



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ESTUDOS DE ILUMINAÇÃO VIA TRAÇADO DE RAIOS EM MODELO DA BACIA DO RECÔNCAVO

FERNANDA CARNEIRO OLIVEIRA

SALVADOR – BAHIA

DEZEMBRO – 2010

Estudos de Iluminação via Traçado de Raios em modelo da Bacia do Recôncavo

por

FERNANDA CARNEIRO OLIVEIRA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

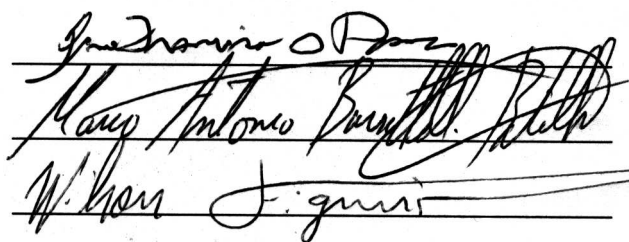
DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora



Msc. Gino Francisco dos Passos - Orientador

Dr. Marco Antônio Barsottelli Botelho

Dr. Wilson M. Figueiró

Data da aprovação: 20/12/2010

Dedico este trabalho, como prova do
meu amor e gratidão, à minha
segunda família:
Tia Solange, Tio Zé, Isa e Fernando

RESUMO

O planejamento da aquisição sísmica é uma etapa do método sísmico que consiste na determinação da geometria e dos parâmetros de aquisição. Devido aos desafios encontrados atualmente durante a exploração, relacionados à áreas novas e ao desenvolvimento de campos de óleo e gás, esta etapa tem se tornado um tópico cada vez mais importante para a indústria do petróleo.

A presença, cada vez mais frequente, de ambientes geológicos complexos, que distorcem a propagação da onda sísmica e localizam o alvo em zonas de sombra com relação às posições dos tiros e dos receptores, cria a necessidade de uma geometria de aquisição ótima, que consiga vencer estes obstáculos da propagação sísmica para cada área.

Para estes ambientes, a única forma de escolher corretamente o dispositivo de aquisição é através de simulações sísmicas avançadas. Esta simulação é realizada durante os Estudos de Iluminação, que são estudos destinados à estimativa da iluminação em determinado horizonte alvo, considerando dispositivos de aquisição diferentes, para avaliar qual obtém melhor resultado.

Este trabalho apresenta mapas de iluminação construídos via traçado de raios em um modelo que representa a borda leste da Bacia do Recôncavo, envolvendo quatro dispositivos de aquisição, possuindo certa semelhança quanto a estrutura, variando apenas alguns parâmetros de registro. O objetivo dos estudos de iluminação consiste em tentar definir o dispositivo mais apropriado ao imageamento de reservatórios pré-rifte sotopostos aos conglomerados de borda, de alta velocidade.

ABSTRACT

Seismic acquisition planning is a stage of the seismic method that consists in determining the acquisition geometry and acquisition parameters. Because of the challenges encountered nowadays during the exploration, related to new areas and to development of oil and gas fields, this stage has become an important topic in the petroleum industry.

The presence, more and more frequent, of complex geologic environments that distort the seismic wave propagation and locate the target in shadow zones with respect to the source and receiver positions, makes it extremely important to find the optimal acquisition geometry that overcomes the obstacles in seismic wave propagation, to each area.

For these environments, the only way to correctly choose the acquisition layout is through advanced seismic simulations. This simulation is held during the illumination studies that are intended to estimate the illumination on a given target horizon, considering different acquisition geometries, to assess which has the best result.

This work presents illumination maps built via ray tracing in a model that represents the eastern edge of Reconcavo Basin, involving four acquisition geometries that have some similarity with respect to the structure, but differ with respect to the acquisition parameters. The purpose of the illumination studies is try to define the more appropriated layout, that correctly sample the pre-rift reservoirs placed beneath high velocities edge conglomerates.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Planejamento da aquisição	3
1.1 Geometrias de aquisição	4
1.1.1 O Arranjo Ortogonal e o Cross Spread	6
1.1.2 <i>Templates</i>	8
1.2 Parâmetros de aquisição	8
1.2.1 Razão de amostragem (Amostragem Temporal)	11
1.2.2 Tamanho da Cella	12
1.2.3 Offset mínimo e Offset máximo	15
1.2.4 Cobertura (<i>Fold</i>)	18
1.3 Área de Aquisição	19
1.3.1 Área de interesse geológico	19
1.3.2 Franja de Migração	19
1.3.3 Área de incremento para a multiplicidade (<i>fold</i>)	20
CAPÍTULO 2 Estudos de Iluminação	22
2.1 Métodos Globais	24
2.2 Métodos Locais	27
CAPÍTULO 3 Traçado de Raios (<i>Ray Tracing</i>)	29
3.1 Construção da Frente de Onda (<i>Wavefront Construction</i>)	33
CAPÍTULO 4 Desenvolvimento	37
4.1 Criação do modelo	37
4.2 Criação da Geometria de Aquisição	40
4.3 Estudos de iluminação	45

CAPÍTULO 5	Resultados	47
5.1	<i>Cross-Spread</i>	47
5.2	Ortogonal N-S x Ortogonal E-W	50
5.3	Ortogonal E-W x Ortogonal E-W com obstáculos	55
CAPÍTULO 6	Conclusões	60
Agradecimentos		62
Referências Bibliográficas		63

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Classes de geometrias de aquisição 3-D: (a) em área, (b) ortogonal, (c) zigzag, e (d) paralela. As linhas contínuas representam os receptores e as tracejadas representam as fontes. (Vermeer, 2002)	5
1.2	A figura evidencia os tiros e receptores correspondentes a um Cross Spread de uma aquisição 3D ortogonal. (Modificado de Vermeer, 2002)	6
1.3	Propriedades do Arranjo Cross Spread. (Modificado de Vermeer, 2002)	7
1.4	Iluminação para quatro Cross Spreads adjacentes para refletores com 15 e 45 graus de mergulho.(Vermeer, 2002)	8
1.5	Figura representando o Patch de uma aquisição. DD_I e DD_X representam as dimensões do dispositivo de registro na direção Inline e na direção Crossline, respectivamente.	9
1.6	Termos do layout da aquisição 3D. (Modificado de Cordsen, 2000)	10
1.7	Registro do sinal sísmico para diferentes intervalos de amostragem.	11
1.8	Definição do X_{min} para estações de tiro e receptor coincidentes (a), e para estações de tiro e receptor deslocadas (b). (Cordsen, 2000)	15
1.9	Nível que possui, pelo menos, uma cobertura Single-fold, determinada pelo tamanho do X_{min} . (Modificado de Cordsen, 2000)	16
1.10	Distribuição da cobertura em um refletor raso, para um X_{min} muito largo.(Cordsen, 2000)	17
1.11	Função "Mute", mostrando a relação entre o offset preservados e o tempo de trânsito. (Modificado de Cordsen, 2000)	17
1.12	A Área da Aquisição pode ser vista como a soma da Área de interesse Geológico, Franja de Migração e Área de Incremento para multiplicidade	20
1.13	Mostra como a Área de Aquisição varia com o objetivo em subsuperfície. (Modificado de Yilmaz, 2001)	21
2.1	Cobertura no domínio CMP e CRP, na modelagem utilizando o mesmo dispositivo de aquisição. (Laurain, 2004)	23
3.1	Raios e sismograma gerado através do <i>Ray Tracing</i> , para um modelo não suavizado: a) e b), e para um modelo suavizado: c) e d). (Gjøystdal, 2007) .	32
3.2	O icosaedro descreve a estrutura básica do ponto de fonte	34
3.3	A frente de onda é propagada através do modelo traçando-se raios da frente de onda antiga até a mais nova. (Vinje, 1996a)	35

3.4	Uma <i>Ray Cell</i> contendo no seu interior um receptor. O dado sísmico é estimado no receptor por interpolação, a partir dos raios r_1 , r_2 e r_3 . (Modificado de Vinje, 1996a)	36
4.1	Seção Geológica da Bacia do Recôncavo. (Brito e Ghignone, 2009)	38
4.2	Seção do modelo criado, que representa, de modo simplificado, a borda leste da Bacia de Recôncavo. A seção mostra também o campo de velocidade, em m/s, da onda P.	39
4.3	Figura mostrando as coordenadas do modelo construído, juntamente com os campos de velocidade (m/s) nas direções N-S e E-W; e o topo da Formação Sergi.	39
4.4	Arranjo Cross Spread gerado através do software OMNI	41
4.5	Figura mostrando o dispositivo Cross Spread sobre o modelo de estudo.	42
4.6	Arranjo Ortogonal N-S	42
4.7	Arranjo Ortogonal N-S, sobre o modelo de estudo. O Patch mostrado na figura é referente à salva de tiros do centro do modelo.	43
4.8	Arranjo Ortogonal E-W	44
4.9	Arranjo Ortogonal E-W, sobre o modelo de estudo. O Patch mostrado na figura é referente à salva de tiros do centro do modelo.	45
4.10	Dispositivo de aquisição Ortogonal E-W com obstáculos	46
4.11	Arranjo Ortogonal E-W com obstáculos, sobre o modelo de estudo.	46
5.1	<i>Hit Map</i> obtido através do arranjo <i>Cross Spread</i>	48
5.2	Mapa de Offset máximo obtido através do arranjo <i>Cross Spread</i>	48
5.3	Mapa de Azimute máximo obtido através do arranjo <i>Cross Spread</i>	49
5.4	Mapa SMA obtido através do arranjo <i>Cross Spread</i>	49
5.5	<i>Hit Map</i> obtido através dos arranjos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W, respectivamente.	51
5.6	Mapa de ângulo máximo de incidência obtido através dos arranjos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W, respectivamente.	51
5.7	Mapa de ângulo mínimo de incidência obtido através dos arranjos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W, respectivamente.	52
5.8	Mapa de Offset máximo obtido através dos arranjos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W, respectivamente.	52
5.9	Mapa de Azimute máximo obtido através dos arranjos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W, respectivamente.	53
5.10	Mapa SMA obtido através dos arranjos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W, respectivamente.	53
5.11	<i>Hit Map</i> obtido através dos arranjos Ortogonal E-W e Ortogonal E-W com obstáculos, respectivamente.	56

5.12	Mapa de ângulo máximo de incidência obtido através dos arranjos Ortogonal E-W e Ortogonal E-W com obstáculos, respectivamente.	56
5.13	Mapa de ângulo mínimo de incidência obtido através dos arranjos Ortogonal E-W e Ortogonal E-W com obstáculos, respectivamente.	57
5.14	Mapa de Offset máximo obtido através dos arranjos Ortogonal E-W e Ortogonal E-W com obstáculos, respectivamente.	57
5.15	Mapa de Azimute máximo obtido através dos arranjos Ortogonal E-W e Ortogonal E-W com obstáculos, respectivamente.	58
5.16	Mapa SMA obtido através dos arranjos Ortogonal E-W e Ortogonal E-W com obstáculos, respectivamente.	58

INTRODUÇÃO

O método sísmico de reflexão constitui a principal ferramenta exploratória na indústria do petróleo desde a década de 1920. A cada dia que passa, devido à maior complexidade dos objetivos de estudo, aumenta a demanda por melhores imagens da subsuperfície, com maior confiabilidade. O aparecimento de algoritmos de migração mais sofisticados, por exemplo, respondeu a parte dos anseios geofísicos na tentativa de ajustar modelos geológicos às seções e volumes sísmicos processados. Entretanto, parte da busca por melhores imagens não reside apenas nas técnicas de processamento, mas também no dispositivo de aquisição empregado, ou seja, no arranjo das fontes e dos receptores.

Basicamente, o método sísmico de reflexão consiste em um sinal gerado na superfície, que é refletido em profundidade, e que carrega de volta à superfície informações sobre os pontos refletores, situados em interfaces geológicas. Logo, caso um ponto em subsuperfície não seja amostrado, não teremos informações sobre o mesmo. Por isso, é importante que, no planejamento de uma aquisição, sejam realizados estudos de iluminação, avaliando diferentes dispositivos (geometrias de aquisição), na busca do que obtenha uma melhor iluminação, garantindo que o objetivo a ser estudado seja satisfatoriamente amostrado. Sendo assim, podemos dizer que os estudos de iluminação são determinantes na escolha da geometria e parametrização de um levantamento sísmico.

A maioria dos métodos empregados nos estudos de iluminação faz uso do traçado de raios. Este método foi desenvolvido inicialmente por um pequeno grupo de geocientistas, na década de 80, tendo como base as idéias apresentadas por Cervený et al. (1977) e Cervený and Hron (1980). O traçado de raios é amplamente utilizado devido à velocidade com que é realizado (método rápido) e por calcular atributos como tempo de trânsito, amplitude, coeficientes de reflexão, entre outros. Entretanto, este método possui certas limitações, como requerer que o modelo de parâmetros elásticos seja construído com determinada suavidade. Estas limitações devem ser consideradas durante a interpretação do dado, já que elas irão influenciar nos resultados.

Vinje et al. (1993b) aprimoram a clássica técnica do traçado de raios entre dois pontos com a introdução do traçamento com frentes de onda, tornando o método mais robusto frente às suas limitações. Além dele, existem diversos outros métodos que podem ser utilizados como uma alternativa ao traçado de raios convencional, como por exemplo o método por feixes gaussianos (Cervený, Popov and Psencik (1982) e Popov (1982)).

O método por diferenças finitas é considerado componente da mais perfeita metodologia possível para estudos de iluminação, sendo, entretanto, considerado impraticável para estudos 3D, devido aos custos computacionais.

Gjøystdal et al. (2007) realizaram um trabalho cuja proposta era melhorar a aplicabilidade do método de traçado de raios na aquisição sísmica, no imageamento e na interpretação. Basicamente, a idéia deste trabalho é realizar a modelagem direta através de processos compostos, que consistem na utilização de uma combinação de métodos (Traçado de Raios e Diferenças Finitas, por exemplo), para serem aplicados, separadamente, em cada parte do modelo, a depender das características e complexidades apresentadas em cada uma delas.

Ainda na linha do método por diferenças finitas, um trabalho de grande destaque foi desenvolvido recentemente por Alves et al. (2009). Este trabalho faz uso da equação da onda para obter os mapas de iluminação. Os resultados alcançados foram satisfatórios, e mais precisos se comparados com os mapas obtidos por traçado de raios. Esta precisão resulta da possibilidade de considerar meios estruturalmente mais complexos, o que não é considerado no traçado de raios, onde os modelos de velocidade precisam ser suavizados. Contudo, o método da equação da onda demanda tempo e um custo computacional mais elevado, o que, a depender do objetivo do trabalho, pode não ser economicamente interessante.

O presente trabalho apresenta resultados da aplicação do método de traçado de raios com frentes de onda. Será feita uma breve fundamentação teórica nos capítulos 1, 2 e 3, introduzindo os conceitos básicos sobre planejamento de uma aquisição, estudos de iluminação e traçamento de raios, respectivamente. No capítulo 4 será feita uma descrição do procedimento realizado, desde a criação do modelo para estudo até os resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 5, os resultados serão mostrados e analisados.

CAPÍTULO 1

Planejamento da aquisição

O Método Sísmico de Reflexão é uma das principais ferramentas utilizadas pela indústria de petróleo. Este método tem como base o fenômeno de propagação de ondas elásticas nas rochas e é utilizado para adquirir informações sobre a subsuperfície, visando, principalmente, mapear estruturas geológicas que possam armazenar hidrocarbonetos ou detalhar campos de óleo e/ou gás já descobertos.

Segundo Yilmaz (2001) a exploração sísmica é dividida em três partes principais:

- Aquisição de dados sísmicos
- Processamento sísmico
- Interpretação sísmica

A aquisição sísmica é a etapa em que os dados a serem analisados serão adquiridos. Esta etapa pode ser subdividida em duas partes principais: planejamento da aquisição e registro dos dados em campo.

No planejamento da aquisição, a geometria de aquisição e os parâmetros de registro são determinados. Já no registro dos dados é quando a aquisição ocorre de fato. Nesta etapa, ondas elásticas são geradas através de fontes artificiais como cargas explosivas ou canhões de ar comprimido. As ondas geradas propagam-se pela subsuperfície, sendo refletidas quando atingem interfaces que separam meios de diferentes propriedades elásticas. Com isso, as ondas voltam para a superfície, onde são captadas por sensores (receptores).

No processamento sísmico, os dados adquiridos na aquisição são tratados, objetivando uma melhor visualização dos mesmos. O produto final é uma imagem da subsuperfície, representada por seções sísmicas, que podem estar em função do tempo ou da profundidade.

A interpretação sísmica consiste na análise das imagens geradas no processamento, visando a delimitação e caracterização geológica de possíveis reservatórios de Hidrocarbonetos.

Segundo Cordsen et al. (2000), os custos de um processamento e de uma interpretação detalhada estão, em geral, em torno de 5 a 10% do valor gasto na aquisição. Com isso,

verifica-se a importância da aquisição e, conseqüentemente, do planejamento para a Exploração Sísmica. Qualquer equívoco em uma destas etapas pode comprometer as etapas seguintes, impactando o estudo como um todo, além de comprometer o custo da pesquisa.

No Planejamento da aquisição é importante que o objetivo de estudo esteja devidamente definido. Será com base nele que todos os parâmetros de registro e o desenho da aquisição serão determinados. Além disso, é de extrema importância fazer um levantamento bibliográfico, coletando todas as informações existentes sobre a região, como por exemplo: dados geológicos (mapas topográficos e mapas estruturais) e dados geofísicos (seções sísmicas, dados de poços, mapas magnéticos e gravimétricos). Estas informações podem ser muito úteis, já que possibilitam uma estimativa mais confiável de dados extremamente necessários na determinação dos parâmetros de aquisição, como profundidade dos objetivos, mergulho das camadas, direção e mergulho das falhas e velocidade das camadas em estudo.

Uma visita ao campo, antes de realizar a aquisição, também é muito válida para o planejamento. Com esta visita, mais informações sobre a região podem ser obtidas e, além disso, a delimitação de possíveis obstáculos pode ser realizada. Estes obstáculos são fatores que podem afetar o arranjo do levantamento e a aquisição, como por exemplo, fatores topográficos, restrições ambientais, áreas de cultivo e áreas demográficas.

Um bom planejamento é essencial para se atingir um resultado satisfatório, com o equilíbrio entre a qualidade do dado e o custo da pesquisa. Entretanto, para certificar que todos estes requisitos sejam satisfeitos, recomenda-se a realização de Estudos de Iluminação (como será visto no Capítulo 2). Estes estudos fazem uma simulação da trajetória do raio, para determinada geometria de aquisição, e obtêm como resultado mapas de iluminação sobre o objetivo de estudo. Com estes mapas, pode-se verificar se o alvo reservatório será amostrado e imageado corretamente. Os obstáculos delimitados em campo também podem ser considerados durante os estudos de iluminação, o que torna o estudo ainda mais realístico.

A depender da iluminação obtida e da qualidade do dado, a geometria da aquisição usada no modelo do estudo pode ser preservada, ajustada ou rejeitada. Portanto, estudos de iluminação 3D reduzem o risco da exploração sísmica, fornecendo medidas quantitativas que auxiliam no design da pesquisa.

1.1 Geometrias de aquisição

Atualmente, na indústria, existem diversas geometrias de aquisição. Cada uma apresenta características diferentes quanto a cobertura, distribuição de afastamentos (offsets), distribuição de azimutes, continuidade espacial, entre outros.

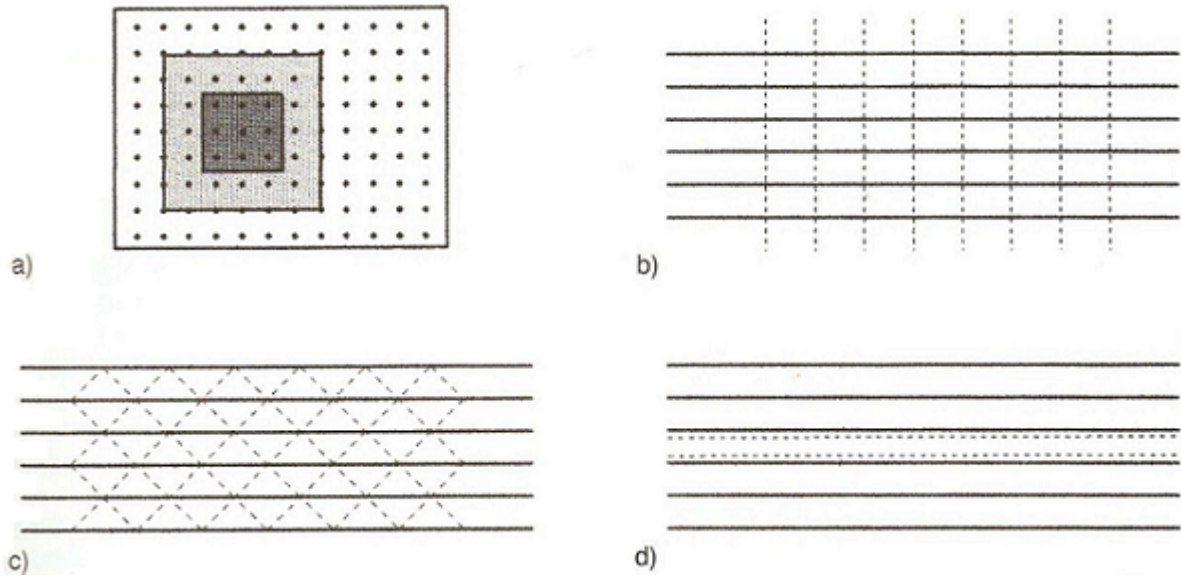


Figure 1.1: Classes de geometrias de aquisição 3-D: (a) em área, (b) ortogonal, (c) zigzag, e (d) paralela. As linhas contínuas representam os receptores e as tracejadas representam as fontes. (Vermeer, 2002)

Em geral, toda aquisição procura equilibrar a qualidade dos dados com o custo do procedimento. Ou seja, o ideal é realizar uma aquisição com máxima cobertura, boa amostragem da área de interesse e custo mínimo.

Segundo Vermeer (2002), as geometrias podem ser classificadas em geometrias em área (*Areal Geometry*) ou geometrias em linha (*Line Geometry*), como pode ser visto na Figura 1.1. Existem também as Geometrias aleatórias, que são usadas apenas quando as condições da superfície (obstáculos) impedem um *layout* regular de tiros e receptores.

A geometria em área (Figura 1.1(a)) é formada por tiros amplamente espaçados cobertos arealmente por estações de receptores. A aquisição nesta geometria ocorre de forma que o tiro é registrado por receptores espalhados em uma malha que cobre uma grande área (ou o contrário, um receptor para uma malha de tiros). Já na geometria em linha, as linhas de tiro são posicionadas paralelamente entre si, assim como as linhas de receptores. A depender da orientação das linhas de tiro com relação às linhas de receptores, a geometria em linha pode ser subdividida em geometria paralela, em que as linhas de tiro são paralelas às de receptores (Figura 1.1(d)), ou de arranjo cruzado (*Crossed-Array*), onde estas linhas se interceptam.

No sub-grupo de arranjos cruzados estão as geometrias ortogonal, em que as linhas de tiro são perpendiculares às de receptor (Figura 1.1(b)), e zigzag (Figura 1.1(c)), onde dois conjuntos de linhas de tiro são posicionadas de modo a formar 45° com as linhas de receptores.

Em levantamentos 3D marinhos, o arranjo mais utilizado é o paralelo (*Line Shooting*). Em terra, o mais utilizado é o ortogonal, também chamado de *Swath Shooting*.

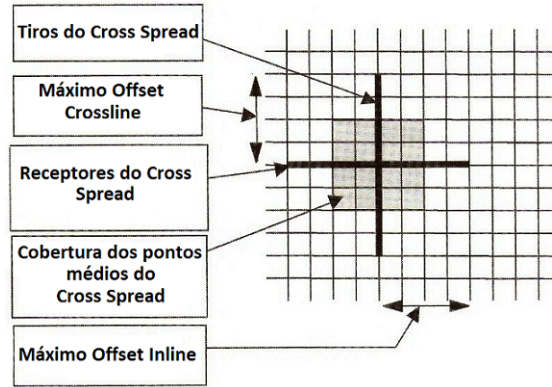


Figure 1.2: A figura evidencia os tiros e receptores correspondentes a um Cross Spread de uma aquisição 3D ortogonal. (Modificado de Vermeer, 2002)

Em levantamentos 3D terrestres, considera-se o arranjo ortogonal mais adequado em relação ao paralelo. Para que o arranjo paralelo tenha um bom intervalo de amostragem, o espaçamento entre as linhas de aquisição deve ser pequeno, o que aumenta seu custo. Além disso, por conta do espaçamento curto entre as linhas, o arranjo paralelo requer áreas de fácil acesso, o que geralmente é difícil de ocorrer na prática. Outra característica que difere as geometrias é com relação à riqueza azimutal. Na geometria paralela a aquisição é *Single Azimuth* (ou *narrow azimuth*), enquanto que na ortogonal, a aquisição é *Wide Azimuth*. Por conta disto, o arranjo ortogonal é mais apropriado para imageamento de ambientes complexos. Entretanto, o processamento de dados para a geometria paralela é mais simples do que o da geometria ortogona.

Tendo em vista como as características mudam de um arranjo para o outro, a escolha da geometria será feita com base nas propriedades de cada dispositivo, visando a aquisição que mais satisfaça os objetivos do estudo.

1.1.1 O Arranjo Ortogonal e o Cross Spread

Se agruparmos os traços que pertencem a uma mesma linha de tiro e de receptor, no arranjo ortogonal, obteremos um arranjo *Cross Spread*, formado por uma linha de tiro e outra de receptor (Figura 1.2). Com isso, pode-se dizer que existem tantos Cross Spreads quanto intersecções no arranjo ortogonal.

O offset máximo do Cross Spread na direção Inline é igual à metade do comprimento da linha de receptores e, na direção Crossline, é igual à metade do comprimento da linha de tiro. A razão entre estes dois comprimentos (Crossline/Inline) determina a razão de achatamento (*aspect ratio*) do cross spread.

No presente trabalho, foram criados arranjos *Cross Spread* e Ortogonais para realizar os estudos de iluminação. A razão de achatamento do Cross Spread criado é igual à 1 (um), ou

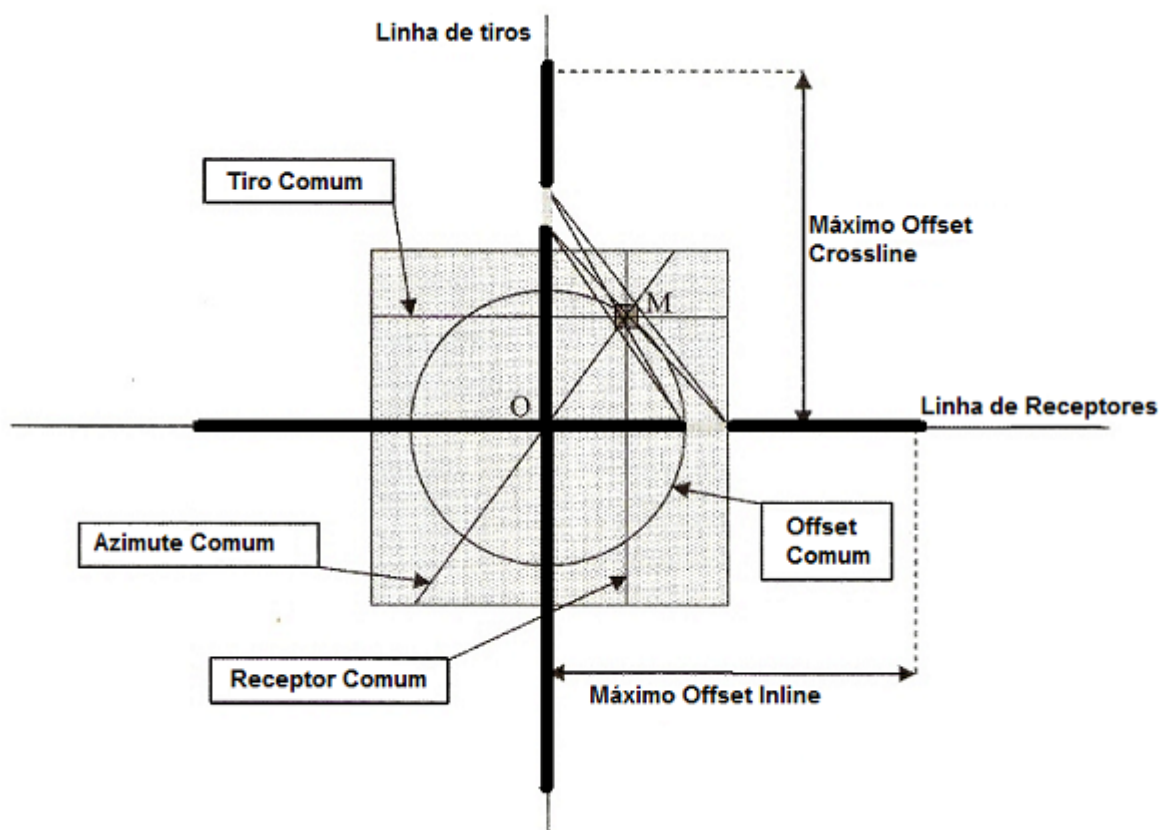


Figure 1.3: Propriedades do Arranjo Cross Spread. (Modificado de Vermeer, 2002)

seja, os comprimentos dos offsets são iguais nas direções Inline e Crossline. Já nos arranjos Ortogonais, a razão de achatamento, para o *Template* de aquisição utilizado, foi de 0,5, ou seja, o offset na direção Inline tem o dobro do tamanho do offset na direção crossline.

A Figura 1.3 ilustra algumas propriedades do arranjo Cross Spread. O traço no ponto M é membro de diferentes grupos, como os de tiro comum, receptor comum, offset comum e azimuth comum. Os atributos espaciais dos traços em volta de M variam lentamente, fazendo do arranjo um conjunto de dados contínuos espacialmente. Por outro lado, o offset máximo do arranjo limita a extensão de cada Cross Spread, formando descontinuidades espaciais na geometria ortogonal (Figura 1.4). Como pode ser visto na figura, em torno das extremidades existem vazios e superposições. Além disso, a depender do mergulho do refletor em estudo, estes vazios e superposições podem ser mais significativos.

Mesmo que os Cross Spreads apresentem uma extensão limitada, é possível criar uma cobertura unitária (*single fold*, cobertura contínua, mas sem redundância), colocando os arranjos próximos uns dos outros. Em um conjunto *single fold* (também chamada de cobertura 100%), o dado pode ser contínuo por partes, com descontinuidades entre Cross Spreads adjacentes, ou seja, nas suas bordas.

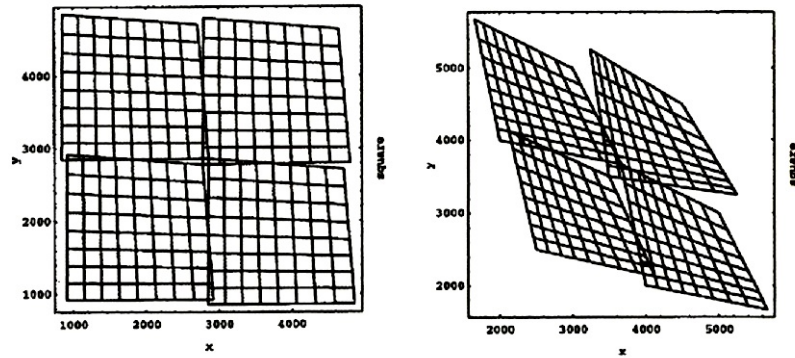


Figure 1.4: Iluminação para quatro Cross Spreads adjacentes para refletores com 15 e 45 graus de mergulho. (Vermeer, 2002)

1.1.2 Templates

Em campo, o dado é adquirido de acordo com os *templates*, que consistem em uma série de tiros (também chamado de salva), registrados por um grupo de receptores ativos (*patch*), como mostra a Figura 1.5. O patch se movimenta em torno da área de aquisição e ocupa diferentes posições de template conforme o levantamento se move para diferentes estações de tiros.

Sendo assim, pode-se dizer que o template representa a forma em que os dados são adquiridos em campo (Figura 1.6).

Na figura 1.6, a “caixa” é definida como a área limitada por duas linhas de tiro adjacentes e por duas linhas de receptores adjacentes. Desta forma, a extensão da caixa na direção crossline é dada pelo intervalo entre as linhas de receptores (ILR) e na direção inline a extensão é dada pelo intervalo entre as linhas de tiro (ILT).

Na indústria, o termo *Swath* usado durante a aquisição representa a largura da área sobre a qual as estações de tiros são registradas sem nenhum movimento da cross line, ou seja, se refere à técnica de levantamento de reflexão sísmica, na qual, duas ou mais linhas paralelas são registradas ao mesmo tempo, sem haver movimento das mesmas.

A escolha da configuração geométrica dos receptores ativos (Patch) é um dos componentes mais significativos do design 3D.

1.2 Parâmetros de aquisição

Os parâmetros que precisam ser definidos no planejamento da aquisição são: amostragem, intervalo entre estações de tiro e receptores, intervalo entre as linhas, offset máximo e mínimo, distribuição de offsets, cobertura, entre outros. Todos estes parâmetros são definidos com

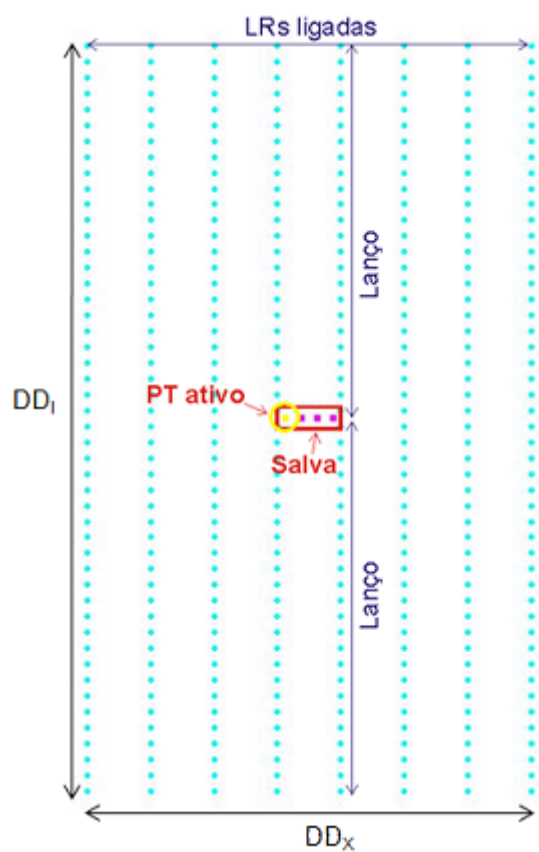


Figure 1.5: Figura representando o Patch de uma aquisição. DD_I e DD_X representam as dimensões do dispositivo de registro na direção Inline e na direção Crossline, respectivamente.

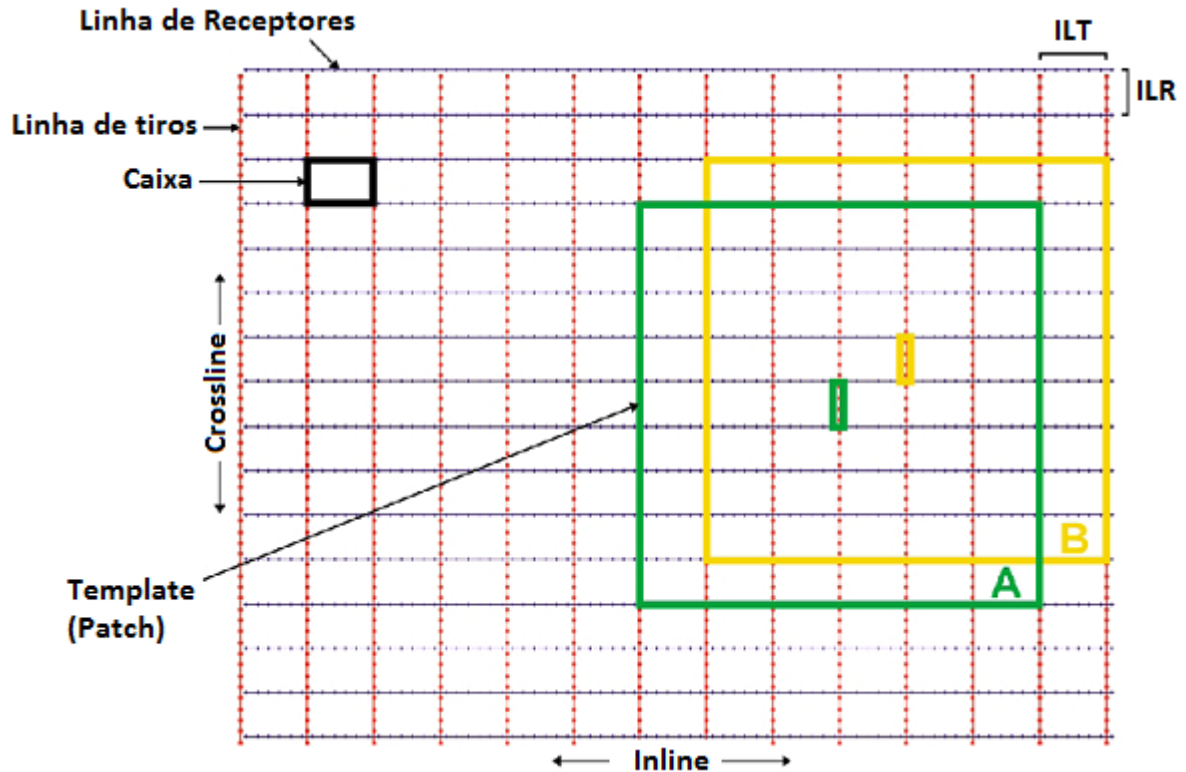


Figure 1.6: Termos do layout da aquisição 3D. (Modificado de Cordsen, 2000)

base nos requerimentos geofísicos desejados, por exemplo: a amostragem espacial é determinada com base na continuidade espacial requerida para o dado; os intervalos entre as estações de tiros e receptores são definidos de acordo com a resolução desejada; o intervalo entre as linhas pode ser determinado considerando o horizonte mais raso a ser mapeado; o offset máximo é definido com base no horizonte mais profundo a ser mapeado; e a cobertura é definida visando a eliminação de ruídos.

Apesar de terem sido citados separadamente, todos estes critérios estão interrelacionados. Por exemplo, um dado com uma boa continuidade espacial irá, em geral, permitir uma boa eliminação de ruídos. Sendo assim, é prudente escolher os parâmetros considerando o meio como um todo.

Além disso, tendo em vista a influência que os parâmetros exercem sobre o dado, podemos concluir que eles devem ser escolhidos cuidadosamente, visando o equilíbrio entre o que o intérprete deseja visualizar e o que o orçamento irá permitir.

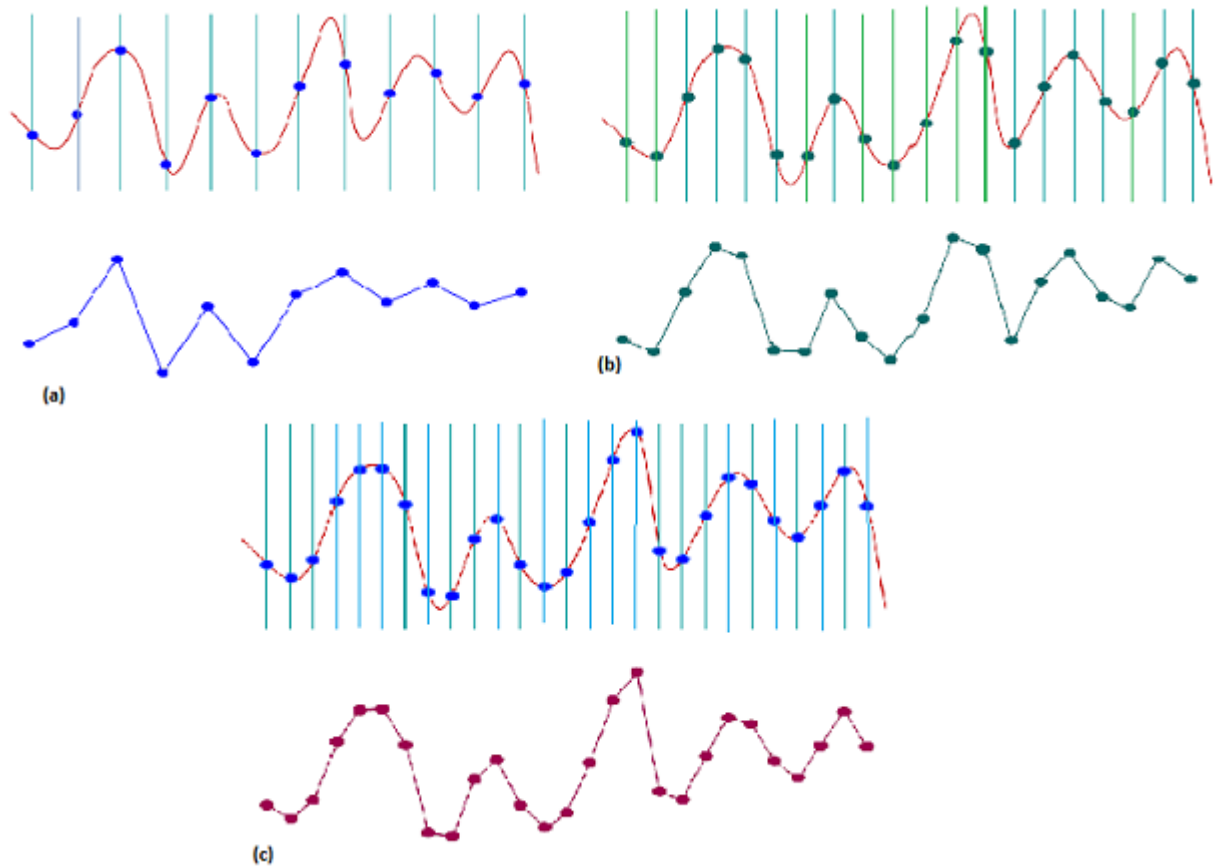


Figure 1.7: Registro do sinal sísmico para diferentes intervalos de amostragem.

1.2.1 Razão de amostragem (Amostragem Temporal)

No método sísmico digital, o traço sísmico não é registrado continuamente em função do tempo t , mas amostrado segundo um intervalo constante Δt . A depender do valor escolhido para o intervalo de amostragem, informações importantes podem ser perdidas, ou informações em excesso podem ser registradas. Os valores típicos dos intervalos de amostragem variam entre 1 a 4 ms para a maioria dos trabalhos de sismica de reflexão. Estudos de alta resolução requerem intervalos pequenos, na faixa de 0,25 ms.

Como pode ser visto na Figura 1.7, quanto maior o intervalo de amostragem, mais suave é o registro do sinal. Esta suavidade resulta da “perda” das altas frequências no registro do traço sísmico.

Na realidade, o que ocorre durante o registro do traço não é a perda dos sinais de alta frequência, mas sim, a amostragem destes sinais como se tivessem mais baixa frequência, ou seja, na forma de um evento falso. Este fenômeno é denominado de Efeito Álias, ou falseamento.

O valor do intervalo de amostragem determina qual é a maior frequência que pode

ser registrada sem o efeito do falseamento, ou seja, determina o limite entre as frequências amostradas corretamente e aquelas que se apresentam em álias. Este limite é denominado de Frequência de Nyquist e é definido pela seguinte expressão:

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad (1.1)$$

Portanto, o efeito álias ocorre quando se deseja amostrar um sinal de frequência maior que a de Nyquist. A frequência observada para este sinal (Frequência de Álias, f_A) é dada por:

$$f_A = |2mf_N - f_S| \quad (1.2)$$

Onde f_N é a frequência de Nyquist, m é um inteiro tal que $f_A < f_N$, e, f_S é a frequência do sinal.

Quando os dados sísmicos são inadequadamente amostrados, torna-se quase impossível identificar com segurança quais são os eventos falsos. Dessa forma, durante o planejamento, é fundamental estabelecer, com base no alvo de estudo, a faixa de frequências que se deseja amostrar. Sendo assim, para que nenhuma informação seja perdida, a razão de amostragem (RA) deve ser calculada por:

$$RA \leq \frac{1}{2.F_{MAX}} \quad (1.3)$$

Onde F_{MAX} é a frequência máxima que se espera recuperar.

Considerando que a Terra atua como um filtro corta-altas muito forte, dificilmente obtém-se frequências acima de 250 Hz (geralmente abaixo dos 100 Hz), o que implica em valores mínimos para a RA, em torno de 2ms.

Também, durante o planejamento, deve-se determinar qual o tempo de registro (TR) do receptor. Este tempo é dado em segundos e pode ser calculado por:

$$TR = 1,5.t \quad (1.4)$$

Onde t é o tempo de ocorrência do refletor mais profundo.

1.2.2 Tamanho da Cella

Até o final dos anos 70, quando o primeiro levantamento 3D foi realizado, a subsuperfície era imageada usando geometrias de aquisição 2D. Durante os anos 90, a configuração de

levantamento 3D ganhou reconhecimento na indústria e hoje é um método de aquisição comum. Como uma consequência, os conceitos básicos por trás do arranjo 3D convencional são herdados do planejamento de aquisição 2D. No processamento de dados 2D por exemplo, os traços são agrupados em famílias de ponto médio comum (*CMP- Common-midpoint gathers*) para criar o empilhamento CMP. Assim, como consequência, no processamento de dados 3D, os traços são agrupados em famílias de cela comum (*Common-cell gathers* ou *bins*) para criar empilhamentos “*common-cell*”. Sendo assim, o tamanho da cela define a área sobre a qual os traços são empilhados.

O tamanho da cela pode ser determinado com base em três fatores: tamanho do alvo, frequência máxima a ser recuperada e resolução lateral.

Se o alvo for muito pequeno, então as celas deverão ser pequenas o suficiente para reunir pelo menos dois a três traços ao longo do alvo (Cordsen et al., 2000). Este requerimento dá ao planejamento uma estimativa inicial para o tamanho da cela, que é:

$$Tamanho\ da\ cela \leq \frac{Tamanho\ do\ Alvo}{3} \quad (1.5)$$

A frequência máxima a ser recuperada também deve ser considerada na determinação do tamanho das celas pois, a depender do espaçamento entre os traços, pode ocorrer falseamento das frequências no dado. Em levantamentos 2D, a frequência de álias pode ser calculada por:

$$f_{aliasing} = \frac{V_{RMS}}{4.\Delta x.\sin\alpha} \quad (1.6)$$

Onde $f_{aliasing}$ é a frequência de álias, V_{RMS} é a velocidade RMS até o objetivo, Δx é o intervalo entre receptores e α é o mergulho da camada mais inclinada.

Como pode ser visto pela equação, o falseamento espacial pode ser gerado por diversos fatores. Entre eles estão: o mergulho das camadas e o intervalo entre receptores. Quanto maior o espaçamento entre os receptores, menor será a frequência em que o falseamento ocorrerá; e, quanto maior a inclinação de um horizonte, menor será a frequência de álias.

Através da relação mostrada pela equação 1.6, pode-se calcular a extensão da cela, nas direções Inline e Crossline, evitando o falseamento espacial dos dados. Para isso, deve-se ter de entrada a frequência máxima a ser recuperada (F_{MAX}), o campo de velocidades até o objetivo e o mergulho da camada mais inclinada em subsuperfície. Sendo assim, a equação para o cálculo do tamanho da cela fica da seguinte forma:

$$D_{XY} \leq \frac{V_{RMS}}{4.F_{MAX}.\sin\alpha} \quad (1.7)$$

Onde D é uma das dimensões da cela, a qual pode estar na direção inline (D_X) ou na direção crossline (D_Y).

Com relação à resolução, assume-se que o tamanho da cela deve estar entre um quarto ($1/4$) e metade ($1/2$) do comprimento de onda dominante. Com isso, pode-se obter um dado com uma resolução aceitável, sem perda de informações. Uma cela com o tamanho menor que um quarto do comprimento de onda irá causar a sobre-amostragem do dado e isso não acrescentará nenhuma informação. Uma cela com o tamanho maior que a metade do comprimento de onda resulta no falseamento espacial do dado e na perda de informações.

O menor valor obtido através dos cálculos referentes a cada fator discutidos acima será atribuído ao tamanho da cela.

A forma ideal para uma cela é um quadrado. Entretanto, se a resolução requerida para uma direção for diferente da requerida para a outra, então a cela pode assumir outra forma. Além disso, problemas de custo podem determinar diferentes intervalos para as estações de tiro e de receptor, o que afeta a forma e tamanho da cela. Em geral, os tamanhos típicos das celas são 25x25m para aquisição em terra e 12.5x25m para aquisição marinha (Yilmaz, 2001).

O intervalo entre as estações de tiro (IPT) e o intervalo entre as estações de receptor (IE) são determinados com base no tamanho da cela, através das seguintes relações:

$$IPT = 2.D_Y \quad (1.8)$$

$$IE = 2.D_X \quad (1.9)$$

Onde D_Y é a dimensão da cela na direção crossline e D_X é a dimensão da cela na direção inline.

Estes parâmetros (IPT e IE), se não definidos adequadamente, podem afetar a continuidade espacial e a resolução do dado, além de gerar falseamento espacial no mesmo.

O alias espacial tem sérios efeitos no desempenho de processos multicanais como filtragem f-k e migração. Caso a amostragem espacial seja realizada de forma inadequada, a migração pode perceber eventos íngremes ou de alta frequência como diferentes do que são na realidade, posicionando-os de forma errada na seção sísmica. Portanto, por conta do falseamento, os processos multicanais podem detectar eventos que diferem do que são na realidade, não sendo tratados apropriadamente.

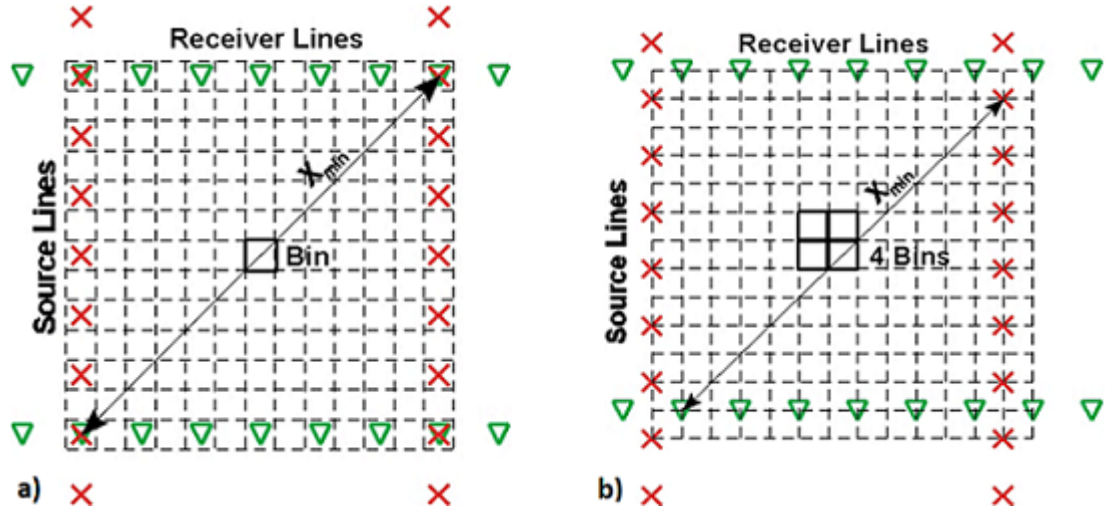


Figure 1.8: Definição do X_{min} para estações de tiro e receptor coincidentes (a), e para estações de tiro e receptor deslocadas (b). (Cordsen, 2000)

1.2.3 Offset mínimo e Offset máximo

Os menores offsets na geometria ortogonal ocorrem nas posições dos pontos médios próximos às interseções entre as linhas de tiro e receptor. No centro da caixa formada por linhas adjacentes de tiro e receptor, o menor offset é igual ao comprimento da diagonal da caixa. Este offset representa o maior offset mínimo (X_{min}) da geometria. Sendo assim, conclui-se que, a cela no centro da caixa possui o maior X_{min} em relação às outras celas da caixa (Figura 1.8a) e quanto maior for a distância entre as linhas, maior o X_{min} .

Geralmente, nos arranjos Ortogonais, as linhas de tiros são deslocadas com relação às linhas de receptores (Figura 1.8b) para que não haja superposição das estações de tiro e receptor, evitando o registro duplicado de raios. Quando este deslocamento é realizado, as quatro celas no centro da caixa possuem o mesmo offset mínimo (X_{min}). Este offset é calculado por:

$$X_{min} = \sqrt{(ILR - 0,5.IPT)^2 + (ILT - 0,5.IE)^2} \quad (1.10)$$

Onde ILR é o intervalo entre as linhas de receptores, IPT é o intervalo entre os pontos de tiro, ILT é o intervalo entre as linhas de tiro e IE é o intervalo entre as estações de receptores.

Em um levantamento, os offsets curtos são necessários para iluminar subsuperfícies rasas. Logo, a distância entre as linhas de aquisição determina o nível mais raso que pode ser mapeado.

Durante o planejamento, deve-se ter em mente qual é o horizonte mais raso a ser

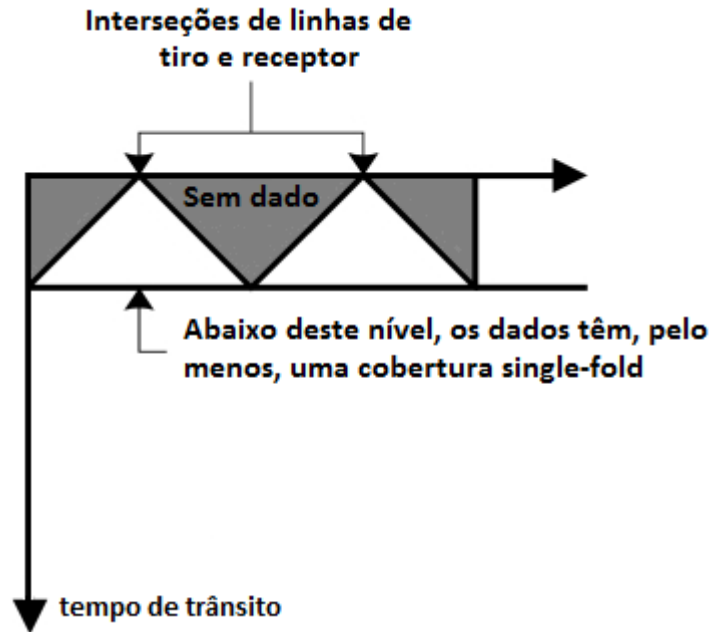


Figure 1.9: Nível que possui, pelo menos, uma cobertura Single-fold, determinada pelo tamanho do X_{min} . (Modificado de Cordsen, 2000)

amostrado. A partir dele o X_{min} será determinado, e em seguida os intervalos entre as linhas de tiro e as linhas de receptor serão definidos. Em geral, o X_{min} deve ser menor do que 1 a 1.2 vezes a profundidade do refletor mais raso (Cordsen, Galbraith and Peirce, 2000). Seu valor assegura que o dado tenha pelo menos uma cobertura *single-fold* ao nível do refletor raso (Figura 1.9).

Quando os intervalos entre as linhas de tiro e receptor são determinados de forma a gerar um X_{min} muito largo para o refletor raso, então a distribuição da cobertura para este refletor será formada por diversas lacunas, sem multiplicidade (Figura 1.10).

No planejamento, além de saber qual o horizonte mais raso a ser mapeado, deve-se ter em mente qual será a multiplicidade requerida para o mesmo. Empilhamentos de dados *single fold*, nas celas que possuem o maior X_{min} , não são suficientes para uma interpretação precisa. Geralmente, pelo menos uma multiplicidade de quatro (*four-fold*) é necessária para ter confiança suficiente na interpretação (Vermeer, 2002).

Além disso, na determinação do X_{min} deve-se considerar também a função *mute* (Figura 1.11), que determina de que forma o *mute* é aplicado no dado depois da correção NMO (*Normal Moveout*). Através desta função, pode-se saber qual é o maior offset que contribui para a seção empilhada ou migrada para cada tempo de trânsito. Assim, para o tempo do refletor mais raso, é possível saber qual o intervalo de offsets que irão contribuir no dado. A função *mute* pode ser obtida com base em dados anteriores registrados na área. Se estes dados não tiverem a disposição, a função *mute* deve ser calculada para uma função velocidade

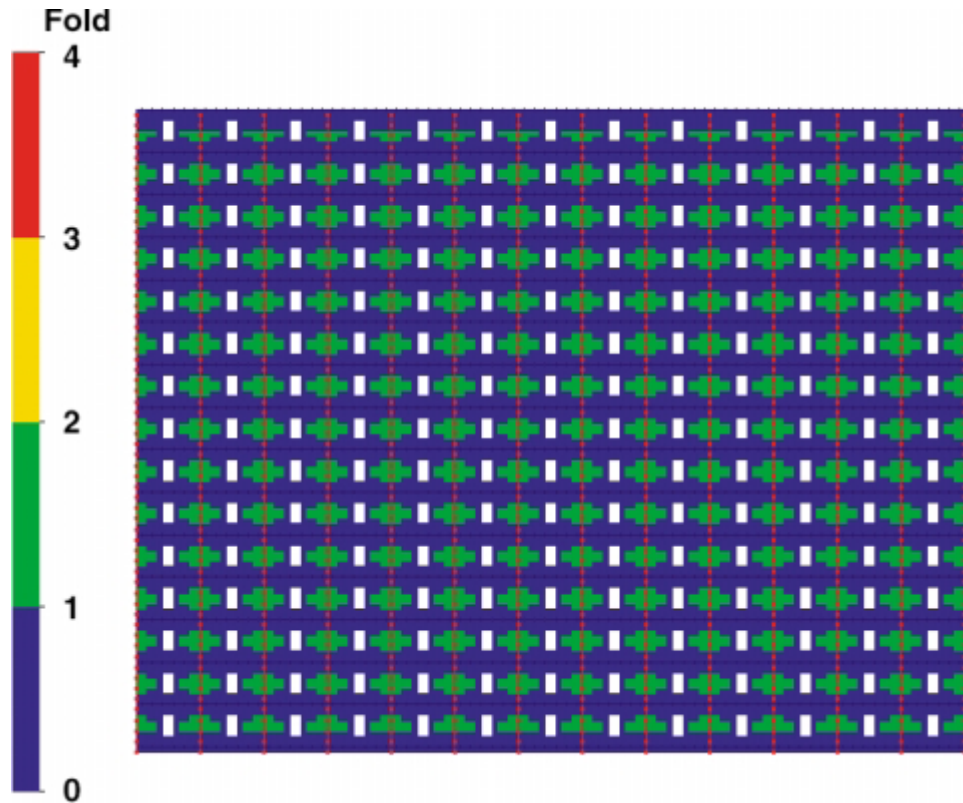


Figure 1.10: Distribuição da cobertura em um refletor raso, para um X_{min} muito largo. (Cordsen, 2000)

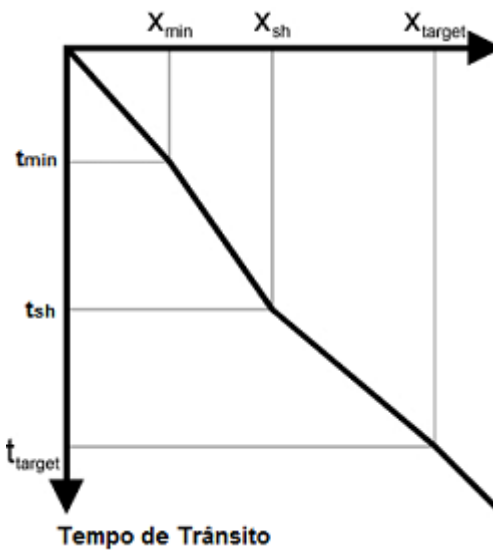


Figure 1.11: Função "Mute", mostrando a relação entre o offset preservados e o tempo de trânsito. (Modificado de Cordsen, 2000)

representativa, assumindo um stretch NMO máximo.

O horizonte mais profundo a ser mapeado determina o limite do offset máximo a ser usado na aquisição, ou seja, o offset máximo (X_{max}) requerido depende da profundidade do

alvo mais profundo a ser imageado. O X_{max} escolhido irá determinar a extensão da linha de receptores e da linha de tiros.

É importante destacar que, durante a determinação do X_{max} , além de ter em mente qual o refletor mais profundo, deve-se considerar as implicações do normal moveout (NMO) e do mergulho dos refletores sobre o dado.

O mute dos offsets distantes tem um grande impacto na seleção dos offsets máximos registrados. A função mute determina o offset máximo X_{dp} para o horizonte mais profundo correspondente ao tempo t_{dp} referente ao horizonte (Figura 1.11).

O offset máximo exerce uma forte influência na continuidade espacial do dado. No arranjo ortogonal, por exemplo, cada limite do cross spread representa uma descontinuidade espacial. Logo, é importante maximizar o offset útil de cada cross spread, a fim de minimizar esta descontinuidade.

O comprimento das linhas de receptores e das linhas de tiros são determinados com base no Offset máximo.

A relação offset máximo na direção Crossline e offset máximo na direção Inline define o “*aspect ratio*” do levantamento, controlando a cobertura azimutal. Quanto mais próxima de 1 (um) for essa relação, mais completa será a amostragem azimutal, permitindo a definição de atributos azimutais no processamento e uso de mais informações para a interpretação, por exemplo, na definição de zonas de fraturamento.

1.2.4 Cobertura (*Fold*)

A cobertura (multiplicidade) é definida com base na razão sinal-ruído (S/N) requerida para o dado. Geralmente, o “*designer*” de uma aquisição 3D tem uma idéia razoável da cobertura requerida para atingir uma razão S/N adequada. A escolha da cobertura pode ser feita com base em experiências passadas, como por exemplo, ter como guia o sucesso ou a falha de um levantamento (3D ou 2D) adquirido no terreno, ou em uma região próxima ou similar.

A multiplicidade é definida como o número de traços que contribuem para um traço empilhado, ou seja, é o número de pontos médios por cela (*CMP Bin*).

Na direção Inline, a multiplicidade (M_I) é dada por:

$$M_I = \frac{N_C \cdot IE}{2 \cdot ILT} \quad (1.11)$$

Onde N_C é o número de receptores ativos por linha de receptor, IE é o espaçamento entre estações de receptor e ILT é o intervalo das linhas de tiro.

Na direção Crossline, a multiplicidade (M_X) é dada por:

$$M_X = \frac{N_T \cdot ILT \cdot NLR}{2 \cdot ILR \cdot NLRR} \quad (1.12)$$

Onde N_T é o número de tiros na salva, ILT é o intervalo das linhas de tiro, NLR é o número de linhas de receptor no dispositivo, ILR é o intervalo entre as linhas de receptor e $NLRR$ é o número de linhas de receptor roladas durante o levantamento.

Desta forma, a multiplicidade total (M) será:

$$M = M_I \cdot M_X \quad (1.13)$$

1.3 Área de Aquisição

A Área de Aquisição é determinada considerando a extensão da área a ser mapeada (área de interesse geológico - AIG). Com base no meio em estudo (inclinação das camadas e profundidade do alvo) um raio de migração é acrescentado à área de interesse, em todas as direções. Esta extensão é chamada de Franja de Migração (FM).

Para que a franja de migração anexada à área de interesse possua uma cobertura plena (*full fold*), outra área precisa ser anexada à área de interesse. Este incremento é chamado de área de incremento de multiplicidade (AIM).

Estas extensões na área do levantamento asseguram a iluminação satisfatória do objetivo. A Figura 1.12 mostra a área de aquisição, com seus incrementos e cobertura delimitados.

1.3.1 Área de interesse geológico

A área de interesse geológico representa a área do objetivo em estudo. Esta área precisa ser delimitada e seu meio caracterizado, ajudando na determinação da Franja de Migração e da Área de incremento de multiplicidade.

1.3.2 Franja de Migração

A Migração é uma etapa do processamento que tem a função de posicionar refletores inclinados e falhas nas suas verdadeiras posições. Entretanto, para que estes eventos sejam corretamente posicionados, é necessário que eles sejam completamente amostrados. A franja de migração atua neste sentido, acrescentando às bordas da área de interesse geológico a área necessária para que todos os eventos inclinados sejam amostrados (Figura 1.12).

Em meios de velocidades constantes, a Franja de Migração é dada por:

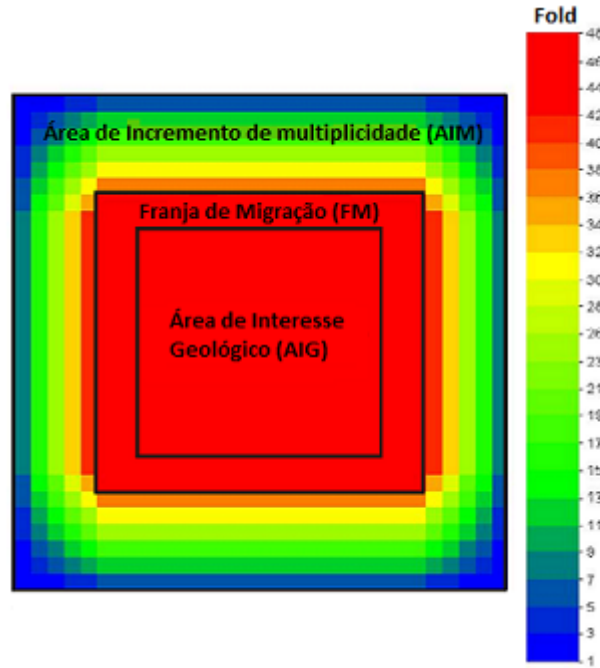


Figure 1.12: A Área da Aquisição pode ser vista como a soma da Área de interesse Geológico, Franja de Migração e Área de Incremento para multiplicidade

$$FM = Z \tan \theta \quad (1.14)$$

Onde Z é a profundidade do objetivo mais profundo e θ é o ângulo de mergulho máximo das camadas.

A depender do meio em estudo, a área da aquisição não precisará ser estendida igualmente em todas as direções. Como pode ser visto na Figura 1.13, o flanco do norte é mais inclinado com relação ao do sul. Logo, a área de aquisição deve ser maior na direção norte.

Portanto, o ideal é que a franja de migração, e conseqüentemente a área da aquisição, seja calculada para cada direção.

1.3.3 Área de incremento para a multiplicidade (*fold*)

A Área de incremento para a multiplicidade (AIM) pode ser calculada nas direções Inline e Crossline.

Na direção inline é dada por:

$$AIM_I = \frac{DD_I}{4} - \frac{ILT}{2} \quad (1.15)$$

Onde DD_I é a dimensão do dispositivo de registro na direção Inline e ILT é o intervalo

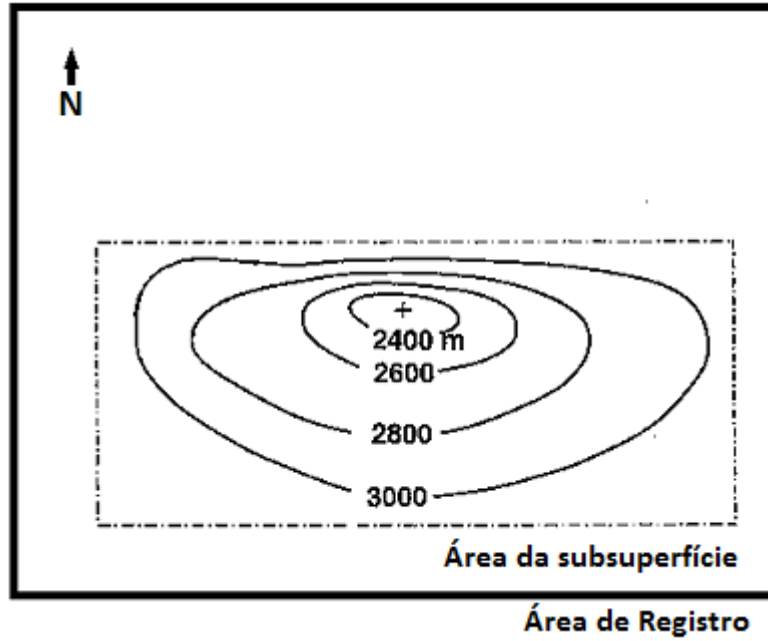


Figure 1.13: Mostra como a Área de Aquisição varia com o objetivo em subsuperfície. (Modificado de Yilmaz, 2001)

entre as linhas de tiro.

Na direção crossline, a área de incremento para a multiplicidade é dada por:

$$AIM_X = \frac{DD_X}{4} - \frac{ILR}{2} \quad (1.16)$$

Onde DD_X é a dimensão do dispositivo de registro na direção Crossline e ILR é o intervalo entre as linhas de receptor.

CAPÍTULO 2

Estudos de Iluminação

Segundo Sheriff (2002), Iluminação é definida como a energia da onda sísmica atingindo um refletor e assim, disponível para ser refletida. Ela depende da configuração dos tiros e receptores e da distribuição da velocidade em subsuperfície.

Conforme Laurain et al. (2004), estudos de iluminação podem ser utilizados para diversos fins, como por exemplo, durante a aquisição, para estimar o recobrimento (*infill*) (Brink et al., 2004); ou após a aquisição, para ajudar a explicar zonas de sombra ou variações de amplitude que estejam relacionadas com a aquisição. Sua aplicação mais comum consiste em analisar o efeito de diferentes layouts de aquisição sobre determinada superfície alvo. Um exemplo para esta aplicação pode ser encontrado no trabalho de Lecomte et al. (2009), onde mapas de iluminação são obtidos para diferentes geometrias de aquisição, visando a que melhor imageia o alvo.

Durante o Planejamento, as geometrias e os parâmetros de aquisição são determinados com base nos requerimentos geofísicos desejados (cobertura, resolução, etc.). Os cálculos desta etapa são realizados no domínio CMP (*Common Mid Point*), que representa o ponto médio entre às posições da fonte e do receptor, sobre superfície de aquisição, considerando a subsuperfície composta por camadas planas. Entretanto, devido às complexidades que os refletores em subsuperfície possam apresentar, nem sempre os passos efetuados durante o Planejamento são suficientes para obter um bom resultado. Isto ocorre pois o CMP não coincide com o ponto médio localizado sobre o refletor, chamado de CRP (*Common Reflection Point*). Os estudos de iluminação entram neste sentido como uma ferramenta auxiliar no Planejamento de Aquisição, pois realizam os estudos no domínio CRP, obtendo resultados mais realísticos.

A Figura 2.1 mostra a cobertura obtida no domínio CMP junto com a cobertura obtida no domínio CRP sobre a superfície alvo, para um mesmo dispositivo de aquisição e mesmo modelo. Pela figura, observa-se que, enquanto a cobertura CMP é constante sobre toda a área do levantamento, a cobertura CRP varia rapidamente sobre todo o alvo, o que evidencia a importância dos estudos de iluminação.

Os estudos de iluminação fornecem uma estimativa da iluminação na superfície alvo e a relaciona com a qualidade da imagem depois do processamento sísmico. Uma distribuição

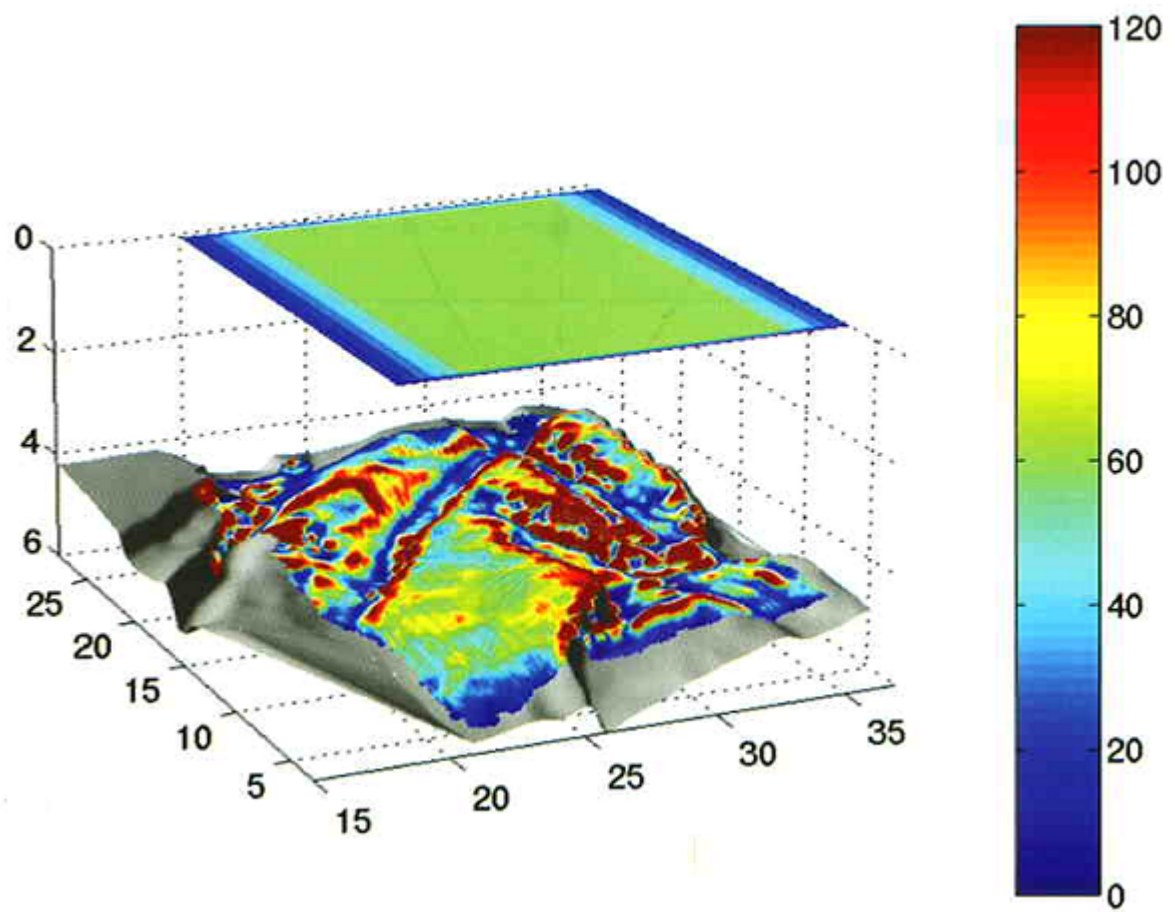


Figure 2.1: Cobertura no domínio CMP e CRP, na modelagem utilizando o mesmo dispositivo de aquisição. (Laurain, 2004)

uniforme dos pontos de reflexão na superfície alvo (iluminação) é considerada como o melhor resultado, e desvios (zonas de sombra ou concentrações anômalas) são interpretadas como áreas com problemas de imageamento.

Basicamente, os estudos de iluminação consistem em quatro etapas:

- Criação do modelo geológico;

A criação do modelo geológico requer informações a priori sobre o meio. Quanto mais próximo da realidade o modelo estiver, melhor será o resultado do estudo. Geralmente, os modelos são criados com base em campos de velocidades obtidos da migração de dados sísmico prévios e os horizontes são fornecidos com base em dados sísmicos já interpretados.

- Geração do dispositivo de aquisição;

O dispositivo de aquisição é gerado com base na geometria e nos parâmetros de aquisição determinados durante o planejamento. Entretanto, o design do levantamento pode ser modificado quantas vezes forem necessárias, até que o objetivo de estudo seja devidamente iluminado.

- Modelagem direta até o objetivo de estudo;

A modelagem direta é o ato de simular os efeitos de uma aquisição a partir de um modelo (Duarte, 2010). Esta simulação pode ser efetuada por diversos métodos, como por Traçado de Raios ou Diferenças finitas. Nos estudos de iluminação, o método por Traçado de raios é o mais utilizado. Através dele, diversos atributos, além do tempo de trânsito e da amplitude, podem ser calculados.

- Geração dos mapas de iluminação.

Depois que o modelamento é realizado, os mapas de iluminação podem ser gerados. Estes mapas mostram como os atributos modelados estão dispostos sobre a superfície alvo, possibilitando avaliar a qualidade da iluminação.

De acordo com Laurain et al. (2004), os métodos de iluminação podem ser classificados em duas categorias: métodos que dão informações sobre toda a área alvo (métodos globais) e métodos que dão informações em determinado ponto no alvo de estudo (método local).

2.1 Métodos Globais

Os métodos globais mais comuns são os “Métodos de Encelamento” (*Binning Methods*). Eles são muito utilizados pela indústria por serem relativamente simples de manusear, robustos

e por possuírem boa relação custo-benefício.

Uma vez que o modelo é construído, várias configurações de levantamento podem ser estudadas. Assim, as reflexões para determinada superfície alvo são traçadas e, para cada uma delas o traçado de raios permite o cálculo não só dos tempos de trânsito, mas também de muitos outros atributos como espalhamento geométrico, coeficiente de reflexão, efeitos de transmissão, amplitude, ângulo de incidência e azimute. Uma vez que o modelamento é realizado, a superfície alvo é “encelada” (dividida em celas), e os diferentes atributos do dado modelado são mapeados dentro das celas.

Muitos atributos podem ser mapeados. Os mais comuns são:

- *Hit Map*

Representa o número de vezes em que cada cela da superfície alvo é atingida por um raio. Através dele podemos analisar a distribuição dos pontos de reflexão no horizonte alvo e assim obter informações sobre as zonas de sombra, áreas de foco (*focusing areas*), bem como identificar área de baixa razão sinal-ruído (zonas de baixa cobertura).

- Amplitude de Iluminação

As amplitudes computadas incluem espalhamento geométrico e coeficientes de transmissão e reflexão. Entretanto, não consideram a integração da zona de Fresnel. De acordo com Laurain and Vinje (2001), a amplitude de iluminação, A , é definida como:

$$A = \left| \frac{\sum_i A_i}{\text{Area da Cela}} \right| \quad (2.1)$$

Onde A_i é o coeficiente de amplitude complexo no receptor para um número de raios i refletindo na cela.

- Distribuição de Offsets

Quando se trata de PSDM, um alto valor para a distribuição de offsets indica que a imagem pré-empilhamento naquele local foi amostrada por vários offsets. No processamento, ele indicará que a análise de velocidade é mais confiável.

- Distribuição do ângulo de incidência

Os ângulos máximo, médio e mínimo em cada cela, podem ser mapeados sobre a superfície alvo. Estes três parâmetros devem ser levados em conta durante a interpretação da distribuição do ângulo de incidência na superfície alvo. Ele pode ajudar a entender a relação entre Amplitude versus Offset (AVO) e Amplitude versus ângulo (AVA), além de dar uma estimativa sobre a qualidade da análise

AVA. Um ponto na superfície alvo com um intervalo limitado de ângulos de incidência, poderá apresentar uma amplitude anômala e uma resolução lateral ruim. Em geral, quanto mais extensa e completa a distribuição de ângulos de incidência, melhor será a resolução.

- Distância horizontal entre CMP e CRP

A distribuição da distância horizontal entre o CMP e o ponto de reflexão (CRP) pode ser computada. Ela dá uma estimativa direta da abertura de migração.

Utilizando estes atributos básicos, uma área corretamente iluminada será definida como tendo um alto *hit map* (pelo menos uma cobertura nominal), uma grande extensão de offsets, ângulos de incidência e azimutes, e uma pequena distância CMP-CRP (abertura lateral).

A maior desvantagem nos Métodos de Encelamento está no fato deles não considerarem a Zona de Fresnel. Vinje (2000) e Laurain et al. (2002) introduziram o método da Amplitude de Migração Simulada (SMA - *Simulated Migration Amplitudes*), que consiste na combinação da modelagem por traçado de raios e na simulação da migração, onde tanto a Zona de Fresnel quanto o pulso sísmico são considerados. Os resultados deste método são mapas de amplitude mais realísticos, como se fossem resultado direto da migração pré-empilhamento em profundidade.

A expressão matemática para a migração Kirchhoff pode ser escrita como:

$$\beta(x) = \int W(x, \xi) F[U(\xi, t = \tau(x, \xi))] d\xi \quad (2.2)$$

onde x indica um ponto em profundidade, U é o traço sísmico, F é um filtro para recuperar corretamente a forma do pulso sísmico, ξ representa as coordenadas do traço, $\tau(x, \xi)$ é o tempo de trânsito do tiro até o receptor via x , W é o fator “peso” (weight) da migração, e β é a amplitude de migração na profundidade x .

Assim, com base na equação 2.2, o método SMA irá substituir o termo do traço sísmico, $U(\xi, t)$, pelo traço correspondente calculado pelo traçado de raios; a função do duplo tempo de trânsito $\tau(x, \xi)$ será substituída por uma aproximação paraxial de segunda ordem, baseada no traçado de raios; e o empilhamento do pulso será feito ao longo do refletor alvo, apenas na região em torno do ponto de reflexão.

O conceito do SMA, além de fornecer mapas de iluminação mais informativos e confiáveis, representa uma importante ferramenta para controle de qualidade, pois baseando-se nos mapas SMA, o intérprete pode identificar os efeitos da mudança das propriedades das rochas nos mapas de amplitude reais, evitando armadilhas de interpretação.

2.2 Métodos Locais

Os estudos de iluminação não consistem apenas em computar a iluminação sobre toda a área de estudo, eles também podem ser focados em um alvo específico, como por exemplo, zonas de sombra. O objetivo neste caso é definir a melhor configuração de tiros e receptores para iluminar uma área delimitada.

Logo, as fontes e receptores são posicionados por toda a superfície do modelo, e o traçado de raios é realizado para todos os tiros e receptores. O estudo de iluminação é então restrito aos raios que incidem sobre a área alvo, e os receptores cujos raios incidem no alvo são mostrados, ou seja, a área de receptores que mais contribuem é delimitada. Outra interação do traçado de raios será necessária para todos os tiros e para a área de receptores delimitada. O número de incidências no local do tiro é plotada, e a área de tiros que mais contribuem é delimitada. Este método dá sugestões sobre qual configuração, quais azimutes e quais afastamentos utilizar.

- Diagrama em roseta (*Rose diagram*)

Diagrama circular que indica a distribuição azimutal de determinado ponto em sub-superfície. O método computa uma família CRP onde o CRP é colocado na superfície alvo. O *Ray shooting* é realizado de um local específico da subsuperfície (posição do CRP), geralmente um ponto em uma posição crítica sobre o topo do reservatório a ser imageado, para a superfície do modelo. Usando o ângulo de partida no CRP, os pares de fonte e receptor que iluminam o local específico da subsuperfície são separados.

A saída é uma família de CRP's seguindo a Lei de Snell. Os pares de tiros e receptores com a maior amplitude são a melhor escolha para o *layout* do levantamento. Os diferentes atributos são organizados no domínio azimuth-offset, e a saída dá uma estimativa do azimuth e do intervalo de offsets que melhor iluminam o CRP. A informação é valiosa no ponto investigado e em torno dele e mais famílias de CRP devem ser investigadas para encontrar a geometria ótima para o levantamento.

- Análise de feixe-focal (*Focal-beam analysis*)

Este método tenciona investigar a influência da geometria de aquisição na qualidade da imagem, considerando, separadamente, a geometria dos receptores e a geometria dos tiros durante a análise. Esta análise separada das geometrias das fontes e dos receptores não apenas fornece informações sobre as propriedades de foco das geometrias (levando à resolução espacial), mas também sobre o comportamento de dependência do ângulo versus a amplitude (van Veldhuizen and Blacquiére,

2003). Logo, pode-se dizer que este método dá uma medida quantitativa para a qualidade da imagem ao invés de uma estimativa qualitativa, como faz o método de encelamento convencional.

Com o uso deste método, experimentos com seções sísmicas migradas são modelados para pontos em uma única subsuperfície alvo. A característica especial no método é que o experimento é dividido em duas partes: uma para o lado das fontes e outra para o lado dos receptores. Para um ponto na subsuperfície alvo, a influência de ambas as geometrias de fontes e receptores pode ser determinada pelo cálculo do feixe focal das fontes (*focal-source beam*) e dos receptores (*focal-receiver beam*), respectivamente. Os feixes dos receptores e dos tiros podem ser considerados como o dado migrado pela metade e eles mostram a iluminação (no lado das fontes) ou a detecção (no lado dos receptores). Os feixes das fontes e dos receptores podem ser combinados (multiplicados) para obter como resultado uma migração completa: uma imagem do ponto alvo (função resolução). A transformada dos feixes para o domínio Radon (τ -p) mostra os efeitos da dependência da iluminação com relação ao ângulo. Pela multiplicação dos feixes transformados, é possível visualizar a dependência do ângulo nas amplitudes refletidas do ponto alvo (chamada de "Amplitude versus Parâmetro do raio", AVP).

Como uma extensão da técnica *focal beam*, a análise do ponto de foco comum (*Common Focusing Point, CFP*) também dá uma estimativa qualitativa da iluminação. Esta análise consiste na migração Kirchhoff do dado traçado por raio para uma família CRP. Esta técnica pode ser usada para investigar a resolução em um ponto da subsuperfície ou para estimar os efeitos *footprint*.

- Análise da resolução (*Resolution analysis*)

Este método dá uma estimativa qualitativa sobre como um ponto arbitrário na subsuperfície é imageado dependendo na configuração do levantamento, no modelo e na banda de frequência. Contrário a análise do ponto de foco comum (CFP), a refletividade não é considerada nesta aproximação. Assumindo um ponto espalhador e parâmetros de aquisição perfeitos como banda de frequência infinita, cobertura completa de fonte/receptor e velocidade do meio perfeitamente conhecida, a função resolução é um Dirac, significando que o ponto espalhador seria perfeitamente imageado.

O método tem aplicações no planejamento da aquisição (escolha dos melhores parâmetros de aquisição) bem como na interpretação (na diferenciação entre os artefatos da migração e reflexões).

CAPÍTULO 3

Traçado de Raios (*Ray Tracing*)

A três décadas atrás, quando surgiu a necessidade de simular a propagação de ondas sísmicas em modelos geológicos 3D, o método do Traçado de Raios apareceu como uma das alternativas mais apropriadas. Com a velocidade dos computadores na época, as Técnicas do Raio eram as únicas aplicáveis às estruturas 3D. Além disso, o fato desta técnica obter atributos como tempo de trânsito, amplitude, ângulo de incidência e espalhamento geométrico era muito apreciado pelos pesquisadores.

Os algoritmos do Traçado de Raios foram desenvolvidos tendo como referência a teoria do livro de Cervený, Molotkov and Psencik (1977) e mais tarde o trabalho de Cervený and Hron (1980). Os trabalhos de Cervený, desde os mais antigos aos mais recentes, sempre foram a base para todos os trabalhos com Traçado de Raios.

Nas aplicações mais antigas, o método do raio era usado para calcular os caminhos e tempos de trânsito do raio, sendo referido como Traçado de Raios Cinemático. Durante as décadas de 70 e 80, técnicas numéricas foram desenvolvidas para o Traçado de Raios Dinâmico, que resulta da curvatura da frente de onda e dos atributos de espalhamento geométrico.

Hoje em dia, o método de Traçado de Raios pode ser usado com diversas finalidades, durante várias etapas dos processos de Exploração e Produção, como por exemplo na modelagem direta, ou em métodos de inversão (tomografia, migração, etc.).

Os movimentos da onda sísmica, considerados em termos de altas frequências no Traçado de raios, obedecem às mesmas leis físicas da ótica. Portanto, podemos estudar os raios sísmicos explorando-se analogias e princípios óticos. O princípio de Fermat é que governa a geometria do raio, isto é, a trajetória do raio é resultante da aplicação do princípio de Fermat à função que fornece o tempo de trânsito da onda em seu movimento ao longo de caminhos que conectam dois pontos. Em outras palavras, o caminho que torna tal tempo mínimo é a trajetória procurada.

As equações que controlam a propagação do raio, durante a aplicação do traçado de raios, são baseadas na equação escalar da onda, dada por:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2(x, y, z)} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

Onde P é a onda plana compressional ($P=P(x,y,z;t)$), t é o tempo de trânsito e $v(x, y, z)$ é a velocidade de propagação da onda.

Uma solução para a equação 3.1, no sistema cartesiano (x,y,z) , é dada pela equação da onda plana compressional:

$$P(x, y, z; t) = P_0 \exp(-i\omega t + ik_x x + ik_y y + ik_z z) \quad (3.2)$$

Onde P_0 é a amplitude e k_x, k_y, k_z e ω são as transformadas de Fourier das variáveis x, y, z e t , respectivamente.

Assim, computando as derivadas parciais da equação 3.2 e substituindo na equação 3.1, obtém-se a relação de dispersão da equação escalar da onda:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{v^2} \quad (3.3)$$

Desta forma, se a equação 3.2 satisfaz a relação dada acima, ela será uma solução válida para a equação escalar da onda.

Reescrevendo a equação 3.2 em termos da fase, tem-se:

$$P(x, y, z; t) = P_0 \exp \left\{ -i\omega \left[t - \left(\frac{k_x}{\omega} x + \frac{k_y}{\omega} y + \frac{k_z}{\omega} z \right) \right] \right\}. \quad (3.4)$$

Através da equação acima, pode-se definir uma superfície de tempo de trânsito $T(x,y,z)$ como:

$$T(x, y, z) = \frac{k_x}{\omega} x + \frac{k_y}{\omega} y + \frac{k_z}{\omega} z. \quad (3.5)$$

Substituindo esta definição na equação 3.4, obteremos a expressão da onda plana em termos da superfície de tempo de trânsito $T(x,y,z)$

$$P(x, y, z; t) = P_0 \exp \{ -i\omega [t - T(x, y, z)] \} \quad (3.6)$$

Para verificar se esta forma da solução da onda plana satisfaz a equação escalar da onda, deve-se calcular suas derivadas parciais e substituir na equação 3.1. O resultado obtido, organizando os termos em parte real e imaginária, é dado por:

$$\omega^2 \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] - i\omega \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\omega^2}{v^2(x, y, z)}. \quad (3.7)$$

Como o termo do lado direito da equação é real, então a parte imaginária do lado esquerdo tende a desaparecer, levando à expressão final:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 = \frac{1}{v^2(x, y, z)}. \quad (3.8)$$

Esta expressão é conhecida como equação iconal. Ela fornece o tempo de trânsito $T(x, y, z)$ para um raio passando por um ponto (x, y, z) em um meio de velocidade $v(x, y, z)$.

Uma solução para a equação iconal, $T(x, y, z) = \text{constante}$ representa a frente de onda em um instante de tempo. Vale lembrar que, como a equação iconal é uma aproximação para a equação escalar da onda, sua solução também deve ser solução da equação 3.1. Logo, é importante verificar em que circunstâncias a equação iconal pode ser considerada como uma boa aproximação para a equação da onda.

Para verificar esta questão, Yilmaz (2001) faz o estudo da função da onda plana (equação 3.6) variando espacialmente a amplitude $P_0(x, y, z)$. Assim, ele calcula as derivadas parciais da equação e substitui na equação 3.1. Com o resultado obtido, ele conclui que a equação iconal é uma boa aproximação para a equação da onda no limite de altas frequências. Como $\lambda = 2\pi v/\omega$, onde λ é o comprimento de onda, o limite de altas frequências é equivalente a pequenos comprimentos de onda. Assim, a aproximação é válida quando a mudança no gradiente de velocidade Δv é muito menor que a frequência v/λ . Na prática, esta aproximação não será válida através de limites de camadas com contrastes bruscos de velocidade ou em camadas com variações de velocidade que ocorrem dentro de uma extensão espacial menor do que o comprimento de onda.

Assim, com base nas considerações feitas na obtenção do conjunto de equações que governam o traçado de raios, conclui-se que o uso deste método em boas condições requer que as fontes sejam de alta frequência, que as interfaces e as propriedades sejam suaves até segunda ordem (primeira e segunda derivadas contínuas) e que os coeficientes de reflexão/transmissão variem lentamente ao longo das interfaces. Por essa razão, o modelo geológico precisa ser suavizado antes que o modelamento seja realizado.

Para ilustrar as limitações do Traçado de Raios, Gjøystdal et al. (2007) computaram a seção zero-offset de um modelo, sem e com suavidade, através do Traçado de Raios. Para o modelo sem suavidade, os resultados são mostrados na Figura 3.1 a) e b), e para o modelo com a suavidade necessária para uma boa modelagem via Traçado de Raio, os resultados são mostrados na Figura 3.1 c) e d).

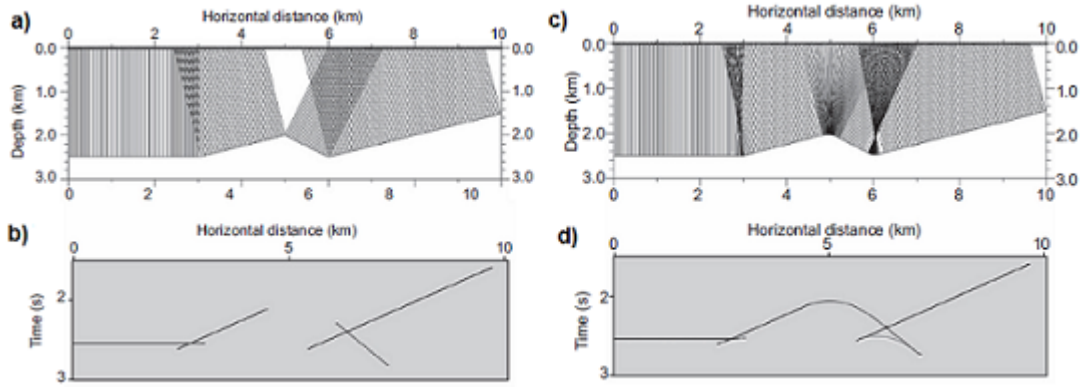


Figure 3.1: Raios e sismograma gerado através do *Ray Tracing*, para um modelo não suavizado: a) e b), e para um modelo suavizado: c) e d). (Gjøystdal, 2007)

Uma parte essencial da modelagem utilizando o Traçado de Raios é o modelo da subsuperfície, no qual os raios se propagam. Três aspectos devem ser considerados durante a construção do modelo:

- O que os raios precisam saber sobre o modelo

O objetivo do modelo é servir os raios com algumas informações básicas sobre a subsuperfície, como por exemplo: velocidades das ondas P e S, densidade, parâmetros de anisotropia e fatores de atenuação. Os raios também precisam de informações sobre as descontinuidades, isto é, sobre as interfaces na subsuperfície.

- As limitações impostas pelo método de Traçado de Raios no modelo

A teoria do Raio impõe algumas limitações sobre o modelo da subsuperfície. Para assegurar a validade dos raios, os parâmetros devem ser suaves e variar lentamente. Na realidade, o que realmente conta é a suavidade do modelo dentro do volume de Fresnel, em torno de cada raio (Cerveny and Soares, 1992). Assim, na prática, as propriedades e as interfaces são suavizadas.

- Representação do modelo para o Traçado de Raios sísmicos

Devido às limitações e restrições do Traçado de Raios, o modelo deve ser construído de forma a respeitar estas limitações. Sendo assim, um modelo típico para o Traçado de Raios é caracterizado por:

- Interfaces (geralmente de natureza complexa);
- Propriedades dos materiais nas camadas; e
- Derivadas contínuas das interfaces e das propriedades (isto assegura a suavidade).

Com isso, podemos observar que no modelo existem dois tipos de elementos: interfaces e propriedades. Uma interface descreve o local da descontinuidade entre duas camadas diferentes na subsuperfície. Já as propriedades representam, de forma contínua e suave, as propriedades dos materiais presentes nas camadas (velocidade, densidade, etc.).

Cada interface é representada por uma malha triangularizada no modelo. Esta representação combina a flexibilidade da malha triangularizada com uma solução aproximada para a suavidade requerida pelo método.

As propriedades são representadas por *splines* tri-cúbicas, sendo bem mais fáceis de reproduzir, em comparação com as interfaces.

Estruturas geológicas complexas podem introduzir descontinuidades na frente de onda e causar zonas de sombra. Vinje et al. (1993) melhorou a técnica clássica de dois-pontos (*two-points*) do Traçado de Raios introduzindo a técnica de construção da Frente de Onda (*Wavefront Construction*). O método é mais eficiente e robusto, mas a maioria das limitações permanece.

O desenvolvimento de novos métodos baseados no raio tem aumentado significativamente o uso do Traçado de Raios na indústria, incluindo casos de propagação complexos.

3.1 Construção da Frente de Onda (*Wavefront Construction*)

A Construção da Frente de Onda é uma técnica baseada na teoria do raio sísmico convencional. Nesta técnica, ao invés de construir raio por raio, como é feito no Traçado de Raios clássico, a Construção da Frente de Onda gera uma frente de onda nova a partir de uma mais antiga. A propagação de uma frente de onda para a outra é feita traçando-se uma grande quantidade de segmentos de raio.

O método da Construção da Frente de Onda foi introduzido para meios bi-dimensionais (2D) através do trabalho de Vinje et al. (1993b). Durante os anos 90, o método foi aperfeiçoado para acomodar modelos 3D (Vinje et al., 1996a; Vinje et al., 1999). A técnica original deste método foi desenvolvida para modelos isotrópicos. Entretanto, mais recentemente, alguns trabalhos foram desenvolvidos para levar em conta meios anisotrópicos (Gibson, 2000).

A idéia básica do método de Construção da Frente de Onda é manter uma densidade uniforme de segmentos de raios ao longo da frente de onda durante a sua propagação. Para controlar a densidade de raios dois critérios são utilizados: a distância entre raios vizinhos; e a separação entre as normais da frente de onda, relacionadas aos raios. A aplicação destes critérios na frente de onda irá levar a criação de novos raios por interpolação.

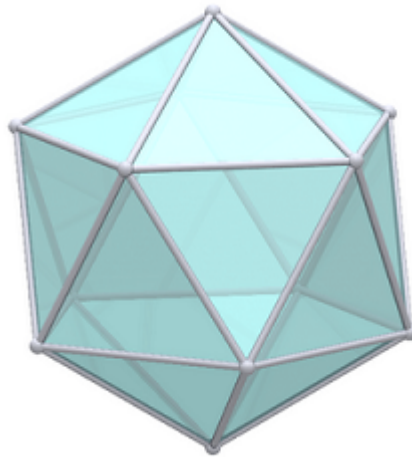


Figure 3.2: O icosaedro descreve a estrutura básica do ponto de fonte

Durante os últimos anos, a Construção da Frente de Onda provou ser uma ferramenta poderosa no modelamento e no imageamento sísmico. A vantagem deste método é que ele pode fazer o modelamento direto em modelos complexos 3D em um tempo aceitável além de ser capaz de encontrar todos, ou uma seleção de eventos refletidos e transmitidos nos pontos dos receptores.

As frentes de onda são definidas como superfícies (em meios 3D) contendo um tempo de trânsito constante com relação à fonte. Elas são representadas por malhas triangularizadas, pois através desta estrutura é possível esticar ou torcer a frente de onda durante a sua propagação pelo meio, além de poder checar, interpolar e estimar rapidamente os parâmetros do receptor.

Os principais passos na Construção da Frente de Onda são:

- Gerar a Frente de Onda inicial;

Para poder propagar as frentes de onda, é necessário que exista uma frente de onda inicial. Para isso, precisa-se de uma malha triangular, com lados e triângulos tão iguais quanto possível. Com este respeito, o icosaedro é especialmente apropriado (Figura 3.2).

O icosaedro consiste em 12 vértices, 30 lados e 20 triângulos regulares. Ao deixar 12 raios, a partir do ponto da fonte, passarem através dos vértices do icosaedro, cria-se a malha triangular desejada. Para adquirir uma amostragem densa de direções dos raios emergentes, realiza-se a interpolação de novos raios na malha triangular. A interpolação é realizada até que o critério da densidade dos segmentos de raio seja atingida.

- Propagar a Frente de Onda ao longo de intervalos de tempo;

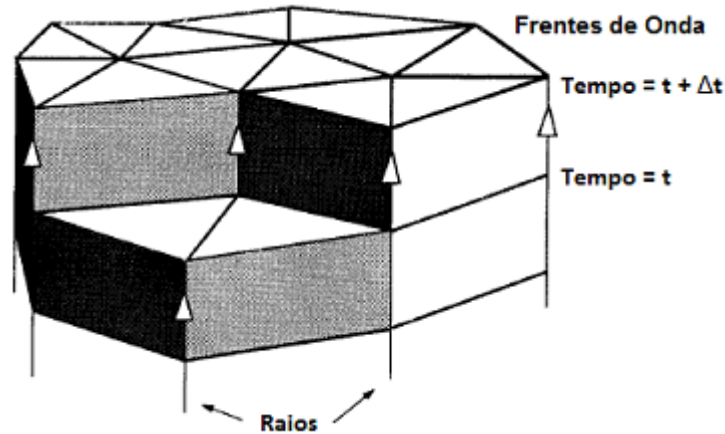


Figure 3.3: A frente de onda é propagada através do modelo traçando-se raios da frente de onda antiga até a mais nova. (Vinje, 1996a)

Para que uma frente de onda, presente no tempo t , seja propagada através de um meio isotrópico, cada nó (interseções entre raios e frentes de onda) deve ser caracterizado por um conjunto de parâmetros como:

- Posição;
- Tangente do raio;
- Direção que o raio que sai da fonte;
- Tipo de onda (P ou S no meio isotrópico);

Dado o conjunto de parâmetros para todos os nós no tempo t , raios na frente de onda serão traçados para um intervalo de tempo Δt , de forma que uma nova frente de onda no tempo $t + \Delta t$ seja criada. Na Figura 3.3, uma parte do campo de onda em três intervalos de tempo sucessivos é mostrada.

As frentes de onda em dois tempos sucessivos (t e $t + \Delta t$) são mantidos na memória para facilitar a interpolação de novos raios e para estimar os eventos nos receptores. Todos os raios na malha são equipados com um código definido pelo usuário, o qual determina a sequência específica de reflexões e/ou transmissões em cada interface do modelo.

- Controlar a densidade de segmentos de raios na Frente de Onda; e

Quando uma divergência está presente no campo de onda, partes da frente de onda serão esticadas durante sua propagação através do meio. Tanto a distância e a diferença angular das tangentes do raio entre os raios vizinhos aumenta, e a interpolação é necessária para manter a densidade de amostragem pré-definida para a frente de onda.

- Interpolação para encontrar as chegadas nos receptores.

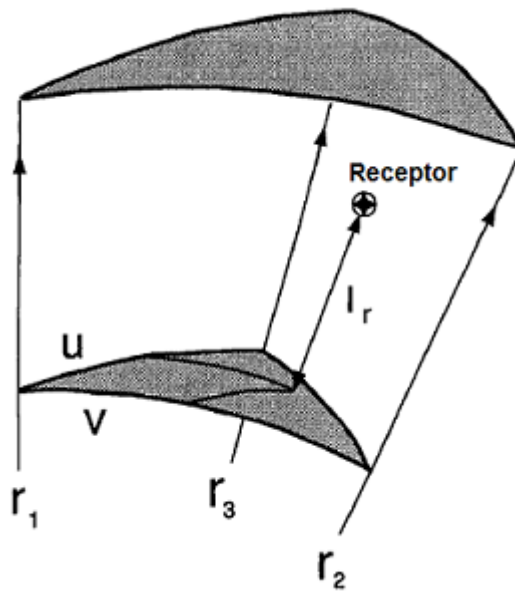


Figure 3.4: Uma *Ray Cell* contendo no seu interior um receptor. O dado sísmico é estimado no receptor por interpolação, a partir dos raios r_1 , r_2 e r_3 . (Modificado de Vinje, 1996a)

A fim de encontrar as chegadas nos receptores, um procedimento capaz de transferir os parâmetros sísmicos da frente de onda para cada receptor se faz necessário. O volume entre duas frentes de onda consecutivas é dividido em *ray cells*. Estas celas são corpos em forma de prisma limitados por três raios e pelos triângulos que os conecta às frentes de onda. Os limites das *ray cells* são usados para construir uma caixa que contenha a *ray cell*. Depois, o conjunto de receptores localizados dentro da cela é encontrado. Alguns destes receptores podem estar localizados dentro da *ray cell*, como mostrado na Figura 3.4.

Os parâmetros sísmicos para este receptor são encontrados pela interpolação dos três raios da *ray cell* usando as coordenadas u, v e t^* , onde (u, v) são as coordenadas do baricentro relativas ao receptor na base da *ray cell*, e t^* é o tempo de trânsito da base da *ray cell* até o receptor.

Desta forma, assim que as frentes de onda são construídas, os dados armazenados nos raios (tempos de trânsito, amplitude, ângulo de incidência, etc.) são transferidos para os receptores por interpolação, dentro das *Ray Cells*.

O tempo computacional gasto no Método de Construção da Frente de Onda depende de fatores como: complexidade do modelo, amostragem da frente de onda (controlada pela densidade de raios e pelo comprimento do intervalo de tempo, Δt , definidos pelo usuário), tempo total de propagação, e número de receptores.

CAPÍTULO 4

Desenvolvimento

Neste trabalho foram realizados estudos de iluminação em um modelo que representa uma área hipotética, no contexto geológico da borda leste da Bacia do Recôncavo. Os estudos foram adquiridos ao nível do Sergi, formação geológica do Pré-Rifte, que abriga acumulações de óleo e/ou gás em diversos pontos da bacia.

O modelo foi criado com base na seção geológica da borda leste da Bacia do Recôncavo (Figura 4.1) apresentada no trabalho de Brito and Ghignone (2009). Segundo eles, existe uma grande possibilidade de ocorrer reservatórios flúvio-eólicos das formações Sergi e Água Grande, ao longo de degraus estruturais, em contato lateral com o gerador representado pelo Mb. Gomo (Fm. Candeias). Se verdade, este fato confere um elevado potencial petrolífero a esta região da bacia do Recôncavo.

Com base nesta afirmação, a proposta deste trabalho é mostrar de que forma os estudos de iluminação podem contribuir para a exploração desta nova fronteira.

4.1 Criação do modelo

O modelo criado é uma representação simplificada da borda leste da Bacia do Recôncavo. Ele tem 10 km de extensão nas direções E-W e N-S e 6 km de profundidade. Como pode ser visto na figura 4.2, o modelo é constituído por seis camadas (cinco interfaces). A primeira camada (de cima para baixo) representa a Fm. São Sebastião; a segunda camada, em forma de cunha, representa a Fm. Salvador; a terceira representa a Fm. Maracangalha; a quarta representa o Membro Tauá (Fm. Candeias); a quinta representa os reservatórios flúvio-eólicos da Fm. Sergi; e por fim, a sexta camada representa o embasamento da bacia.

Para facilitar o processo de construção do modelo, a seção geológica da Figura 4.1, que está na direção Noroeste-Sudeste (NW-SE), foi posicionada na direção Leste-Oeste (E-W) no sistema de coordenadas do modelo (Figura 4.3).

O modelo foi gerado através dos *softwares* Gocad e Norsar3D. No Gocad, as interfaces (na realidade, conjunto de pontos) foram geradas, posicionadas nos locais desejados, sendo inclinadas e deslocadas verticalmente para representar o padrão de falhas normais da bacia.

SEÇÃO GEOLÓGICA NW-SE

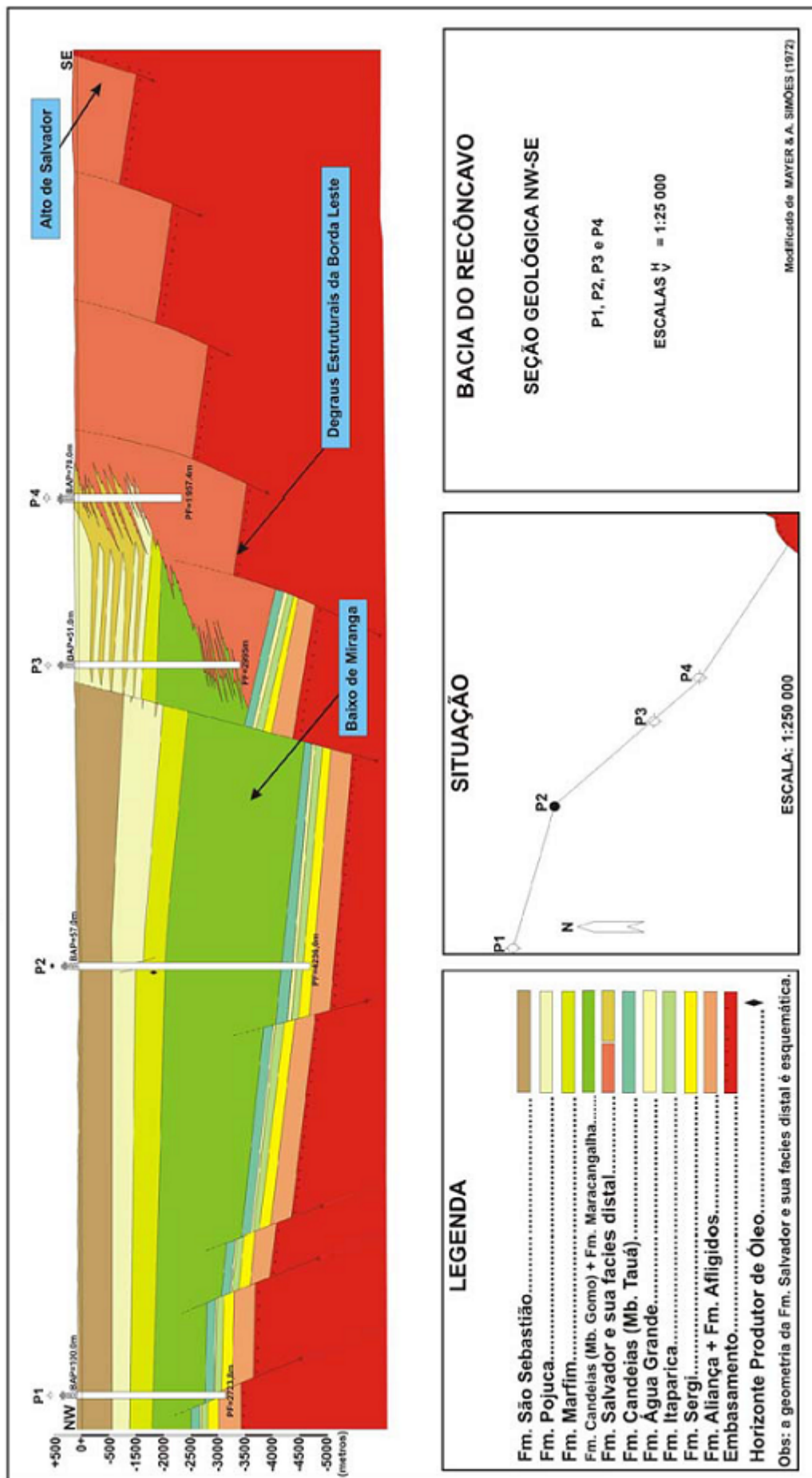


Figure 4.1: Seção Geológica da Bacia do Recôncavo. (Brito e Ghignone, 2009)

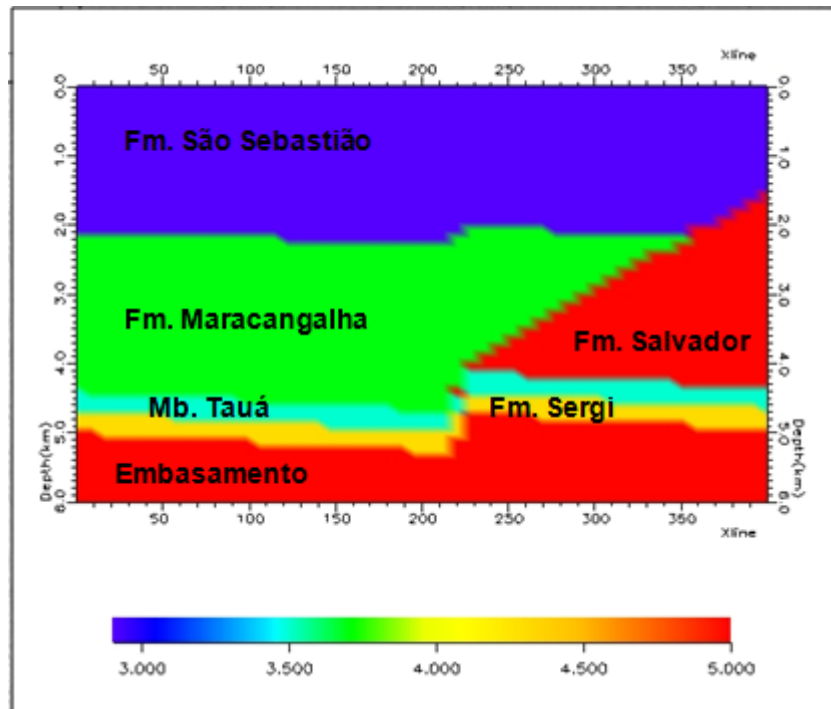


Figure 4.2: Seção do modelo criado, que representa, de modo simplificado, a borda leste da Bacia de Recôncavo. A seção mostra também o campo de velocidade, em m/s, da onda P.

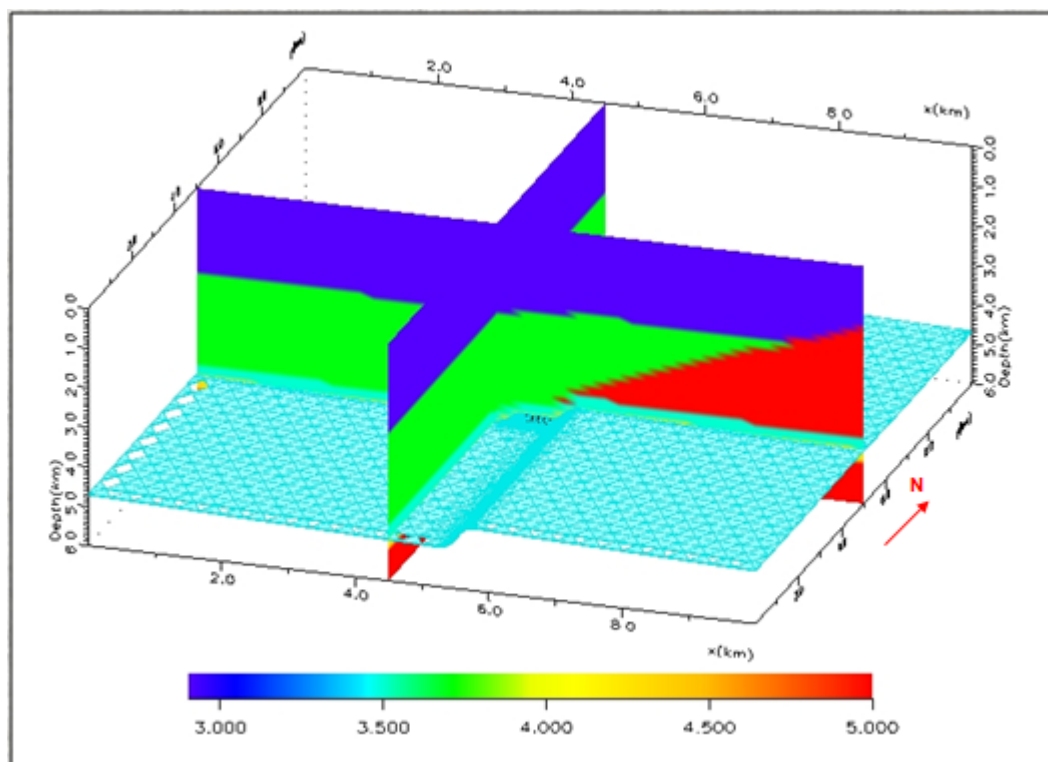


Figure 4.3: Figura mostrando as coordenadas do modelo construído, juntamente com os campos de velocidade (m/s) nas direções N-S e E-W; e o topo da Formação Sergi.

Em seguida, as interfaces foram exportadas como arquivos ASCII xyz (arquivos contendo as coordenadas X, Y e Z de cada interface).

No Norsar3D, as interfaces foram importadas, sendo devidamente suavizadas e triangularizadas, com base no que é requerido para realizar o Traçamento de Raios. Em seguida, as camadas (chamadas de blocos no Norsar3D) foram delimitadas pelas interfaces, e propriedades como velocidades das ondas P e S e a densidade foram definidas para cada camada.

As velocidades da onda P (V_P) e as densidades (ρ) para cada camada, foram obtidas através de dados de poços (perfis sônicos e de densidade) registrados dentro da região onde localiza-se o modelo. Seus valores foram tomados como uma média dos valores observados ao longo da formação. Já as velocidades da onda S (V_S) foram obtidas através da razão V_S/V_P (Equação 4.1), considerando as camadas como sólidos de Poisson ($\sigma = 0,25$).

$$\frac{V_S}{V_P} = \sqrt{\frac{0,5 - \sigma}{1 - \sigma}} \quad (4.1)$$

Com isso, estando as interfaces e as camadas definidas, com suas respectivas propriedades, tomando o cuidado para que os mesmos estejam devidamente suavizados, o modelo está pronto para ser usado.

4.2 Criação da Geometria de Aquisição

Conforme descrito no Capítulo 1, no planejamento de uma aquisição, deve-se determinar os parâmetros de aquisição com base nas características do meio em estudo. Como o modelo foi criado com base em dados já existentes sobre a bacia do Recôncavo, não foram encontradas dificuldades na determinação das informações necessárias para o cálculo dos parâmetros de aquisição, são elas:

- Profundidade do alvo: 4100-4700m;
- Mergulho da camada mais inclinada $\approx 30^\circ$;
- Propriedades das camadas (definidas na tabela 4.1)

As geometrias de aquisição foram criadas através do *software* OMNI. Quatro dispositivos de aquisição foram criados, são eles:

1. Cross Spread: Consiste de uma linha de tiro, na direção E-W, e uma linha de receptores, na direção N-S (Figuras 4.4 e 4.5). Os parâmetros da aquisição são mostrados na tabela 4.2.

	VP (m/s)	VS (m/s)	ρ (g/cm^3)
Embasamento	5000	2886,7	2,6
Fm. Sergi	4300	2482,6	2,5
Mb. Tauá (Fm. Candeias)	3500	2020,7	2,4
Fm. Maracangalha	3700	2136,2	2,3
Fm. Salvador	5000	2886,7	2,6
Fm. São Sebastião	2900	1674,3	2,3

Table 4.1: Tabela contendo as propriedades de cada camada do modelo

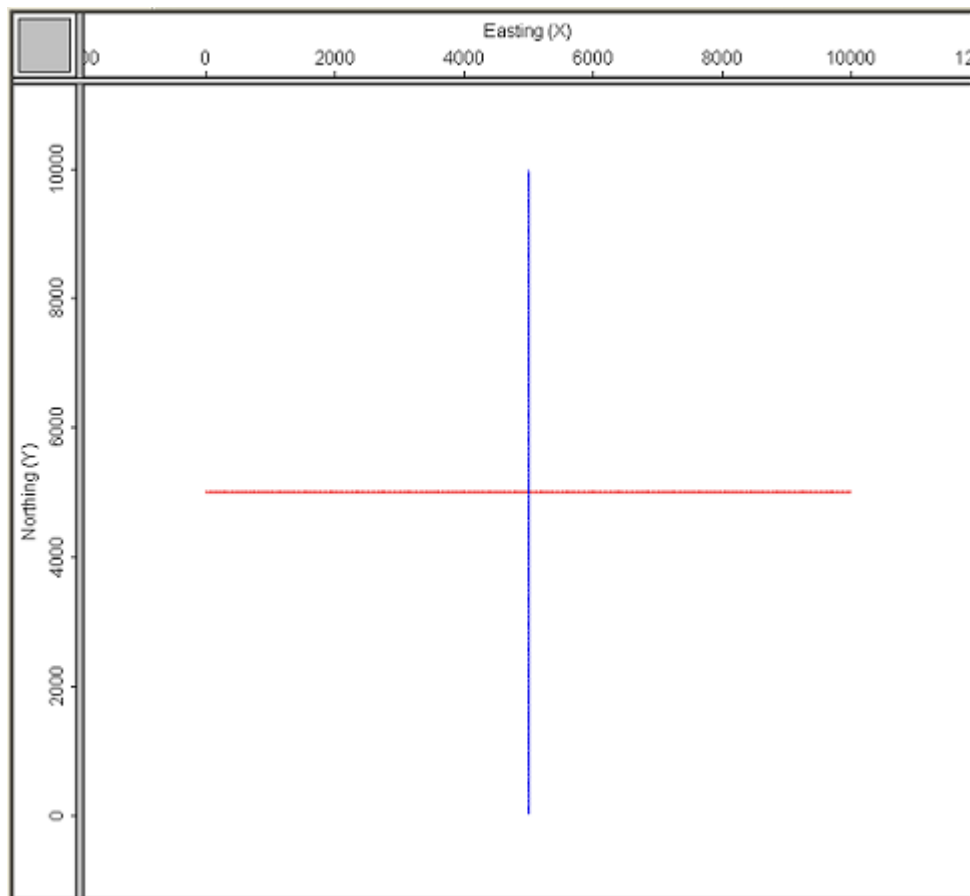


Figure 4.4: Arranjo Cross Spread gerado através do software OMNI

Número de Tiros	200
Número de Receptores	200
Espaçamento entre Tiros	50m
Espaçamento entre Receptores	50m
<i>Aspect Ratio</i>	1

Table 4.2: Parâmetros de Aquisição do Dispositivo Cross Spread

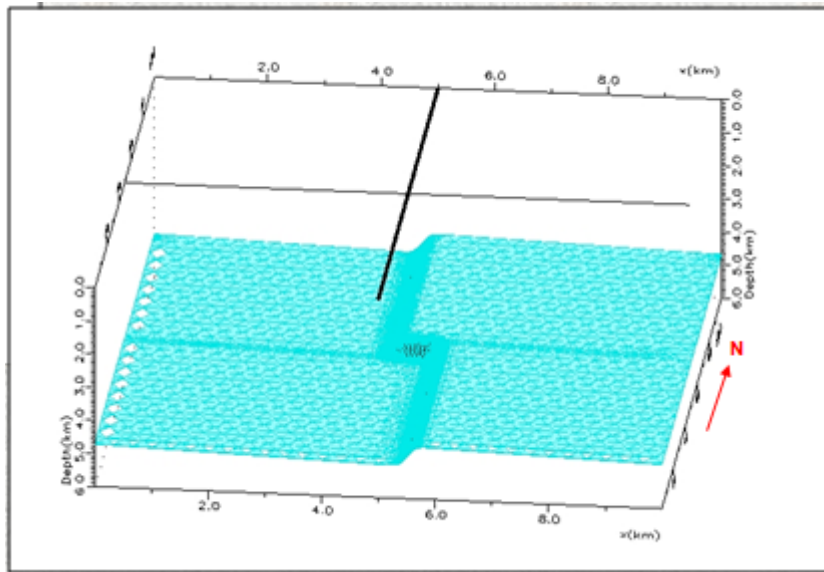


Figure 4.5: Figura mostrando o dispositivo Cross Spread sobre o modelo de estudo.

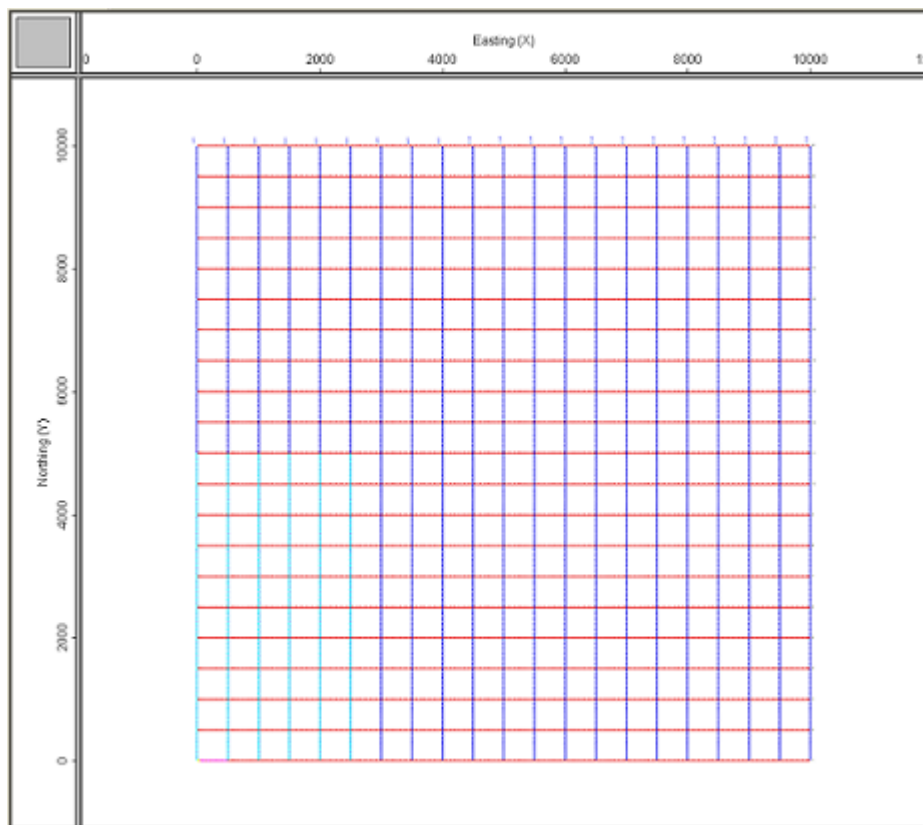


Figure 4.6: Arranjo Ortogonal N-S

2. Ortogonal N-S: São 21 linhas de tiro, na direção E-W, e 21 linhas de receptores, na direção N-S (Figuras 4.6 e 4.7). Os parâmetros da aquisição são mostrados na tabela 4.3.

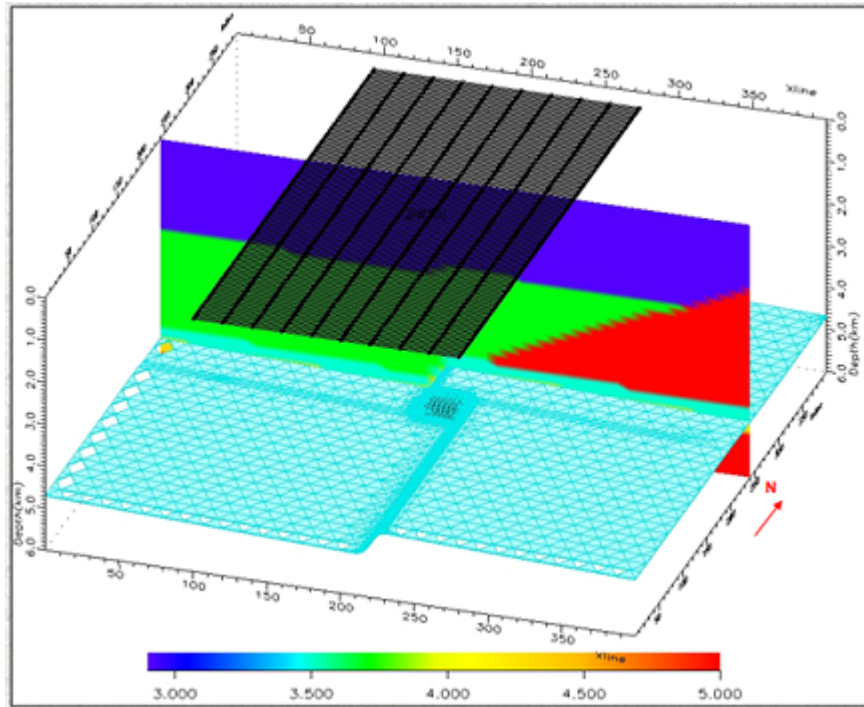


Figure 4.7: Arranjo Ortogonal N-S, sobre o modelo de estudo. O Patch mostrado na figura é referente à salva de tiros do centro do modelo.

Número total de Tiros	4200
Espaçamento entre tiros	50m
Espaçamento entre receptores	50m
Espaçamento entre linhas de tiro	500m
Espaçamento entre linhas de receptores	500m
Comprimento da linha de tiro/receptor	1000m
Número de receptores por linha	200
Número máximo de canais ligados por tiro	2000
Número de linhas de tiro	21
Número de linhas de receptores	21
Template	
Linhas de receptores por tiro (min-max)	6 - 10
Receptores por linha (min-max)	100 - 200
<i>Aspect Ratio</i>	0,5

Table 4.3: Parâmetros de aquisição do dispositivo Ortogonal N-S

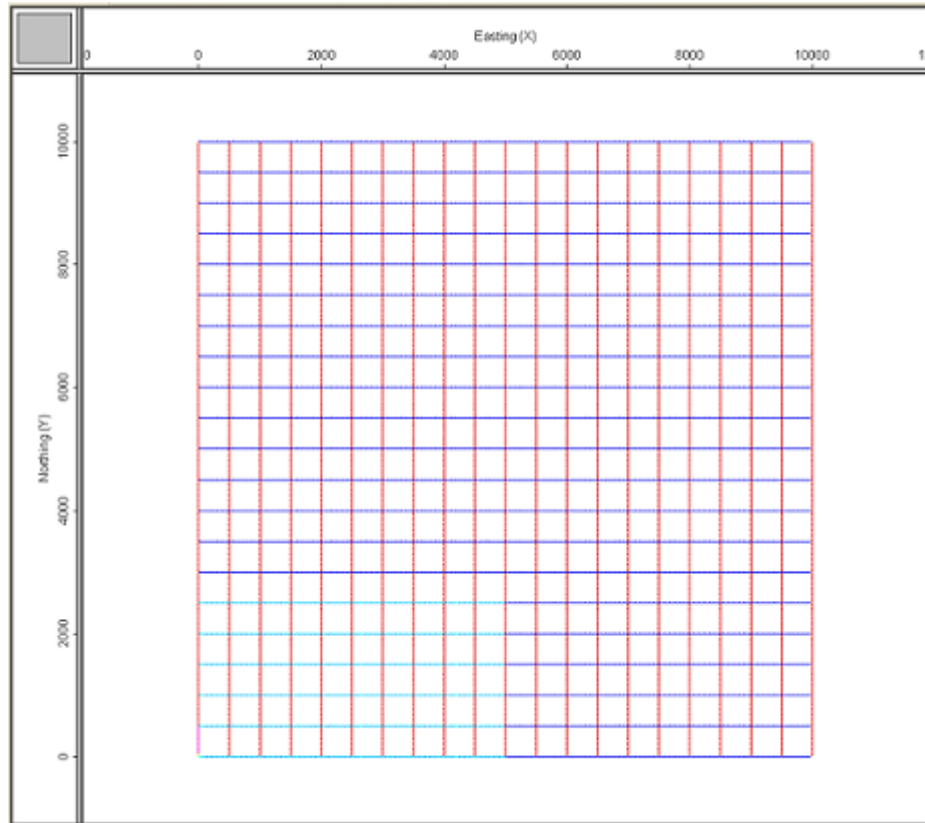


Figure 4.8: Arranjo Ortogonal E-W

3. Ortogonal E-W: Tem a mesma estrutura do arranjo Ortogonal N-S (mesmos parâmetros de aquisição), a única diferença é que as linhas de tiro estão dispostas na direção N-S e as linhas de receptores estão na direção E-W (Figuras 4.8 e 4.9).
4. Ortogonal E-W com obstáculos: Este dispositivo foi criado através do Ortogonal E-W, apenas excluindo e modificando as posições de alguns tiros e receptores, com o objetivo de simular obstáculos na área de aquisição (Figura 4.10). O obstáculo em azul, no canto superior direito da área do levantamento, representa um lago; os pontos verdes representam poços, as linhas que se cruzam representam rodovias e o obstáculo em cinza, na interseção entre as rodovias, representa um povoado. O template da aquisição é semelhante ao do Ortogonal E-W. Entretanto, por conta das modificações (obstáculos), os patches e salvas terão, em alguns momentos, menos estações (Figura 4.11).

Depois de criadas, as geometrias de aquisição foram exportadas com formato SPS (*Shell Processing Support*). No processo de exportação são gerados três arquivos: um contendo as coordenadas dos tiros, outro contendo as coordenadas dos receptores e o último contendo o padrão da aquisição (arquivo de relação), especificando de que forma os tiros e receptores são manuseados ao longo da aquisição.

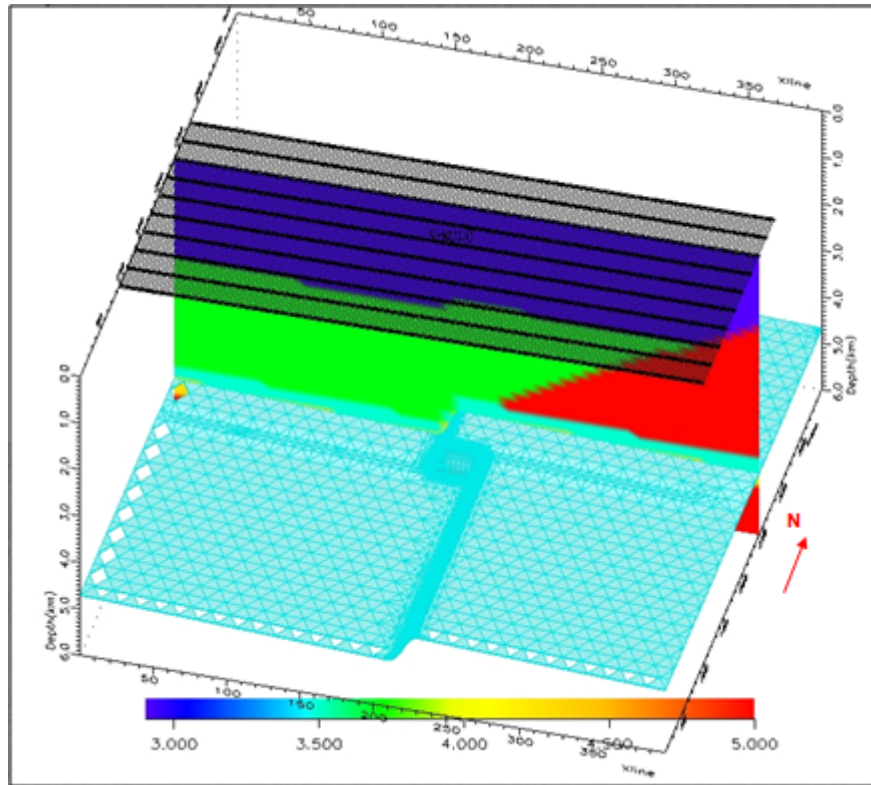


Figure 4.9: Arranjo Ortogonal E-W, sobre o modelo de estudo. O Patch mostrado na figura é referente à salva de tiros do centro do modelo.

Estes arquivos foram importados no Norsar3D para que os estudos de iluminação fossem realizados.

4.3 Estudos de iluminação

Os estudos de iluminação foram realizados no *software* Norsar3D. A área de interesse está localizada ao nível da interface do Sergi (entre a Formação Sergi e o Membro Tauá). Diversos mapas de iluminação foram gerados para cada dispositivo de aquisição. Entre eles estão:

1. *Hit Map*
2. Mapa com ângulos máximos de incidência
3. Mapa com ângulos mínimos de incidência
4. Mapa de distribuição de Offsets
5. Mapa de distribuição de azimutes
6. Mapa de SMA - Amplitude de migração simulada

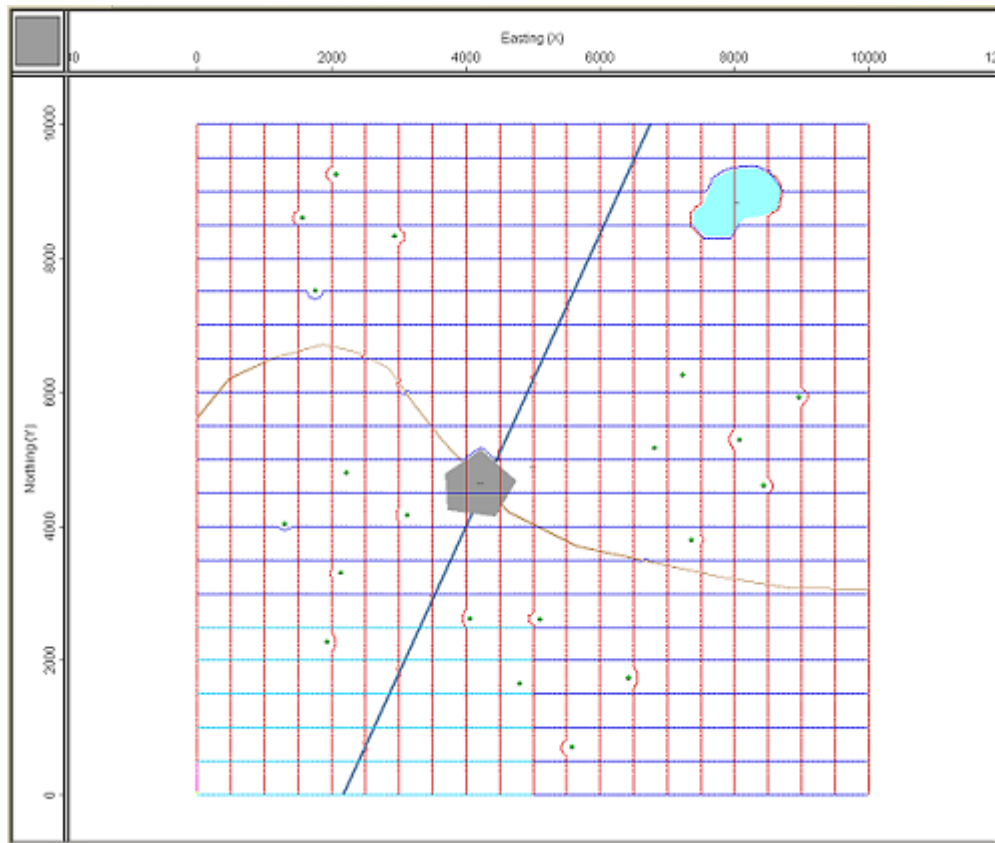


Figure 4.10: Dispositivo de aquisição Ortogonal E-W com obstáculos

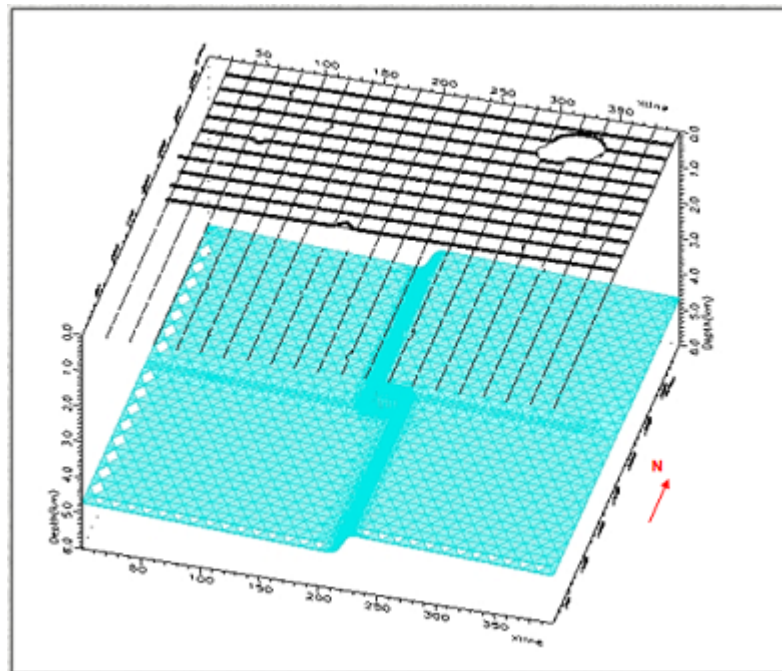


Figure 4.11: Arranjo Ortogonal E-W com obstáculos, sobre o modelo de estudo.

CAPÍTULO 5

Resultados

O dispositivo *Cross Spread* foi utilizado para servir como base para os outros dispositivos de aquisição. Através dele foi possível avaliar o comportamento dos raios ao longo do modelo e verificar o tempo gasto para propagar as frentes de onda no *Wavefront Tracer* do Norsar 3D.

O tempo gasto foi relativamente pequeno, tendo em vista a simplicidade do dispositivo de aquisição.

Os dispositivos Ortogonais foram utilizados com o intuito de avaliar a resposta do levantamento ao mudar alguns parâmetros da aquisição.

Considerando que o *aspect ratio* dos dispositivos ortogonais é de 0,5, ao permutar as linhas de tiro com as linhas de receptores, passando do arranjo Ortogonal N-S para o Ortogonal E-W, visava-se avaliar qual a direção do levantamento que melhor imageia o refletor alvo, ou seja, o objetivo do estudo com estes arranjos foi determinar o dispositivo de aquisição mais eficaz. Um trabalho semelhante foi realizado por Campbell et al. (2002), onde aquisições marinhas com streamer são obtidas nas direções Norte-Sul e Leste-Oeste para mostrar o efeito da mudança na direção do levantamento sobre os mapas de iluminação gerados em interfaces sob corpos salinos.

Os arranjos ortogonal E-W e ortogonal E-W com obstáculos foram usados com o objetivo de avaliar a influência dos obstáculos na iluminação do dado.

5.1 *Cross-Spread*

Através da geometria Cross Spread, foram gerados *Hit Maps* (Figura 5.1), mapas de distribuição de offsets (Figura 5.2), de distribuição de azimutes (Figura 5.3) e SMA (Figura 5.4).

Como pode ser visto na figura 5.1, a cobertura no arranjo Cross Spread é igual a 1 ao longo da região iluminada, obtendo algumas variações nas bordas das falhas. Estas variações podem ter sido geradas pela presença de descontinuidades abruptas no modelo de velocidade, pela presença da Fm. Salvador (complexidade do modelo). Este fato pode

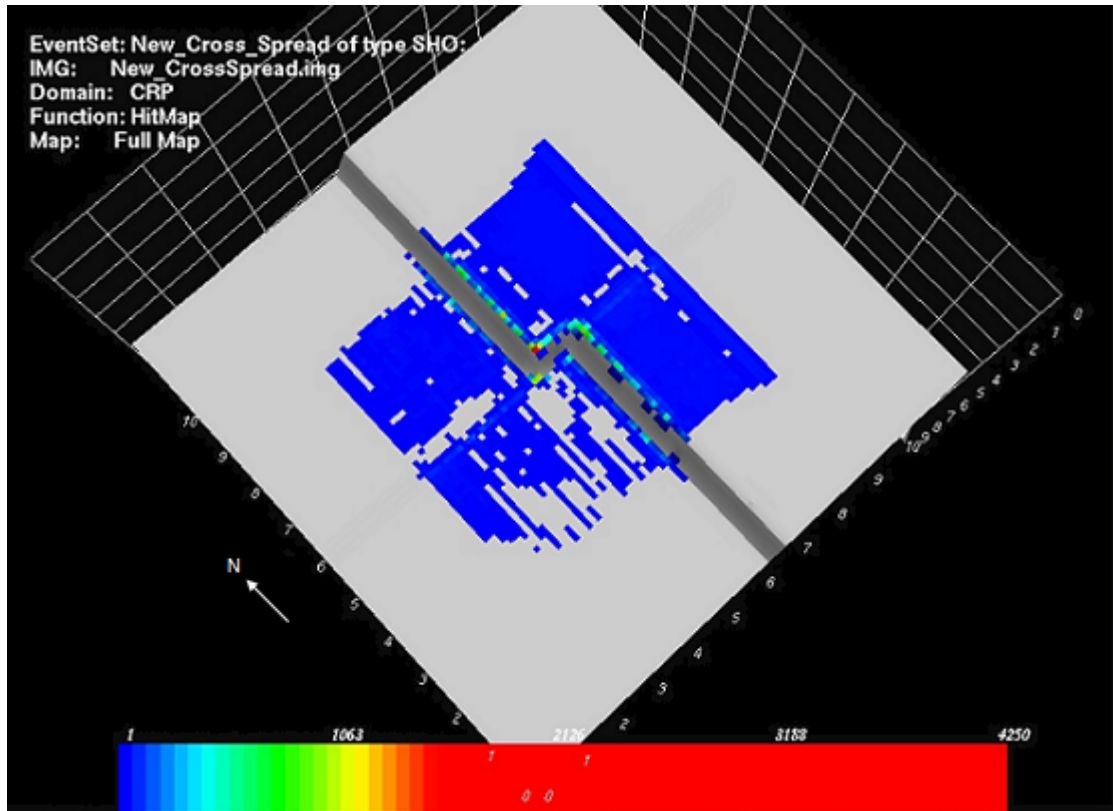


Figure 5.1: *Hit Map* obtido através do arranjo *Cross Spread*.

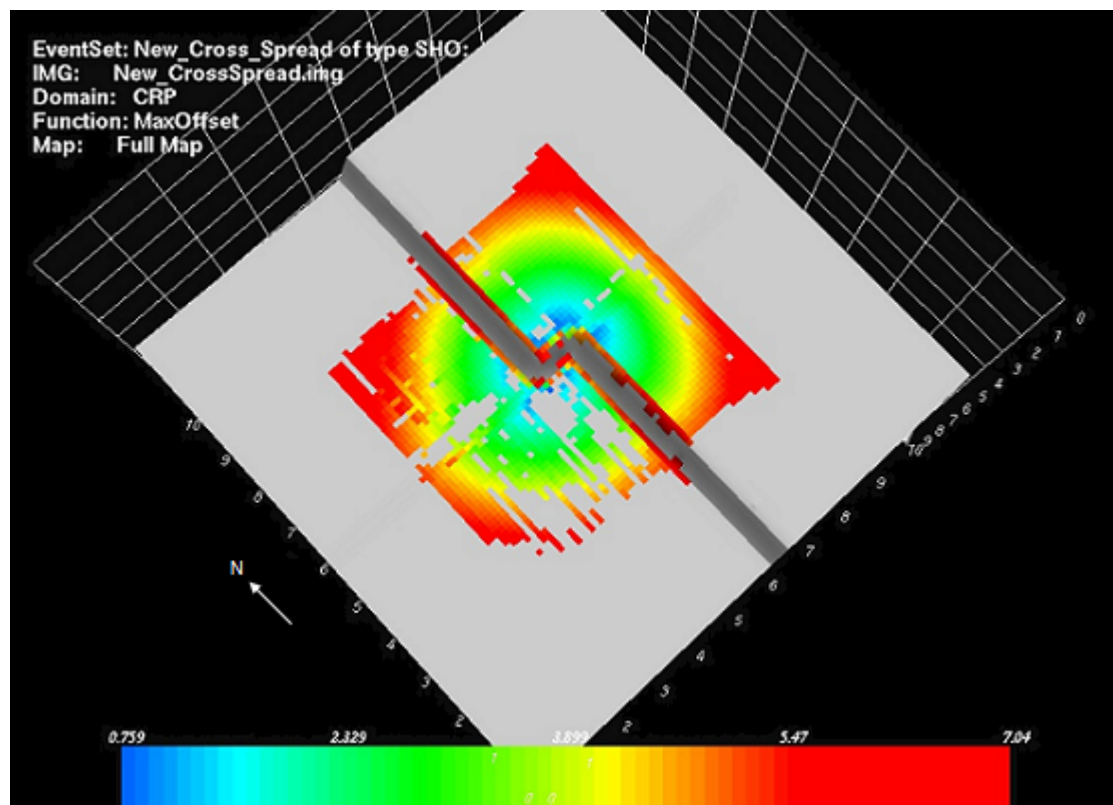


Figure 5.2: Mapa de Offset máximo obtido através do arranjo *Cross Spread*.

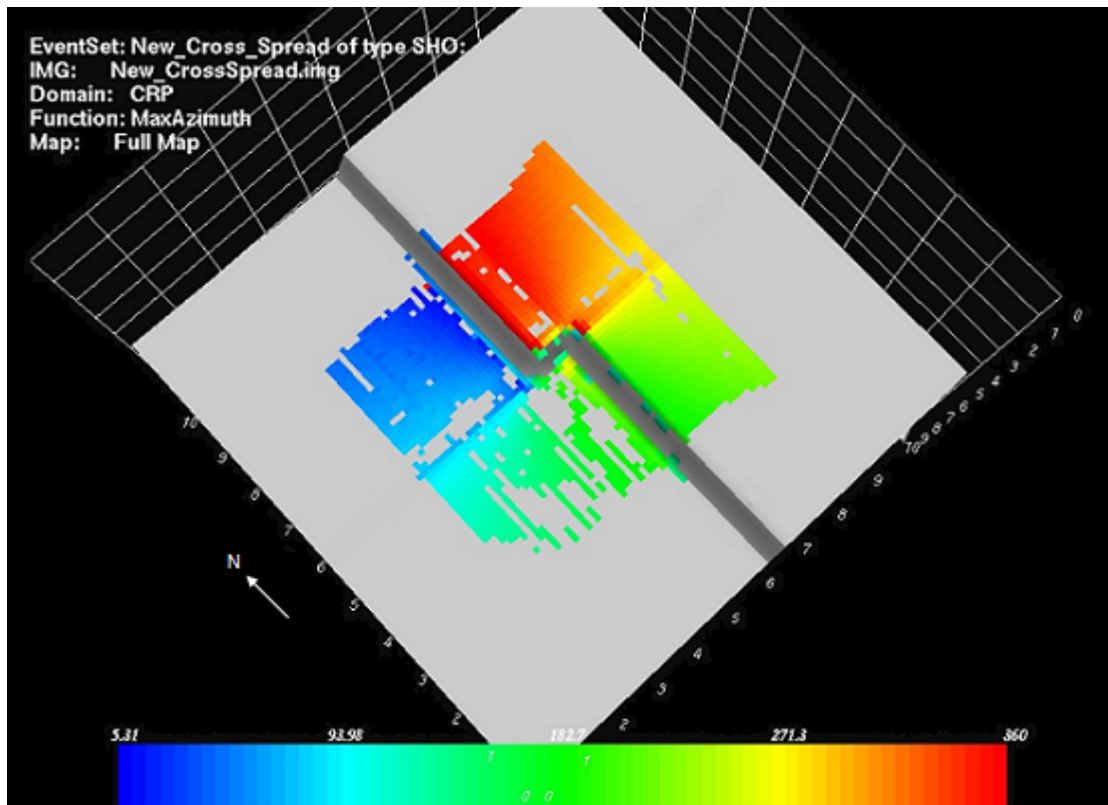


Figure 5.3: Mapa de Azimute máximo obtido através do arranjo *Cross Spread*.

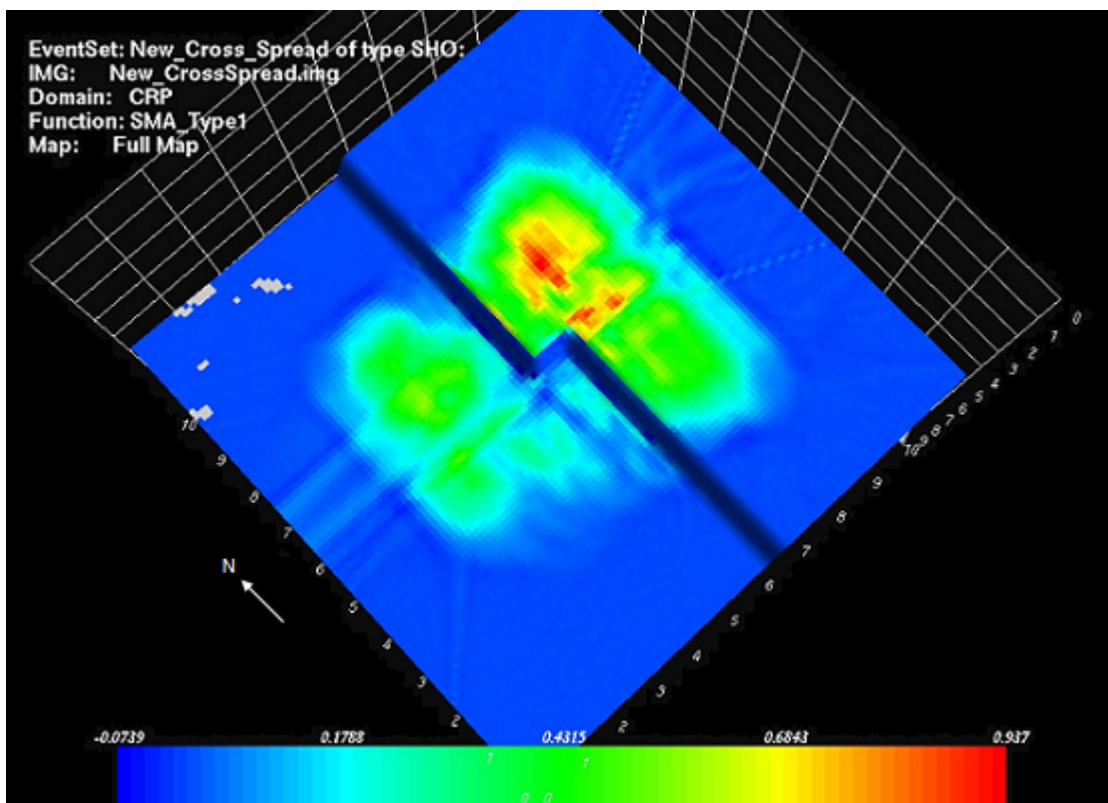


Figure 5.4: Mapa SMA obtido através do arranjo *Cross Spread*.

indicar, entretanto, que alguma parametrização do traçado de raios foi definida de forma inadequada, resultando na fragilidade do estudo.

Observa-se também, nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3, que algumas áreas dentro da região estudada não foram iluminadas (zonas de sombra). Esta falta de iluminação pode estar relacionada com problemas numéricos da propagação dos raios ou com problemas referentes à suavidade do modelo e dos horizontes (superfícies triangularizadas).

Na Figura 5.2, observa-se que o resultado foi coerente com o que é esperado para arranjos *Cross-Spread*, conforme discutido no capítulo 1 (Figura 1.3). Além disso, vale destacar que, as figuras 5.2 e 5.3 mostram o único offset e o único azimuth, respectivamente, que estão registrados para cada ponto do horizonte, onde, na maior parte dos casos, a cobertura foi unitária, como mostrado na figura 5.1.

Na figura 5.4, verifica-se que o mapa registrou amplitudes anômalas abaixo da cunha de conglomerados da Fm. Salvador. Estas anomalias podem ter sido geradas pelos desvios dos raios provocados pelos fortes contrastes de velocidades entre as Formações.

5.2 Ortogonal N-S x Ortogonal E-W

Os mapas de iluminação para os dispositivos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W serão aqui mostrados e comparados. A comparação será feita visando determinar qual o dispositivo que melhor ilumina o alvo.

Para estes arranjos, foram obtidos *Hit Maps* (Figura 5.5), mapas com o ângulo máximo de incidência (Figura 5.6), mapas com o ângulo mínimo de incidência (Figura 5.7), mapas de distribuição de offsets (Figura 5.8), de distribuição de azimuths (Figura 5.9) e SMA (Figura 5.10).

Como pode ser visto na Figura 5.5, existe uma forte influência da direção dos dispositivos nos mapas gerados. Isto se deve ao fato do dispositivo ser direcional, já que o *aspect ratio* é igual a 0,5. Com base no *Hit Map*, o arranjo Ortogonal N-S parece ser o mais indicado para a aquisição. Isto deve-se às seguintes observações:

- Maior área imageada, com fold mais alto (em praticamente todos os quadrantes).
- Maior uniformidade (consistência) no número de hits, evidenciada pela coloração do mapa (mais tons em verde). A uniformidade é bastante desejável em mapas de hits, em oposição com áreas de concentração de cores “quentes” ladeadas por cores “frias”.

Entretanto, ambas as direções apresentam uma distribuição satisfatória, sem mostrar nenhuma zona de sombra, apenas aquelas relacionadas com o taper do fold (bordas da área).

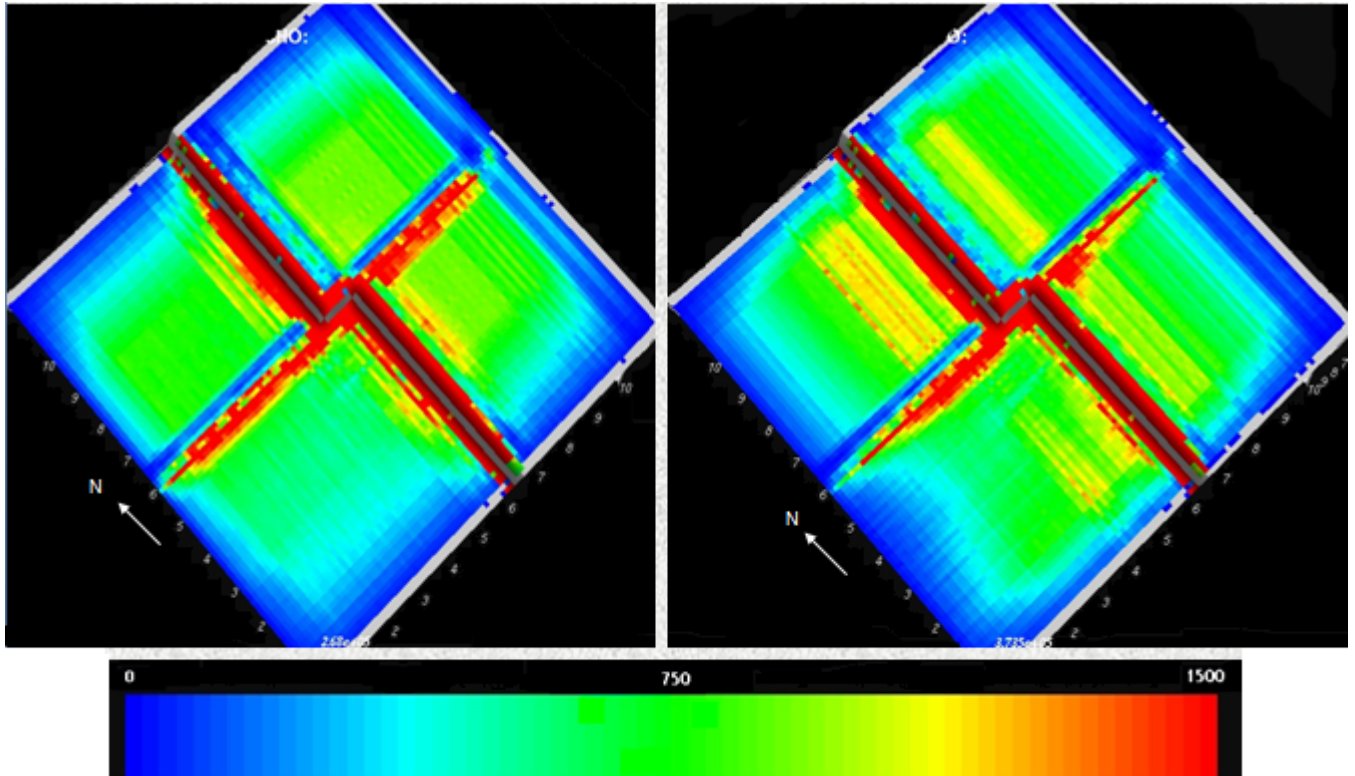


Figure 5.5: *Hit Map* obtido através dos arranjos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W, respectivamente.

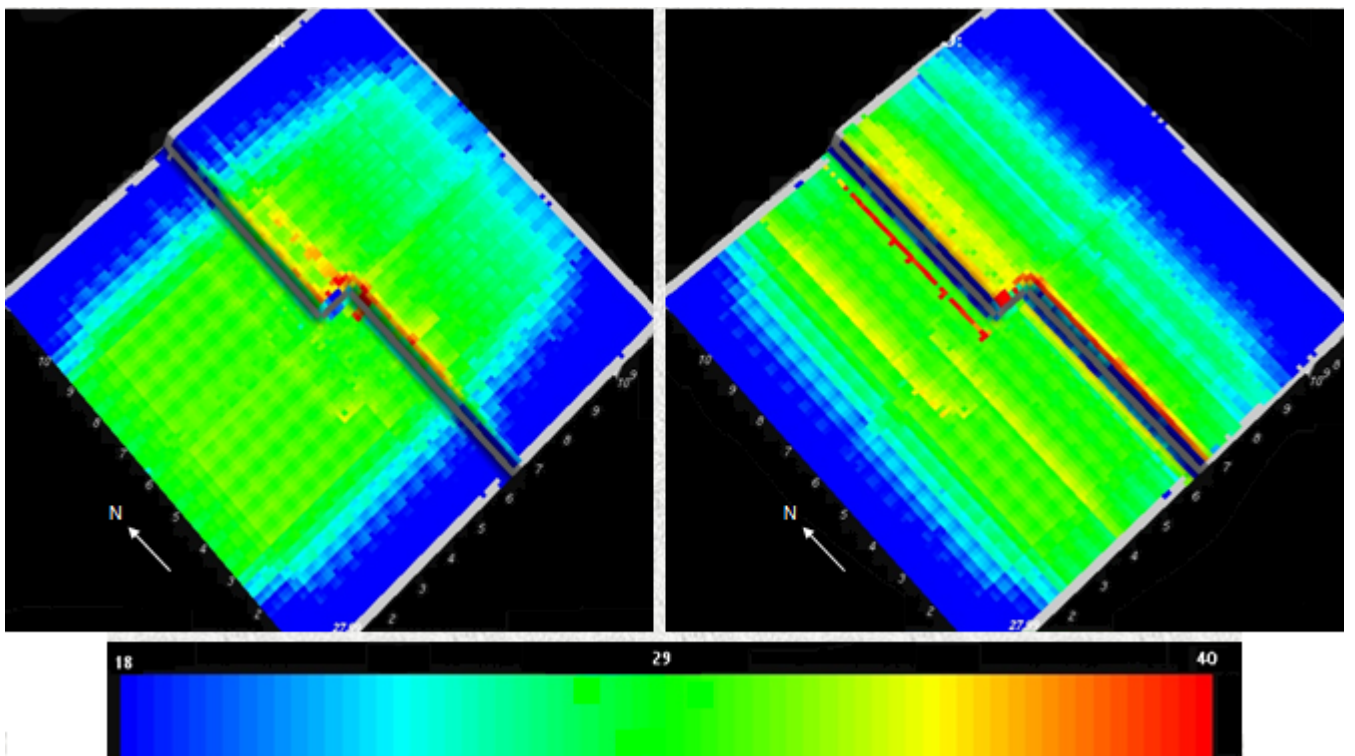


Figure 5.6: Mapa de ângulo máximo de incidência obtido através dos arranjos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W, respectivamente.

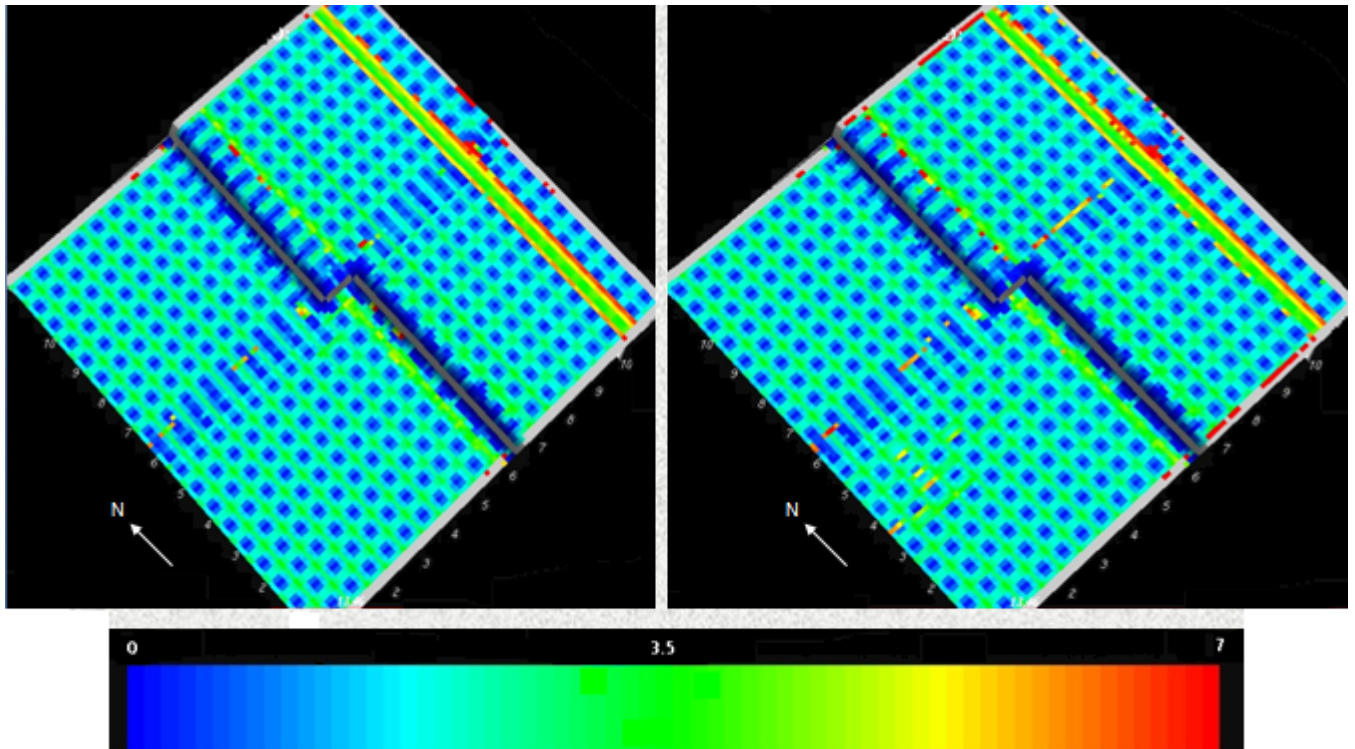


Figure 5.7: Mapa de ângulo mínimo de incidência obtido através dos arranjos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W, respectivamente.

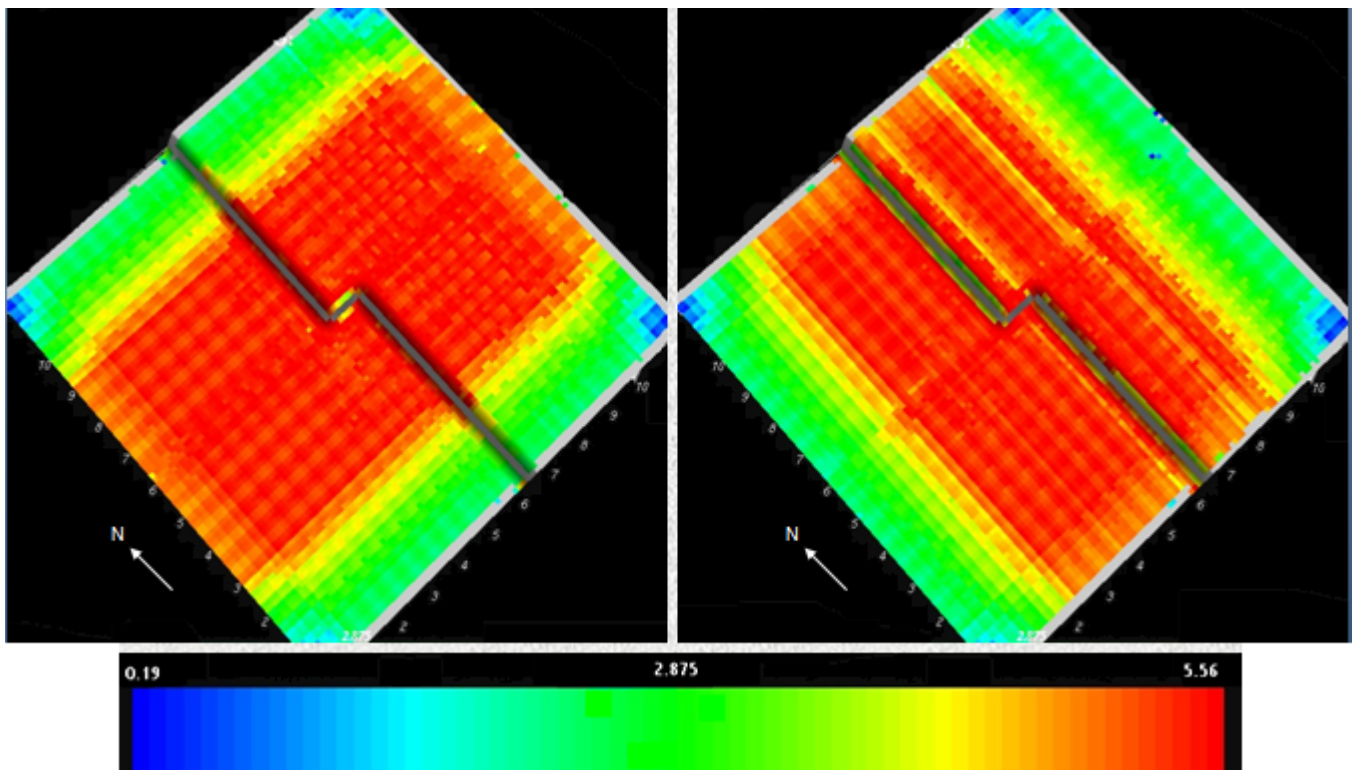


Figure 5.8: Mapa de Offset máximo obtido através dos arranjos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W, respectivamente.

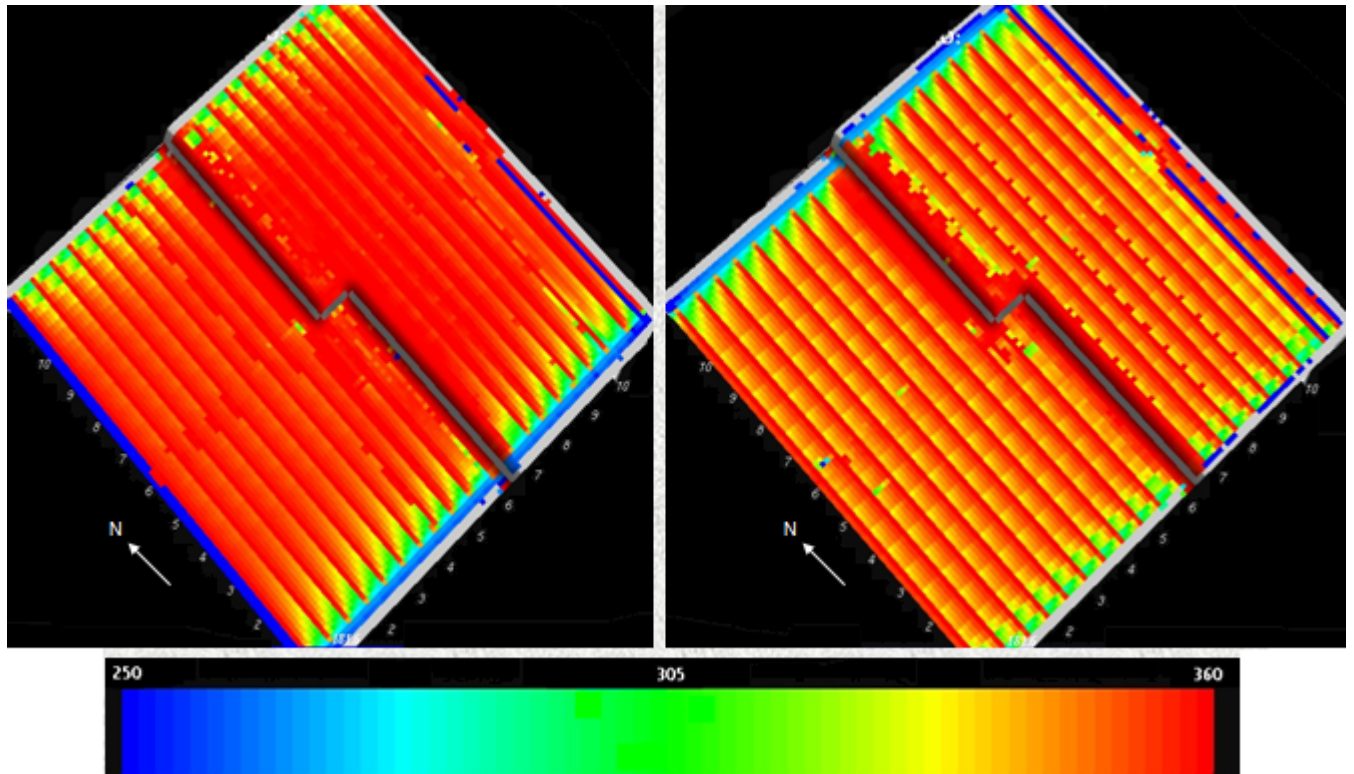


Figure 5.9: Mapa de Azimute máximo obtido através dos arranjos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W, respectivamente.

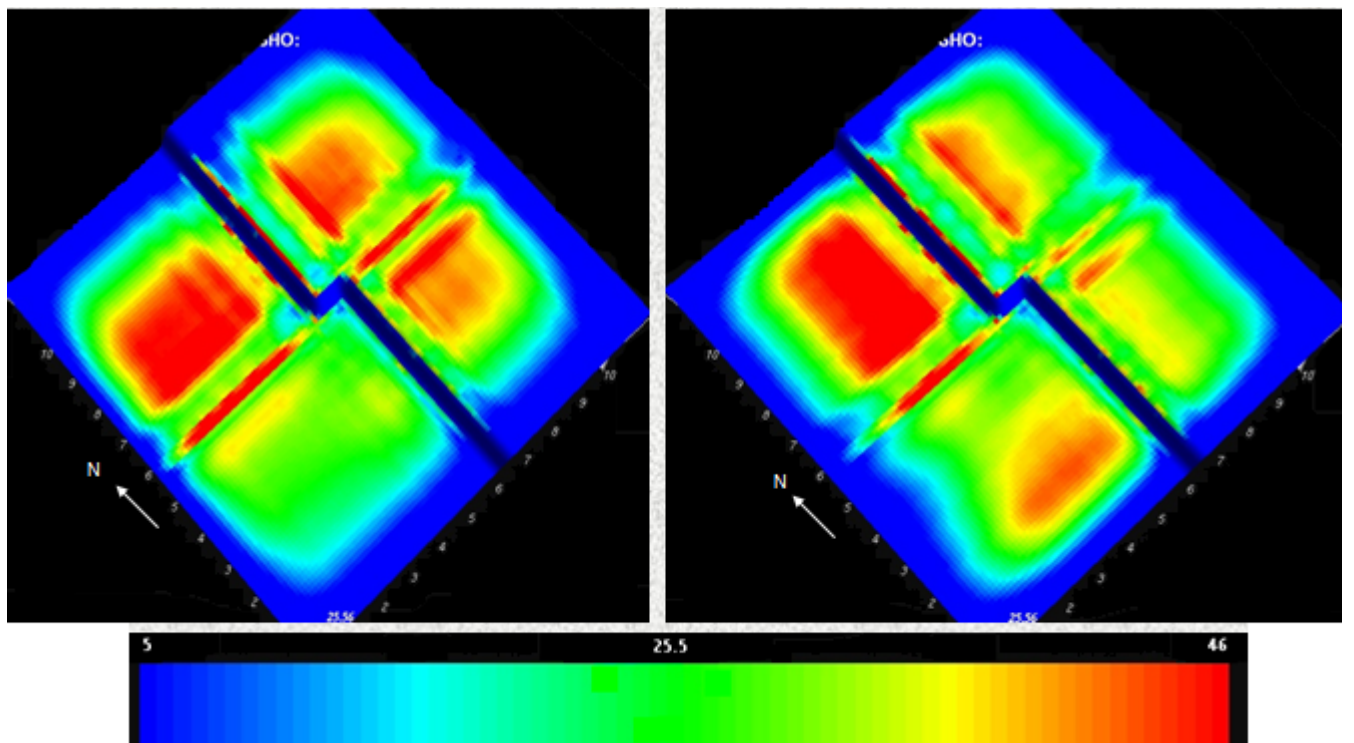


Figure 5.10: Mapa SMA obtido através dos arranjos Ortogonal N-S e Ortogonal E-W, respectivamente.

A Figura 5.6 também indica uma melhor performance do dispositivo N-S, no que se refere à consistência do ângulo de incidência, (valor em torno de 29°). Para ser considerado ideal, esse valor poderia ser ainda maior (entre 35 e 40°).

A Figura 5.7 mostra um padrão xadrez de variação do ângulo mínimo. Este padrão também pode ser chamado de *footprint*, considerado como efeito do dispositivo de aquisição utilizado e não como uma resposta geológica do meio. Este efeito é compatível com o maior espaçamento entre as linhas de tiros e as linhas de receptores (500 metros no arranjo). Quanto mais raso for o objetivo de estudo (refletor), mais forte será a manifestação deste efeito. Assim, com base no mapa obtido, sob o ponto de vista da uniformidade, pode-se deduzir que o espaçamento entre as linhas deveria ser menor, o que reduziria o efeito do *footprint*, obtendo um resultado mais satisfatório.

Entretanto, mesmo havendo a alternância de valores do ângulo de incidência, nas duas direções do dispositivo, essa variação pode ser considerada razoável e satisfaz o valor de ângulo mínimo desejado para atender aos estudos de AVO, valendo ressaltar que o intérprete, ao analisar os dados reais, deve estar atento à estes efeitos.

Através dos mapas de Offset máximo (Figura 5.8), percebe-se que também há maior consistência para a direção N-S.

Com relação ao mapa de azimuth máximo (Figura 5.9), pode-se observar que o arranjo ortogonal N-S apresenta uma maior uniformidade nos valores do azimuth. Esta uniformidade é desejável pois assegura uma melhor qualidade no processamento. Portanto, podemos concluir que, além de fornecer informações sobre qual dispositivo apresenta melhor amostragem do refletor, os mapas de iluminação também sugerem qual dispositivo apresentará melhor eficácia do processamento.

O mapa SMA (Figura 5.10) mais adequado para os objetivos do estudo foi o do dispositivo N-S. O mapa referente a este arranjo é o que apresenta maior uniformidade das altas amplitudes, principalmente na região abaixo da cunha da Fm. Salvador. As altas amplitudes são resultado da maior incidência de energia no horizonte, sendo por isso, extremamente importantes para o processamento, já que possibilitam o imageamento do refletor, e para a interpretação, no que se refere à delimitação e caracterização do horizonte. Entretanto, deve-se ficar atento aos valores das amplitudes, se elas realmente caracterizam o refletor, ou se são resultado de fatores referentes ao traçado de raios.

Com base nos mapas obtidos, pode-se inferir que, o arranjo ortogonal N-S foi o dispositivo mais apropriado para o estudo do Sergi, apresentando os melhores resultados para todos os atributos mapeados. Com isso, apesar da simplicidade do modelo, fica possível determinar uma estratégia de aquisição para o caso da borda leste da bacia do Recôncavo, que apresenta uma camada de conglomerados de alto mergulho e alta velocidade, Formação Salvador, e um sistema de falhas de direção nordeste-sudoeste. A melhor estratégia neste

caso é adotar um dispositivo cuja direção das linhas de tiro seja ortogonal à direção principal das estruturas, assegurando uma maior uniformidade da amostragem e uma riqueza azimutal favorável à iluminação do alvo, em comparação com as demais direções de levantamento. Esta estratégia se estende à outras situações semelhantes, em que haja uma direção predominante das estruturas (sistemas de falhas, corpos salinos, entre outros).

No caso de não existir uma direção predominante das estruturas, a proposta é utilizar um dispositivo com maior *aspect ratio*, o que diminui seu caráter direcional, possibilitando uma amostragem de boa qualidade em todas as direções. Esta solução pode ter um custo maior, mas em compensação, a qualidade da pesquisa será melhor.

5.3 Ortogonal E-W x Ortogonal E-W com obstáculos

Como foi dito anteriormente, o arranjo ortogonal E-W com obstáculos foi criado com o objetivo de avaliar a influência que os obstáculos exercem na iluminação do dado. Os mapas de iluminação do arranjo ortogonal E-W e do ortogonal E-W com obstáculos serão aqui dispostos lado a lado, visando esta avaliação.

Para estes arranjos, foram obtidos *Hit Maps* (Figura 5.11), mapa de ângulo máximo de incidência (Figura 5.12), mapa de ângulo mínimo de incidência (Figura 5.13), mapas de distribuição de offsets (Figura 5.14), de distribuição de azimutes (Figura 5.15) e SMA (Figura 5.16).

Como pode ser verificado na maioria dos mapas obtidos, a influência dos obstáculos não foi muito significativa. Este fato pode ser explicado pela profundidade do alvo. Se o horizonte fosse mais raso, esta influência seria mais marcante, afetando com maior intensidade os atributos mapeados.

Os mapas mais influenciados pela presença dos obstáculos foram os de ângulo máximo de incidência e de ângulo mínimo de incidência, como pode ser verificado nas figuras 5.12 e 5.13. A variação anômala do ângulo mínimo de incidência, nas áreas abaixo dos obstáculos, pode causar artefatos ou ambigüidades durante a interpretação de dados reais obtidos na região.

Supondo que o mapa da figura 5.13, referente ao arranjo com obstáculos, represente uma situação real, e que um intérprete queira fazer uma análise mais avançada do horizonte, a nível de caracterização de reservatório, ele poderá evitar possíveis armadilhas de interpretação se estiver com o mapa em mãos. Se ele for avaliar, por exemplo, a relação da amplitude com o offset (AVO) e com o ângulo (AVA), os valores anômalos do ângulo de incidência, nas regiões dos obstáculos, irão causar alterações nos valores das amplitudes, não representando verdadeiramente o refletor em estudo. Assim, se o intérprete não estiver atento aos efeitos

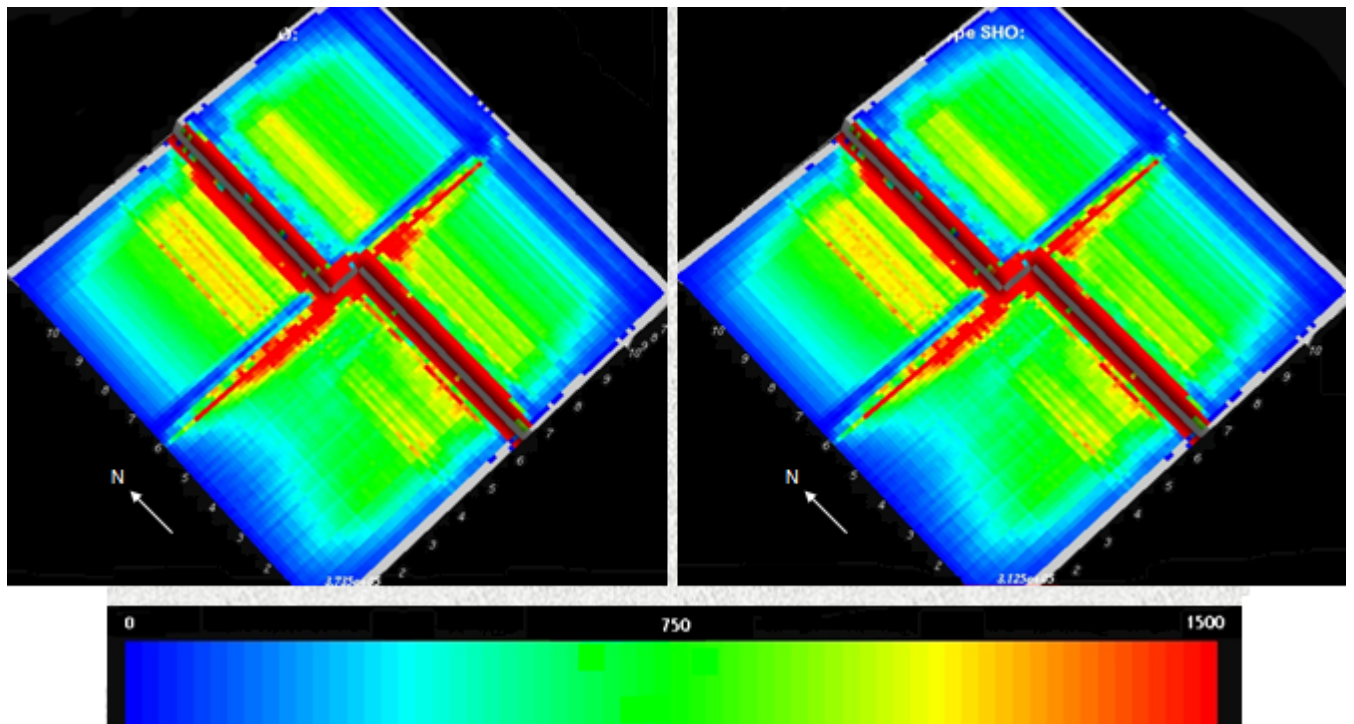


Figure 5.11: *Hit Map* obtido através dos arranjos Ortogonal E-W e Ortogonal E-W com obstáculos, respectivamente.

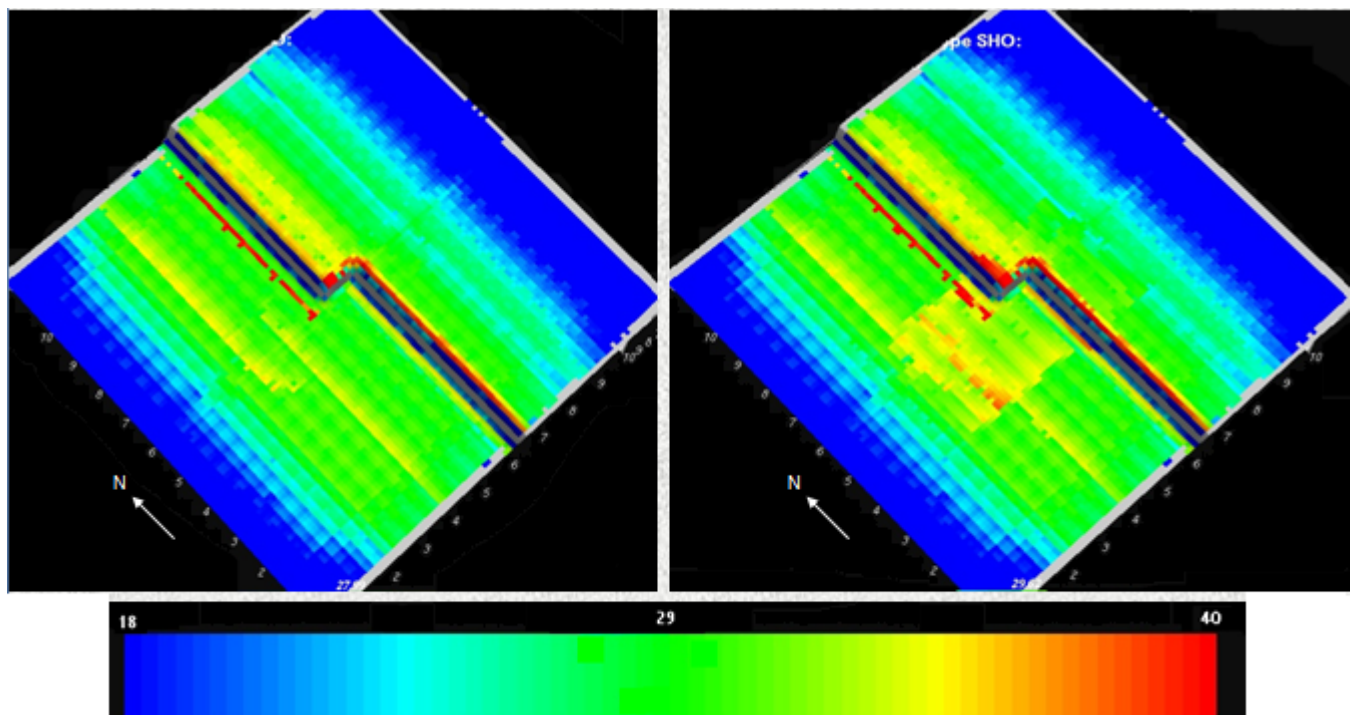


Figure 5.12: Mapa de ângulo máximo de incidência obtido através dos arranjos Ortogonal E-W e Ortogonal E-W com obstáculos, respectivamente.

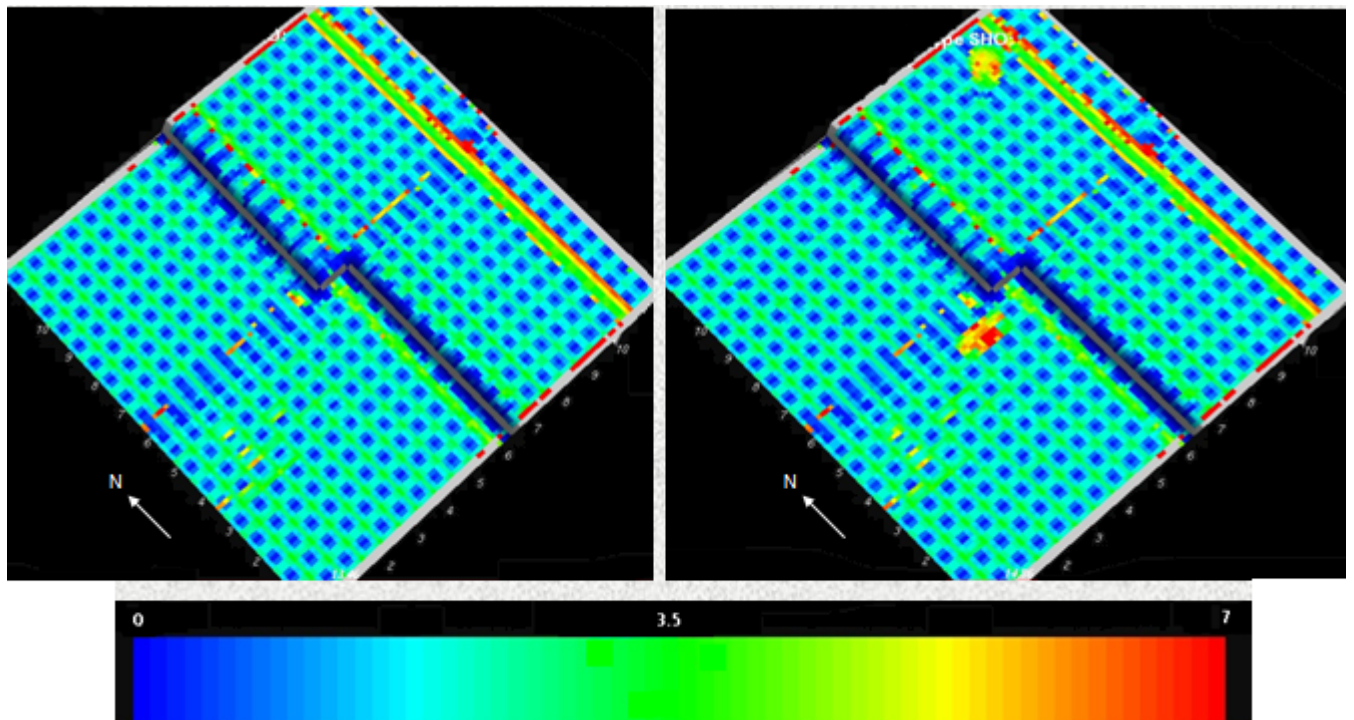


Figure 5.13: Mapa de ângulo mínimo de incidência obtido através dos arranjos Ortogonal E-W e Ortogonal E-W com obstáculos, respectivamente.

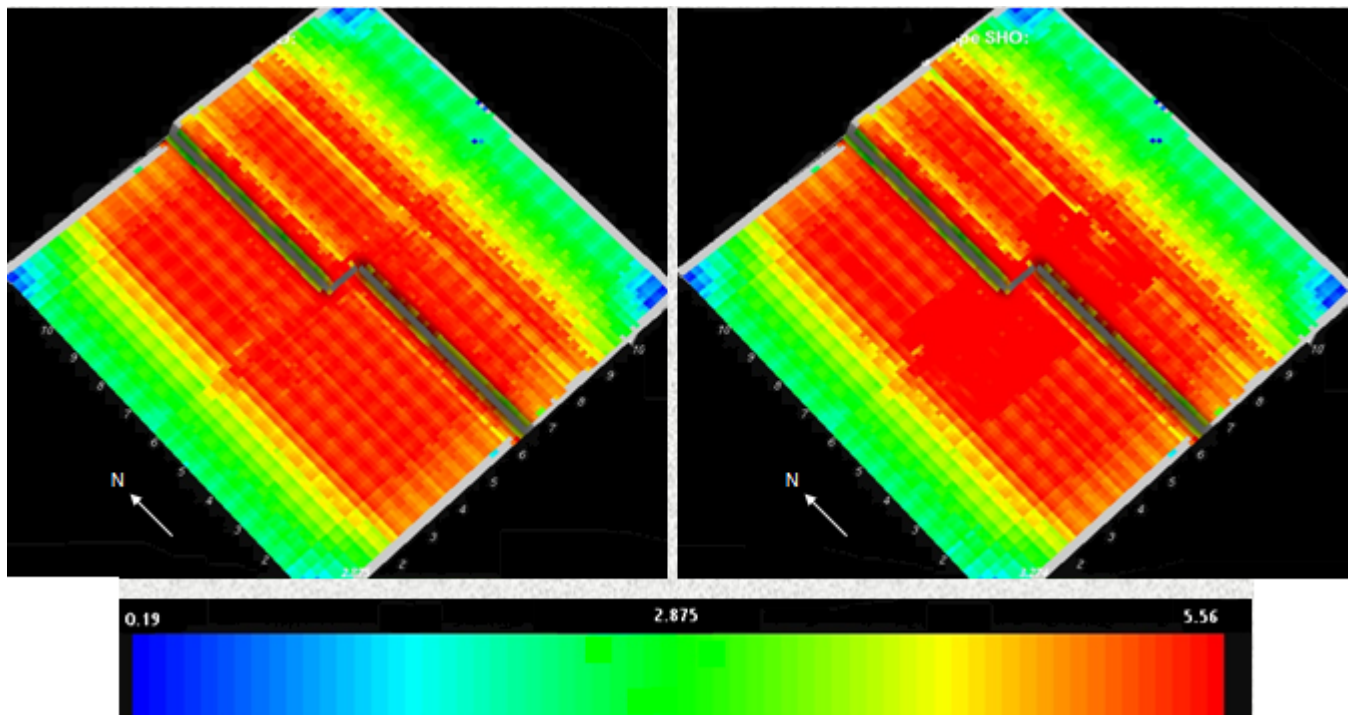


Figure 5.14: Mapa de Offset máximo obtido através dos arranjos Ortogonal E-W e Ortogonal E-W com obstáculos, respectivamente.

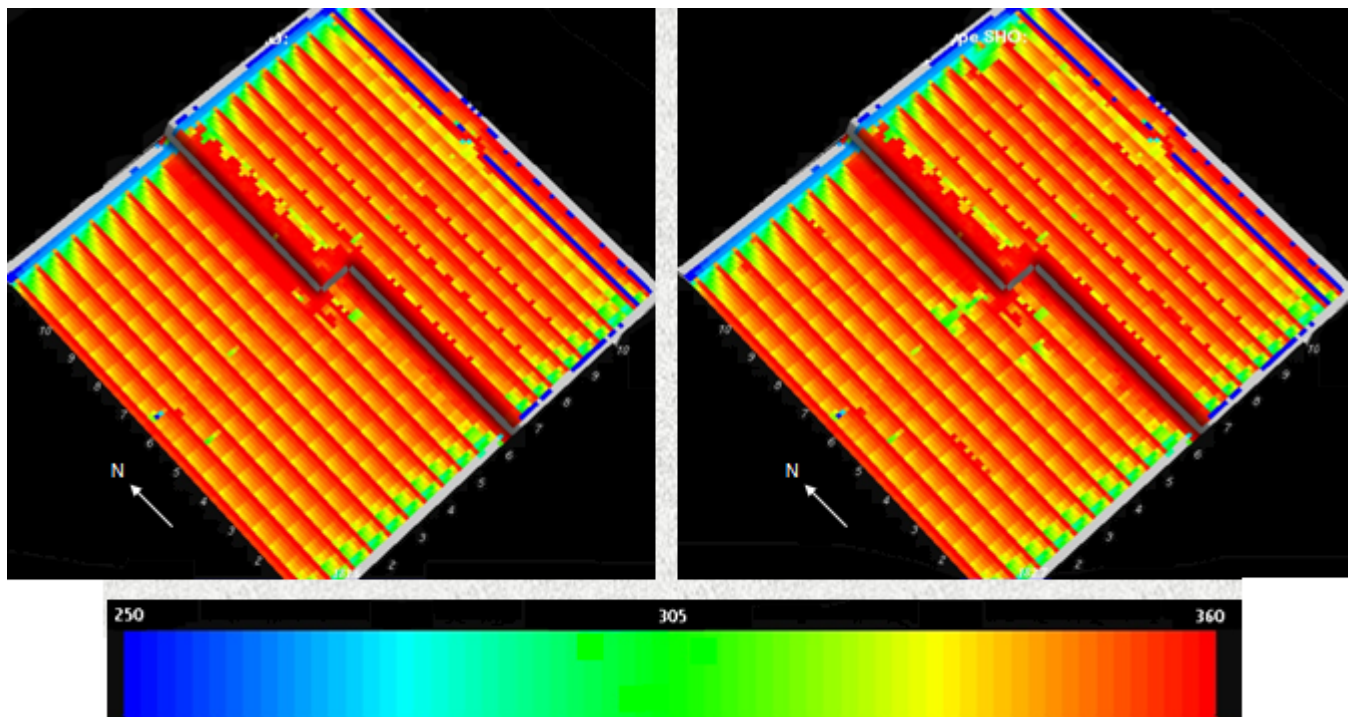


Figure 5.15: Mapa de Azimute máximo obtido através dos arranjos Ortogonal E-W e Ortogonal E-W com obstáculos, respectivamente.

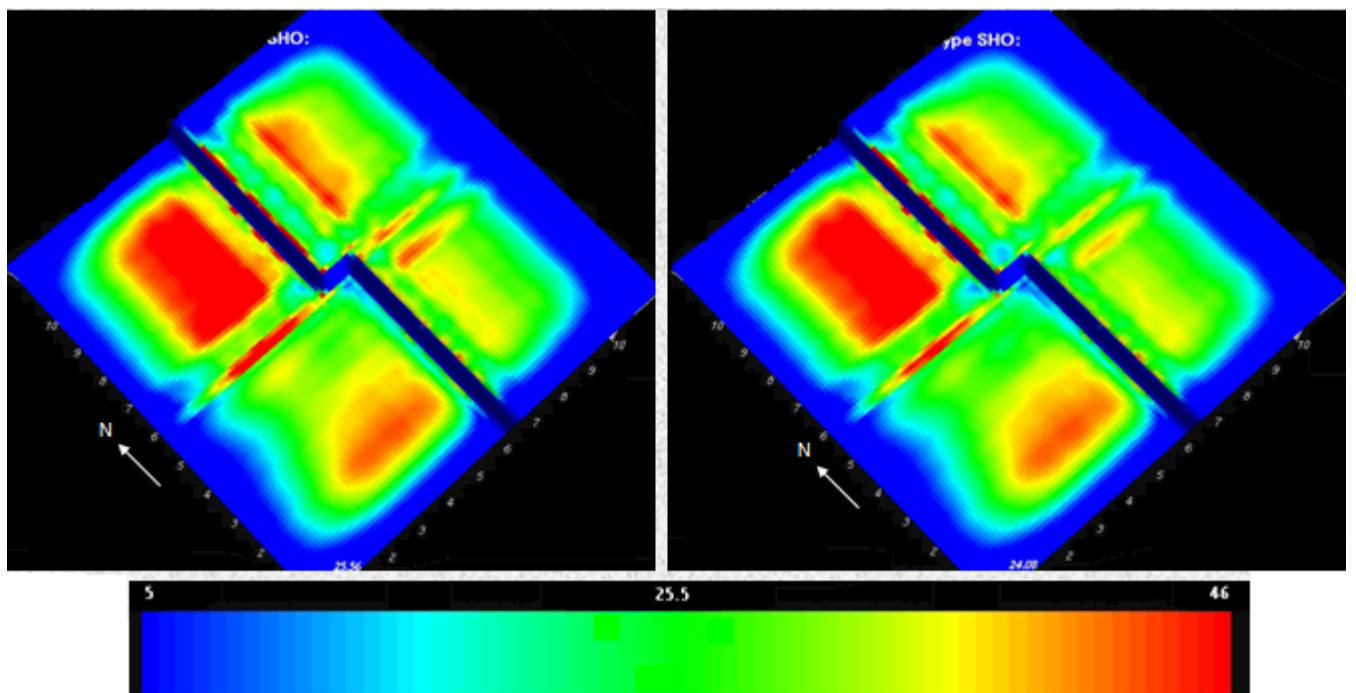


Figure 5.16: Mapa SMA obtido através dos arranjos Ortogonal E-W e Ortogonal E-W com obstáculos, respectivamente.

que os obstáculos podem causar, ele irá interpretar as anomalias de forma errada, como se fossem hidrocarbonetos, ou qualquer outra coisa que não seja o real.

Com isso, pode-se verificar, mais uma vez, a importância dos estudos de iluminação. Além de ser uma ferramenta adicional para na etapa do planejamento, eles também são bastante úteis na etapa da interpretação, alertando o intérprete sobre possíveis armadilhas e evitando que ele cometa equívocos na interpretação.

CAPÍTULO 6

Conclusões

O planejamento da aquisição, na maioria das vezes, é realizado com base na distribuição da cobertura e do offset, assumindo a subsuperfície como sendo composta por camadas planas.

Entretanto, isto quase nunca acontece em situações reais. Sendo assim, a modelagem direta tem sido usada com bastante frequência para planejar a aquisição. O traçado de raios é um dos métodos mais utilizados na modelagem, tendo como objetivo de estudo prever a iluminação em refletores alvos, para determinados dispositivos de aquisição. Como resultado destes estudos, são gerados mapas de iluminação, que são mapas localizados sobre o horizonte alvo, mostrando os atributos modelados. Estes mapas servem como informações adicionais na escolha do melhor dispositivo durante o planejamento de uma aquisição sísmica.

O custo de realizar um estudo de iluminação é mínimo e seu tempo de conclusão é curto quando comparado com a aquisição. Portanto, não realizar este estudo poderá ser arriscado devido ao alto custo de uma aquisição sísmica 3D.

Uma vez conhecida a influência da geometria de aquisição sobre a qualidade da imagem, é possível aperfeiçoar o layout da pesquisa e a estratégia do imageamento para o melhor resultado possível.

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, podemos concluir que os mapas de iluminação são, realmente, informações muito úteis, tanto para o planejamento da aquisição quanto para a etapa da interpretação. Apesar da simplicidade do modelo, foi possível determinar uma estratégia de aquisição para a borda leste da bacia do Recôncavo. Além disso, as observações realizadas podem servir como referência para outras regiões, que apresentem uma estrutura semelhante (zonas com altos contrastes de velocidade e direção preferencial de estruturas).

Através do modelo criado e dos mapas gerados durante o estudo, o intérprete é capaz de se “familiarizar” com o ambiente em investigação. Assim, os mapas gerados induzem o intérprete a pensar na área de estudo, nos problemas que possam surgir e nas possíveis respostas do levantamento. Consequentemente, quando a aquisição for realizada, ele terá mais facilidade em interpretar o resultado, por estar mais atento à situação do sistema.

Com base nos mapas obtidos, pode-se inferir que, o arranjo ortogonal N-S foi o dispositivo mais apropriado para o estudo do Sergi, apresentando os melhores resultados para todos os atributos mapeados. Com isso, apesar da simplicidade do modelo, fica possível determinar uma estratégia de aquisição para o caso da borda leste da bacia do Recôncavo. A melhor estratégia neste caso é adotar um dispositivo cuja direção das linhas de tiro seja ortogonal à direção principal das estruturas, assegurando uma maior uniformidade da amostragem e uma riqueza azimutal favorável a iluminação do alvo.

Como sugestão para a continuação deste trabalho, propõe-se aumentar as dimensões do modelo e do dispositivo de aquisição, para aumentar o afastamento máximo e permitir a gravação de ondas com maiores trajetórias. Também seria interessante aplicar gradiente de velocidade nas camadas, tendo em vista que elas são espessas o bastante. O gradiente de velocidade nas camadas tornaria a trajetória do raio mais curva, assumindo um aspecto mais realístico. Em um modelo com estas características é possível aumentar o número de hits em estruturas de grandes mergulhos, como por exemplo domos de sal, canais antigos e vizinhança de falhas de rejeitos consideráveis.

A criação de outros tipos de mapas, como por exemplo os *Flower Plots*, seria bem enriquecedor, já que estes mapas dão indicações mais diretas sobre qual direção de levantamento utilizar. A variação nos parâmetros do traçado de raios também poderia trazer informações úteis para o estudo, já que seria possível analisar a influência do método utilizado sobre os estudos. Esta é a vantagem de modelar, poder modificar o modelo ou o dispositivo, e avaliar o impacto de cada variação na resposta do estudo.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Gino Passos, pelo profissionalismo e empenho com que tratou este trabalho.

Ao Marco Cesar Schinelli, suas sugestões foram sempre oportunas e construtivas.

Ao Antônio Edson, pela simpatia e pela ajuda.

Ao Paulo Barrocas, Álvaro Lúcio, Aggio e Credilson. Mesmo à distância, a colaboração de vocês foi imprescindível na execução deste trabalho.

À PETROBRAS pela oportunidade do meu desenvolvimento técnico-científico.

Aos amigos da PETROBRAS, Suelen, Asclépio, Léo, Fernando, Thanany, Gomes, Carmo, Jô, entre outros. Obrigada pelo carinho.

Aos professores da UFBA, pelos conhecimentos transmitidos ao longo de todo o curso.

Aos colegas de turma, Américo, Liège, Naiane, Misael, Tiago, Rodrigo, Rejhane, Alan, Cleriston e Nayguel; e a todos os amigos do curso, Vinicius, Tiago Freitas, Taís, Alana, Felipe Terra, Felipe Mendes, Enock, entre tantos outros. Obriagada pela amizade.

Aos meus pais e irmãs, pelo apoio incondicional.

A toda minha família, pelo incentivo. Em especial, tia Solange, tio Zé, Isa e Fernando. Obrigada por terem me acolhido com tanto amor e carinho. Vocês são os principais responsáveis pela conclusão deste trabalho.

Ao meu namorado, Leandro, pelo companheirismo, pela ajuda inestimável e por ter sempre acreditado em mim.

Referências Bibliográficas

- Alves, G. C.; Bulcão, A. Filho, D. M. S.; Theodoro, C. E. and Santos, A. L. (2009) Target oriented approach for illumination analysis using wave equation via fdm, SEG Technical Program Expanded Abstracts, **28**(1):181–185.
- Brink, M.; Jones, N.; Doherty, J.; Vinje, V. and Laurain, R. (2004) Infill decisions using simulated migration amplitudes, SEG Int'l Exposition and 74th Annual Meeting.
- Brito, A. F. and Ghignone, J. I. (2009) Borda centro-leste da bacia do recôncavo (estado da bahia): Uma nova fronteira exploratória na mais profícua bacia petrolífera terrestre do brasil, SBGf.
- Campbell, S.; Pramik, B. and Cafarelli, B. (2002) Comparative ray-based illumination analysis, SEG Int'l Exposition and 72nd Ann. Meeting.
- Cerveny, V. and Hron, F. (1980) The ray series method and dynamic ray-tracing system for three-dimensional inhomogeneous media, Bulletin of the Seismological Society of America, **70**:47–77.
- Cerveny, V. and Soares, J. P. (1992) Fresnel volume ray tracing, Geophysics, **57**:902–905.
- Cerveny, V.; Molotkov, I. A. and Psencik, I. (1977) Ray Method in Seismology, Charles University, Prague.
- Cerveny, V.; Popov, M. M. and Psencik, I. (1982) Computation of wave fields in inhomogeneous media-gaussian beam approach, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, **70**:109–128.
- Cordsen, A.; Galbraith, M. and Peirce, J. (2000) Planning Land 3-D Seismic Survey, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, USA.
- Duarte, O. O. (2010) Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia, Sociedade Brasileira de Geofísica.
- Gibson, J. R. (2000) Ray tracing by wavefront construction for anisotropic media, Expanded Abstracts, 70th SEG Annual Meeting, pp. 2305–2308.
- Gjøystdal, H.; Iversen, E.; Lecomte, I.; Kaschwich, T.; Drottning, A. and Mispel, J. (2007) Improved applicability of ray tracing in seismic acquisition, imaging, and interpretation, Geophysics, **72**:SM261–SM271.
- Laurain, R. and Vinje, V. (2001) Prestack depth migration and illumination maps, SEG Technical Program Expanded Abstracts, **20**:929–932.

- Laurain, R.; Mispel, J. and Vinje, V. (2002) Towards better amplitude maps by simulated migration, Expanded Abstracts, 72nd Ann. Internat. SEG Mtg., Salt Lake City, pp. 1376–1379.
- Laurain, R.; Gelius, L. J.; Vinje, V. and Lecomte, I. (2004) A review of 3d illumination studies, Journal of Seismic Exploration, **13**:17–37.
- Lecomte, I.; Kaschwich, T.; Gjøystdal, H. and Iversen, E. (2009) Use ray-based modeling methods to plan, analyze, and control subsalt imaging, EAGE.
- Popov, M. M. (1982) A new method of computation of wave fields using gaussian beams, Wave Motion, **4**:85–97.
- Sheriff, R. E. (2002) Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics, SEG.
- van Veldhuizen, E. and Blacquiere, G. (2003) Acquisition geometry analysis using quantitative measures for image quality, Expanded Abstracts, 73rd Ann. Internat. SEG Mtg., Dallas, pp. 2148–2151.
- Vermeer, G. J. O. (2002) 3-D Seismic Survey Design, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.
- Vinje, V. (2000) Reflector oriented amplitude recovery, Abstracts, 62nd EAGE Conf., Glasgow, p. P0136.
- Vinje, V.; Iversen, E. and Gjøystdal, H. (1993) Traveltime and amplitude estimation using wavefront construction, Geophysics, **58**:1157–1166.
- Vinje, V.; Iversen, E. and Gjøystdal, H. (1993b) Traveltime and amplitude estimation using wavefront construction, Extended Abstracts, EAEG Annual Meeting, **58**:1157–1166.
- Vinje, V.; Iversen, E.; Astebo, K. and Gjøystdal, H. (1996a) Estimation of multivalued arrivals using wavefront construction, Geophys. Prospect., **44**:819–842.
- Vinje, V.; Astebo, K.; Iversen, E. and Gjøystdal, H. (1999) 3-d ray modeling by wavefront construction in open models, Geophysics, **64**:1912–1919.
- Yilmaz, O. (2001) Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, USA.