

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

JOÃO MUNIZ MOREIRA

**ESTUDOS DE ILUMINAÇÃO SÍSMICA POR TRAÇADO DE
RAIOS NA BACIA DO ESPÍRITO SANTO**

**NITERÓI
2013**

JOÃO MUNIZ MOREIRA

**ESTUDOS DE ILUMINAÇÃO SÍSMICA POR TRAÇADO DE
RAIOS NA BACIA DO ESPÍRITO SANTO**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Programa de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Geofísica.

Orientador:

Prof. Dr. Rogério de Araújo Santos

NITERÓI

2013

JOÃO MUNIZ MOREIRA

**ESTUDOS DE ILUMINAÇÃO SÍSMICA POR TRAÇADO DE
RAIOS NA BACIA DO ESPÍRITO SANTO**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Programa de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Geofísica.

Aprovado em: __/__/____

Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Rogério de Araújo Santos
Universidade Federal Fluminense - UFF**

**Prof^a. Dr^a. Eliane da Costa Alves
Universidade Federal Fluminense - UFF**

**Prof. Dr. Cleverson Guizan Silva
Universidade Federal Fluminense – UFF**

**NITERÓI
2013**

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho aos meus pais, e meus maiores professores, Marcos Muniz Moreira e Ilka Maria de Almeida, que com todo apoio e dedicação dados durante toda a minha criação, foram fundamentais para que eu pudesse realizar este sonho.

Agradeço à minha namorada Tamyres Esteves, aos meus irmãos Pedro de Almeida e Renato de Almeida Rocha e à minha madrasta Shirley Monnerat, pelo companheirismo e incentivo e, principalmente, pelos momentos de felicidade e descontração.

Aos meus familiares, em especial, minha avó Silvia Madeira de Almeida por sempre me transmitir muita paz e sabedoria, e meu avô Renato de Almeida (*in memoriam*), por ser um exemplo de vida pra mim.

Aos alunos da turma de 2008 do curso de graduação em Geofísica da UFF. Com certeza, todos contribuíram para a conclusão desta graduação. Em especial, agradeço fortemente aos meus grandes amigos e colegas de estudos Fabrício Ornellas, Bruno Motta, João Bruno e Bruno Braga. Sem eles talvez não estaria aqui!

Agradeço aos professores e pesquisadores do LAGEMAR-UFF, especialmente ao professor Alex Motta Borges e ao doutorando Camilo Aristizabal, por tanto conhecimento que me foi passado.

Ao meu orientador Rogério Santos e aos membros da banca examinadora Eliane Alves e Cleverson Guizan, pelos ensinamentos, paciência e apoio dado a este trabalho.

Por fim, agradeço aos parceiros de futebol, importantíssimos nas semanas mais tensas de estudos, e a todos os amigos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse concluído.

RESUMO

A presença de estruturas evaporíticas nas bacias sedimentares causa bruscas variações laterais e verticais de velocidade das ondas sísmicas no meio, afetando intensamente o mapeamento sísmico das camadas abaixo dessas estruturas. Estas camadas, no contexto das bacias da margem continental do sudeste, podem conter os principais reservatórios de hidrocarbonetos no Brasil. Para melhorar a qualidade dos dados sísmicos nestas regiões, são feitos estudos de iluminação no sentido de encontrar soluções que viabilizem um bom mapeamento das camadas abaixo do sal, contribuindo para um melhor conhecimento dos reservatórios nelas encontrados. Para isso, são utilizadas técnicas de modelagem direta que proporcionam estimar o resultado do mapeamento em aquisições de dados sísmicos. O presente trabalho objetiva realizar modelagens 3D baseadas na Teoria do Traçado de Raios, em um modelo geológico aproximado contido na Bacia do Espírito Santo, com o intuito de se determinar os melhores parâmetros de aquisição para alcançar uma boa iluminação das camadas localizadas abaixo de diápiros e muros de sal. Para tal, foram feitos: um modelo geológico com base na interpretação de dados sísmicos de reflexão e um modelo de velocidades a partir de dados de poço; simulação de aquisições com variados parâmetros e geometrias e, geração e análise dos mapas de iluminação sísmica produzidos pelo traçado de raios por Construção de Frente de Onda.

Palavras chave: Traçado de Raios, Modelagem Sísmica, Estudos de Iluminação, Planejamento de Aquisição Sísmica

ABSTRACT

The presence of evaporitic structures in sedimentary basins cause abrupt lateral and vertical variations in the velocities of the seismic waves in the medium, intensely affecting the seismic imaging of the layers below these structures. These layers may contain the principal hydrocarbon reservoirs in Brazil. To improve the quality of seismic data in these regions, illumination studies are done in order to find solutions that enable a good imaging of the sub-salt, contributing to a better understanding of the reservoirs found therein. For this reason, direct modeling techniques are used to estimate the results in the imaging of seismic data acquisition. The present study aims to perform 3D modeling based on the Ray Tracing Theory, in an approximate geologic model based in the Espírito Santo Basin, in order to determine the best acquisition parameters to achieve good images of layers located below the salt domes and walls. It will be presented: a geological model based on the interpretation of seismic reflection data and a velocity model based on well data; simulate acquisition with varying geometries and parameters, and generation and analysis of maps of seismic illumination produced by Ray Tracing by Wavefront Construction.

Keywords: Ray Tracing, Seismic Modeling, Illumination Studies, Acquisition and Survey Design.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
1 ÁREA DE ESTUDO.....	12
1.1 Bacia do Espírito Santo.....	12
1.1.1 Origem e evolução tectono-sedimentar.....	13
1.1.2 A Seção evaporítica e sua tectônica	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Estudos de Iluminação.....	17
2.2 Traçado de Raios	20
2.3 Traçado de Raios por Construção de Frente de Onda.....	23
2.4 Método da amplitude simulada migrada (SMA)	25
3 METODOLOGIA	27
4 RESULTADOS.....	38
4.1 Sismogramas sintéticos	38
4.2 Mapas de iluminação	38
4.3 Diagrama de roseta.....	49
5 CONCLUSÃO	52
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
7 APÊNDICE A – Listagem das linhas sísmicas utilizadas.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da Bacia do Espírito Santo e área de estudo. Coordenadas em UTM.	12
Figura 2: Carta Estratigráfica da Bacia do Espírito Santo. (Fonte: ANP round4) ¹	14
Figura 3: Seção geológica da Bacia do Espírito Santo. (Fonte: ANP round4) ²	15
Figura 4: Mapa de quantidade de raios incididos por cela (HitsMap). (Fonte: Geøystdal et al. 2007)	19
Figura 5: Ilustração de elementos do método global <i>Binning Methods</i> . (Fonte: Laurain et al. 2004)	20
Figura 6: Ilustração do traçado da frente de onda em modelo com presença de zonas sem informação. (Fonte: Vinje et al. 1999)	24
Figura 7: Mapa batimétrico de parte da Bacia do Espírito Santo e as linhas sísmicas utilizadas.	27
Figura 8: Mapa batimétrico cortado pela linha sísmica 0239-0350. Escala em profundidade.	28
Figura 9: Superfície topo do Aptiano cortada pelas principais linhas sísmicas para este trabalho. Delimitação das regiões escolhidas e poços utilizados.	30
Figura 10: Segmento da linha 0232-0068. Horizontes mapeados em tempo duplo de trânsito.	30
Figura 11: Segmento da linha 0066-0003. Horizontes mapeados em tempo duplo de trânsito.	31
Figura 12: Modelo1 contendo as interfaces utilizadas. A linha AA' indica o posicionamento da seção do modelo de velocidades mostrado na figura 13 e do sismograma sintético da figura 16.	32
Figura 13: Seção do modelo de velocidade do Modelo1 com tabela das propriedades atribuídas.	32
Figura 14: Modelo2 contendo todas as interfaces utilizadas, exceto a interface superfície do mar para facilitar a visualização. O segmento BB' indica a posição da seção do modelo de velocidade da figura 15 e do sismograma sintético da figura 17.	33

Figura 15: Seção do modelo de velocidade para o Modelo2 com tabela das propriedades atribuídas.....	33
Figura 16: Sismograma sintético de afastamento nulo para o Modelo1.....	35
Figura 17: Sismograma sintético de afastamento nulo do Modelo2.....	35
Figura 18: Modelo de velocidades do Modelo1 com visualização da superfície Alvo e do arranjo de aquisição com cabos de superfície na direção N-S.....	36
Figura 19: Modelo de velocidades e os raios com ângulos de saída da fonte entre 5° e 60°, no plano paralelo à linha de navegação, refletidos no Alvo.....	37
Figura 20: Mapa de quantidade de chegadas para aquisição na direção N-S.	39
Figura 21: Mapa de quantidade de chegadas para aquisição na direção W-E.	40
Figura 22: Mapa de amplitudes migradas simuladas para aquisição N-S.....	41
Figura 23: Mapa de amplitudes migradas simuladas para aquisição W-E.	41
Figura 24: Mapa de quantidade de chegadas por cela para aquisição N-S. A região marcada pelo círculo vermelho apresenta baixa iluminação.	42
Figura 25: Mapa de quantidade de chegadas por cela para aquisição W-E. ...	43
Figura 26: Mapa de quantidade de chegadas por cela para aquisição Dip. A região marcada pelo círculo vermelho apresenta uma pequena faixa com baixa iluminação.	43
Figura 27: Mapa de quantidade de chegadas por cela para aquisição Strike. .	44
Figura 28: Mapa de amplitudes migradas simuladas para aquisição N-S.....	45
Figura 29: Mapa de amplitudes migradas simuladas para aquisição W-E	45
Figura 30: Mapa de amplitudes migradas simuladas para aquisição Strike.	46
Figura 31: Mapa de amplitudes migradas simuladas para aquisição Dip.....	46
Figura 32: Mapa de ângulos máximos de incidência para direção N-S.....	47
Figura 33: Mapa de ângulos máximos de incidência para a direção W-E.....	47
Figura 34: Mapa de ângulos máximos de incidência para a direção Dip.	48
Figura 35: Mapa de ângulos máximos de incidência para a direção Strike.....	48
Figura 36: Tiro inverso, disparado no alvo e registrado na superfície.....	49
Figura 37: Diagrama de roseta gerado para análise de melhores off-sets e azimutes. As direções Dip e Strike indicam muitas chegadas para os off-sets entre 11 e 12 Km.....	50
Figura 38: Mapa de quantidade de chegadas para a direção Dip com 12 km de comprimento. A região circulada, ponto de interesse desta análise, apresenta melhor iluminação se comparada com os mapas da figura 24 e 26.....	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Relação das velocidades P calculadas em cada poço, nas profundidades indicadas.....	29
---	----

INTRODUÇÃO

As recentes descobertas de reservas de hidrocarbonetos na região do pré-sal das bacias da margem continental do sudeste têm colocado o Brasil na posição de um dos maiores futuros produtores de petróleo no mundo. Grande parte dessas descobertas só foi possível com o desenvolvimento e a aplicação dos métodos sísmicos de exploração, principalmente do método sísmico de reflexão.

Entretanto, estas reservas encontram-se sobrepostas por uma camada evaporítica que apresenta duas características peculiares: menor densidade e maior velocidade sísmica em relação às demais camadas sedimentares. Estas características fazem com que a camada evaporítica se torne um desafio para a investigação destes reservatórios, com a aplicação da sísmica de reflexão.

O fato de possuírem menor densidade induz um fluxo vertical ascendente desta camada em direção ao assoalho submarino, gerando domos e muros de sal que intrudem nas camadas superiores, dobrando e fraturando-as, num processo denominado halocinese. Este processo gera uma configuração geológica complexa, com padrões de esforços distensivos e compressivos, em grande parte do pacote sedimentar, resultando em pontos e regiões que refletem o sinal sísmico com intensidade tão alta, que em vários casos, apenas é possível visualizar ruídos causados pelas difrações nas seções sísmicas. Já a característica de apresentar maior velocidade, somando-se com a estruturação complexa, produz na região em subsuperfície, uma configuração de bruscas variações laterais e verticais de velocidade, fazendo com que o sinal sísmico tome trajetórias complexas, comprometendo a penetração e a cobertura do método de reflexão.

Neste sentido, surge a necessidade de realização de estudos prévios para melhor planejamento da aplicação do método.

No presente trabalho, serão feitos estudos de modelagem direta 3D fundamentada no traçado de raios por construção de frentes de ondas, visando produzir mapas de iluminação em um modelo geológico aproximado, contido na Bacia do Espírito Santo, com intuito de se determinar os melhores

parâmetros e geometrias de aquisição, que resultem num bom mapeamento das camadas pré-sal desta bacia.

A maioria dos métodos aplicados aos estudos de iluminação faz uso do traçado de raios, devido à alta velocidade com que é realizado e por permitir o cálculo de diversos atributos como amplitude, tempos de trânsito, espalhamento geométrico, curvatura de frentes de onda, entre outros. Entretanto, por ser viável apenas com o uso de altas frequências, o método possui algumas limitações, como por exemplo, necessitar de modelos com considerável suavidade. Mesmo assim, o método por traçado de raios é amplamente indicado por sua robustez, principalmente em casos de modelagem 3D, que requerem alto custo computacional.

Para realizar este estudo, serão utilizados:

- *software* de interpretação - para identificação dos horizontes sísmicos, criação dos *grids* representando as superfícies sedimentares e cálculo das velocidades sísmicas de poço e;
- *software* de modelagem sísmica - para a confecção dos modelos geológicos e de velocidades, determinação dos parâmetros e geometrias de aquisição, realização do traçado do raio e geração dos mapas de iluminação.

Nestas ferramentas geofísicas, serão introduzidos e trabalhados dados de sísmica 2D de reflexão e de perfilagem de poço.

1 ÁREA DE ESTUDO

1.1 Bacia do Espírito Santo

A Bacia do Espírito Santo, localizada ao longo do litoral do Estado do Espírito Santo e do litoral sul do Estado da Bahia (figura 1), possui área em terra de 18.000 km² e estende-se pela plataforma continental por 200.000 km², sendo delimitada ao sul pelo Alto de Vitória separando-a da Bacia de Campos, e a norte pela Bacia de Mucuri. A perfuração de milhares de poços e a realização de diversas aquisições sísmicas desde a década de 1950 permitiram uma caracterização bastante segura das unidades litoestratigráficas e um melhor conhecimento dos eventos tectono-sedimentares que lhes deram origem. O primeiro poço da plataforma continental brasileira foi o pioneiro Espírito Santo Submarino nº 1, perfurado em 1968 em águas rasas desta bacia (Mokriak *et al.*, 2008).

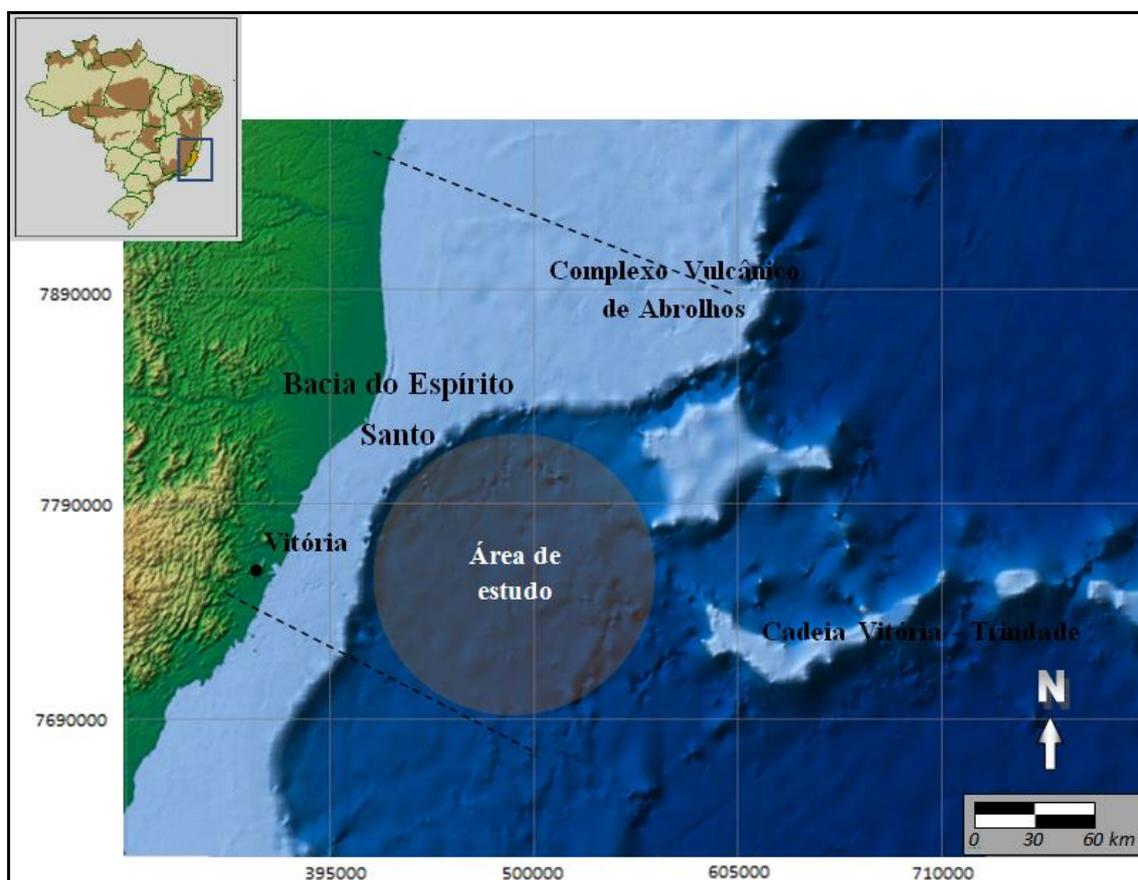


Figura 1: Mapa de localização da Bacia do Espírito Santo e área de estudo. Coordenadas em UTM.

1.1.1 Origem e evolução tectono-sedimentar

O embasamento da Bacia do Espírito Santo consiste em complexa associação de ígneas e metamórficas de idade pré-Cambriana (Vieira *et al.*, 1994). Nestas rochas, ocorrem diques intrudidos com orientação preferencial NW – SE, de idade Jurássica, que concordam com o lineamento de Colatina, estando provavelmente relacionados aos estágios de abertura do Oceano Atlântico. Essa bacia insere-se no contexto das bacias da margem continental do sudeste brasileiro, originadas no processo de rifteamento que dividiu o grande paleocontinente *Gondwana* durante o Eocretáceo.

Dois eventos vulcânicos distintos são registrados na bacia. O primeiro, foi um evento associado à tafrogênese das bacias marginais, de idade neocomiana/barremiano, constituído de basaltos toleíticos da Formação Cabiúnas. O segundo, ocorrido no Eoterciário originando a Formação Abrolhos, corresponde à sequência vulcanoclástica responsável pela criação do Arquipélago de Abrolhos e, às rochas vulcânicas alcalinas que formam as Ilhas de Trindade e Martins Vaz.

A evolução estratigráfica da bacia pode ser subdividida em três megasequências deposicionais associadas às suas fases tectônicas (Vieira *et al.*, 1994) com sedimentação continental lacustrina, transicional e marinha.

A mega sequência continental é associada à fase Rifte, apresentando sedimentos e rochas vulcânicas de idade Neocomiano a Aptiano Superior. A megasequência Transicional marca o início da fase Drifte (Divergência Continental), sendo caracterizada pela sedimentação de evaporitos aptianos. A megasequência Marinha é associada à fase de subsidência térmica, sendo caracterizada por uma plataforma carbonática rasa de idade albiana, que é afogada por sedimentos de águas profundas a partir do Albiano Superior – Cenomiano. A sedimentação do intervalo Cretáceo Superior a Terciário é caracterizada por depósitos carbonáticos e siliciclásticos em típica sequência regressiva de margem continental. A figura 2 ilustra a carta estratigráfica da Bacia do Espírito Santo.

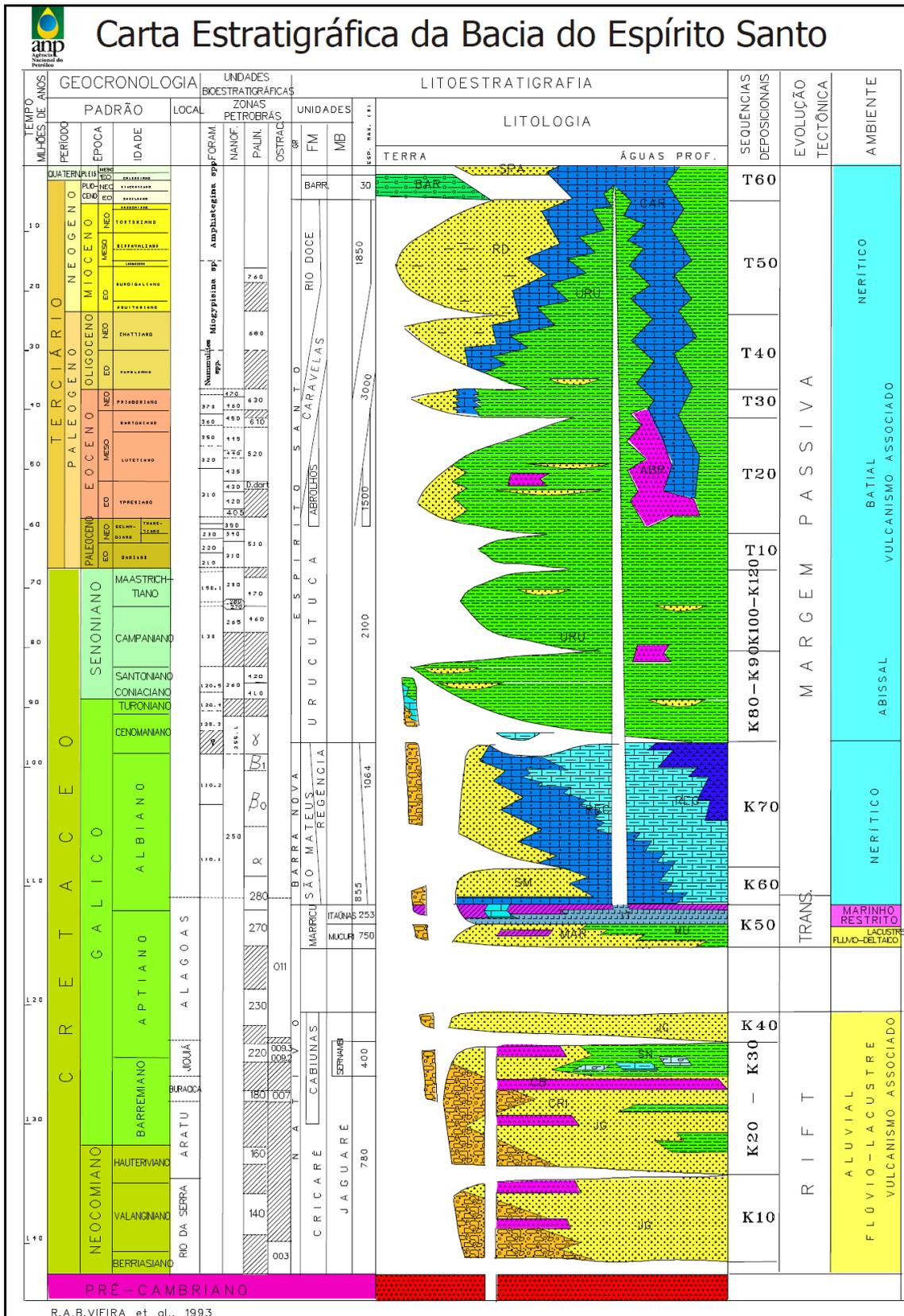


Figura 2: Carta Estratigráfica da Bacia de Espírito Santo. (Fonte: ANP, round 4) ¹

¹ Documento eletrônico disponível em < http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round4/atividades_exploratorias/cartas_secoes/espsanto.htm >. Acesso em: 15 Fev. 2013.

1.1.2 A Seção evaporítica e sua tectônica

A evolução tectono-sedimentar e a geologia do petróleo, tanto na parte emersa quanto na parte submersa, apresentam destacada relação com a tectônica do sal.

A fase evaporítica da Bacia do Espírito Santo mostra seus primeiros indícios no topo do Membro Mucuri de idade Aptiano Médio, gradando ascendentemente para rochas que caracterizam um ambiente de bacia restrita, com alta evaporação e precipitação de sais do Membro Itaúnas. Os evaporitos possuem ampla distribuição areal e expressivas variações de espessura, estando ausentes nos paleocânions terrestres devido à erosão. Na figura 3, observa-se uma seção geológica da bacia, com um pronunciado diápiro de sal.

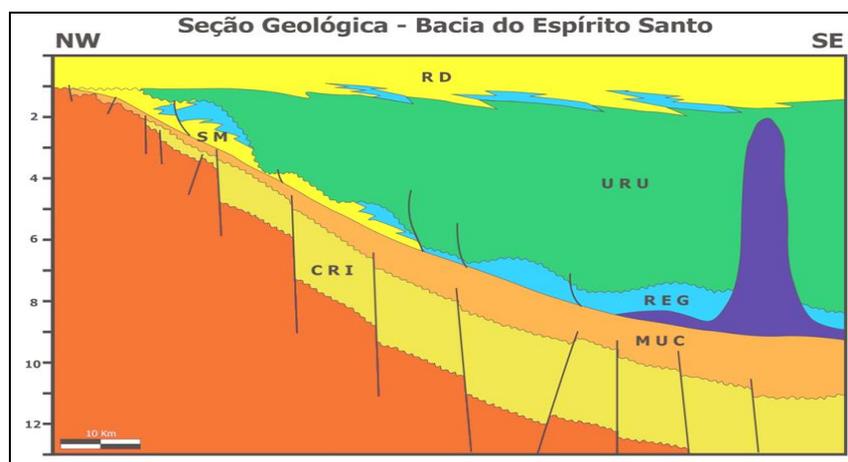


Figura 3: Seção geológica da Bacia do Espírito Santo. (Fonte: ANP, round 4) ²

Cainelle e Mohriak (1998), citados por Mohriak *et al.* (2008), realizaram um trabalho onde foram feitas interpretações de linhas sísmicas e de dados de métodos potenciais, ressaltando importantes feições da tectônica de sal, dentre elas:

- ocorrência de diápiros de sal na região do Complexo Vulcânico de Abrolhos, particularmente na sua borda oeste, formando as províncias de domos sul e norte;
- aparecimento de feições compressoriais associadas à movimentação de sal e de folhelho;

² Documento eletrônico disponível em < http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round4/atividades_exploratorias/cartas_secoes/espsanto.htm >. Acesso em: 15 Fev. 2013.

- ocorrência de esforços distensivos em função da movimentação do sal, resultando em lacunas estratigráficas do carbonato albio e formação de estruturas do tipo cascos de tartaruga;
- feições diapíricas que ocorrem a partir do talude, formando províncias de domos e muralhas de sal na bacia profunda, algumas das quais com milhares de metros de espessura, atingindo níveis próximos ao fundo do mar;
- feições compressionais na região de águas ultraprofundas, onde também ocorrem minibacias entre muralhas de sal e
- ocorrência de inversão de diápiros de sal e línguas de sal alóctone.

Neste trabalho, a área de estudo estará inserida na Bacia do Espírito Santo, em região onde ocorrem estruturas salinas de grandes espessuras em subsuperfície.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Estudos de Iluminação

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

Estudos de iluminação podem ser utilizados para diversos fins, como por exemplo, para estimar o recobrimento durante a aquisição; ou após a aquisição, para ajudar a explicar zonas de sombra ou variações de amplitude que estejam relacionadas com a aquisição, segundo Laurain *et al.* (2004). Analisar o efeito de diferentes layouts de aquisição sobre uma determinada superfície alvo tem sido a aplicação mais comum deste método. Como exemplo, tem-se o trabalho produzido por Lecomte *et al.* (2009) onde mapas de iluminação são gerados para diferentes geometrias de aquisição, objetivando encontrar a que melhor ilumina a superfície alvo.

A determinação de melhores geometrias e parâmetros de aquisição é conduzida pelos objetivos geofísicos almejados, como por exemplo, cobertura e resolução, durante o planejamento. Comumente, estes planejamentos são calculados no domínio CMP (*Common Mid Point*), que representa o ponto médio entre as posições da fonte e do receptor, na superfície de aquisição, considerando camadas planas em subsuperfície. No entanto, devido às complexidades estruturais o CMP pode não coincidir com o ponto real de reflexão, sendo este agora o ponto CRP (*Common Reflection Point*). Neste sentido, os estudos de iluminação ganham grande importância no auxílio do planejamento, pois neles são realizados cálculos no domínio CRP, conduzindo a resultados mais fidedignos. São duas as premissas básicas deste estudo: a distribuição uniforme de pontos de reflexão na superfície alvo é considerada o melhor resultado, e as zonas de sombra ou zonas de concentração anômala, são tidas como áreas com problemas de mapeamento. Estas duas premissas serão a base para a análise dos mapas neste trabalho.

Segundo Oliveira (2010), os estudos de iluminação podem ser divididos em quatro etapas:

- Criação do modelo geológico;
Com base em informações de campos de velocidade obtidos da migração de dados sísmicos prévios e horizontes fornecidos por interpretação de dados também sísmicos e prévios, o modelo é gerado dando grande importância à proximidade do modelo com a realidade. Quanto maior a proximidade, mais fidedigno será o resultado.
- Geração do dispositivo de aquisição;
Este dispositivo é gerado conforme a geometria e os parâmetros determinados durante o planejamento da aquisição. Neste momento, o design de aquisição pode ser modificado diversas vezes, até que o objetivo do estudo seja alcançado (melhor iluminação).
- Modelagem direta visando o objetivo do estudo;
A modelagem direta baseia-se em simular a resposta dos efeitos de uma aquisição a partir de um modelo geológico. Fazendo uso do Traçado de Raios, diversos atributos podem ser calculados, como por exemplo, o tempo de trânsito e a amplitude de reflexão.
- Confecção dos mapas de iluminação.
Com os resultados calculados pela modelagem, os mapas de iluminação são gerados (figura 4). Nestes mapas, é possível visualizar como os atributos calculados estão distribuídos sobre a superfície alvo, permitindo a avaliação da qualidade da iluminação, e por consequência, a determinação da melhor geometria de aquisição.

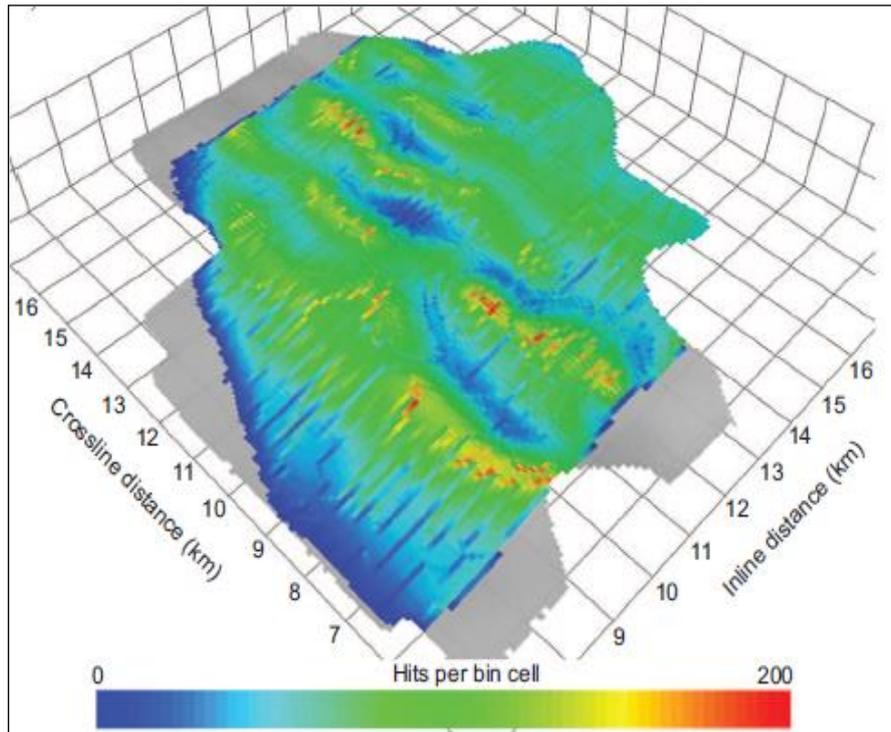


Figura 4: Mapa de quantidade de raios incididos por cela (*HitsMap*).

(Fonte: Geøystdal et al. 2007)

Laurain *et al.* (2004), classificou os métodos de iluminação dividindo-os em duas categorias:

- Métodos Globais

Os métodos globais são estudos que dão informação sobre toda a área alvo. Possuem robustez e boa relação de custo-benefício, sendo os mais comuns destes métodos, os *Binning Methods*, onde a superfície alvo é dividida em celas e os resultados são atribuídos à cada uma destas celas (figura 5). Neste método, várias configurações de levantamento podem ser simuladas para um mesmo modelo geológico, onde são traçadas as reflexões para uma determinada superfície alvo, e para cada uma destas são calculados diversos atributos, como por exemplo, tempo de trânsito, espalhamento geométrico, coeficiente de reflexão, amplitudes, ângulos de incidência e azimutes.

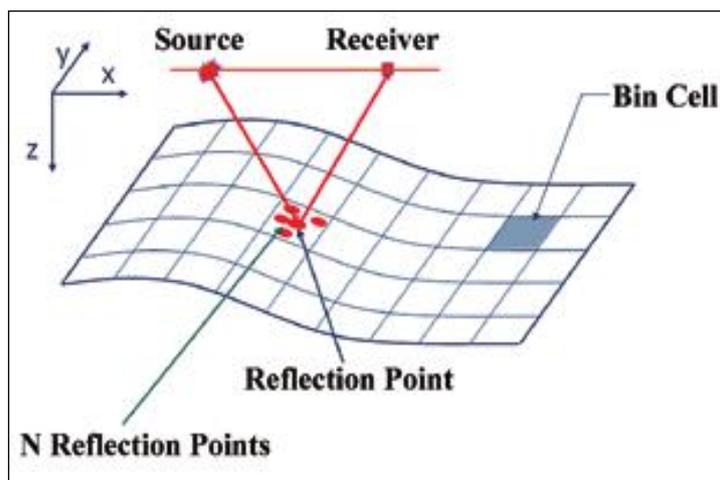


Figura 5: Ilustração de elementos do método global *Binning Methods*.

(Fonte: Laurain et al. 2004)

- Métodos Locais

Ao contrário dos métodos globais, onde a iluminação é feita sobre toda a área de estudo, os métodos locais são focados em um alvo específico, com área limitada. Neste estudo, a idéia central é definir o melhor posicionamento dos tiros e receptores (azimutes e *offsets*) para iluminação de uma zona de sombra em uma superfície alvo em subsuperfície. Para tal, os receptores são posicionados na superfície ($Z=0$), em toda a área de estudo, e o tiro é dado acima da superfície alvo, num ponto da zona de sombra e, utilizando-se do Princípio da Reciprocidade, a frente de onda é propagada até os receptores na superfície.

2.2 Traçado de Raios

O traçado de raios tem sido largamente utilizado para realização de modelagens nas últimas décadas por ser um método rápido de simulação de propagação de ondas sísmicas em modelos 3D. Algumas décadas atrás, a indústria do petróleo frequentemente fazia utilização de dados 2D na investigação de hidrocarbonetos. Porém, com o desenvolvimento de tecnologias, os pesquisadores se depararam com um volume grande de dados, em arquiteturas 3D, e neste momento o traçado de raio (*Ray Tracing*) se tornou importantíssimo, porque além de sua robustez e eficiência, proporciona

o cálculos de diversos atributos como tempo de trânsito, amplitudes reais e complexas, ângulo de incidência, entre outros.

As equações utilizadas na propagação de raios são aproximações da equação escalar da onda, que é dada por (Cerveny, 1987):

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2(x, y, z)} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

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 (1.1), no sistema cartesiano (x, y, z) , é dada pela equação da onda plana compressional:

$$P(x, y, z; t) = P_0 \exp(-i\omega t + ik_x x + ik_y y + ik_z z) \quad (1.2)$$

Onde P_0 é a amplitude do sinal e K_x, K_y, K_z e w são as transformadas de Fourier das variáveis x, y, z e t , respectivamente.

A fim de se obter a relação de dispersão da equação escalar da onda, calcula-se as derivadas parciais da equação (1.2) e substitui-se na equação (1.1), resultando na equação:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{w^2}{v^2} \quad (1.3)$$

A equação (1.2) será válida para a equação escalar da onda se satisfazer a relação acima.

Reescrevendo a equação (1.2) em termos da fase, tem-se:

$$P(x, y, z; t) = P_0 \exp \left\{ -i\omega \left[t - \left(\frac{k_x}{w} x + \frac{k_y}{w} y + \frac{k_z}{w} z \right) \right] \right\} \quad (1.4)$$

Pode-se então definir uma superfície de tempo de trânsito $T(x, y, z)$ como:

$$T(x, y, z) = \frac{k_x}{w} x + \frac{k_y}{w} y + \frac{k_z}{w} z \quad (1.5)$$

Substituindo a relação acima na equação (1.4), pode-se expressar a equação da onda plana em termos da superfície de tempo de trânsito $T(x, y, z)$:

$$P(x, y, z; t) = P_0 \exp\{-i\omega[t - T(x, y, z)]\} \quad (1.6)$$

Para verificar se esta forma da solução da onda plana satisfaz a equação escalar da onda, é preciso calcular suas derivadas parciais e substituí-las na equação (1.1). Separando os termos em partes real e imaginária, chega-se na expressão:

$$w^2 \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] - i\omega \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{w^2}{v^2(x, y, z)} \quad (1.7)$$

Excluindo a parte imaginária da equação acima, chega-se na expressão denominada equação iconal, utilizada para aplicação dos métodos de traçado de raios, fornecendo o tempo de trânsito $T(x, y, z)$ para um raio passando por um ponto (x, y, z) em um meio de velocidade $v(x, y, z)$:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 = \frac{1}{v^2(x, y, z)} \quad (1.8)$$

O método do traçado de raio pode ser separado em duas vertentes: Traçado Cinemático e Traçado Dinâmico, sendo aplicados em diversas etapas dos processos de investigação sísmica, como por exemplo, na modelagem direta (objetivo deste trabalho) ou na modelagem inversa. A aplicação do método cinemático ou dinâmico depende dos objetivos de um estudo. Para exemplificar, um estudo baseado em localização de pontos de reflexão e tempos de chegada, pode utilizar-se apenas do traçado cinemático. Já o

traçado dinâmico, daria ao estudo possibilidade de calcular outros atributos como espalhamento geométrico e ângulos de incidência.

O algoritmo do traçado de raio é baseado na ótica geométrica, respeitando as Leis de Snell, e consiste em se determinar um dos pontos correspondentes às extremidades dos raios como ponto inicial e, através da resolução de um sistema de equações diferenciais, procurar o raio que atinge o segundo ponto no tempo mínimo, seguindo o Princípio de Fermat, e fazendo uma varredura com os raios disparados. Tal metodologia é aproximada, sendo aplicada apenas aos conteúdos de altas frequências em modelos que apresentem interfaces e propriedades físicas com variações suaves.

Portanto, a construção do modelo, que é constituído de malhas triangularizadas representando as interfaces e *splines* tri-cúbicas representando as propriedades, deve ser feita com base nas seguintes informações requeridas pelo método de traçado de raio:

- Velocidades de ondas P e S, densidades, parâmetros de anisotropia, fatores de atenuação e localização da malha triangularizada;
- Suavidade do modelo dentro do volume de Fresnel, em torno de cada raio. Derivadas contínuas das interfaces e propriedades garantem a suavidade do modelo. Para verificar a validade do modelo o simples processo de análise dos sismogramas sintéticos, onde podem ser constatadas descontinuidades em um refletor, pode ser rapidamente aplicado.

2.3 Traçado de Raios por Construção de Frente de Onda

No presente trabalho, o método de traçado de raios a ser utilizado será o de traçado por Construção de Frente Onda (*Wavefront Construction*), desenvolvido por Vinje *et al.* (1993), baseando-se na teoria do traçado de raios de dois-pontos (*two-point*). Esta técnica apresenta grande parte das limitações encontradas nas técnicas clássicas de traçado de raios, porém é mais robusta e eficiente e, sua maior vantagem é a realização de modelagem direta em

modelos complexos 3D com custo computacional aceitável. Outra grande vantagem é o fato desta técnica permitir regiões vazias (sem qualquer informação) no modelo geológico e de velocidades (Figura 6).

A construção das frentes de ondas é feita de forma que uma frente gere uma outra através de uma grande quantidade de raios, considerando a ideia de manter uma densidade constante ao longo da propagação da onda. Para tal, um algoritmo controla a distância entre raios vizinhos e o ângulo entre as normais de cada triângulo da frente onda. Este processo pode levar à criação por interpolação ou exclusão de raios ao longo da propagação. Para meios 3D, as frentes de onda são consideradas superfícies, representadas por malhas triangularizadas, que possuem um tempo de trânsito constante em relação à fonte.

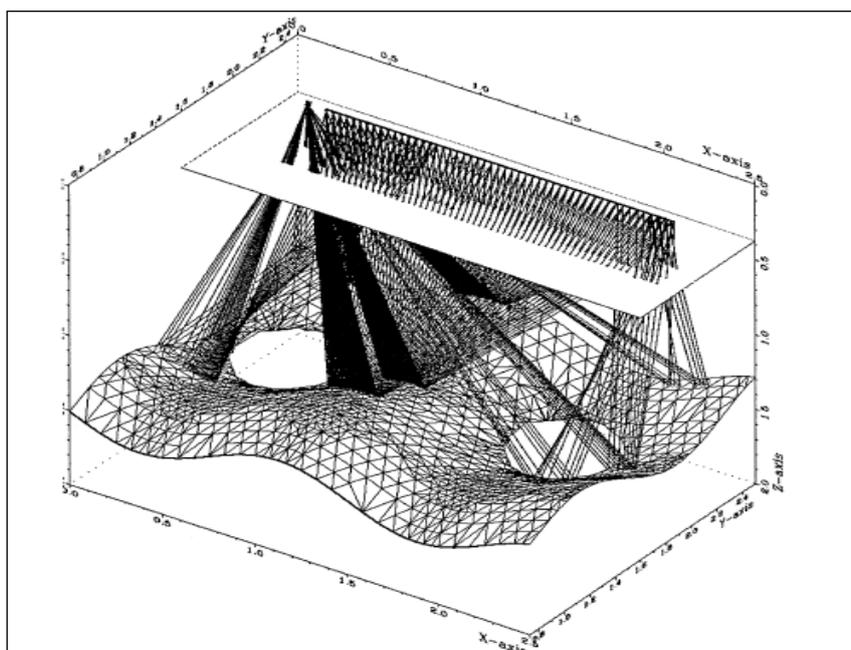


Figura 6: Ilustração do traçado da frente de onda em modelo com presença de zonas sem informação. (Fonte: Vinje et al. 1999)

O processo de construção das frentes de ondas tem o custo computacional em função de diversos fatores, como por exemplo, a complexidade do modelo, a amostragem da malha que representa a frente onda, o tempo de propagação registrado e o número de receptores. Na modelagem sísmica, este processo é feito da seguinte forma: geração da frente de onda inicial; propagação desta frente ao longo de intervalos de tempo pré-definidos; controle da densidade de

raios segundo critérios pré-definidos; e interpolação para transferir os dados registrados nos diversos raios, até o ponto do receptor.

2.4 Método da amplitude simulada migrada (SMA)

A expressão matemática para migração kirchhoff pode ser escrita como (ex, Bleistein e Gray, 2001):

$$\beta(x) = \int W(x, \xi) f[U(\xi, t = \tau(x, \xi))] d\xi \quad (2.1)$$

Onde x é um ponto em profundidade, U são os traços sísmicos, f é um filtro necessário para recuperar corretamente a forma do pulso, ξ são os pontos dos traços, $\tau(x, \xi)$ são os tempos de trânsito do tiro até o receptor passando por x , $W(x, \xi)$ são os pesos de migração e $\beta(x)$ é a amplitude de migração no ponto em profundidade x .

Na migração PSDM, o dado real é empilhado no domínio da profundidade, traço por traço, usando a função de tempo duplo de trânsito do tiro ou receptor para o ponto imagem. No método aqui abordado, o empilhamento dos pulsos sintéticos é simulado em profundidade. Para modelar $\beta(x)$ ao longo do horizonte alvo usando traçado de raio, é preciso estimar o tempo duplo de trânsito $\tau(x, \xi)$. Ao invés de usar o tempo duplo de trânsito, será usada a aproximação do campo de tempo de trânsito ao redor da reflexão para um raio especular. Isto é feito usando a teoria paraxial do raio (Cerveny et al., 1984):

$$\tau(x) = \tau_0 + (p_s + p_r)^T (x - x_0) + \frac{1}{2} (x - x_0)^T \left(\hat{M}_s + \hat{M}_r \right) (x - x_0) \quad (2.2)$$

Onde $\tau(x)$ é a aproximação do tempo duplo de trânsito na posição x , τ_0 é o tempo de trânsito para o raio refletido em x_0 , P_s e P_r são os dois vetores de vagarosidade em x_0 (da fonte e do receptor, respectivamente), e \hat{M}_s e \hat{M}_r são as matrizes 3x3 das segundas derivadas do tempo de trânsito em x_0 .

Para o raio especular refletindo em x_0 (chegando no tempo τ_0) substitui-se U na equação (2.1) pelo correspondente traço sintético P:

$$\begin{aligned} p(t) &= \text{Re}(A_0)s(t-t_0) - \text{Im}(A_0)h(t-t_0), \quad \tau \in [t_0, t_0 + T] \\ p(\tau) &= 0, \quad \tau \notin [t_0, t_0 + T] \end{aligned} \quad (2.3)$$

Onde $s(t)$ é o pulso causal de duração T e $h(t)$ é a sua transformada de Hilbert. A_0 é o coeficiente complexo de amplitude estimado pelo traçado de raio.

Como na migração PSDM, o traço sintético P é filtrado por F resultando em $d(t) = F[p(t)]$. O filtro depende da dimensão do problema (Bleistein and Gray, 2001).

Ao redor do ponto de reflexão, o tempo duplo de trânsito é aproximado usando a equação (2.2) para uma série de pontos x . Usando o pulso $d(t)$ e a aproximação de tempo de trânsito da equação (2.2), a amplitude simulada na posição x de um único pulso sintético é dado por:

$$a(x) = d[t(x) + t_{peak}] \quad (2.4)$$

Onde t_{peak} é o tempo correspondente do pico de amplitude do pulso.

Para cada chegada modelada o pulso migrado $a(x)$ é computado e o correspondente mapa de amplitudes migradas é gerado com o empilhamento destas chegadas, assim o valor final da amplitude migrada $A(x)$ na posição x é:

$$A(x) = \sum_{eventos} a(x) \quad (2.5)$$

Essa equação corresponde à integral de migração da equação (2.1), ajustando todos os pesos W para 1.

3 METODOLOGIA

Os estudos de iluminação são divididos em quatro etapas principais. São elas:

- Construção dos modelos:

Seções sísmicas 2D da Bacia do Espírito Santo, em tempo, empilhadas e migradas, foram interpretadas com foco no mapeamento dos horizontes base do Aptiano, topo do Aptiano, topo do Albiano e fundo do mar. Após a interpretação dos horizontes, estes foram interpolados a fim de se gerar *grids* no formato xyz que representam a superfície mapeada em cada seção geológica.

As linhas sísmicas (listadas no Apêndice A) e os poços utilizados neste trabalho foram cedidos pelo projeto “Análise Morfo-tectônica e Significado Estratigráfico dos Altos Estruturais que Segmentam as Bacias da Margem Continental Sudeste Brasileira” realizado em convênio entre a empresa Repsol-YPF e o Departamento de Geologia Marinha da Universidade Federal Fluminense – LAGEMAR.

A figura 7 mostra as linhas utilizadas plotadas sobre o grid de batimetria do fundo do mar, extraído da base de dados de domínio público TOPEX disponibilizado pela NASA.

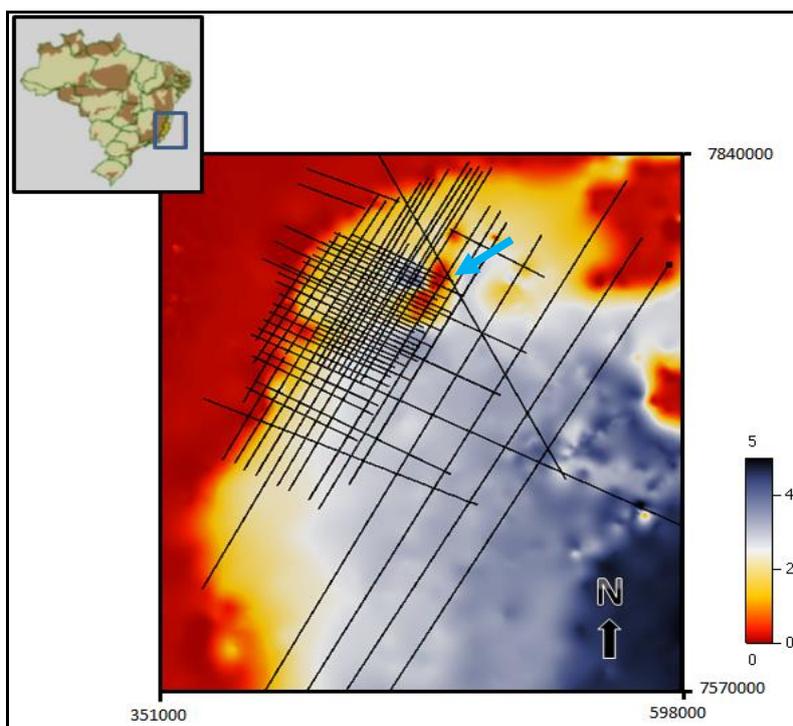


Figura 7: Mapa batimétrico de parte da Bacia do Espírito Santo e as linhas sísmicas utilizadas.

Nota-se neste grid de batimetria que existem altos submarinos (indicados pela seta azul na figura 7) que não estão registrados nos dados sísmicos. Na figura 8, o grid TOPEX é cruzado pela linha sísmica 0239-0350 permitindo visualizar a não concordância na morfologia do fundo do mar. Entretanto, o grid foi utilizado apenas para facilitar a localização das linhas sísmicas, não sendo utilizado em nenhuma etapa da modelagem.

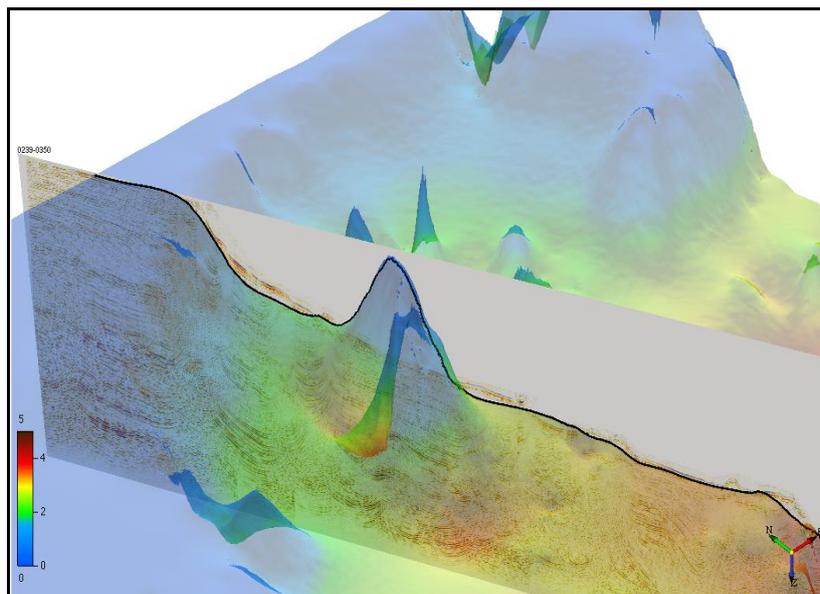


Figura 8: Mapa batimétrico cortado pela linha sísmica 0239-0350. Escala em profundidade.

O gradiente de velocidade sônica dos poços mostrados na figura 9 e situados próximo às regiões selecionadas, foi calculado, transformado para m/s e extrapolado para que assim seja configurado um modelo 3D de velocidades.

A tabela 1 lista os poços utilizados, os intervalos de profundidade calculados e as velocidades aproximadas encontradas.

Para extrapolar este gradiente até a profundidade abaixo do sal, foram adicionadas velocidades médias encontradas na literatura, com valores de 4500 m/s para a seção Aptiano e 3500 m/s para a seção pré-Aptiano. Utilizando este modelo de velocidades, as superfícies foram convertidas do domínio do tempo para o domínio da profundidade, utilizando o conversor tempo-profundidade do software NORSAR3D.

Tabela 1: Relação das velocidades P calculadas em cada poço, nas profundidades indicadas.

Profundidade (m) / Poços	4-BRSA-392-ESS	4-BRSA-256-ESS
2410 (Mioceno inferior)		2200 m/s
4200 (Coniaciano)		3500 m/s
2700 (Albiano superior)	3800 m/s	
3040 (Albiano inferior)	4000 m/s	

Além das superfícies mapeadas, foram introduzidas uma superfície plana na profundidade $z=0$, representando a superfície do mar e uma superfície alvo, localizada a uma distância mínima de 300 m abaixo da superfície base da Aptiano, ambas em profundidade. Obtendo as superfícies agora em profundidade, foram gerados blocos entre todas as superfícies e foram atribuídas a estes blocos: velocidades sísmicas compressionais médias presentes na literatura para os blocos representativos da água do mar, da seção Aptiano, da seção pré-Aptiano e da seção Alvo; velocidade sísmica derivadas da curva sônica dos poços já citados, para os sedimentos da seção Albiano e para todo o pacote sedimentar desde o topo do Albiano até o fundo do mar; e densidades conhecidas na literatura para todos os blocos.

Com o intuito de dar foco em algumas regiões da bacia que possuem espessas camadas de sal, a superfície topo do Aptiano foi analisada, dando preferência para locais que estejam atravessados por linhas sísmicas. Assim, foram escolhidos dois modelos inseridos na região (figura 9). O Modelo1, contendo 2 diápiros de sal perfurando a seção Albiano; e o Modelo2 contendo uma espessa muralha de sal e não contendo a superfície topo do Albiano, devido a seção Albiano ser nesta região muito delgada e de difícil reconhecimento em seções sísmicas.

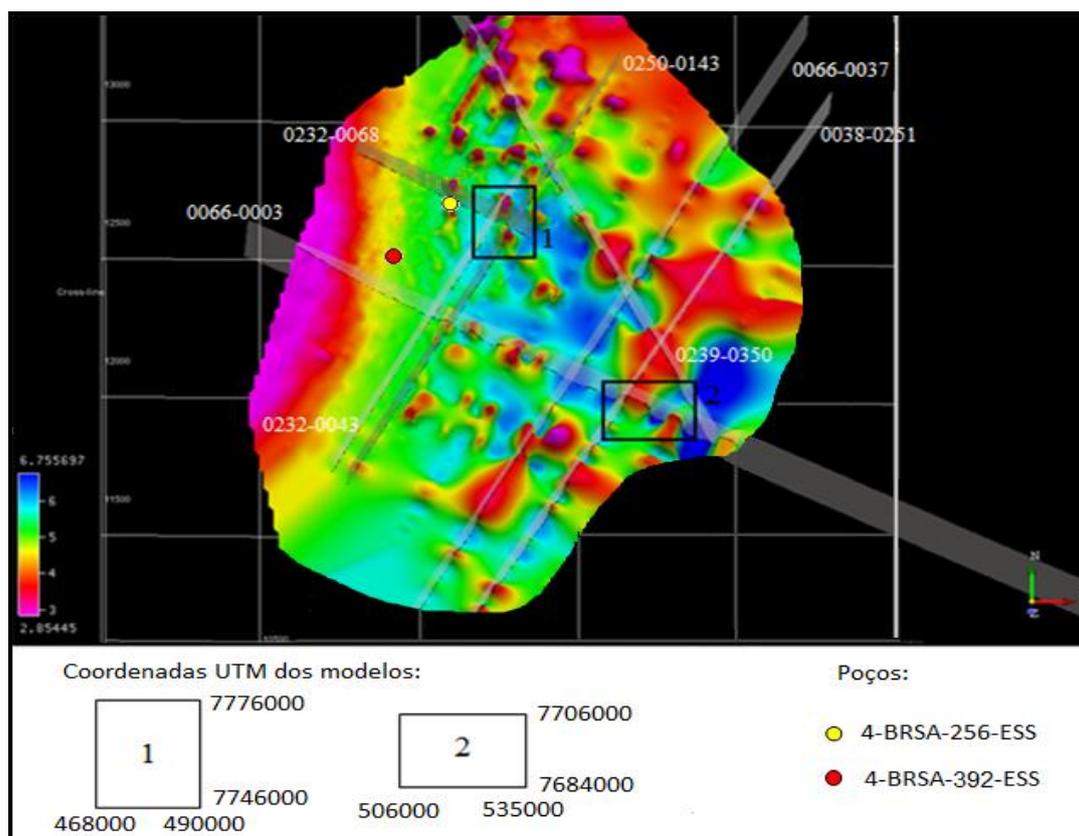


Figura 9: Superfície topo do Aptiano cortada pelas principais linhas sísmicas para este trabalho. Delimitação das regiões escolhidas e poços utilizados.

Nas figuras 10 e 11 têm-se segmentos das linhas sísmicas 0232-0068 e 0066-0003 que cruzam os modelos Modelo1 e Modelo2, respectivamente.

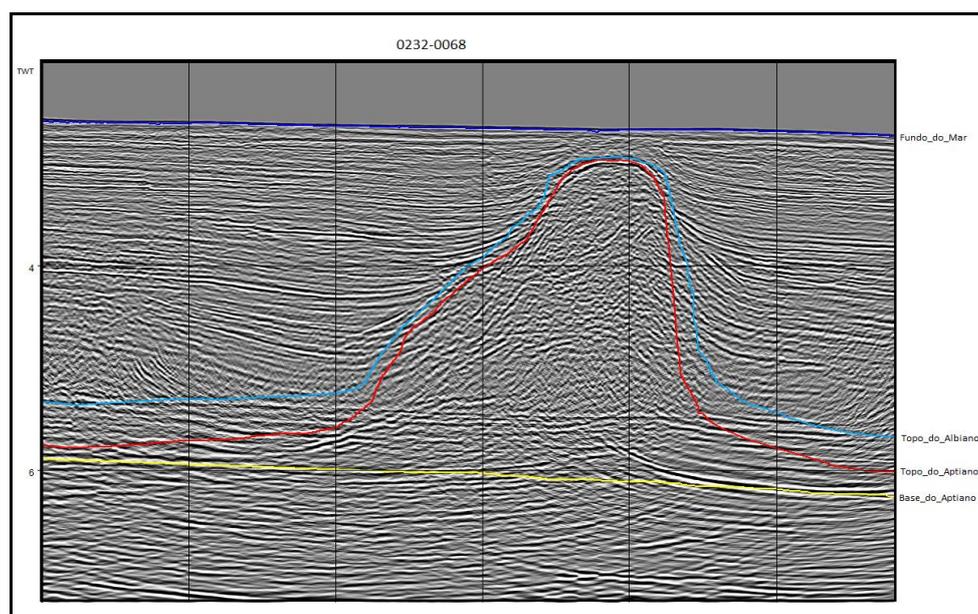


Figura 10: Segmento da linha 0232-0068. Horizontes mapeados em tempo duplo de trânsito.

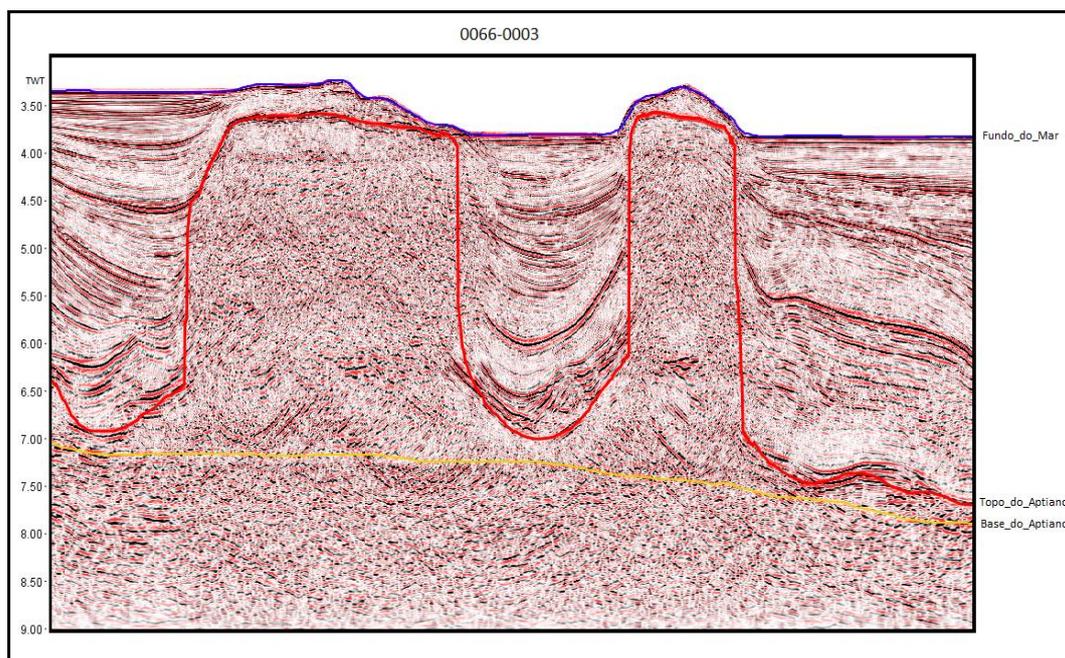


Figura 11: Segmento da linha 0066-0003. Horizontes mapeados em tempo duplo de transito.

As figuras 12 e 14 ilustram os modelos gerados em profundidade e as figuras 13 e 15 mostram seções dos modelos de velocidades para cada modelo.

Os dados sísmicos e de poços utilizados foram gentilmente cedidos pelo convênio *Repsol – LAGEMAR* (Departamento de Geologia da Universidade Federal Fluminense) e trabalhados no software livre de interpretação sísmica *OpenTect*. A confecção dos modelos geológicos foi realizada no *software* de modelagem sísmica *Norsar3D*, gentilmente cedido pela empresa norueguesa *Norsar Innovation – AS* e pela brasileira *Ies Brazil Consulting & Services*.

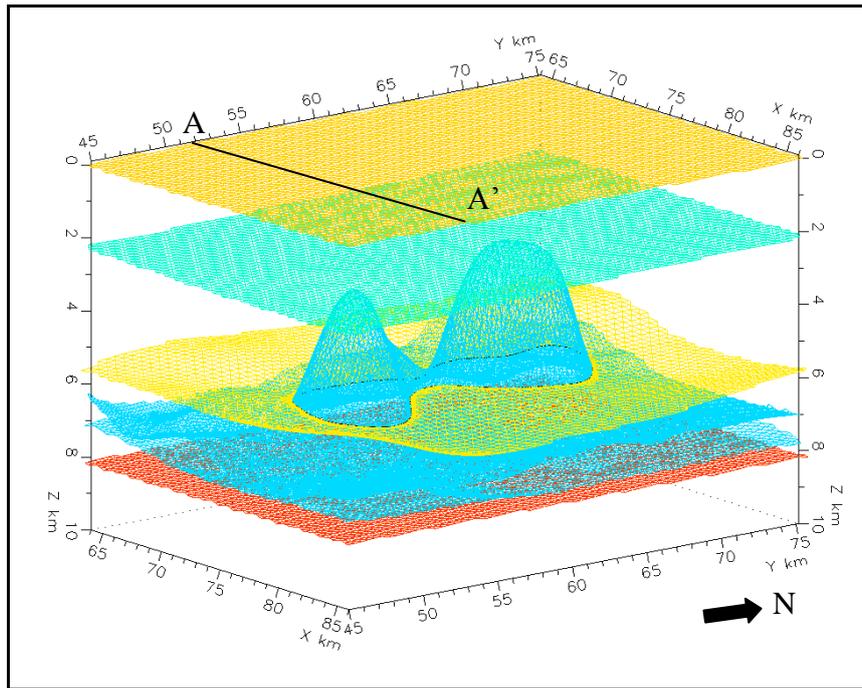


Figura 12: Modelo1 contendo todas as interfaces utilizadas. A linha AA' indica o posicionamento da seção do modelo de velocidades mostrado na figura 13 e do sismograma sintético da figura 16.

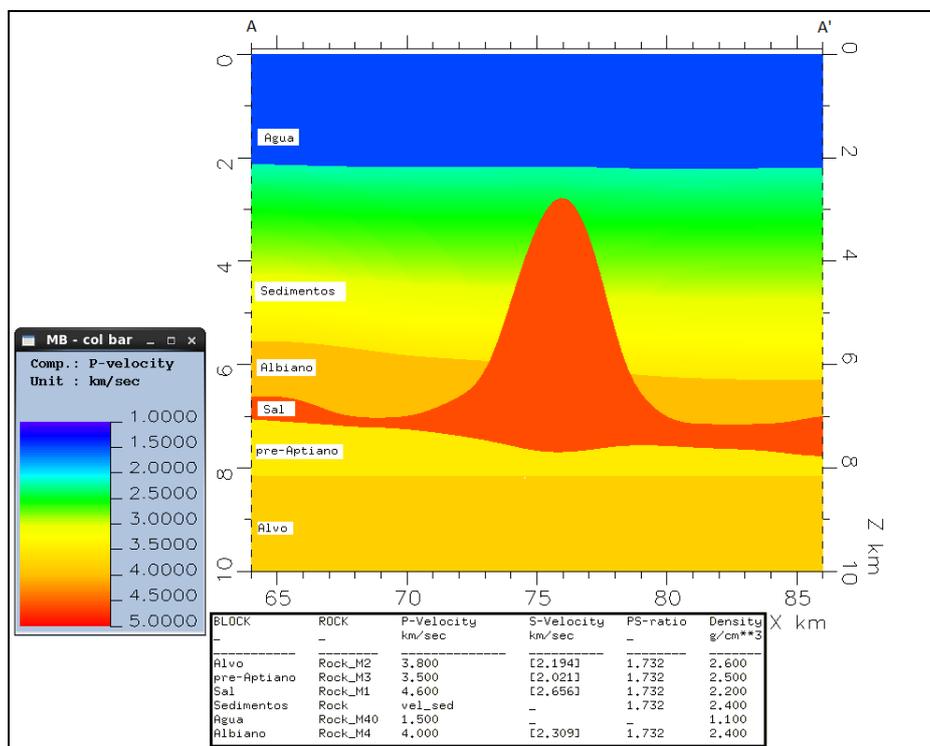


Figura 13: Seção do modelo de velocidade do Modelo1 com tabela das propriedades atribuídas.

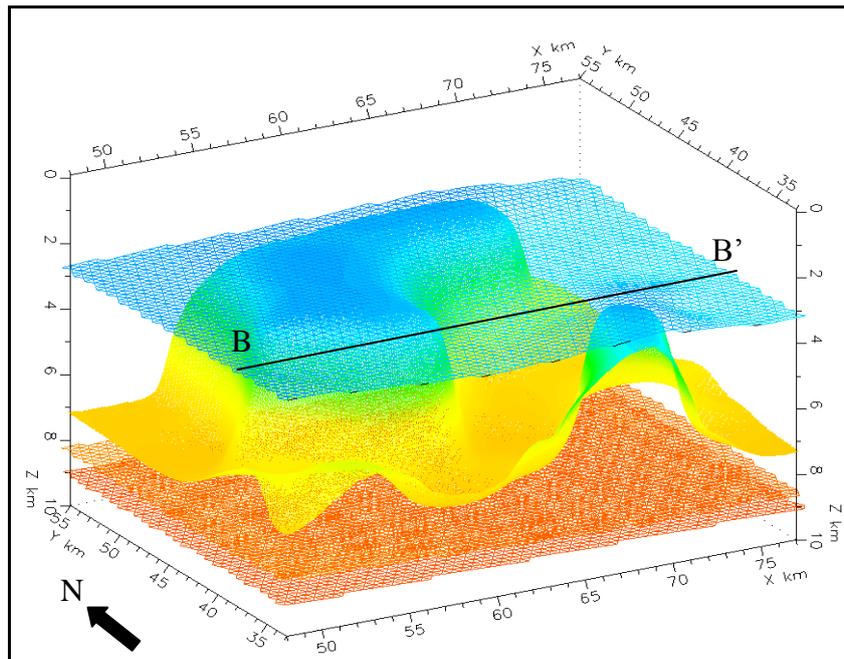


Figura 4: Modelo2 contendo todas as interfaces utilizadas, exceto a interface superfície do mar para facilitar a visualização. O segmento BB' indica a posição da seção do modelo de velocidade da figura 15 e do sismograma sintético da figura 17.

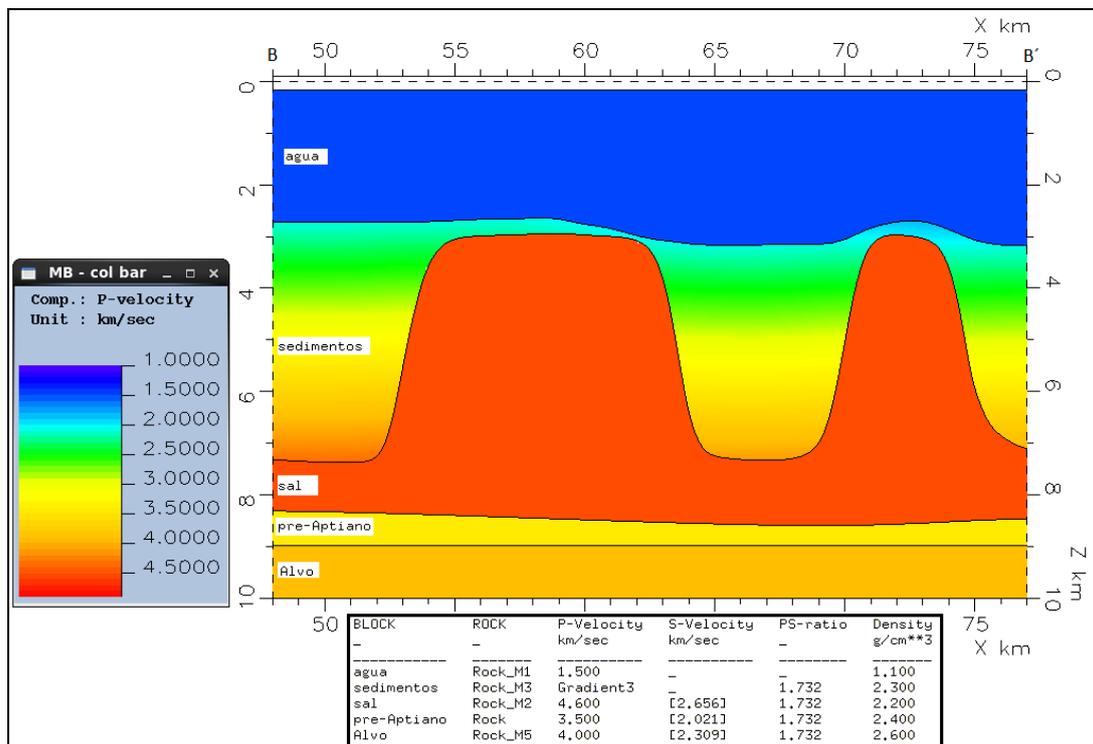


Figura 5: Seção do modelo de velocidade do Modelo2 com tabela das propriedades atribuídas.

- Calibração do modelo:

Para atender as exigências do traçado de raio, antes de começar os estudos de iluminação, é necessário que as superfícies e propriedades sejam

suavizadas até que não sejam encontradas descontinuidades nos eventos de reflexão para uma certa superfície contínua. Para isso, foi utilizado o método do horizonte explosivo por traçado de raios do software NORSAR3D, que simula uma seção sísmica empilhada na posição de afastamento nulo, a partir da propagação de raios normais à superfície, que partem desta até o receptor localizado na superfície do mar. Para gerar o sismograma foi utilizado o pulso de fase zero *Ricker* de 20 Hz. As figuras 16 e 17 mostram estas seções para os dois modelos utilizados, apresentando continuidade dos refletores e assegurando a validade dos modelos para a simulação.

- Geração das geometrias de aquisição:

Utilizando-se de um módulo do *software Norsar3D*, foram geradas geometrias de aquisição com cabos de superfície em diferentes direções.

Para o Modelo1, foi usado um levantamento na direção N-S e outro na direção W-E. Já para o Modelo2, foram usados levantamentos nas direções N-S, W-E e nas direções N27E e N63W, sendo as duas últimas correspondentes às orientações preferenciais Strike e Dip, respectivamente, dos sedimentos Aptianos neste modelo. Todas as aquisições possuem em média 10000 tiros, espaçados de 100m, dados em linhas de navegação com espaçamento de 450m. Foram utilizados 9 cabos espaçados de 100m, com off-set mínimo de 100m, 8 km de comprimento e contendo receptores a cada 50m. Também foi simulada uma aquisição na direção Dip com 12 km de cabo, para o Modelo2. O arranjo utilizado foi o end-on, com receptores sempre centrados no tiro. A figura 18 exemplifica um dos levantamentos utilizados.

Para gerar um diagrama de roseta foi simulado um tiro inverso, saindo de um ponto acima da superfície Alvo do Modelo2, e atingindo uma malha de receptores espaçados de 100 m, posicionada na superfície. Tal metodologia é baseada no Princípio da Reciprocidade.

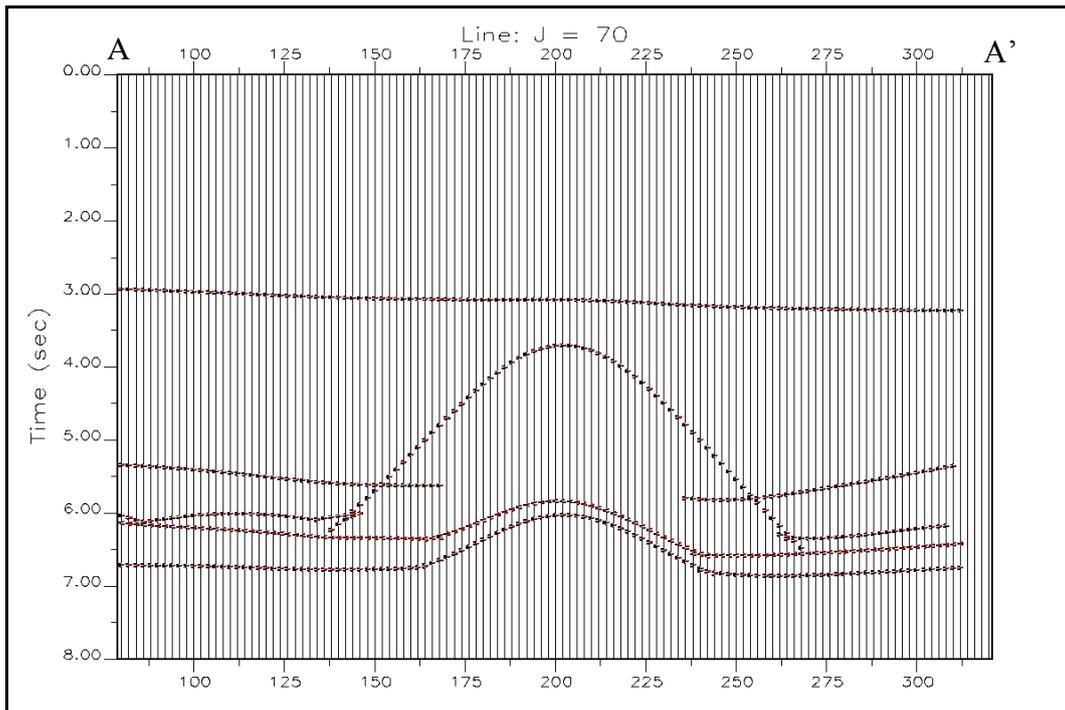


Figura 6: Sismograma sintético de afastamento nulo para o Modelo1.

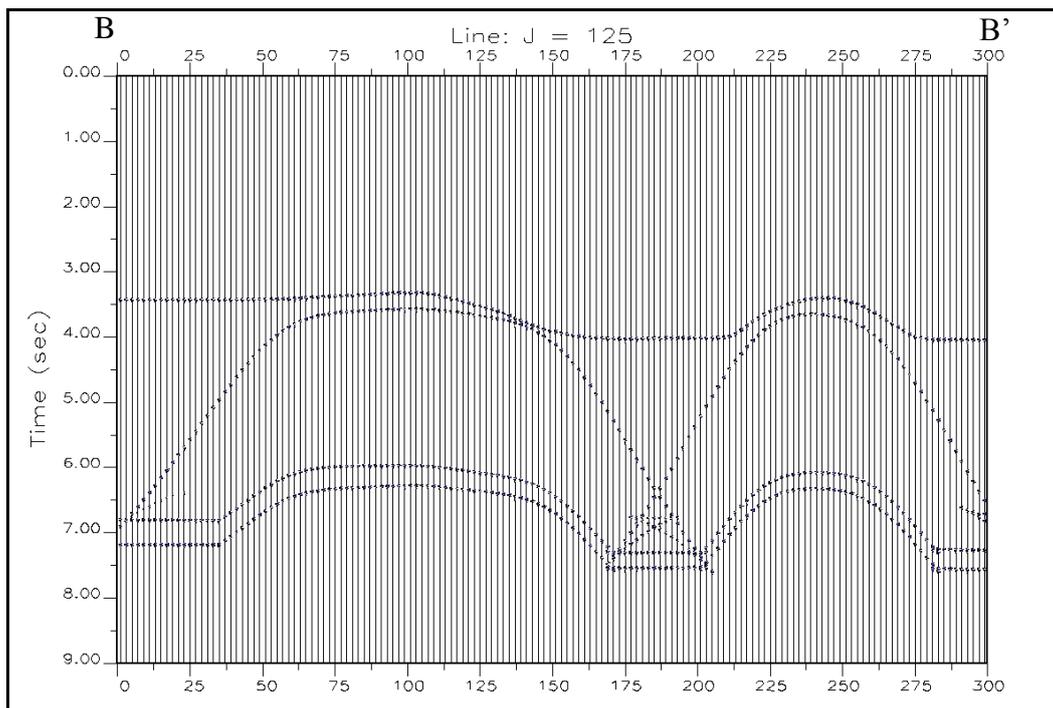


Figura 7: Sismograma sintético de afastamento nulo do Modelo2.

- Traçado de Raios para mapas de iluminação:

Novamente com auxílio do *Norsar3D*, a simulação das aquisições foi realizada utilizando-se da técnica do traçado dos raios por construção e propagação de frente de onda através dos modelos. O código do raio foi

configurado de modo que os raios da onda P partam de fontes localizadas na superfície do mar, atinjam os pontos de reflexão na superfície alvo e retornem à superfície para serem registrados pelos receptores. A figura 19 exemplifica o traçado do raio. Durante esta simulação, foram registrados os caminhos dos raios, os tempos de chegada, o contraste de impedância e os ângulos de partida, incidência e reflexão.

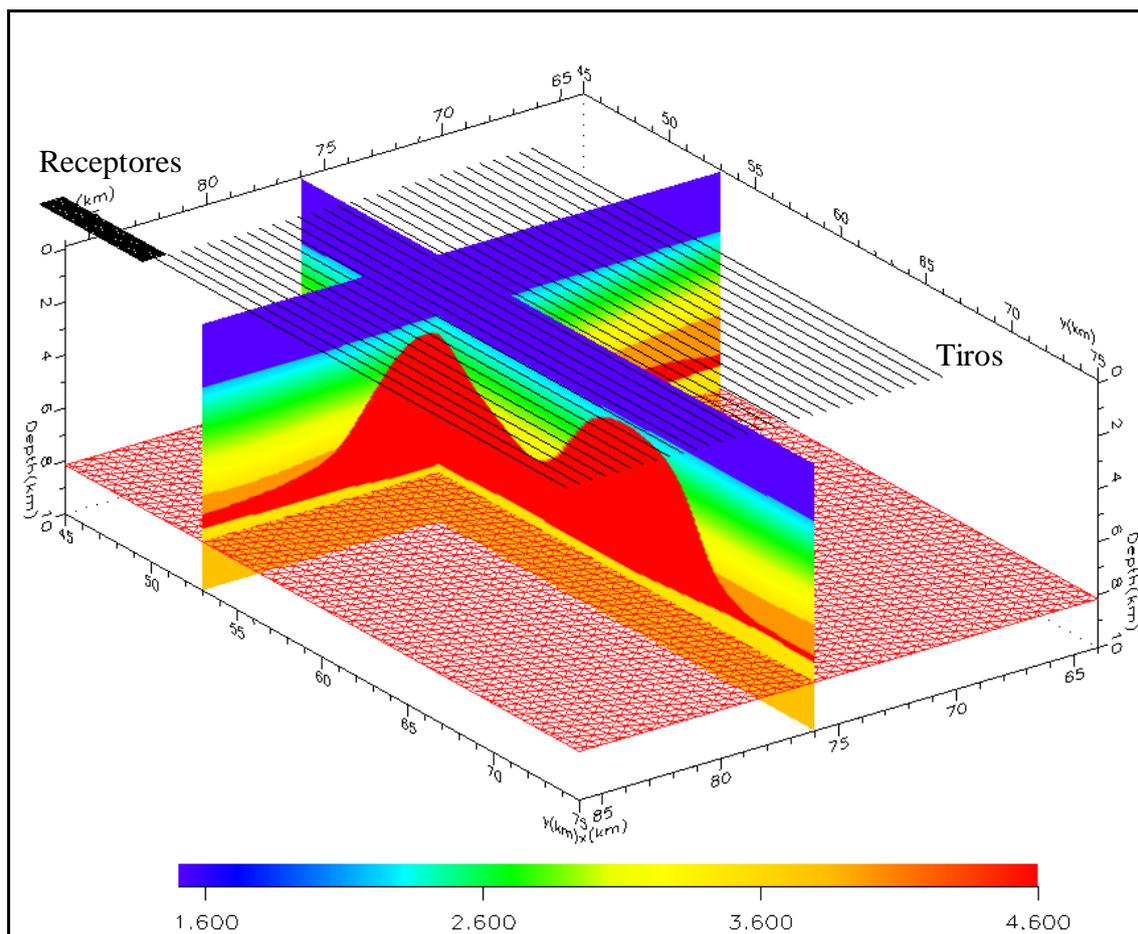


Figura 8: Modelo de velocidades do Modelo1 com visualização da superfície Alvo e do arranjo de aquisição com cabos de superfície na direção N-S.

- Confecção e análise dos mapas de iluminação:

Depois de realizada a etapa do traçado de raios, os dados gerados são levados à confecção dos mapas de iluminação referentes aos dispositivos de aquisição adotados, mais uma vez com auxílio do *software Norsar3D*. Os eventos são calculados no domínio do ponto de reflexão comum, no horizonte alvo. Foram computados, os mapas de amplitude simulada migrada e os mapas de quantidades de eventos refletidos por célula para os dois modelos,

além do mapa de ângulos máximos de incidência para o Modelo2. Para gerar os mapas SMA, foi utilizado o pulso de fase zero *Ricker* de 20 Hz. Os mapas de iluminação foram gridados utilizando um fator de suavização para compensar o padrão indesejado produzido pela maior cobertura na linha de navegação. Desta forma, o fato deste trabalho não contar com um estudo de resolução não prejudica a interpretação dos mapas, deixando com que as variações nas aquisições sejam função apenas das direções de navegação.

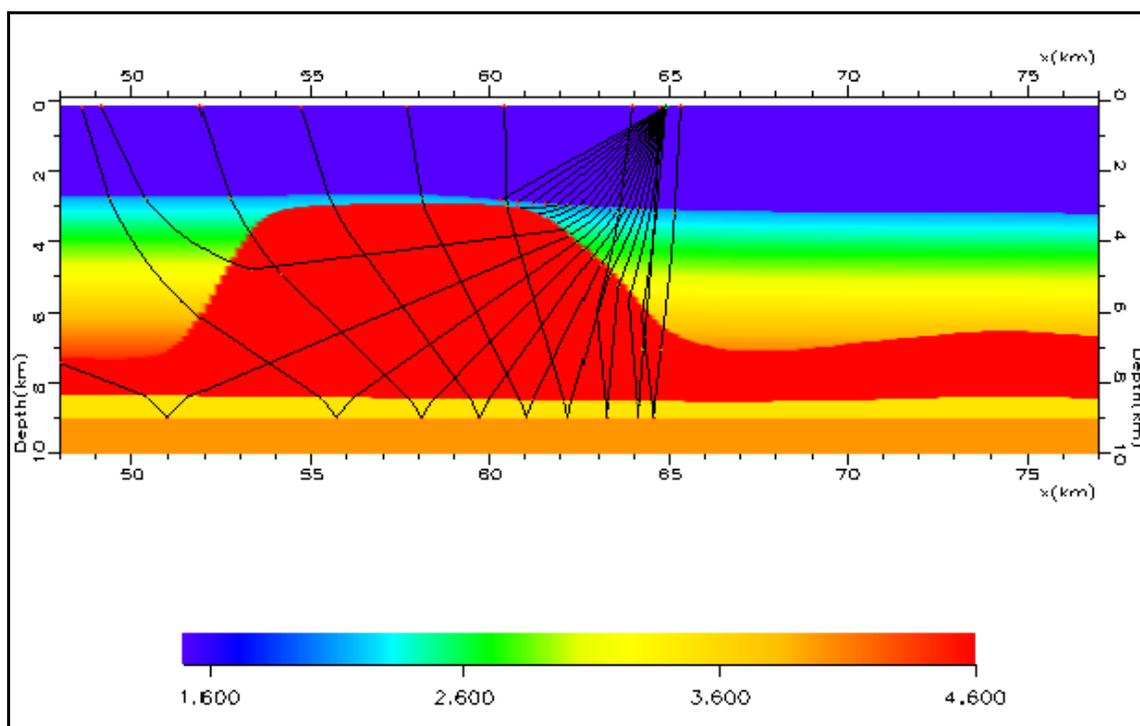


Figura 19: Modelo de velocidades e os raios com ângulos de saída da fonte entre 5° e 60° , no plano paralelo à linha de navegação, refletidos no Alvo.

4 RESULTADOS

4.1 Sismogramas sintéticos

Observando as seções de afastamento nulo das figuras 16 e 17, utilizadas para comprovar a validade dos modelos, é possível ver o registro do fenômeno sísmico *Pull-up*, distorcendo os horizontes base do Aptiano e Alvo, na região abaixo dos diápiros de sal. Este fenômeno é causado pela variação lateral de velocidade entre o domo Aptiano e os sedimentos que o cercam, provocando o registro dos eventos de reflexão em tempos mais curtos que os reais.

Nestas seções, ainda é possível observar as difrações sísmicas afetando os horizontes mais profundos, além do horizonte topo do Aptiano. As difrações neste último horizonte são provocadas tanto pela curvatura da superfície quanto pela brusca variação de velocidades nas regiões próximas aos flancos dos diápiros, causando difrações também nos horizontes mais profundos.

Os dados sintéticos gerados não passaram por nenhuma etapa de processamento sísmico, por exemplo, migração ou conversão tempo-profundidade, onde provavelmente estes fenômenos indesejados seriam corrigidos.

Neste trabalho não foi feita comparação entre dados reais e sintéticos devido aos modelos utilizados serem aproximações da realidade, principalmente pelo fato das velocidades usadas na modelagem direta terem sido extrapoladas a partir de dados de poço.

4.2 Mapas de iluminação

- Modelo1:

Para o Modelo1, foram simuladas as respostas para uma aquisição na direção N-S e para uma outra aquisição na direção W-E.

Os mapas de quantidade de chegadas por célula (figuras 20 e 21) mostram maior uniformidade das cores para a direção W-E em comparação com a direção N-S, principalmente na região do diápiro mais ao norte do mapa (indicada pelo retângulo amarelo na figura 20), onde observamos maior presença de tons de azul e vermelho. Este diápiro possui forma mais alongada,

na direção norte-sul, diferenciando-se do diápiro da região sul do mapa, que possui forma mais arredondada.

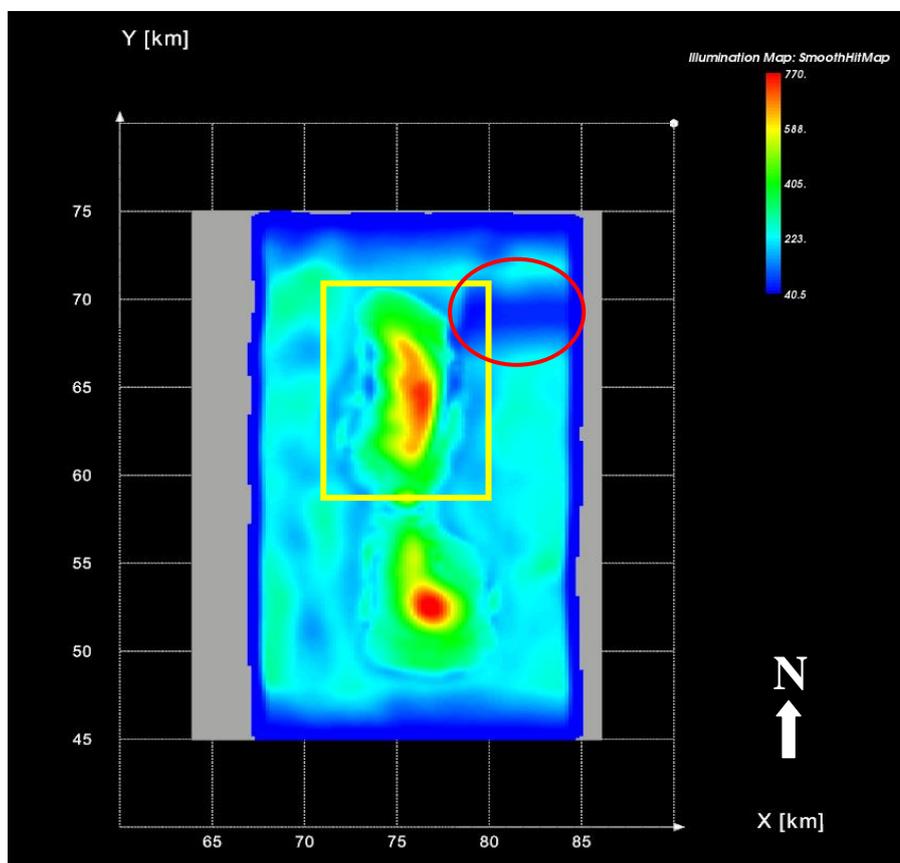


Figura 9: Mapa de quantidade de chegadas para aquisição na direção N-S.

No mapa de quantidades de chegadas N-S nota-se ainda uma variação da quantidade de chegadas na região nordeste do modelo (indicada pelo círculo vermelho), estando provavelmente relacionada a alguma imprecisão no modelo de velocidades ou nas superfícies. Entretanto, as seções de afastamento nulo para este modelo não evidenciaram tais imprecisões e esta anomalia pode estar relacionada a alguma falha no algoritmo do traçado de raio. Em todos os mapas não foram encontradas zonas de sombra, exceto aquelas relacionadas às bordas do modelo.

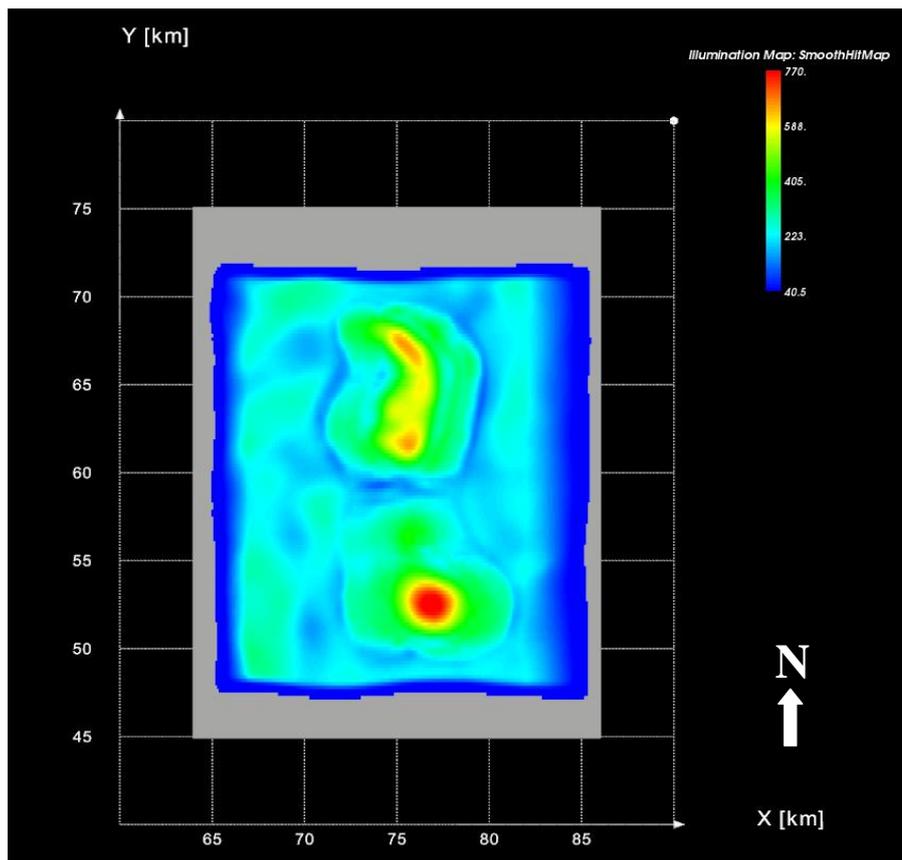


Figura 10: Mapa de quantidade de chegadas para aquisição na direção W-E.

Já os mapas de amplitude simulada migrada (figuras 22 e 23) mostram menor variação das amplitudes para a direção de levantamento W-E, evidenciada pela maior presença de tons laranja, ao contrário do mapa da direção N-S que possui maior presença de tons verde e vermelho, dispostos lado a lado.

Além disso, observando a figura 23 é possível ver um aumento de amplitude na região central abaixo dos domos (correspondente à região no interior da linha azul) e diminuição nas regiões abaixo dos flancos dos domos (correspondente à região entre a linha preta e a linha azul). Esta variação ocorre devido à mudança na trajetória do raio ao atravessar a camada de sal, difratando ao entrar e convergindo ao sair desta camada.

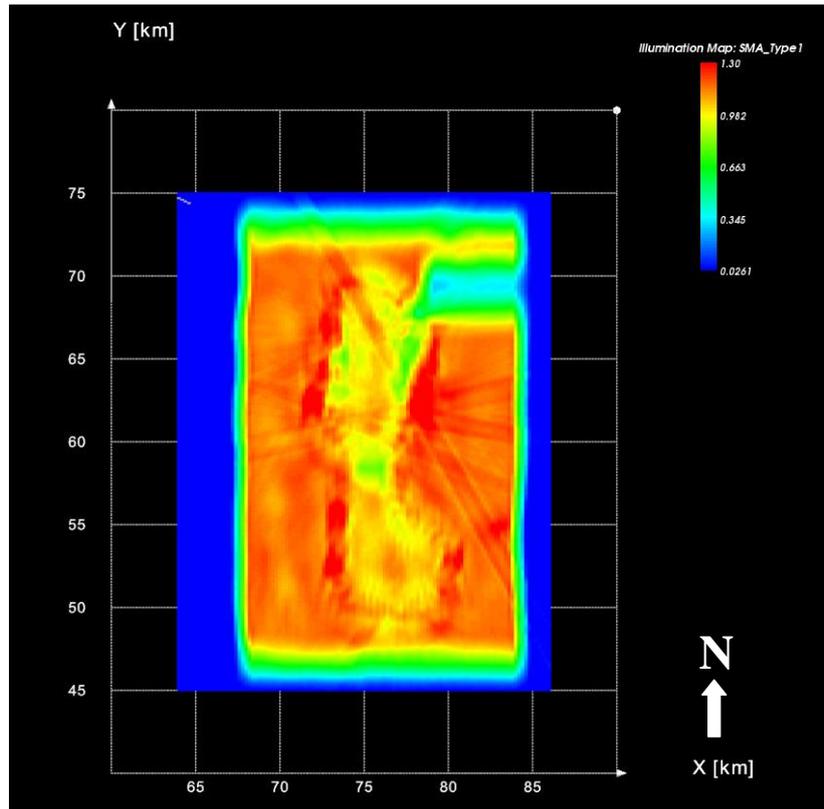


Figura 11: Mapa de amplitudes migradas simuladas para aquisição N-S.

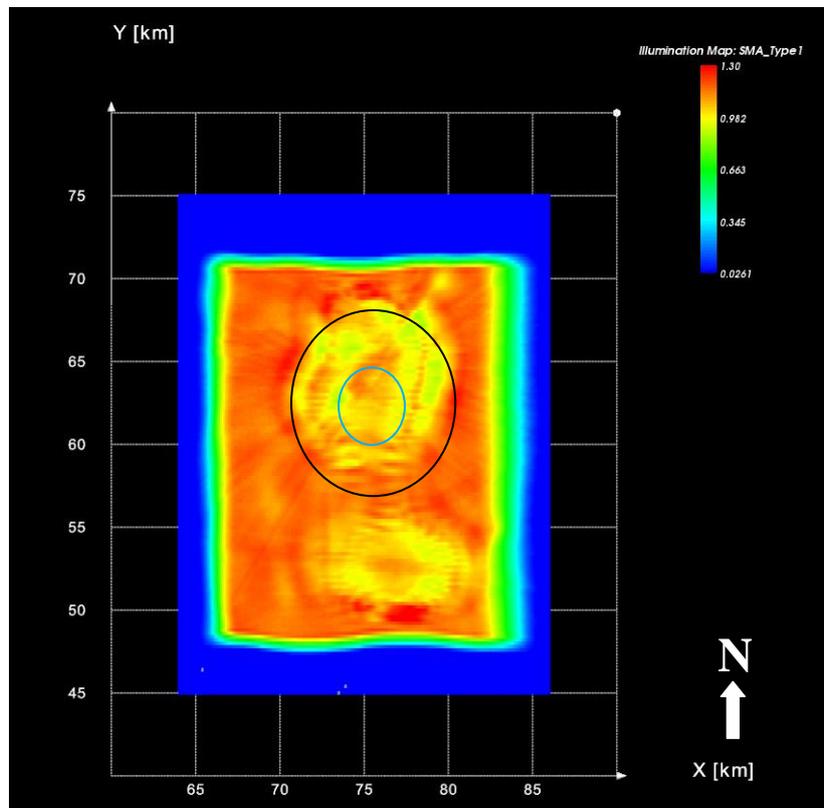


Figura 12: Mapa de amplitudes migradas simuladas para aquisição W-E.

- Modelo2:

Inicialmente as aquisições simuladas para o Modelo1 foram aplicadas ao Modelo2, tomando-se as mesmas direções. Entretanto, diferentemente do Modelo1, o Modelo2 apresenta uma muralha de sal com orientação Strike de aproximadamente N27E. Então, foram simuladas mais duas aquisições, nas direções N27E (Strike) e N63W (Dip).

Observando os mapas de quantidades de chegadas (figuras 24, 25, 26 e 27), nota-se que em todas as direções a região abaixo da muralha de sal (zona sombreada) foi bem iluminada.

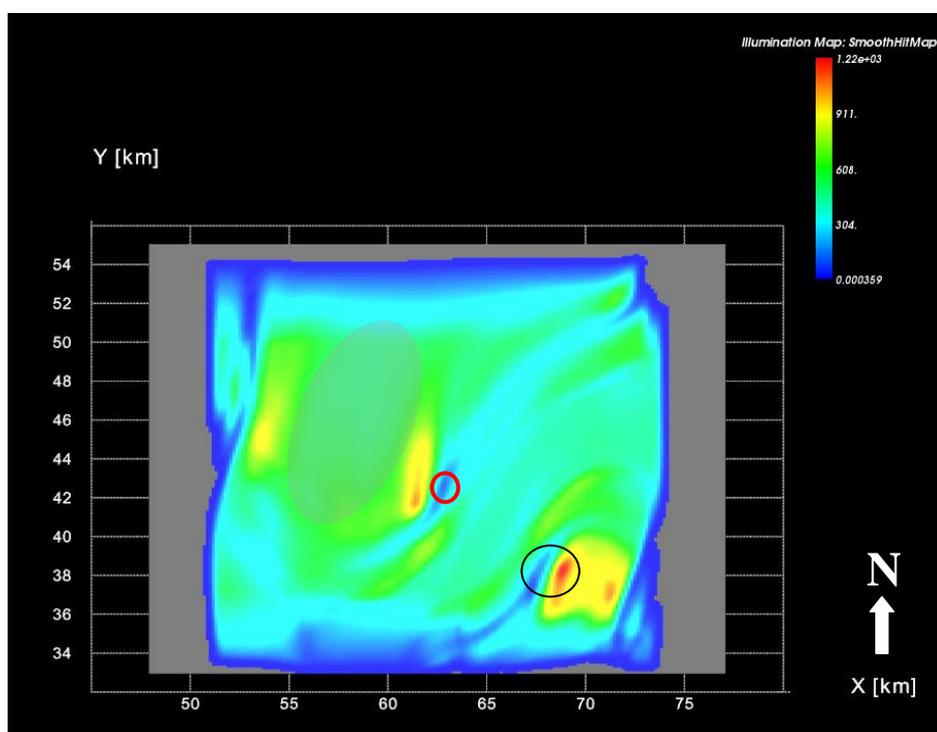


Figura 13: Mapa de quantidade de chegadas por célula para aquisição N-S. A região marcada pelo círculo vermelho apresenta baixa iluminação.

Porém, abaixo dos flancos as mudanças de iluminação são bruscas, evidenciando zonas bem iluminadas ao lado de zonas com baixa iluminação, como é visto nas regiões marcadas por círculos pretos nas figuras 24, 25 e 27. É possível observar que os mapas nas direções W-E e Dip apresentam respostas semelhantes, com maior uniformidade de chegadas em relação aos mapas N-S e Strike.

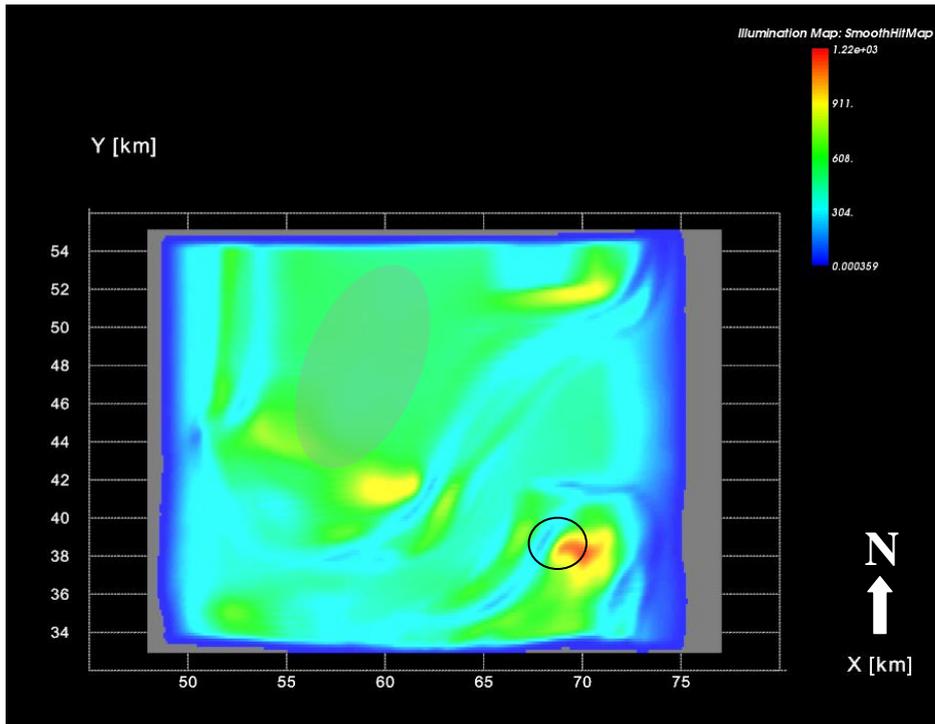


Figura 14: Mapa de quantidade de chegadas por célula para aquisição W-E.

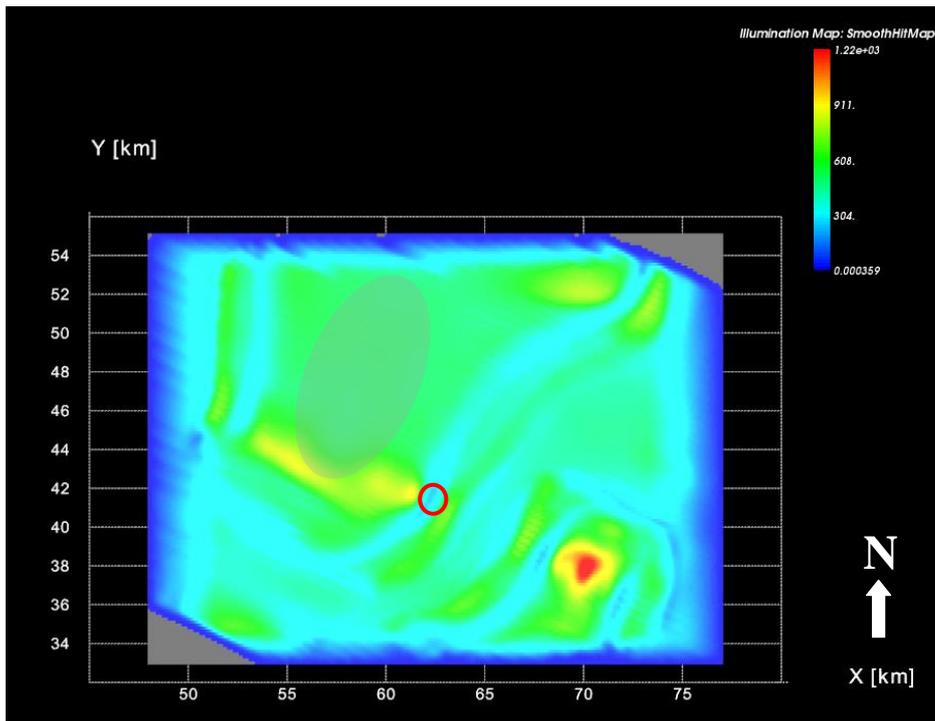


Figura 15: Mapa de quantidade de chegadas por célula para aquisição Dip. A região marcada pelo círculo vermelho apresenta uma pequena faixa com baixa iluminação.

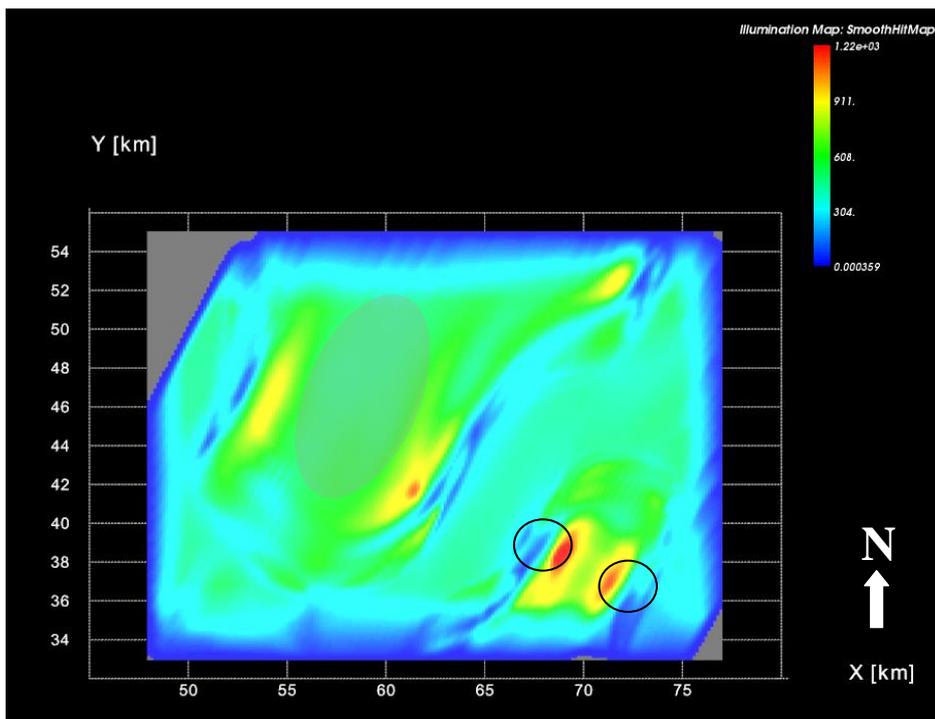


Figura 16: Mapa de quantidade de chegadas por célula para aquisição Strike.

Os mapas de amplitude simulada migrada mostrados nas figuras 28, 29, 30 e 31, também apresentam melhores resultados para as direções W-E e Dip. Apesar de obterem respostas semelhantes quanto ao número de chegadas, estas duas aquisições apresentam diferenças bastante visíveis, quando são analisados os mapas de amplitude simulada migrada.

Nota-se que a aquisição na direção Dip (figura 31) apresenta menor presença de tons vermelhos e verdes, indicando menor variação de amplitude e, portanto, sendo esta aquisição mais indicada que a direção W-E (figura 29).

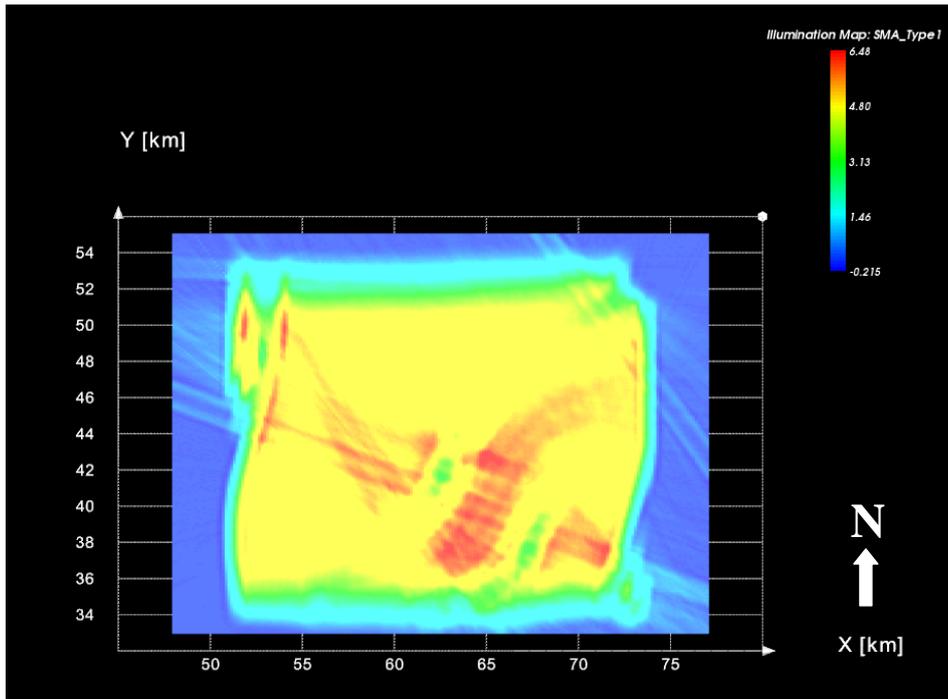


Figura 17: Mapa de amplitudes migradas simuladas para aquisição N-S.

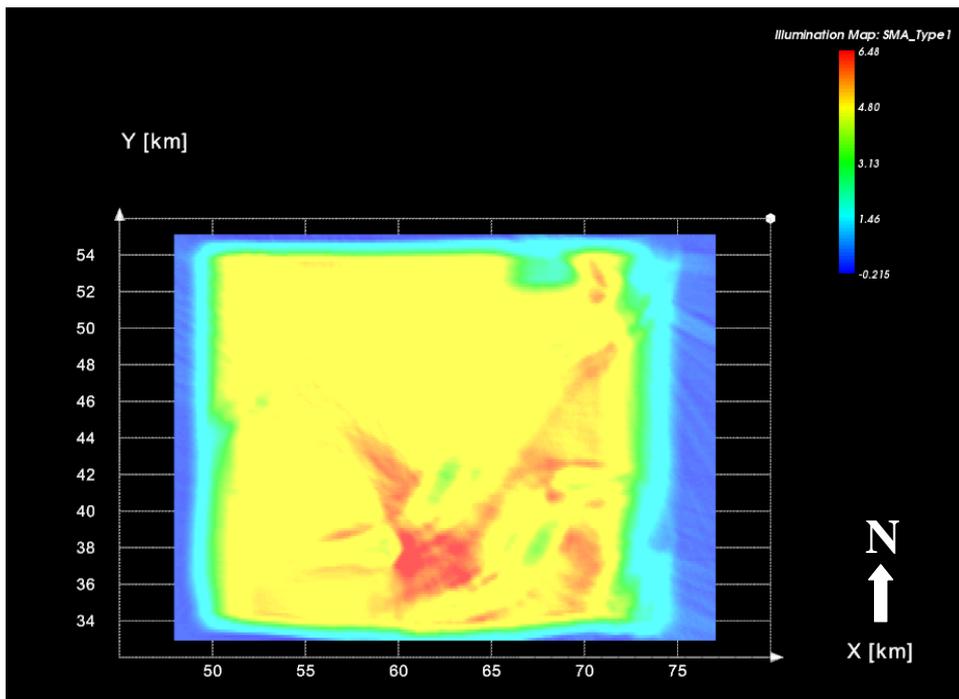


Figura 29: Mapa de amplitudes migradas simuladas para aquisição W-E

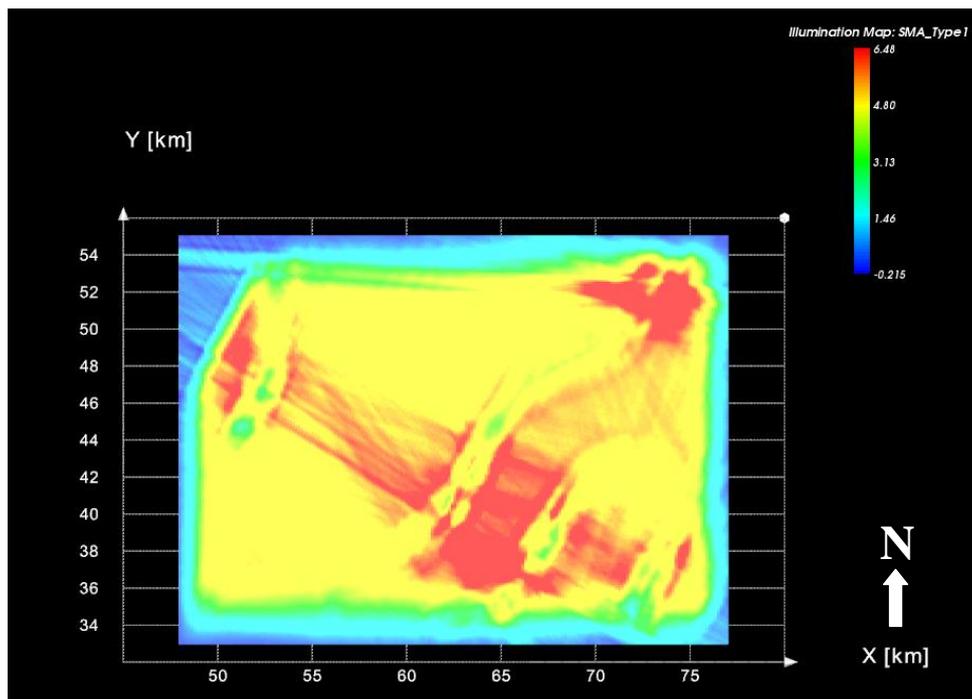


Figura 18: Mapa de amplitudes migradas simuladas para aquisição Strike.

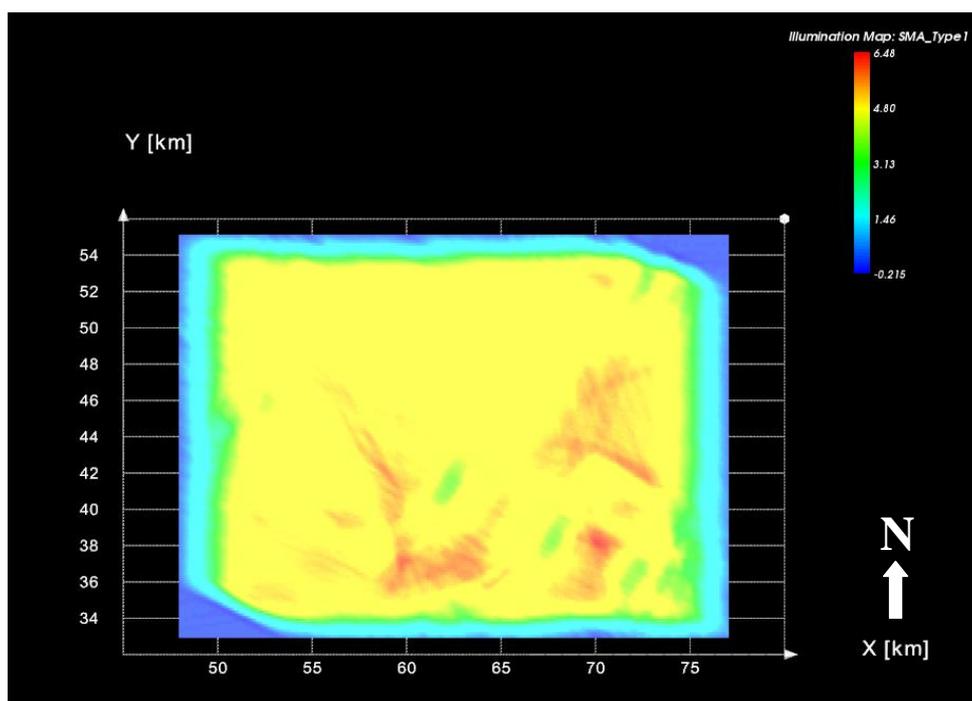


Figura 19: Mapa de amplitudes migradas simuladas para aquisição Dip.

Outro critério que foi utilizado para avaliação das aquisições para este modelo foi o mapa de ângulos máximos de incidência (figuras 32, 33, 34 e 35).

Nestes mapas observa-se que a direção de levantamento Dip, da figura 34, apresenta maior uniformidade de registro de ângulos de incidência máximos, prevalecendo os ângulos médios entre 18 e 26 graus, enquanto as

demais direções, além de apresentarem variações bruscas entre regiões vizinhas, também apresentaram pequenas regiões (indicadas por setas na figura 35) com anomalias associadas à perda dos ângulos maiores que 30° nas regiões abaixo do flanco da muralha de sal.

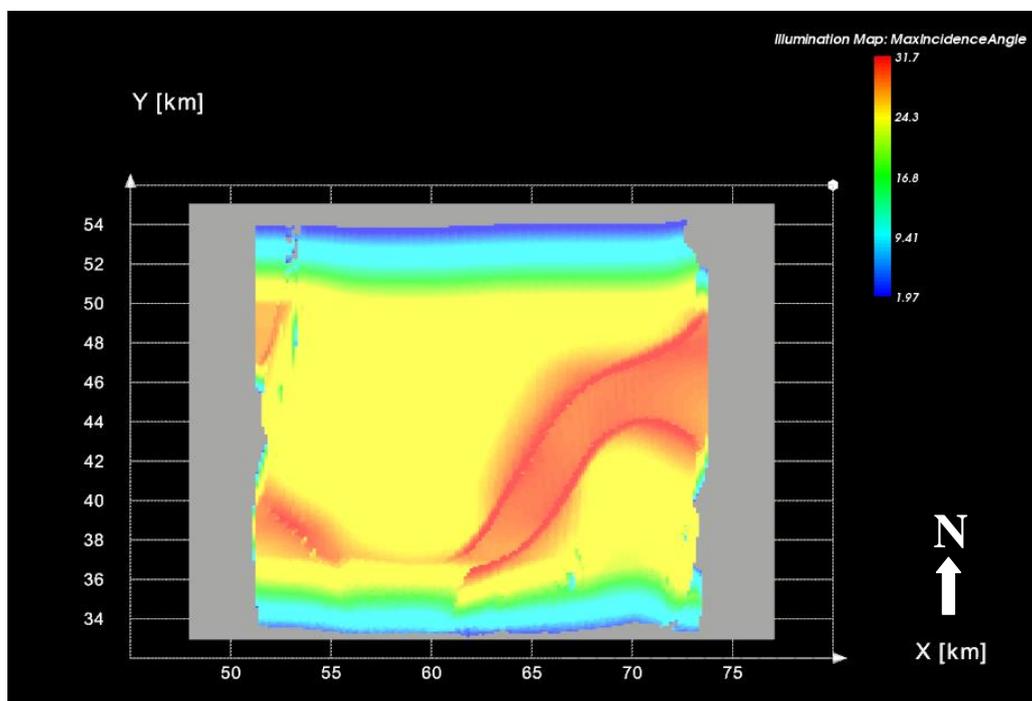


Figura 20: Mapa de ângulos máximos de incidência para direção N-S.

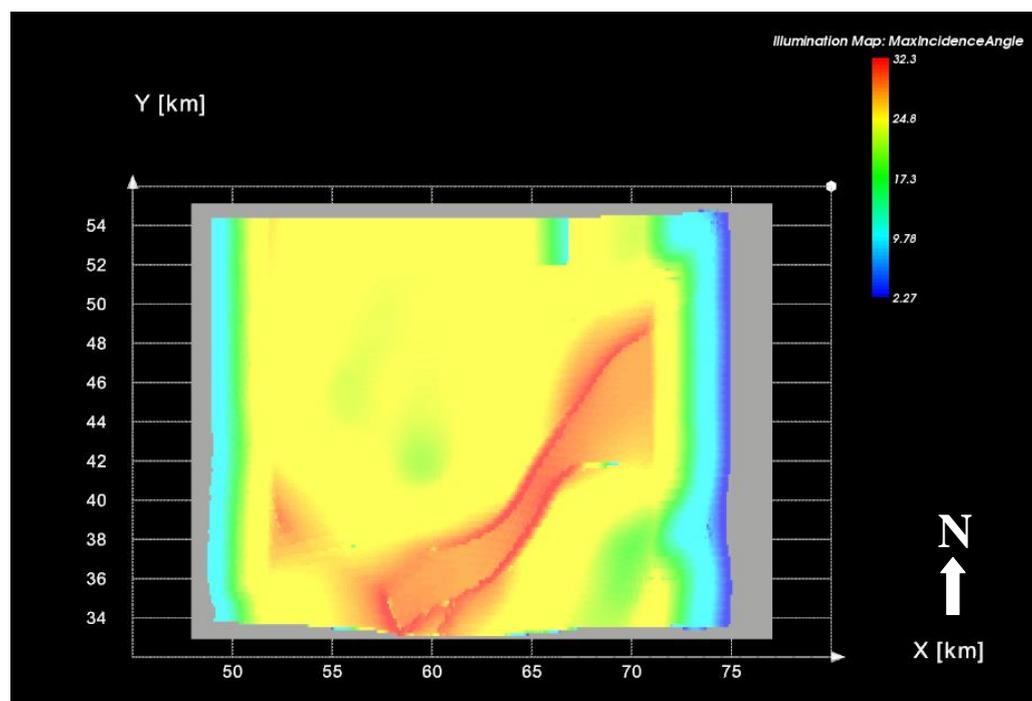


Figura 21: Mapa de ângulos máximos de incidência para a direção W-E.

A direção Dip também registrou a chegada de ângulos máximos maiores em praticamente todas as regiões do modelo, chegando a ângulos máximos de 34° , como pode ser visto na figura 34.

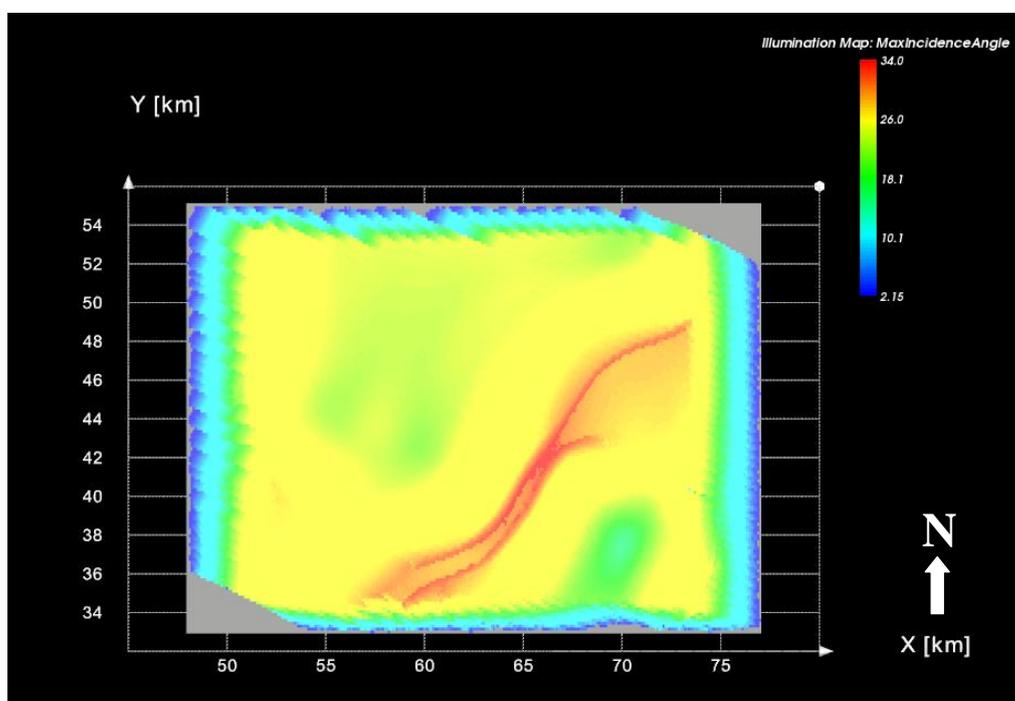


Figura 22: Mapa de ângulos máximos de incidência para a direção Dip.

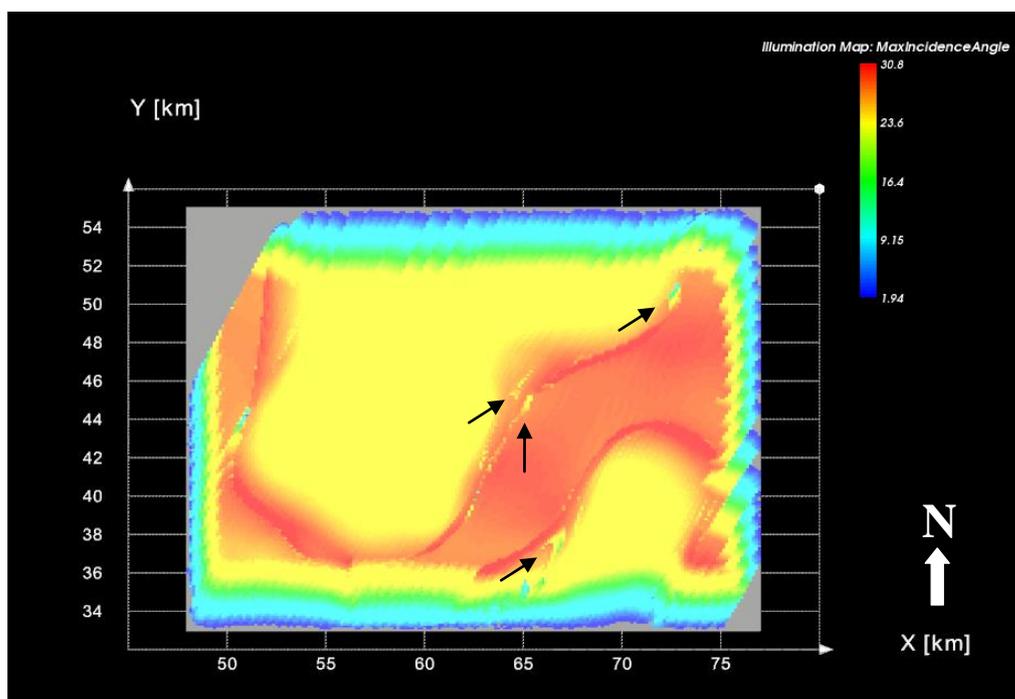


Figura 23: Mapa de ângulos máximos de incidência para a direção Strike.

4.3 Diagrama de roseta

Os resultados apresentados até aqui não evidenciam nenhuma região de sombra real (com justificativa geológica), ou seja, não há zonas na superfície Alvo que apresentem falta absoluta de iluminação. Este fato pode estar relacionado com algum erro na suavização das superfícies e propriedades, fazendo com que os raios se propaguem como estivessem num meio homogêneo. Porém, esta resposta pode ser realmente a esperada para estes tipos de estruturas salinas, pois mesmo que as espessuras sejam grandes e os modelos variem lateralmente, não há nestes modelos características morfológicas como as encontradas em corpos de sal alóctone, como exemplo, as línguas ou cogumelos de sal, que normalmente afetam muito o sinal sísmico.

Mesmo assim, é possível observar que algumas regiões apresentam índices muito baixos de pontos refletidos, indicadas pela cor azul-escuro, e com o objetivo de analisar os melhores *off-sets* e azimutes para mapeamento de uma destas regiões, foi gerado um diagrama de roseta. O ponto escolhido situa-se no interior da região marcada pelo círculo vermelho nas figura 24 e 26. O caminho dos raios desde a fonte até o receptor, com ângulos de saída entre 0° e 80° em relação ao eixo vertical, é mostrado na figura 36.

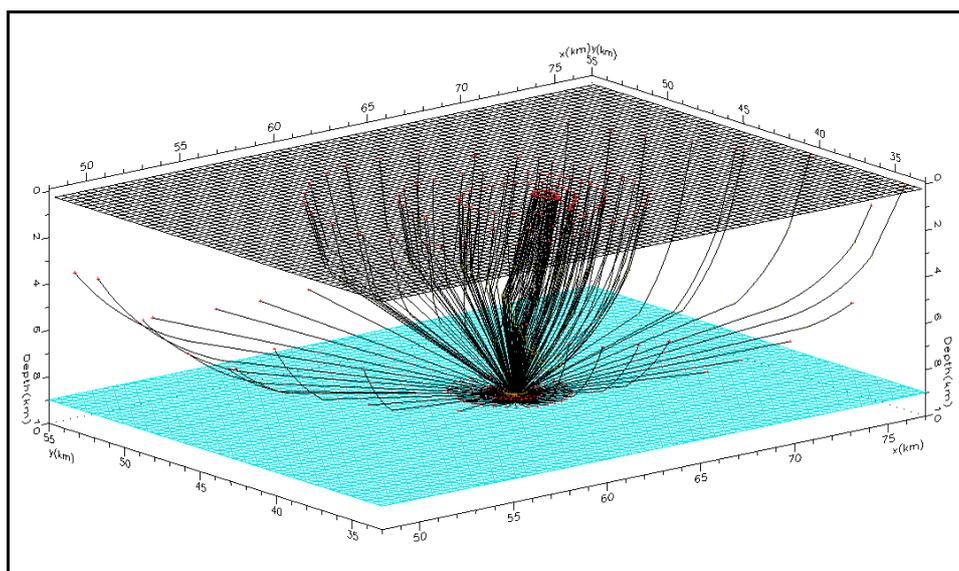


Figura 24: Tiro inverso, dado acima do alvo e registrado na superfície.

Analisando o diagrama gerado (figura 37) pode-se concluir que praticamente todas as direções e todos os off-sets (exceto os muito curtos) vão iluminar este ponto, porém, os off-sets entre 11 e 12 Km nos azimutes Dip e Strike podem apresentar maior número de reflexões para este ponto, devido a presença da cor vermelha nas regiões circuladas. Foi feita, então, uma aquisição focada neste ponto, com as mesmas configurações do levantamento Dip, porém agora utilizando cabos de 12 Km de extensão.

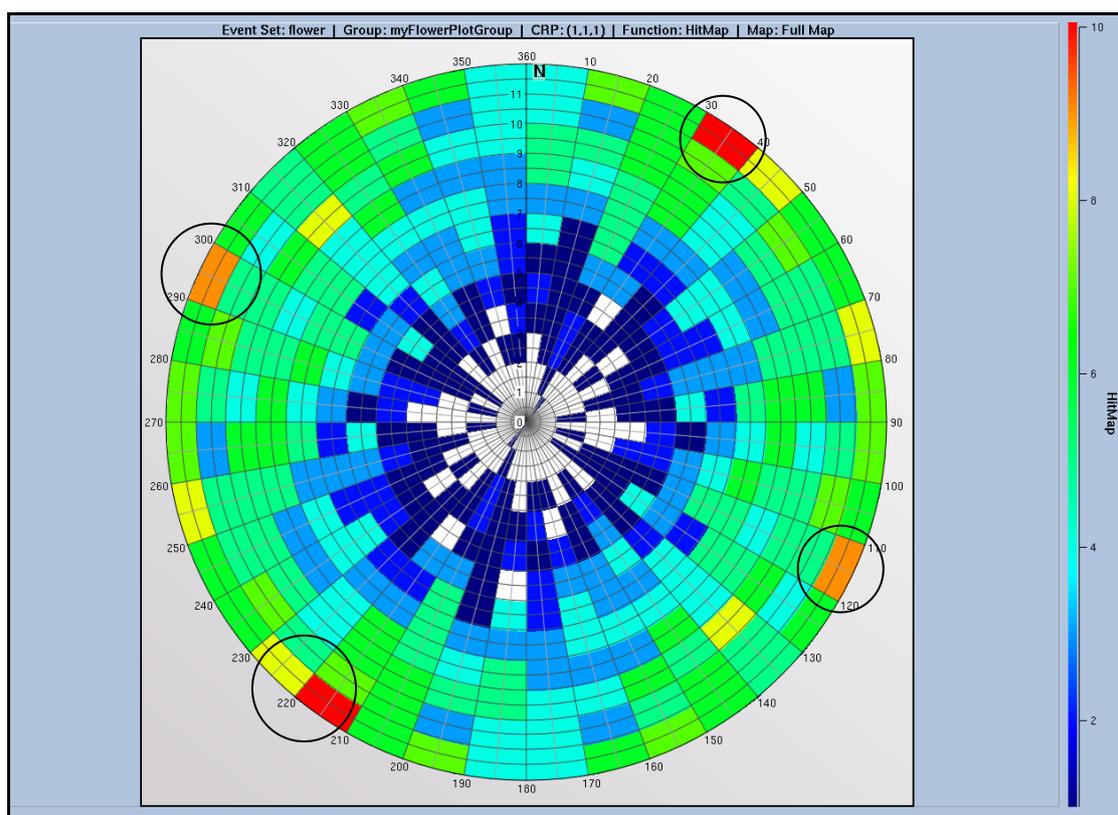


Figura 25: Diagrama de roseta gerado para análise de melhores off-sets e azimutes. As direções Dip e Strike indicam muitas chegadas para os off-sets entre 11 e 12 Km.

A figura 38 mostra o mapa de quantidades de chegadas para esta última aquisição, onde é possível observar que o ponto pesquisado foi atingido por mais raios em relação à aquisição com 6 km de cabo mostrada na figura 26, evidenciando que para mapear bem esta região o mais indicado é a utilização de cabos de receptores com maiores off-sets. Se comparado com o mapa da figura 24, referente à direção de levantamento N-S com 6 km, nota-se uma diferença muito grande de iluminação nesta região, mostrando novamente que a aquisição indicada pelo diagrama de roseta permite o registro de dados com melhor qualidade.

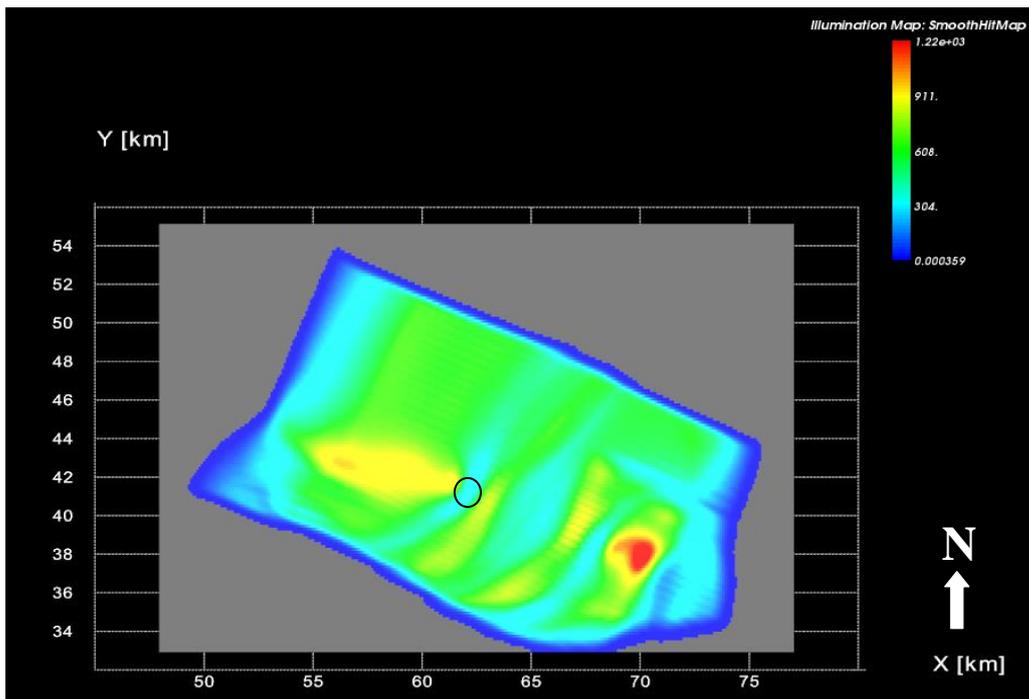


Figura 26: Mapa de quantidade de chegadas para a direção Dip com 12 km de comprimento. A região circutada, ponto de interesse desta análise, apresenta melhor iluminação se comparada com os mapas da figura 24 e 26.

5 CONCLUSÃO

A aquisição de dados sísmicos é uma das etapas mais dispendiosas no processo de exploração de hidrocarbonetos. Estas aquisições são realizadas utilizando como base aproximações de princípios físicos que comumente são aplicados a modelos geológicos simplificados. Porém, este não é o cenário encontrado na geologia nem tanto nas aquisições de dados. Como consequência, os dados adquiridos muitas vezes não são coerentes com o esperado.

Dentre os principais fatores que influenciam a qualidade destes dados, está a presença de refletores inclinados em ambientes com variações laterais de velocidade. Estes fatores fazem com que os eventos sísmicos não atinjam os pontos esperados num refletor em subsuperfície - os pontos médios de reflexão (CMP), fazendo com que o processamento e a interpretação sísmica não consigam montar uma imagem realística da geologia em subsuperfície.

Neste contexto, os métodos de modelagem direta, utilizando-se do registro de eventos nos pontos reais de reflexão, podem se tornar uma boa ferramenta para estimativa das respostas sísmicas, podendo ser aplicados em diferentes modelos geológicos.

Neste trabalho, utilizou-se a técnica do traçado de raio, conhecida por seu baixo custo computacional, para estimar repostas em dois modelos aproximados inseridos na bacia do Espírito Santo. Para os dois modelos, foi possível observar que um alvo em profundidade é melhor iluminado quando tenta-se evitar a influência das respostas de camadas sotopostas, nas respostas do evento desejado.

Analisando os mapas, tanto o de número de chegadas quanto o de amplitude simulada migrada, observa-se que as aquisições nas direções W-E para o Modelo1 e Dip para o Modelo2 são as mais indicadas. Cruzando estes mapas com as orientações principais das estruturas geológicas dos modelos, é possível concluir que aquisições perpendiculares ao Strike destas estruturas, seja uma muralha ou apenas um diápiro de sal com certa orientação, apresentam dados com maior qualidade que as aquisições feitas nas demais direções.

Foi possível concluir também que a iluminação de um horizonte em subsuperfície, será função principalmente da variação lateral das velocidades sísmicas nos sedimentos do meio ao redor. Isto pode ser concluído ao analisar os mapas apresentados para Modelo2. Apesar de o modelo apresentar grandes espessuras vertical e lateral das camadas de sal, as regiões com pior padrão de iluminação não estão abaixo destas espessuras e sim, encontram-se principalmente nos flancos do sal, justamente onde a variação lateral de velocidade é maior.

Os diagramas de rosetas podem ser usados quando há o interesse em iluminar uma região pontual, evitando que o estudo tenha que ser realizado para toda a região a ser pesquisada. No caso de uma zona de sombra já conhecida, apenas um tiro é necessário para a pesquisa. Neste trabalho, foi possível concluir que este tipo de estudos de iluminação permite a definição dos melhores off-sets e melhores azimutes para uma certa região.

Portanto, a aplicação de modelagem direta por traçado de raios, antes ou durante a etapa de aquisição sísmica, permite a geração e análise de diversos mapas de iluminação, configurando um estudo de iluminação sísmica com baixo custo computacional e de recursos humanos. Assim, torna-se possível realizar aquisições objetivas, com menor tempo de operação e registro de dados com maior qualidade, refletindo em melhoria também nas próximas etapas, por exemplo, no processamento e na interpretação sísmica.

Uma sugestão para continuação deste estudo é a utilização de modelos de velocidades sísmicas originados durante a migração, ao invés de velocidades extrapoladas de poço, com intuito de se ter respostas mais fiéis à realidade.

Outra sugestão é a realização de simulações com geometrias de aquisição mais modernas, por exemplo, aquisições wide-azimute e aquisições Coil, que têm sido utilizadas com frequência na indústria de exploração.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Quarta Rodada de licitações: Seções Geológicas e Cartas Estratigráficas. Disponível em : <http://www.anp.gov.br/brasil_rounds/round4/atividades_exploratorias/cartas_s ecoes/espsanto.htm >. Acesso em: 15 Fev. 2013.

Bleistein, N. and Gray, S. H., 2001, *From the Hagedoorn imaging technique to Kirchhoff migration and inversion*. Geophys. Prosp., Eur, Assn. Geosci. Eng., 49, 629-643.

Botelho, M. A. B., 1986, *Modelamento sísmico na bacia do Recôncavo usando a técnica de traçamento dos raios*, Tese de doutorado, UFBA

Cerveny, V., Klimes, L. and Psencik I., 1984, *Paraxial ray approximations in the computation of seismics wavefields in inhomogeneous media*. Geophys. J R. astr. Soc., 1984, 89-104.

Cerveny, V., 1987. *Ray Method for Three-Dimensional Seismic Modeling*. Petroleum Industry Course, The Norwegian Institute of Technology.

Gjøystdal, H., Iversen, E., Laurain, L., Lecomte, I., Vinje, V., and Åstebøl, K., 2002. *Review of ray theory applications in modelling and imaging of seismic data*. Studia geophysica et geodaetica, 46, 113-164.

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., Gelius, L., Vinje, V. and Lecomte, I., 2004. *A review of 3D illumination studies*. Journal of Seismic Exploration.

Laurain, R., Vinje, V., Strand, C., 2004, *Simulated migration amplitude for improving amplitude estimates in seismic illumination studies*, The leading edge, March, p. 240 – 245

Lecomte, I., Kaschwich, k., Gjøystdal, h., and Iversen, E., 2009. *Use Ray-Based Modeling Methods to Plan, Analyze, and Control Subsalt Imaging*. EAGE Subsalt Imaging Workshop, Cairo Nov 2009.

Mohriak, W., Szatmari, P. and Anjos, S. *Sal: Geologia e Tectônica. Exemplos nas Bacias Brasileiras*. São Paulo: Editora Beca, 2008.

Oliveira, F., 2010, *Estudos de Iluminação via Traçado de Raios em modelo da Bacia do Recôncavo*, Monografia, UFBA, Bahia.

Sheriff, R. E., (2002) *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*, SEG.

Tagliari, C. V. (1993). *Evolução das sequências mistas(siliciclásticas e carbonáticas) sob a influência da halocinese durante o Albo-Aptiano da Plataforma de Regência Bacia do Espírito Santo*. Instituto de Geociências. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Mestrado: 176

Tsingas, C., Drottning, A., Bergfjord, E., Branston, M., Fox, A., Zinger, M., Musser, J., *Survey Design and Evaluation for Advanced Marine Acquisition in a Subsalt Environment*. EAGE Subsalt Imaging Workshop, Cairo Nov 2009.

Vermeer, G. J. O. (2002) *3-D Seismic Survey Design*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.

Vieira, R. A. B., Mendes, M. P., Vieira, P. E., Costa, L. A. R., Tagliari, C. V., Bacelar, L. A. P., Feijó, F. J. (1994). *"Bacias do Espírito Santo e Mucuri."* Boletim de Geociências da Petrobrás 8(1): 191-202.

Vinje, V., Åstebøl, K, Iversen, E., and Gjøystdal, H., 1999, *3-D ray modelling by wavefront construction in open models*: Geophysics, 64, 1912-1919.

Vinje, V., Iversen, E., and Gjøystdal, H., 1993, *Traveltime and amplitude estimation using wavefront construction*, *Geophysics*, 58, 1157-1166.

7 APÊNDICE A – Listagem das linhas sísmicas utilizadas.

0038-0532	0232-0076
0038-0251	0232-0079
0066-0003	0239-0350
0066-0032	0250-0113
0066-0036	0250-0120
0066-0037	0250-0121
0232-0036	0250-0122
0232-0037	0250-0123
0232-0038	0250-0125
0232-0039	0250-0126
0232-0040	0250-0127
0232-0041	0250-0128
0232-0043	0250-0129
0232-0046	0250-0130
0232-0064	0250-0131
0232-0066	0250-0136
0232-0067	0250-0137
0232-0068	0250-0139
0232-0069	0250-0138
0232-0070	0250-0139
0232-0071	0250-0140
0232-0072	0250-0141
0232-0073	0250-0142
0232-0075	0250-0143