bem espaçada e são armazenadas no disco. Então, para cada traço de entrada, o *KDMIG* executa as operações da seguinte forma:

- Leitura de duas tabelas de tempos de viagem do disco, uma correspondendo à fonte e outra à localização do receptor;

- Interpolação das tabelas de tempo de viagem de um *grid* mais espaçado para um *grid* mais detalhado;
- ‘Pulverização’ de cada amostra do traço de entrada para o volume da imagem de acordo com as informações de tempo de viagem.

O fluxo de trabalho de migração de cada traço sísmico descrito acima é ilustrado na figura 54. O resultado de saída do fluxo de trabalho é a resposta ao impulso de migração do traço. Após percorrer todos os traços de entrada e acumular suas respostas ao impulso correspondente, podemos obter a imagem final da subsuperfície, que fornece informações valiosas sobre as estruturas geológicas imageadas.



**Figura 54 – Fluxo de trabalho de migração KDMIG (Kirchhoff Depth Migration).**

Modificado de Liu et al., (2022)

A partir do fluxo de trabalho mostrado na figura 54, podemos observar que o *KDMIG* precisa ler e interpolar dois volumes 3D e pulverizar cada amostra em outro volume 3D para cada traço. Considerando que pode haver bilhões de traços e centenas de milhões de *grids* para o volume sísmico, os custos de *I/O* e computacionais para o *KDMIG* completo são extremamente altos. Portanto, foi desenvolvido um algoritmo *KDMIG* acelerado para melhorar a eficiência de *I/O* e computacional.

#### 4.4.1.2 KDMIG Acelerada

O sistema paralelo heterogêneo combina as vantagens da *CPU* e *GPU*, que são executar as partes sequenciais na *CPU* e as partes paralelas intensivas na *GPU*, para que os aplicativos obtenham o melhor desempenho. Liu et al. (2022) adotou essa arquitetura paralela heterogênea e também desenvolveu quatro estratégias de aceleração para utilizar

plenamente o poder computacional do supercomputador. As estratégias de aceleração desenvolvidas incluem:

- 1) ordenação cruzada,
- 2) interpolação de textura,
- 3) computação *multi-stream*,
- 4) otimização de arquitetura paralela.

A tecnologia resultante é chamada de migração em profundidade Kirchhoff acelerada, ou *AKMIG*.

A primeira estratégia de aceleração desenvolvida no *AKMIG* é a classificação cruzada, que visa maximizar a reutilização das tabelas de tempos de viagem. Tome como exemplo, um *common shot gather* com 1 tiro fixo e 99 receptores: para migrar esse *common shot gather*, o *KDMIG* precisa ler 100 tabelas de tempo. Por outro lado, para migrar um *cross-spread gather* com 50 tiros e 50 receptores, o *KDMIG* também precisa ler 100 tabelas de tempo de viagem, mas pode migrar até 2.500 traços. Assim, neste caso, separar os dados de entrada por *cross-spread gathers* antes da migração pode alcançar uma melhoria de até 25 vezes na eficiência de E/S.

**Tabela 4 – Essa tabela mostra que os *cross-spread gathers* podem alcançar o melhor desempenho entre os tipos de *gathers*.**

Tipo de <i>Gather</i>	# tabelas de tempos do receptor	# tabelas de tempos da fonte	# total de tabelas de tempo	# máx. de traços que podem ser migrados
-----------------------	---------------------------------	------------------------------	-----------------------------	---

Tipo de <i>Gather</i>	# tabelas de tempos do receptor	# tabelas de tempos da fonte	# total de tabelas de tempo	# máx. de traços que podem ser migrados
<b><i>Common shot gathers</i></b>	1	99	100	99
<b><i>Common receiver gathers</i></b>	99	1	100	99
<b><i>Common offset gathers</i></b>	50	50	100	50
<b><i>Cross-spread gathers</i></b>	50	50	100	2500

Liu et al. (2022)

A segunda estratégia de aceleração desenvolvida no *AKMIG* é usar a memória de textura, em vez da memória global, para armazenar as tabelas de tempo de viagem. O uso dessa estratégia pode não apenas aumentar a largura de banda de leitura das tabelas de tempos de viagem, mas também melhorar a eficiência da interpolação de tempos de viagem.

A terceira estratégia de aceleração é a computação de múltiplos *streams*. Ao se realizar a execução do *kernel* e a transferência de dados em *streams* separados, podemos reduzir significativamente o tempo total decorrido do programa. Tome como exemplo a migração de três traços, em comparação com o método de *stream* único, o tempo total decorrido pode ser reduzido em 33% se a tarefa de migração for distribuída para *streams* diferentes. A melhoria de desempenho pode ser ainda maior se migrar mais traços.

A estratégia de aceleração final que foi desenvolvida no *AKMIG* é a otimização da arquitetura paralela. O objetivo desta estratégia é melhorar a simultaneidade de várias *GPUs* e melhorar a escalabilidade do desempenho.

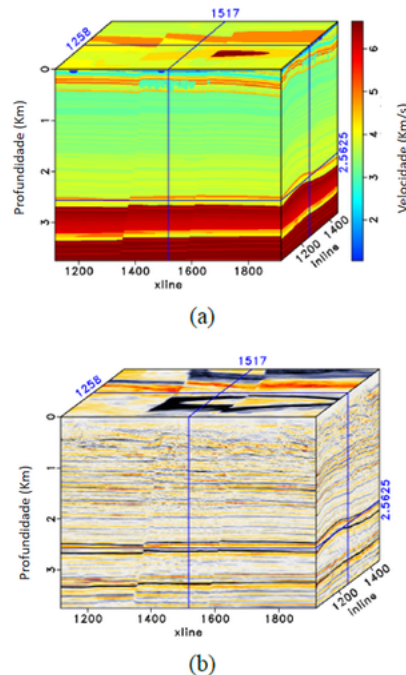
#### 4.4.1.3 Exemplos

Em seguida, o desempenho da tecnologia *AKMIG* foi testado com o modelo *SEAM Arid* (ORISTAGLIO, 2015 apud YE *et al.*, 2022). Este modelo apresenta importantes características geológicas de ambientes áridos ou desérticos, incluindo estruturas cársticas e contrastes extremos entre sedimentos não consolidados próximos à superfície e camadas rochosas, que muitas vezes obscurecem *targets* mais profundos.

O *dataset* original foi pré-processado para melhorar a qualidade das imagens sísmicas a seguir. Após o pré-processamento, o tamanho dos dados sísmicos foi reduzido para

cerca de 704 GB com aproximadamente 234 milhões de traços no total.

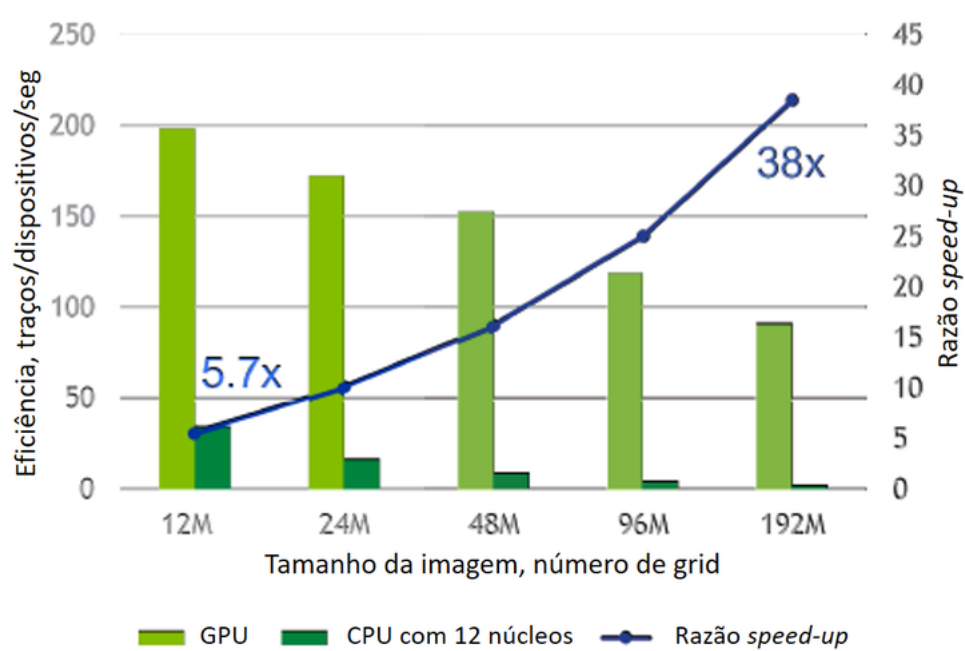
A figura 55 mostra o modelo de velocidade real e o resultado da imagem do *AKMIG* desenvolvido. Comparado com o modelo de velocidade real, podemos ver que a maioria das feições de subsuperfície foram reconstruídas com sucesso pelo *AKMIG*, como as falhas nas *inlines* e os anticlinais nas *crosslines*. Além disso, confirmamos que o resultado *AKMIG* é comparável à imagem calculada pelo método *KDMIG* baseado em *CPU*. Demonstramos assim que o *AKMIG* desenvolvido fornece a imagem sísmica correta.



**Figura 55 – (a) Modelo de Velocidade 3D SEAM Arid. (b) migração Kirchhoff em profundidade usando o *AKMIG*.**

Modificado de Liu et al. (2022)

A *CPU* usada para a comparação é a Intel Xeon *CPU* E5- 2680 v3, que contém 12 núcleos e tem a frequência base de 2,5 GHz; A *GPU* usada aqui é a Tesla K80, que contém 4992 núcleos, e o tamanho da memória global é de 24 GB. Podemos ver que junto com o aumento do tamanho da imagem, a taxa de aceleração da versão *GPU* sobre a versão *CPU* aumenta notavelmente de 5,7x para 38x. Isso ocorre porque o dispositivo *GPU* possui milhares de *threads* que podem ser executados simultaneamente, em vez de dezenas de *threads* na *CPU*, e isso é ainda superior quando o tamanho dos dados se torna enorme. No entanto, deve-se observar que quando o tamanho da imagem for maior que o tamanho da memória global, a taxa de aceleração será menor do que o esperado.



**Figura 56 – Métricas de eficiência do AKMIG.**

Modificado de Liu et al. (2022)



## 5 Discussão e Considerações Finais

### 5.1 Discussão Sobre os Testes

A partir dos testes demonstrados na seção 3, nota-se que todos os referidos parâmetros têm sua devida importância:

- 1) teste de regularização: consiste na remoção manual de um traço a fim de entender o que pode ocorrer quando um dado não foi regularizado corretamente. No caso, foi observado que a ausência do traço no dado de entrada resultou em um artefato após a migração Kirchhoff.
- 2) teste de espaçamento dos dados de entrada: que diz respeito aos efeitos práticos do uso de diversos espaçamentos entre os traços do dado a ser migrado. O resultado prático seria que quanto maior o espaçamento, menor o conteúdo de frequência e consequentemente a resolução do dado final. Inicialmente, o processamento de *anti-aliasing* foi usado como um filtro FK que redefine os limites superior e inferior de K antes da mudança do espaçamento dos dados de entrada. De acordo com a técnica de identificação de falseamento espacial explicada na seção 2.0.4, não foram identificados falseamentos desse tipo nos dados de entrada usados. Caso contrário, seriam vistos eventos com mergulho invertido no domínio FK. Por fim, os dados com espaçamento de 25m x 25 m foram multiplicados por 4 para se compensar a perda de energia com a divisão em 2 nas duas dimensões do dado de entrada de 12.5 m x 12.5 m. O mesmo foi feito para a reamostragem em 50m x 50m . Contudo, nesse caso as amplitudes do dado de saída foram multiplicadas por 16 já que houve uma decimação de 4 em cada dimensão.
- 3) teste de amostragem vertical: sobre a frequência de Nyquist para cada amostragem. Nota-se uma perda significativa no conteúdo de frequências mais altas do plano de offset com menor taxa de amostragem, de acordo com a figura ??.
- 4) resposta impulsiva: para análise da resposta ao impulso migrado com diferentes restrições de *dip*.
  - teste de *dip* em um plano de *offset*: no qual se analisa um mesmo plano migrado com diversas limitações de mergulho.
- 5) restringindo o *dip* máximo: para redução de ruído e melhor definição de estruturas com mergulho alto. O *dip* é muito importante para imageamento de feições geológicas como flancos de sal e falhas porém quando muito alto, o *dip* pode adicionar ruído à seção sísmica migrada.

## 5.2 Revisão Bibliográfica

### 5.2.1 Abertura Otimizada em Dados Kirchhoff

A otimização da abertura na migração de Kirchhoff no domínio do ângulo pode melhorar significativamente a qualidade de uma imagem sísmica. O método de otimização de abertura necessita eliminar artefatos de migração sem distorcer o sinal útil. O componente de difração do campo de ondas sísmicas caracteriza pequenos, mas importantes objetos geológicos e traz resolução extra para imagens sísmicas. Para uma imagem ideal de objetos de difração, deve ser usada uma abertura de migração tão ampla quanto possível. No entanto, o imageamento de reflexões requer uma abertura menor em torno do ponto tangente.

Para atender a ambos os requisitos, sugere-se a utilização de imagens parciais de mergulho constante. Uma análise da consistência entre inclinações locais e mergulhos constantes de uma imagem parcial torna possível avaliar a contribuição de qualquer parte dos dados migrados. Essa análise nos permite extrair eventos construtivos. O empilhamento desses eventos é equivalente à migração usando uma abertura ideal.

### 5.2.2 Dados Kirchhoff para *ML* de Interpretação de Corpos de Sal

Ye *et al.* (2022) apresenta uma nova ferramenta baseada em uma rede neural profunda multitarefa, especialmente projetada para interpretação automática simultânea de corpos de sal e horizontes sísmicos, o que reduz significativamente o trabalho humano, restringindo a necessidade de *picking* manual a pequenas regiões incertas. Ao construir uma arquitetura de rede extensa com vários canais de saída, vários conjuntos de dados parcialmente rotulados podem ser incluídos no procedimento de treinamento. As camadas compartilhadas e as conexões adicionais entre os canais de saída impõem restrições adicionais durante o treinamento e geram saídas de previsão multidimensionais que permitem *QC* flexível e testes de cenário. A capacidade de obter rótulos parciais não apenas enriquece os dados de treinamento disponíveis, mas também permite o procedimento de treinamento semi-supervisionado. Essa funcionalidade contribui para a generalização e permite previsões em conjuntos de dados anteriormente não vistos pela rede.

### 5.2.3 Dados Kirchhoff para Caracterização de Locais de *CCUS*

O fluxo de trabalho descrito por Pernin *et al.* (2022) compreende a integração de dados sísmicos de banda larga de alta qualidade, informações de poços, seus produtos derivados e várias ferramentas de análise de reservatórios para caracterizar dois componentes principais de *CCS*: reservatório e contenção/selo. A etapa de interpretação por si só fornece entendimento geológico: distribuição de sedimentos, falhamentos, *onlapping* de

camadas e ambiente deposicional. A análise petrofísica e a física de rocha é a ponte que liga as propriedades elásticas ( $I_p$  e  $V_p/V_s$ ) às propriedades do reservatório ( $\Phi T$  ou  $V_{clay}$ ) tanto para o nível de cobertura/selo quanto para o reservatório. A amarração poço-sísmica aumenta a confiabilidade da estimativa das propriedades de reservatório longe dos poços. Por fim, a calibração das velocidades sísmicas melhora a transformação de profundidade para a estrutura do contêiner e sua espessura e é crucial para a volumetria da capacidade. Como o fluxo de trabalho implementado é principalmente orientado por dados, ele pode ser facilmente estendido em grandes áreas para fins de triagem e caracterização do local de CCS. A classificação e avaliação de vários locais de CCS podem ser feitas usando a matriz de avaliação de risco apresentada e abrem a possibilidade de procurar um local em escala.

#### 5.2.4 Migração Kirchhoff Acelerada em Sistemas Computacionais Heterogêneos *CPU-GPU*

Liu *et al.* (2022) desenvolveu um algoritmo acelerado de migração em profundidade de Kirchhoff baseado na arquitetura de computação paralela heterogênea *CPU-GPU*. Com quatro estratégias de aceleração, incluindo classificação cruzada, interpolação de textura, computação *multi-stream* e otimização de arquitetura paralela, a eficiência do algoritmo foi aprimorada em até 40x em comparação com a versão da *CPU*. Isso reduzirá significativamente o tempo de resposta para o processamento de dados sísmicos e reduzirá consideravelmente o consumo de energia para imageamentos sísmicos.

## 6 Conclusão

Após os referidos testes, pode-se concluir que cada parâmetro tem sua devida importância conforme foi mostrado nas imagens, gráficos e discussões acerca dos resultados obtidos.

É inquestionável que o surgimento de algoritmos de migração modernos e inovadores é uma constante tanto na academia quanto na indústria, e se fazem cada vez mais presentes devido ao aumento do poder computacional que os avanços tecnológicos vêm proporcionando às empresas de processamento, aos centros e institutos de pesquisa do ramo, etc. Contudo, de acordo com os artigos e aplicações práticas considerados nas seções anteriores, nota-se a importância dos dados migrados por Kirchhoff até os dias de hoje, como podem ser úteis em pesquisas dos mais variados temas em destaque na indústria de processamento de dados sísmicos marinhos multicanal, proporcionando importantes *insights* para *CCS*, *ML*, performance de sistemas computacionais, etc. De fato, esses tipos de dados seguem sendo aplicados nos fluxos de processamento sísmico da indústria, conforme exemplificado na tabela 3.

Com relação aos trabalhos em destaque na revisão bibliográfica da seção 4 pode-se concluir que:

- 1) A migração Kirchhoff, que continua sendo uma ferramenta popular para imageamento sísmico, pode ter sua melhor abertura definida no domínio do ângulo. Por outro lado, para uma imagem ideal de objetos de difração, deve ser usada uma abertura de migração tão ampla quanto possível. No entanto, o imageamento de reflexões requer uma abertura menor em torno do ponto tangente. Enfim, a otimização de imageamento proposta por Klovov e Fomel (2013) consiste em achar uma abertura ótima, em um *trade off* considerando os dois fatores supracitados.
- 2) O surgimento de novas ferramentas baseadas em redes neurais tem sido feito também com o uso de dados migrados em Kirchhoff, o que reforça a relevância desse tipo de migração nos dias atuais. Como exemplo, temos a *AI* baseada em uma rede neural profunda e multitarefa, projetada por Ye *et al.* (2022) que provou ser eficiente na interpretação automática simultânea de corpos de sal e horizontes sísmicos.
- 3) O fluxo de trabalho descrito por Pernin *et al.* (2022) demonstra como é possível a aplicação de dados sísmicos - gerados por migração de Kirchhoff em profundidade - para identificação de locais de *CCS* de escala suficientemente grande, atendendo às metas de emissões de carbono vigentes.
- 4) Considerando que a migração de Kirchhoff em profundidade é uma das técnicas sísmicas mais confiáveis para imageamento de geologias complexas, Liu *et al.* (2022)

desenvolveu um algoritmo acelerado de migração de Kirchhoff em profundidade baseado na arquitetura de computação paralela heterogênea *CPU-GPU*, cujas quatro estratégias reduziram significativamente o tempo de resposta para o processamento sísmico e o consumo de energia em imageamentos.

## Referências

- BAKULIN, A. *et al.* Nonlinear beamforming for enhancement of 3D prestack land seismic data. **Geophysics**, v. 85, n. 3, p. 283 – 296, 2020.
- BAYSAL, E.; KOSLOFF, D. D.; SHERWOOD, J. W. C. Reverse time migration. **Geophysics**, SEG, v. 48, p. 1514 – 1524, 1983.
- BIENATI, N. *et al.* Limited aperture migration in the angle domain. In: **71st EAGE Conference and Exhibition Extended Abstracts**. [S.l.: s.n.], 2009. (U005).
- CLAERBOUT, J. F. Imaging the Earth's Interior. **Blackwell Scientific Publications.**, 1985.
- CLAERBOUT, J. F.; DOHERTY, S. M. Downward continuation of moveout-corrected seismograms. **Geophysics**, SEG, Dallas, v. 37, n. 37, p. 741 – 768, 1972.
- DONDURUR, D. **ACQUISITION AND PROCESSING OF MARINE SEISMIC DATA**. Amsterdam: Elsevier, 2018.
- DURHAM, L. S. **Play This: Game Chip Aids Exploration**. march/2010. Disponível em: <https://explorer.aapg.org/story/articleid/2763/play-this-game-chip-aids-exploration>. Acesso em: 02/29/2022.
- ETGEN, J.; GRAY, S. H.; ZHANG, Y. An overview of depth imaging in exploration geophysics. **Geophysics**, v. 74, n. 6, p. 5 – 17, 2009.
- GAZDAG, J. Wave equation migration by phase shift. **Geophysics**, SEG, v. 43, p. 1342 – 1351, 1978.
- GRAMSTAD, O.; NICKEL, M. Automated interpretation of top and base salt using deep convolutional networks. In: **88th Annual International Meeting**. SEG, 2018. p. 1956 – 1960. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/segam2018-2996306.1>.
- HAGEDOOM, J. G. A process of seismic reflection interpretation: Geophys. Prosp. v. 2, p. 85 – 127, 1954.
- HARDY, R. **Basic Seismic Processing For Interpreters**. March 2021. Disponível em: <http://www.xsgeo.com/course/basic.htm#contents>. Acesso em: 26/12/2022.
- HERTWECK, T. *et al.* Aperture effects in 2.5D kirchhoff migration: a geometrical explanation. **Geophysics**, n. 68, p. 1673 – 1684, 2003a.
- HERTWECK, T. *et al.* Aperture effects in 2.5D kirchhoff migration: a geometrical explanation. **Geophysics**, v. 68, p. 1673 – 1684, 2003b.
- JOHNSON, J.; ALAHI, A.; FEI-FEI, L. Perceptual losses for real-time style transfer and super-resolution. In: **European Conference on Computer Vision**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 694 – 711.
- KAUR, H.; PHAM, N.; FOMEL, S. Estimating the inverse Hessian for amplitude correction of migrated images using deep learning. In: MEETING 89th A. I. (Ed.). **89th Annual International Meeting**. SEG, 2019. p. 2278 – 2282. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/segam2019-3207296.1>.

- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. 3. ed. [S.l.]: Blackwell Science, 2002.
- KHAIDUKOV, V.; LANDA, E.; MOSER, T. J. Diraction imaging by focusing/defocusing: An outlook on seismic superresolution. **Geophysics**, n. 69, 2004.
- KLOKOV, A.; FOMEL, S. Selecting an optimal aperture in Kirchhoff migration using dip-angle images. **Geophysics**, v. 78, n. 6, p. S243 – S254, Outubro 2013.
- LEVEILLE, J. P. *et al.* Subsalt imaging for exploration, production, and development: A review. **Geophysics**, n. 76, p. WB3 – WB20, 2011.
- LEWIS, W.; VIGH, D. Deep learning prior models from seismic images for full-waveform inversion. In: **87th Annual International Meeting**. SEG, 2017. p. 1512 – 1517. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/segam2017-17627643.1>.
- LI, H. *et al.* Statistical inversion of variable salt velocity by neural network classification in the central Gulf of Mexico. In: **86th Annual International Meeting**. SEG, 2016. p. 5323 – 5327. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/segam2016-13969828.1>.
- LIU, Y. *et al.* Accelerated Kirchhoff depth migration on CPU-GPU heterogeneous computing systems. In: GEOPHYSICISTS, S. of E.; GEOLOGISTS the American Association of P. (Ed.). **Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 2724 – 2728.
- MAY, F.; MÜLLER, C.; BERNSTONE, C. How much CO<sub>2</sub> can be stored in deep saline aquifers in Germany? VGB Powertech, v. 85, p. 32 – 37, 2005.
- MOUSA, W. A. **ADVANCED DIGITAL SIGNAL PROCESSING OF SEISMIC DATA**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 342 p.
- NEIDELL, N. Perceptions in seismic imaging part 2: Reflective and diffractive contributions to seismic imaging. **The Leading Edge**, n. 16, p. 1121 – 1123, 1997.
- ORISTAGLIO, M. Seam update: The arid model—Seismic exploration in desert terrains. **The Leading Edge**, n. 34, p. 466 – 468, 2015. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/tle34040466.1>.
- PAFFENHOLZ, J. *et al.* Subsalt multiple attenuation and imaging: Observations from the Sigsbee2B synthetic dataset. **SEG Technical Program Expanded Abstracts**, p. 2122 – 2125, 2002.
- PAUGET, F.; LACAZE, S.; VALDING, T. A global approach in seismic interpretation based on cost function minimization. In: SEG, E. A. (Ed.). **79th Annual International Meeting**. [s.n.], 2009. p. 2592 – 2596. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/1.3255384>.
- PERNIN, N. *et al.* Integrated workflow for characterization of CO<sub>2</sub> subsurface storage sites. In: GEOPHYSICISTS, S. of E.; GEOLOGISTS the American Association of P. (Ed.). **Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 449 – 453.
- SCHNEIDER, W. A. INTEGRAL FORMULATION FOR MIGRATION IN TWO AND THREE DIMENSIONS. **GEOPHYSICS**, SEG, Dallas, v. 43, n. 1, p. 49 – 76, Fevereiro 1978.

- SEN, S. *et al.* SaltNet: A production-scale deep learning pipeline for automated salt model building. **The Leading Edge**, v. 39, p. 195 – 203, 2020. Disponível em: <http://mr.crossref.org/iPage?doi=10.1190%2Ftle39030195.1>.
- STOLT, R. H. Migration by Fourier transform. **Geophysics**, SEG, v. 43, p. 23 – 48, 1978.
- SUN, J. On the limited aperture migration in two dimensions. **Geophysics**, n. 63, p. 984 – 994, 1998.
- TANER, M. T.; KOEHLER, F. Velocity spectra|digital computer derivation applications of velocity functions. **Geophysics**, v. 34, p. 859 – 881, 1969.
- TEIXEIRA, D.; YEH, A.; GAJAWADA, S. Implementation of Kirchhoff Prestack Depth Migration on GPU. In: SEG, E. A. (Ed.). **83rd Annual International Meeting**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 3683 – 3686.
- WALDELAND, A. U. *et al.* Convolutional neural networks for automated seismic interpretation. **The Leading Edge**, v. 37, p. 529 – 537, 2018. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/tle37070529.1>.
- WU, Y.; MCMECHAN, G. A. Feature-capturing full waveform inversion using a convolutional neural network. In: **88th Annual International Meeting**. SEG, 2018. p. 2061 – 2065. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/segam2018-2963265.1>.
- YE, R. *et al.* Deep-learning application of salt geometry detection in deep water Brazil. In: GEOPHYSICISTS, S. of E.; GEOLOGISTS the American Association of P. (Ed.). **Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1669 – 1673.
- YILMAZ, O. **SEISMIC DATA ANALYSIS**: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2008. v. 1.
- YILMAZ, O. **Seismic Data Analysis**: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data. Tulsa: SEG, 2001.
- ZHOU, H. *et al.* Salt interpretation with U-SaltNet. In: **90th Annual International Meeting**. [s.n.], 2020. p. 1434 – 1438. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/segam2020-3423283.1>.