

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS**  
**OCEANOS E DA TERRA.**

**MARCELLA MARIA DE MELO CORTEZ**

**INTERPRETAÇÃO DO MAGMATISMO DO PÓS-SAL E SEU EFEITO NA**  
**ILUMINAÇÃO SÍSMICA EM OBJETIVOS EXPLORATÓRIOS DO**  
**ALBIANO E DO PRÉ-SAL DA BACIA DE SANTOS, BRASIL.**

**NITERÓI**

**2017**

**MARCELLA MARIA DE MELO CORTEZ**

**INTERPRETAÇÃO DO MAGMATISMO DO PÓS-SAL E SEU EFEITO NA  
ILUMINAÇÃO SÍSMICA EM OBJETIVOS EXPLORATÓRIOS DO  
ALBIANO E DO PRÉ-SAL DA BACIA DE SANTOS, BRASIL.**

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

**Orientador:**

**MARCOS A. CETALE SANTOS**

**NITERÓI**

**2017**

# Marcella Maria de Melo Cortez

## INTERPRETAÇÃO DO MAGMATISMO DO PÓS-SAL E SEU EFEITO NA ILUMINAÇÃO SÍSMICA EM OBJETIVOS EXPLORATÓRIOS DO ALBIANO E DO PRÉ-SAL DA BACIA DE SANTOS, BRASIL.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor

Área de Concentração: Geofísica

Aprovada em [01/12/2017]

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Orientador [Marcos A. Cetale Santos], Dr.

Deptº de Geologia e Geofísica

---

Prof. [ Luiz Alberto Santos], Dr.

Deptº de Geologia e Geofísica

---

Prof. [ Rogério de Araújo Santos], Dr.

Deptº de Geologia e Geofísica

---

Prof. [ Fernando Freire], Dr.

Deptº de Geologia e Geofísica

---

Geóloga. [Isabela de Oliveira Carmo], Dra.

PETROBRAS

---

Geólogo. [ Jobel Lourenço Pinheiro Moreira], Dr.

[Consultor]

## Agradecimentos

Dedico este trabalho aos meus filhos Pedro e Isabel, grandes motivadores do meu crescimento anímico, pessoal e profissional. Ao meu marido Marcos pelo exemplo, incansável, de busca ao conhecimento.

As minhas parceiras e “fiéis escudeiras” Ruth e Orenita que sempre me ajudaram com o trabalho da casa e dos meus filhos proporcionando a tranquilidade necessária para o exercício da profissão.

Aos meus colegas de profissão geólogos, geofísicos e engenheiros que ao longo da carreira me inspiraram pelo exemplo de esforço e determinação em fazer valer cada segundo do trabalho; Makoto Saito, Edilson dos Santos, Marcos Fetter, Regis Krueel, Juan Doblaz, Bruno da Silva Mendes (*in memoriam*), Ana Zélia Nunes de Barros, Sérgio Guimarães, Renault Lemaire, Jeferson Luiz Dias, Maria Cristina Vito.

Ao meu orientador Marcos Cetale e aos membros da banca de qualificação Luiz Alberto Santos e Rogéri Santos pelas sugestões de continuidade do trabalho e elaboração desta tese.

A empresa Schlumberger pelo uso da licença acadêmica do *software* Petrel cedida ao departamento de Geologia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense.

A empresa IES Brasil, representante da Norsar no Brasil, por ceder as licenças acadêmicas para o Departamento de Geologia e Geofísica da Universidade federal Fluminense.

A toda a equipe da Aquisição Marinha da Petrobras pelo apoio e suporte ao logo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Grupo de “imageamento” sísmico e inversão sísmica (GISIS) do Departamento de Geologia e Geofísica pelo suporte de recursos diversos e infraestrutura para o desenvolvimento do trabalho.

Ao BDEP da Agência Nacional do Petróleo pela liberação dos dados públicos de geofísica e de geologia para o desenvolvimento desta tese.

## Resumo

Durante a última década um esforço significativo em exploração de hidrocarbonetos em água profunda e ultra profunda contribuiu para a evolução do conhecimento sobre a distribuição de rochas ígneas nas bacias sedimentares ao longo das margens continentais. Os objetivos exploratórios situados abaixo de corpos de rochas ígneas mais rasas e de alta impedância comumente apresentam variações de amplitude decorrentes de sombra de iluminação em áreas de baixa incidência. O processamento sísmico, a migração em profundidade, a interpretação e a análise de atributos requerem uma atenção especial quando estes corpos magmáticos afetam a iluminação de alvos mais profundos. Normalmente os diápiros de sal constituem o foco da análise de estudos de iluminação e os corpos de rochas ígneas raramente são modelados com este intuito.

Através da interpretação sísmica e da modelagem geológica das sucessões vulcano sedimentares de idade Terciária, de corpos de rochas extrusivas de idade Albiana e das intrusões ígneas no Cretáceo, foi possível simular o efeito dos mesmos na resposta de amplitude de alvos mais profundos em uma área da região do Alto de Cabo Frio da Bacia de Santos. As rochas ígneas extrusivas do Terciário ocorrem intercaladas com sedimentos formando sucessões vulcano-sedimentares marcadas por uma resposta alternada de baixa e alta amplitude, com forte descontinuidade lateral. Os mapas de amplitude mostram elementos arquitetônicos bem preservados, interpretados como fluxos de lava e vulcões, contrastando com as camadas de sedimentos. Os corpos ígneos intrusivos e extrusivos tridimensionais, utilizados para construir o modelo geológico 3D, foram definidos através de *geobodies* extraídos automaticamente a partir dos volumes de impedância relativa e averiguados com atributo sísmico geométrico de detecção de borda.

A partir dos *geobodies* foram modeladas duas sucessões vulcano-sedimentares, de idade Terciária, além dos demais corpos intrusivos do período Cretáceo e das rochas ígneas extrusivas do período Albiano. Na área do projeto a camada de sal é fortemente estruturada devido à movimentação tectônica que gerou diápiros espessos de direção NE-SW e que controlaram a geometria e distribuição da seção carbonática sobreposta a sequência do Intra-Albiano. Para a construção do modelo de traçado do raio, que têm como objetivo representar as principais complexidades geológicas da seção do pós-sal,

foram incluídas também as seções do Sal e do Intra-Albiano. Os efeitos de sombra das paredes do sal e da plataforma carbonática na seção do pré-sal foram também considerados no estudo de iluminação. As propriedades acústicas da sequência da sobrecarga sedimentar (*overburden*), do Intra-Albiano, da camada de sal e das rochas ígneas, foram obtidas principalmente através da análise estatística de correlação dos perfis de poços disponibilizados para este trabalho. A geometria de aquisição sísmica a cabo convencional foi parametrizada de forma semelhante a original e uma aquisição de ampla variação azimutal do tipo *Coil* também foi testada. Os mapas de amplitude simulada das interfaces refletivas ao topo da sequência carbonática do Intra-Albiano e da Base do Sal foram gerados a partir da informação do traçado de raio. A comparação entre as amplitudes reais e simuladas mostram o efeito combinado e isolado devido à presença de rochas ígneas mais rasas, da geometria complexa do Albiano e da camada de Sal na iluminação sísmica dos objetivos mais profundos do Intra-Albiano e da Base do Sal.

*Palavras chave: Interpretação de Rochas Ígneas, Traçado de Raios, Petrofísica de Rochas Ígneas, Modelagem Sísmica, Estudos de Iluminação.*

## Abstract

During the last decade, a significant effort in hydrocarbon exploration in deep and ultra-deep water contributed to the evolution of knowledge on the distribution of igneous rocks of sedimentary basins along the continental margins. The exploration objectives located beneath shallower igneous bodies rocks of high impedance commonly feature amplitude variations arising from the shadow of illumination in areas of low incidence. Seismic processing, migration in depth, interpretation and analysis of attributes require special attention when these magmatic bodies affect the illumination of deeper targets. Usually the salt diapirs constitute the focus of the illumination studies and the bodies of igneous rocks are rarely modeled with this purpose.

Through seismic interpretation and geological modeling of volcano-sedimentary successions from Tertiary age, extrusive rock bodies of Albian age and of igneous intrusions in the Cretaceous, it was possible to simulate the effect of amplitude response on deeper targets in an area of the Alto de Cabo Frio in Santos basin. The extrusive igneous rocks of the Tertiary interspersed with sediments form volcano-sedimentary successions marked by an alternating high and low response amplitude, with strong lateral discontinuity. Amplitude maps show architectural elements well conserved, interpreted as streams of lava and volcanoes, contrasting with the layers of sediment. The intrusive and extrusive igneous, used to construct the 3D geological model, were defined through numerical geobodies automatically extracted from the relative impedance volumes and determined with seismic attribute of edge detection. From the geobodies were modeled two volcano-sedimentary successions of Tertiary age, in addition to other bodies of intrusive and extrusive igneous rocks of the Albian period.

In the project area the salt layer is strongly structured due to tectonic movement that generated thick diapirs oriented in NE-SW direction and that control the geometry and distribution of the superimposed Intra-Albian carbonate section. The effects of shade of the walls of the salt and the carbonate platform in the pre-salt section were also considered in the study. For the construction of the ray tracing model which are intended to represent the main post-salt geological complexities were also included the sections of the salt and the Intra-Albiano. The acoustic properties of the sequence of sedimentary overload (overburden), Intra-Albiano, salt and layer of igneous rocks were obtained mainly through the statistical analysis from correlation of wells profiles

available for this project. The conventional cable seismic acquisition geometry was parameterized similarly to original and an acquisition of wide azimuthal variation named “Coil” was also tested. The simulated range maps of reflective interfaces from the top of the Intra-Albian carbonate sequence and from the Base of the Salt were generated from the ray tracing results. The comparison between the range and variation of real and simulated amplitudes show the illumination effects of the presence of the shallower igneous rocks, the complex geometry of carbonates and the salt layer sequences in the deep objectives of Intra-Albian and the Base of the Salt.

*Keywords: Igneous Rock Interpretation, Ray Tracing, Seismic Modeling, Igneous Rock Petrophysics, Illumination Studies, Acquisition and Survey Design.*

## Sumário

<b>Introdução</b> .....	14
<b>1.0-Descrição dos Dados e da Área de Trabalho</b> .....	17
<b>2.0-Metodologia de Trabalho</b> .....	23
<b>3.0-Interpretação Sísmica da Área</b> .....	26
3.1-Magmatismo Análogo e sua Expressão na Bacia de Santos.....	26
3.2-Calibração Sísmica-Poço.....	30
3.3-Interpretação Sísmica Estratigráfica e Estrutural.....	33
3.4-Conversão Tempo-Profundidade.....	36
3.5-Detecção de Corpos Ígneos com Atributos Sísmicos 3D.....	43
<b>4.0-Propriedades Acústicas das Rochas Ígneas</b> .....	52
4.1-Interpretação das Litofácies Ígneas em Perfis de Poços.....	52
4.2-Quantificação das Propriedades Acústicas.....	57
<b>5.0-Modelagem Geológica e de Propriedades Sísmicas para o Traçado do Raio</b> .....	66
5.1- Construção do Modelo 3D Geológico.....	66
5.2- Propriedades Sísmicas.....	67
5.2.1-Estimativa de Vs para as Rochas Siliciclásticas.....	68
5.2.2-Estimativa de Vs para as Rochas Carbonáticas.....	70
5.2.3-Estimativa de Vs para as Rochas Ígneas e para a Halita.....	71
5.3- Cenários de Modelagem Geológica.....	75
<b>6.0-Estudo de Iluminação</b> .....	78
6.1-Análise Estatística Azimutal dos Raios de Incidência.....	78
6.2-Aquisição Sísmica Convencional X <i>Coil</i> .....	84
6.3-Parametrização do Traçado do Raio.....	87
6.4-Métodos de Simulação de Amplitude.....	89
6.5-Simulação de Amplitude Migrada do Topo do Intra-Albiano e da Base do Sal.....	92
6.6-Comparação entre a Amplitude Simulada Migrada e a Amplitude Real.....	103
<b>7.0-Conclusão</b> .....	106
<b>8.0-Bibliografia</b> .....	109

## Índice de Figuras

1. Carta Estratigráfica da Bacia de Santos.....	19
2. Localização da área estudada, dos dados sísmicos e de poços .....	20
3. Complexos hidrotermais análogos da Bacia de Vøring.....	27
4. Exemplo de rochas ígneas no pós-sal ao norte da Bacia de Santos .....	29
5. Perfis de velocidade do poço A “chave” .....	31
6. Calibração sísmica do poço A com a sísmica 3D da área de trabalho.....	32
7. Calibração sísmica do poço D com a sísmica 2D da área de trabalho.....	33
8. Interpretação sísmica de uma seção chave da área de trabalho.....	35
9. Zonas de sombra e baixa coerência sob corpos ígneos extrusivos.....	36
10. Função velocidade média definida para a conversão tempo-profundidade.....	38
11. Seção sísmica <i>inline</i> em profundidade calibrada com o poço A.....	39
12. Seção sísmica 2D em profundidade calibrada com o poço D.....	40
13. Mapa regional em profundidade do fundo do mar.....	41
14. Mapa regional em profundidade do topo do Intra-Albiano.....	41
15. Mapa regional em profundidade do topo do Sal.....	42
16. Mapa regional em profundidade da base do Sal.....	42
17. Perspectiva do topo dos corpos ígneos e da camada sal.....	43
18. Rochas ígneas no poço A e na seção calibrada de impedância relativa (IR).....	44
19. <i>Geobodies</i> dos corpos ígneos a partir da opacidade de IR.....	45
20. <i>Geobodies</i> dos corpos ígneos transferidos para o <i>grid</i> sísmico 3D.....	47
21. Seção sísmica NE-SW ( <i>inline</i> ) do atributo 3D <i>Edge Detection</i> .....	47
22. Mapas de amplitude <i>RMS (Root Mean Square)</i> da sucessão vulcano-sedimentar.....	49
23. Sistema análogo de vulcões e lavas do norte da Etiópia.....	50
24. Classificação das fácies ígneas a partir de perfis (Topo do Cretáceo).....	54
25. Classificação das fácies ígneas nos intervalos Campaniano e Albiano.....	55
26. Classificação e correlação de fácies dos poços proximais ao poço A.....	56
27. Histogramas de <i>gamma ray</i> , densidade e velocidade das fácies ígneas.....	57
28. Reconhecimento e subclassificação das fácies ígneas.....	58
29. Mapa de espessura das sucessões vulcano-sedimentares do Terciário.....	59
30. Superfícies de modelagem das sucessões vulcano-sedimentares.....	60

31. Amplitude <i>RMS</i> e interpretação das fácies sísmicas ígneas extrusivas .....	60
32. Velocidade intervalar média das sucessões vulcano-sedimentares.....	61
33. Modelo 2D final de velocidade intervalar de EVS_1 e EVS_2.....	62
34. Resolução e resposta de amplitude das rochas ígneas na seção siliciclástica do Cretáceo Superior.....	63
35. Resolução e resposta de amplitude das rochas ígneas na seção carbonática do Albiano.....	64
36. Modelo de traçado do raio dos corpos ígneos e da superfície da Base do Sal...	67
37. Estimativa de $V_p/V_s$ com a profundidade.....	70
38. Modelo de velocidade da onda “P” compressional.....	73
39. Função Densidade X Profundidade da sobrecarga sedimentar.....	73
40. Modelo de densidade da sobrecarga sedimentar.....	74
41. Área de modelagem sísmica.....	76
42. Pontos amostrais do Intra-Albiano e da Base do Sal.....	80
43. Representação esquemática dos diagramas de roseta.....	81
44. Diagramas de roseta dos raios de iluminação do Topo do Intra-Albiano.....	82
45. Diagramas de roseta dos raios de iluminação da Base do Sal.....	83
46. Modelo do traçado de raio das sequências vulcano-sedimentares.....	84
47. Configuração da aquisição sísmica a cabo.....	85
48. Configuração da aquisição sísmica <i>Coil</i> .....	86
49. Propagação da frente de onda no modelo do traçado de raio.....	88
50. Mapas e histogramas de SMA do Topo do Intra-Albiano.....	93
51. Mapa e histograma de diferença do SMA do Topo do Albiano	94
52. Mapas de histogramas de SMA da Base do Sal.....	96
53. Comparação entre os mapas de SMA do Topo do Intra-Albiano e da Base do Sal.....	98
54. Mapa e histograma de diferença do SMA da Base do Sal.....	99
55. Comparação entre os mapas de SMA da Base do Sal gerados com aquisição a cabo e <i>coil</i> .....	101
56. Comparação entre os mapas de SMA e de amplitude <i>RMS</i> do Topo do Intra-Albiano.....	103
57. Ilustração em seção sísmica da zona de sombra e dos ruídos sotopostos aos paleovulcões .....	104
58. Comparação entre os mapas de SMA e de amplitude <i>RMS</i> da Base do Sal....	105

59. Ilustração em seção sísmica do efeito de sombra na Base do Sal.....	105
---	-----

## Índice de Tabelas

1. Poços públicos utilizados no projeto.....	21
2. Dados sísmicos públicos utilizados no projeto.....	22
3. Classificação e espessura dos corpos ígneos.....	65
4. Propriedades elásticas dos corpos ígneos.....	74
5. Propriedades elásticas das sequências do modelo de <i>background</i> .....	75
6. Modelos geológicos de traçado do raio. ....	77

## Introdução

Na última década as empresas de exploração realizaram um esforço significativo em lâmina d'água e também em objetivos exploratórios mais profundos, particularmente nas margens das bacias sedimentares passivas do tipo Atlântico. Além de expressivas descobertas do Cretáceo Inferior, na seção Pré-Sal Aptiana e de depósitos turbidíticos do Cretáceo Superior, este esforço trouxe mais conhecimento a respeito da distribuição de rochas ígneas tanto nas sequências da seção do Pré-Sal como do Pós-Sal. O efeito da iluminação sísmica não homogênea, de objetivos mais profundos, pode ser consequência da ocorrência mais rasa de rochas de maior impedância que as encaixantes, como no caso das rochas ígneas presentes na seção Pós-Sal siliciclástica da Bacia de Santos. Nestes casos o processamento sísmico, a migração em profundidade, a interpretação e a análise de atributos sísmicos necessitam uma atenção especial na construção de modelos de velocidade, assim como os métodos qualitativos e quantitativos de interpretação que utilizam a variação de amplitude nos objetivos mais profundos afetados por sombras de iluminação (VerWest *et al.*,2001).

A Bacia de Santos iniciou sua evolução durante a separação do paleocontinente Gondwana no Cretáceo Inferior e apresenta uma evolução característica das fases Rifte, Transicional e Deriva de bacias do tipo Atlântico além de eventos magmáticos distintos nos períodos do Albiano, Santoniano, Maastrichtiano, Paleoceno e Eoceno. O magmatismo extrusivo é mais expressivo nas áreas adjacentes ao Alto de Cabo Frio, com a presença de rochas vulcânicas do Albiano até o Eoceno. As falhas normais, associadas aos flancos de sal e altos do embasamento, parecem terem atuado como dutos para as distintas fases de magmatismo intrusivo e extrusivo. De fato, isto sugere que a Bacia de Santos teve sua quiescência interrompida por atividade tectônica durante sua evolução sedimentar.

Neste projeto a metodologia empregada consistiu na construção de modelos sísmicos sintéticos, a partir de uma interpretação sísmica e geológica de um caso real, que reproduzisse os corpos ígneos que causam impacto na escala de resolução sísmica. Foram realizadas as etapas de interpretação sísmica e geológica, a análise de atributos sísmicos calibrados em perfis de poço, a construção dos modelos geológicos para o método de traçado do raio e o estudo de iluminação sísmica através da simulação de amplitude migrada.

A interpretação sísmica regional indicou a presença de uma distribuição quase completa de rochas ígneas em um contexto onde o material magmático foi formado tanto durante como após o preenchimento sedimentar da bacia. Nos baixos da bacia foi possível interpretar complexos de intrusivas e, nos altos do embasamento, foram identificados *mounds* extrusivos, vulcões preservados e fluxo de lavas.

As feições ígneas de elementos arquiteturais distintos como os complexos de *sills* (soleiras), chaminés e vulcões produzem zonas de sombra e um ruído aleatório nos refletores mais profundos. Os *Sills* e os diques podem ser facilmente interpretados no dado sísmico quando possuem impedância mais elevada que a rocha encaixante. O reconhecimento de rochas extrusivas, como produto de fluxo de lavas, pode ser um desafio quando mesclados ou fortemente intercalados com sedimentos. Os vulcões expõem material em pulsos que normalmente se misturam com sedimentos inconsolidados na superfície, resultando em uma sucessão vulcano-sedimentar cujo contraste interno não é detectado pela resolução sísmica. Neste caso a média das propriedades acústicas auxilia na identificação do contraste lateral com a rocha encaixante. Além de intrusões ígneas, dois cones vulcânicos estão preservados na área e, para a caracterização de suas geometrias, foi aplicado um fluxo de trabalho baseado na extração de *geobodies* delimitados através de valores de opacidade da impedância relativa. A validação destes *geobodies* foi confirmada através do atributo geométrico 3D que realça as bordas de corpos descontínuos.

A partir da média das propriedades acústicas e das características geológicas, três classes distintas de fácies ígneas foram identificadas: Extrusivas Vulcano-Sedimentares (EVS), Intrusivas de Alta Impedância (IAI), Fluxo de Lavas Extrusivas (FLE).

O método de modelagem sísmica sintética de propagação utiliza a técnica do traçado de raio e requer a definição de regiões geológicas, na escala da resolução sísmica, e de propriedades acústicas e elásticas contrastantes. Neste trabalho estas regiões foram definidas através dos limites das grandes sequências sedimentares e dos limites dos corpos ígneos a seguir; lâmina d'água (Datum-Fundo do Mar), sobrecarga sedimentar (Fundo do Mar-Topo do Intra-Albiano), o Intra-Albiano, a camada de Sal e todos os corpos ígneos interpretados na sísmica. Este projeto é constituído de duas fases de modelagem; a primeira contou com um modelo mais simples onde foi analisada a influência da presença de sequências vulcano-sedimentares do Paleoceno/Oligoceno e

na segunda fase, foram incorporadas as ígneas extrusivas e intrusivas do Cretáceo no estudo de iluminação da Base do Sal.

O resultado parcial desta primeira fase serviu de insumo para a publicação de um artigo intitulado “*Seismic Interpretation, Attribute Analysis and Illumination Study for Targets below a Volcanic-Sedimentary Succession, Santos Basin, Offshore Brazil*” (Cortez, M.M.M & Santos, M.A.C) na revista Interpretation da SEG na edição de fevereiro de 2016 e também para a defesa do exame de qualificação realizado em agosto de 2015.

A segunda fase de modelagem levou em consideração, além das rochas ígneas intrusivas e extrusivas mais profundas, a incorporação das sequências carbonáticas do Albiano e do Sal, ambas de maior complexidade estrutural e relevantes ao estudo de iluminação da base do sal. No limite da resolução sísmica, ambos os modelos são detalhados o suficiente para tentar reproduzir de forma mais realista possível os problemas de iluminação relacionados à presença de rochas ígneas e a complexidade estrutural dos eventos situados acima da sequência Pré-Sal.

As propriedades acústicas de cada bloco foram estimadas a partir da velocidade intervalar da onda P e da densidade obtidas através dos perfis de poços. A velocidade da onda S foi estimada, ou diretamente atribuída, a partir de estudos de casos análogos pesquisados na bibliografia. No sentido de tentar reproduzir de forma realista a iluminação nos objetivos analisados, foram utilizados os parâmetros similares à geometria de aquisição sísmica convencional a cabo e uma aquisição de ampla distribuição azimutal denominada “*Coil*”.

A metodologia do traçado de raio foi primeiramente empregada na investigação estatística azimutal das direções de máxima incidência dos raios e posteriormente, por construção de frentes de onda, na geração dos atributos sísmicos sintéticos calculados a partir do coeficiente de reflexão. Distintos cenários, com e sem as rochas ígneas do Terciário e do Cretáceo, foram considerados na modelagem para o traçado de raio. Em cada cenário, através da comparação da amplitude simulada migrada com a amplitude extraída do dado sísmico foi possível analisar o efeito parcial e combinado na iluminação dos horizontes alvos.

## 1.0-Descrição dos Dados e da Área de Trabalho.

A Bacia de Santos localiza-se no sudeste da margem continental do Brasil, entre o Rio de Janeiro e Florianópolis, e ocupa uma área aproximada de 350000 km<sup>2</sup>. É uma bacia de margem passiva formada durante a abertura do Oceano Atlântico, com uma grande quantidade de sal Aptiano depositado logo após o final da fase rifte de desenvolvimento da bacia. O movimento do sal e a tectônica tiveram início no Albiano, enquanto a bacia subsidia, e foi intensificado no final do Cretáceo quando uma quantidade expressiva de sedimentos preencheu a mesma como consequência do soerguimento epirogênico da área *onshore* adjacente. O soerguimento é o resultado do arranjo de tectônica de placas do lado Andino, da placa Sul Americana, ocorrido no final do Turoniano. Além do aumento de aporte sedimentar ocorreu o magmatismo, tanto *offshore* como *onshore*, coexistente a este soerguimento (Pequeno, 2006). A figura 1 ilustra a carta estratigráfica da Bacia de Santos.

Segundo Moreira *et al.* (2006) as bacias da margem continental brasileira são classificadas como bacias de margem passiva. Entretanto, nas bacias de Santos e Campos, esta condição foi interrompida por dois principais períodos tectônicos intra e extrabaciais que ocorreram no Santoniano e no Eoceno. A região do Alto de Cabo Frio, no sul da Bacia de Campos e norte da Bacia de Santos, foi bastante afetada por magmatismo. Esses eventos já foram abordados por vários autores tais como: Rangel *et al.* (1990); Mizusaki e Mohriak, (1992); Almeida *et al.* (1996); Oreiro (2002); Burda e Calazans (2001); Oreiro *et al.* (2005 a,b); Thomaz Filho *et al.* (2005); Szatmari (2001,2004).

A área total estudada compreende 1300 km<sup>2</sup> com uma batimetria média de 1.5 km e localiza-se na zona *offshore* da costa brasileira a Nordeste da Bacia de Santos, próxima a uma das principais feições tectônicas do sudeste da margem continental brasileira denominada de Alto de Cabo Frio.

Os dados sísmicos e de poço foram fornecidos pela Agência Nacional do Petróleo no âmbito da pesquisa desenvolvida pela Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil. O dado sísmico compreende 200 km<sup>2</sup> de sísmica 3D e aproximadamente 800 km de linhas sísmicas 2D ambos migrados no domínio pré-empilhamento com a técnica Kirchhoff em tempo.

O limite da área de modelagem sísmica foi definido de modo a incorporar os dados sísmicos 2D das seções semi-regionais que serviram para a extrapolação da interpretação sísmica a partir do dado 3D. As interpretações litológicas e petrofísicas foram realizadas através das informações de amostras de calha e dos perfis de *gamma ray*, densidade, resistividade e sônico de 15 poços. A figura 2 e as tabelas 1 e 2 mostram respectivamente a localização da área de estudo e os dados disponibilizados.

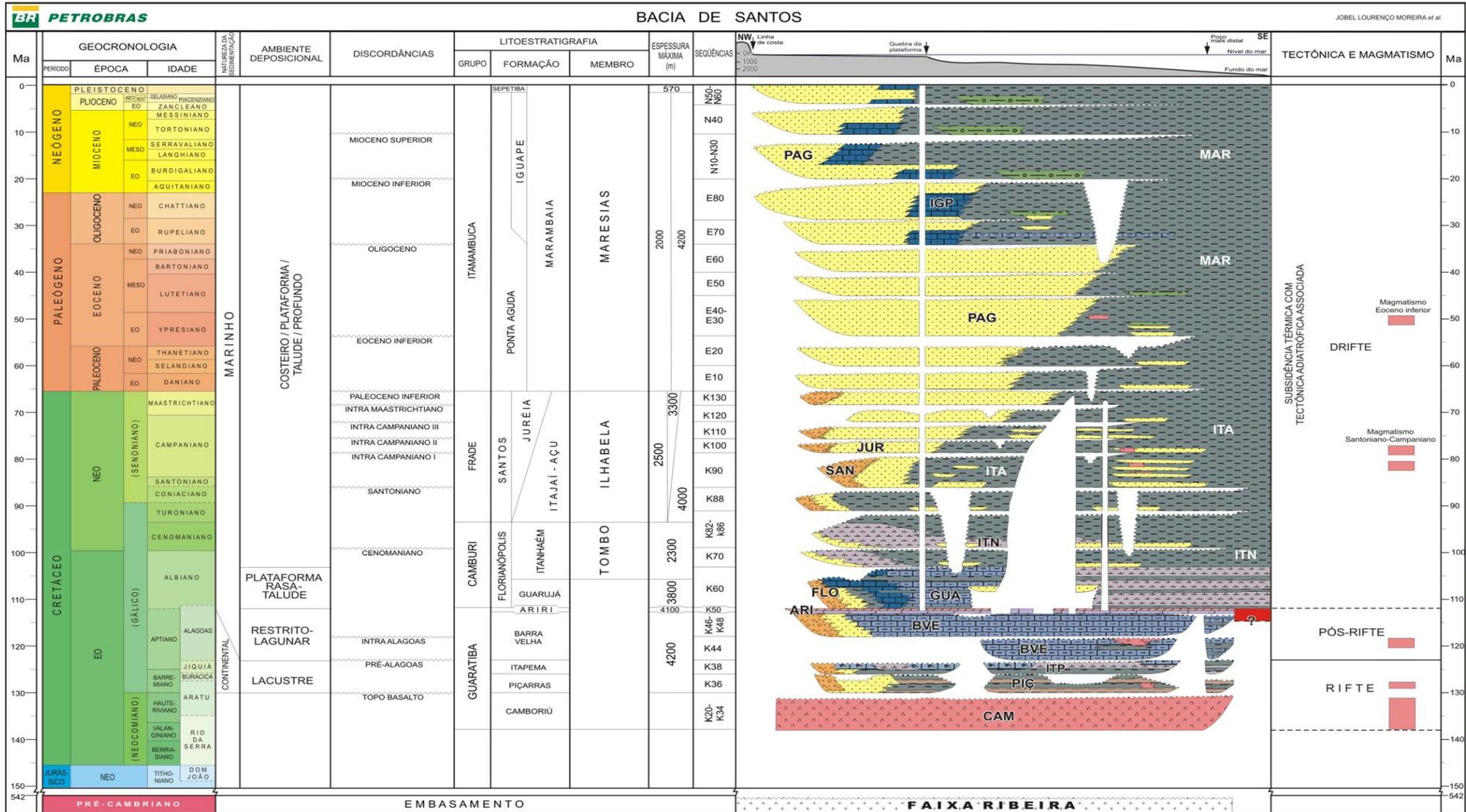


Figura 1. Carta Estratigráfica da Bacia de Santos. Fonte: Moreira *et al.* (2007).

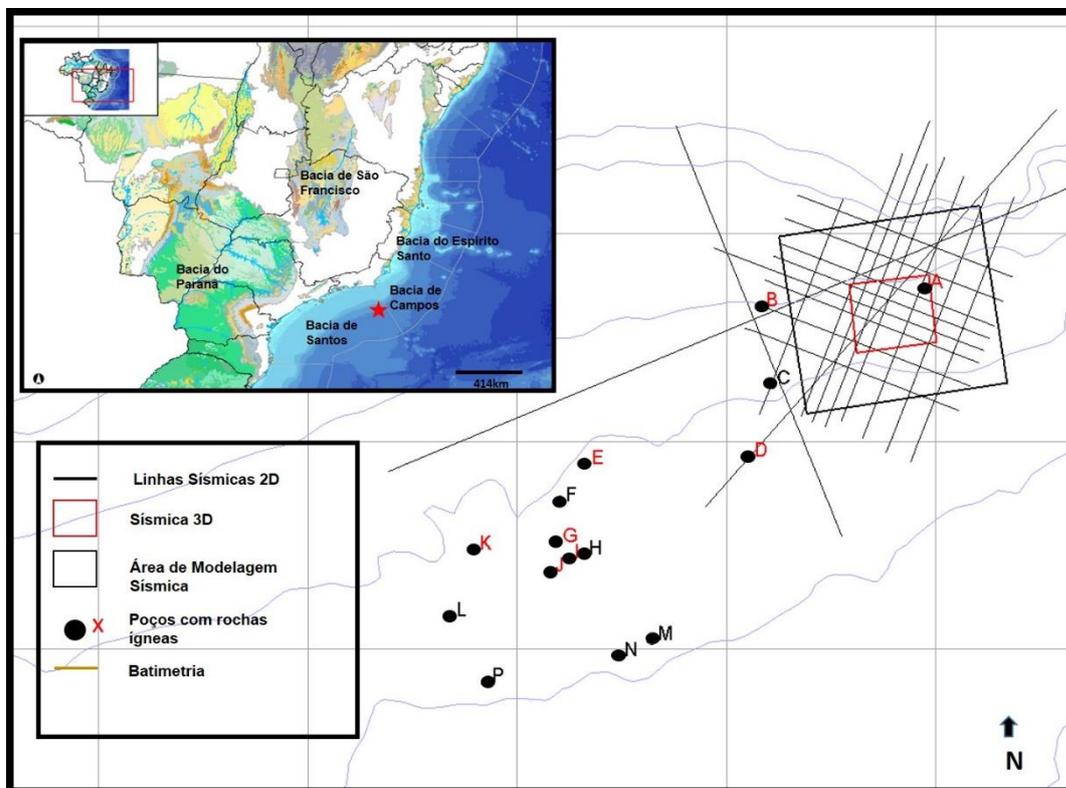


Figura 2. Localização da área estudada e dos dados sísmicos e de poços.

Nome ANP	Nome Projeto
1-BRSA-74B-RJS	E
1-BRSA-130-RJS	F
1-BRSA-137-RJS	L
1-BRSA-557-RJS	A
1-BSS-69_BS	D
1-HESS-1-RJS	B
1-RJS-0539-RJS	I
1-SHEL-4A-RJS	C
1-SHEL-5-RJS	M
2-ANP-1-RJS	P
2-ANP-2A-RJS	N
2-ANP-2-RJS	O
3-BRSA-2A-RJS	J
3-BRSA-19-RJS	G
3-BRSA-342-RJS	K
4-BRSA-451-RJS	H

**Tabela 1. Poços públicos fornecidos pela ANP**

<b>Sísmica 2D</b>	0228_SANTOS_11A.0228-3707.MIG_FIN.1.sgy
	0228_SANTOS_11A.0228-3730.MIG_FIN.2.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1241.MIG_FIN.1.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1243.MIG_FIN.2.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1244.MIG_FIN.3.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1245.MIG_FIN.4.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1246.MIG_FIN.5.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1247.MIG_FIN.6.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1248.MIG_FIN.7.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1249.MIG_FIN.8.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1250.MIG_FIN.9.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1251.MIG_FIN.10.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1252.MIG_FIN.11.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1253.MIG_FIN.12.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1255.MIG_FIN.13.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1256.MIG_FIN.14.sgy
	0250_SANTOS_15F.0250-1257.MIG_FIN.15.sgy
0250_SANTOS_15F.0250-1258.MIG_FIN.16.sgy	
0250_SANTOS_15F.0250-1259.MIG_FIN.17.sgy	
<b>Sísmica 3D</b>	0262_ALTO_CABO_FRIO.3D.MIG_PSTM

**Tabela 2. Dados sísmicos fornecidos pela ANP**

## 2.0-Metodologia de Trabalho

A metodologia de trabalho e pesquisa consistiu basicamente em cinco etapas principais descritas a seguir:

### (1) Preparação e controle de qualidade dos dados sísmicos e de poço.

O dado sísmico empilhado, migrado em tempo antes do empilhamento (PSTM, *Pre Stack Time Migrated*), juntamente com os poços e seus respectivos perfis, foram carregados no *software* Petrel de interpretação sísmica e modelagem geológica. Os dados sísmicos, por terem sido gravados em coordenadas geográficas de latitude e longitude, foram carregados através do posicionamento de linha de tiro e de CDP (*common depth point*) em uma malha sísmica previamente definida com coordenadas métricas cartesianas referenciadas no sistema de projeção Sirgas2000\_UTM23S.

Uma parte dos perfis de poços foi editada e filtrada para emendar as curvas oriundas de corridas de perfilagens sequenciais e também para remoção de dados espúrios. Os perfis sônicos, quando incompletos, foram interpolados a partir da primeira amostra até a cota correspondente ao fundo do mar, com velocidade intervalar da lâmina d'água de 1500m/s mantida constante até o *datum* de cota zero do nível do mar.

### (2) Interpretação e conversão tempo e profundidade dos dados sísmicos.

Os dados sísmicos em tempo PSTM 2D e 3D, após a calibração com os perfis dos sismogramas sintéticos dos poços A e B representados no mapa da figura 2, foram utilizados para a interpretação estratigráfica e estrutural regional. O perfil sônico do poço A (1-BRSA-557-RJS), localizado na área nordeste da sísmica, foi corrigido com as informações de *checkshot* e posteriormente utilizado na calibração com o dado sísmico. A partir da tendência da velocidade intervalar do perfil sônico foi extraída uma função utilizada na construção do modelo de velocidade média de Dicks, aplicada verticalmente traço a traço no volume sísmico 3D, para a conversão tempo-profundidade.

Os dados sísmicos 2D foram convertidos para profundidade a partir da construção de um modelo de velocidade regional, de melhor ajuste aos poços A e D, sendo este último calibrado em uma seção sísmica 2D regional de direção NE-SW.

### **(3) Interpretação e quantificação dos perfis.**

Previamente a interpretação sísmica algumas seções estratigráficas/estruturais foram construídas a partir dos perfis de poço e dos marcadores geológicos (fundo do mar, topo do Cretáceo, topo do Intra-Albiano, topo do Sal e base do Sal). A correlação das principais sequências siliciclásticas compreendidas entre o fundo do mar até o topo da plataforma carbonática do Albiano, da camada de Sal e das ocorrências dos diferentes tipos de rochas ígneas intrusivas e extrusivas, foi determinante na classificação genética e de propriedades acústicas das mesmas.

Definidas as sequências, foram testados os intervalos de correlações dos perfis de *gamma ray*, de densidade, de resistividade e de velocidade intervalar que coincidissem com as ocorrências de rochas ígneas descritas no relatório de acompanhamento de perfuração. Desta forma foram diferenciadas as classes faciológicas de siliciclásticos e carbonatos das fácies correspondentes às rochas ígneas.

### **(4) Construção do modelo geológico para o método do traçado de raio.**

A subárea escolhida para a modelagem sísmica corresponde à área da sísmica 3D, acrescida da interpretação feita na malha das seções 2D, com foco na análise de iluminação correspondente aos alvos representados pelos altos com fechamentos estruturais em todas as direções, do Intra-Albiano e da Base do Sal. A estrutura do topo do Intra-Albiano, localizada na porção centro-oeste da área do 3D, situa-se sobre um diápiro de sal e a estrutura da Base do Sal, espacialmente coincidente e mais estreita, situa-se sobre um alto local do embasamento.

O *software* Norsar utilizado neste projeto, de ampla aplicação comercial e também de pesquisa acadêmica na indústria do petróleo, é uma tecnologia de modelagem sísmica desenvolvida a partir do método do traçado do raio. Comumente aplicada para o planejamento da aquisição sísmica em áreas exploratórias geologicamente complexas, esta tecnologia também tem sido desenvolvida e aplicada em estudos de reservatórios. O *software* Norsar foi utilizado principalmente para a análise de iluminação dos objetivos profundos afetados pela presença de corpos ígneos nas seções rasas e também pela existência de complexidade estrutural da sequência do Albiano e da camada do Sal.

Cenários de menor a maior complexidade geológica, foram construídos para analisar separadamente os efeitos das rochas ígneas e da complexidade estrutural na análise de iluminação, tanto na etapa de modelagem como no traçado de raio. No cenário mais simples somente a camada de Sal foi inserida e, para os cenários

intermediários até o mais complexo, a camada do Intra-Albiano, os corpos ígneos intrusivos e as sequências vulcano-sedimentares do Paleógeno, foram inseridos sucessivamente. Desta forma através do uso de modelos de distintos graus de complexidade geológica, foi possível analisar os efeitos e causas isolados e combinados nas variações de amplitude associadas à intensidade de iluminação.

Nos modelos simplificados foram testadas as geometrias de aquisição convencional a cabo (*streamer*) semelhante a original e para o modelo completo, onde todos os objetos de impacto na iluminação foram considerados, foi testada também a geometria de aquisição de ampla varredura azimutal circular/elíptica denominada *COIL Shooting*. Para testar a resposta destas geometrias de aquisição foi utilizada a técnica de análise estatística azimutal, dos raios de incidência, em pontos de reflexão previamente definidos nos horizontes objetivos.

#### **(5) Estudos de iluminação sísmica.**

No *software* Norsar foram construídos os mapas de amplitude simulada e migrada para um meio isotrópico a partir da refletividade das ondas “P” (compressional) e “S” (cisalhante), calculadas pelo método do traçado do raio. Em cada modelo foram computados mapas de incidência e de amplitude simulada nos objetivos do topo do Intra-Albiano e da Base do Sal. Para entender o efeito de iluminação sísmica em cada caso, os mapas de amplitude simulada foram comparados com a extração de amplitude real *Root Mean Square (RMS)* ao longo dos horizontes de interesse.

### **3.0-Interpretação Sísmica da Área**

A interpretação sísmica 2D regional e 3D da área de interesse, foi realizada com o dado sísmico empilhado em tempo e migrado pelo método Kirchhoff no domínio pré-empilhamento.

O objetivo principal da interpretação 2D foi o reconhecimento das principais sequências estratigráficas, suas heterogeneidades internas e geometrias externas em associação com a distribuição das rochas ígneas. No âmbito regional a caracterização de distintos compartimentos estruturais, e dos locais favoráveis a intrusões e extrusões magmáticas, auxilia na compreensão dos processos e distribuição de rochas ígneas em diferentes escalas.

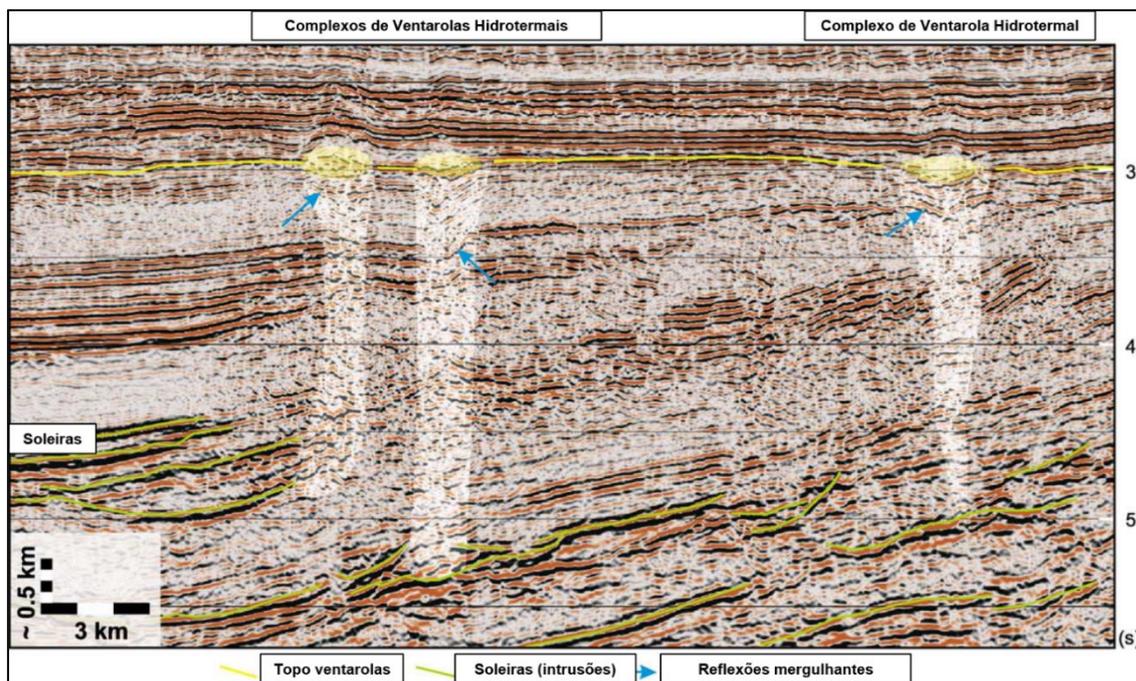
Na interpretação sísmica 3D também foram utilizados atributos sísmicos e métodos de detecção automática para caracterizar, com o maior nível possível de detalhe, os elementos geológicos de interesse ao estudo de iluminação.

#### **3.1-Magmatismo Análogo e sua Expressão na Bacia de Santos.**

Segundo Planke *et al.* (2003), a identificação de depósitos vulcânicos e a compreensão do magmatismo, na evolução da fase rife de uma bacia, são aspectos importantes em exploração de petróleo. Os complexos magmáticos intrusivos podem ter um grande impacto na história evolutiva da bacia e dos sistemas petrolíferos. Durante a ascensão magmática, os efeitos de curta duração incluem a deformação, o soerguimento, a maturação do petróleo, o aquecimento e o metamorfismo das rochas encaixantes e a evaporação dos fluídos com a possibilidade de formação de ventarolas (*vents*) hidrotermais. Os efeitos de longo termo incluem, além do processo de compactação diferencial, a focalização do fluxo dos fluídos e a compartimentação através da “blindagem” da sequência sedimentar devido à presença de sucessões de camadas de rochas ígneas rígidas. Todos estes efeitos descritos produzem uma desordem geológica que, na escala sísmica, aparecem como fácies caóticas geralmente associadas a falhas e fraturas. Nestas regiões além da “desordem” do sinal sísmico, de menor coerência, ocorre atenuação da amplitude e este efeito pode ser erroneamente confundido com sombra de iluminação.

Planke *et al.* (2005) descreveram um conjunto similar de feições nas bacias Vøring e Møre do Mar do Norte. Os autores estudaram o magmatismo de diferentes

idades onde identificaram as seguintes feições no dado sísmico: (1) complexos de *sills* (soleiras) nas sequências mais profundas, (2) trajetórias de fluídos magmáticos e hidrotermais nas regiões de baixa coerência sísmica, e (3) fluxos de lavas extrusivas que encerram o ciclo nas porções mais rasas da bacia. A figura 3 ilustra uma seção sísmica do Mar do Norte onde são ressaltadas a expressão sísmica de *vents* hidrotermais e as respectivas associações ígneas.



**Figura 3. Exemplo de complexos hidrotermais da porção central da Bacia de Vøring** Fonte: Jamtveit *et al.* (2004) in Planke *et al.* (2005). As setas azuis mostram as áreas de baixa coerência sísmica decorrente do faturamento da rocha encaixante causado pela ascensão hidrotermal.

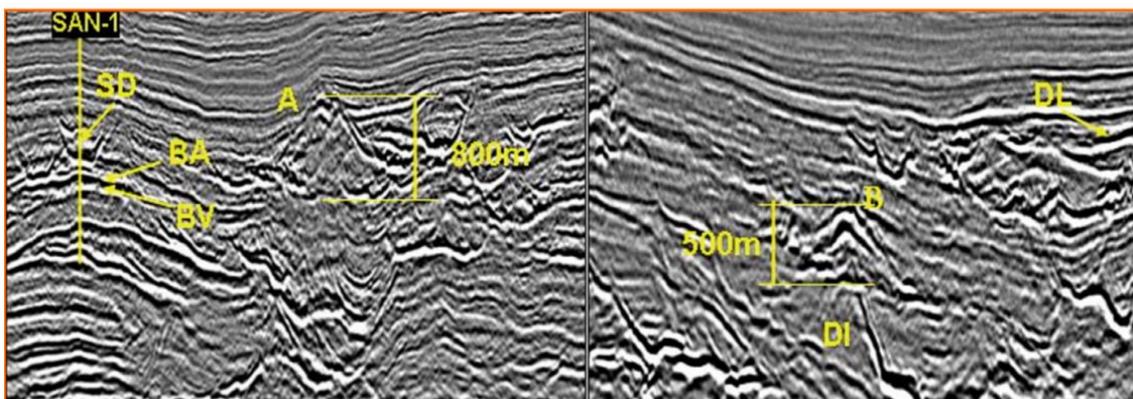
O vulcanismo “volumoso”, de expressão regional, normalmente é associado a uma anomalia de temperatura do manto formada pela ascensão de uma pluma mantélica. Outro modelo considera uma associação muito forte entre tectônica e vulcanismo, quando o rifteamento litosférico pode ocasionar fusão por decompressão. O magma formado por fusão parcial do manto pode migrar em direção à superfície através de um sistema de bombeamento por fases (Gallagher & Dromgoole, 2007). Subsequentemente, este magma ascendente pode se instalar como intrusões profundas ou rasas, chegando a extravasar na superfície e formando vulcões e derrames de lavas (Smallwood & Maresh, 2002). No curto prazo as consequências do vulcanismo

extrusivo são menos extensivas, porém podem causar deformação e sobrecarga nos sedimentos. O impacto de longo termo pode ocorrer devido ao efeito de blindagem na bacia sedimentar influenciando os processos de deformação relacionados com a compactação e a formação de domos e deslizamentos de massa. Como observado por Planke *et al.* (1998) e Reynisson *et al.* (2007), estes depósitos vulcânicos, quando possuem alta velocidade sísmica, obstruem a iluminação sísmica das sequências sotopostas

Durante o processo de ascensão magmática, pode ocorrer a reutilização de um sistema pretérito de fraturamento associado a um complexo de *vents* hidrotermais. A combinação da expressão sísmica dos complexos de soleiras profundas de alta velocidade, de sistemas verticais de fraturamento, de fácies caóticas de baixa coerência, associadas à ocorrência de intrusões menores do tipo vitórias-régias rasas que culminam com extrusões e vulcões preservados, caracteriza um conjunto multifásico de pulsos magmáticos. A incerteza, na interpretação sísmica, das causas da baixa iluminação de objetivos profundos, aumenta consideravelmente quando a região de sombra sotoposta a vulcões e lavas de alta velocidade coincide com uma região fraturada de baixa coerência do sinal sísmico.

Na Bacia de Santos os trabalhos prévios, de carácter regional, publicados por Oreiro (2006) e Moreira *et al.* (2006), serviram de subsídio a interpretação sísmica das rochas ígneas da área deste trabalho. Os autores descreveram em detalhe o magmatismo de  $82 \pm 1$  Ma, do intervalo Santoniano-Campaniano, identificado através da presença de cones vulcânicos, diques e fluxos de lava. Os cones vulcânicos possuem uma área média de  $25 \text{ km}^2$  e altura aproximada de 700m. As fácies sísmicas variam de transparentes (sem reflexões) a descontínuas, dispostas em mosaico, e de forte contraste de amplitude. Os fluxos de lava se distinguem dos sedimentos por contraste positivo de impedância, seguido de um contraste negativo (figura 4). Este padrão é associado, no topo, por basaltos amigdalóides de baixos valores de *gamma ray*, altas resistividades e densidades, e velocidade intervalar de 4500m/s. Na base desta sucessão ocorrem brechas vulcanoclásticas com baixos valores de *gamma ray*, baixas resistividades e densidades, e velocidade acústica de 3400m/s. Segundo estes autores é comum observar diques de alta impedância, do magmatismo Santoniano, em sedimentos Albo-Cenomanianos. Algumas soleiras do Eoceno apresentam forma típica de vitória régia e possuem baixos valores de *gamma ray*, elevadas resistividades e densidades, com uma velocidade acústica de 4500m/s.

Oreiro (2006) descreveu os eventos magmáticos do Cretáceo-Superior e do Terciário através das interações com o preenchimento sedimentar na região do Alto de Cabo Frio. O mesmo autor também mencionou a ocorrência conspícua do magmatismo intrusivo e extrusivo da Bacia de Santos durante os períodos Santoniano e Eoceno, com o pico de atividade neste último.



**Figura 4. Rochas Ígneas no Norte da Bacia de Santos. Seção pós-sal constituída por um grupo de seqüências siliciclásticas com cones vulcânicos (A), soleiras de diabásio (SD), intrusões (DI) e derrames de lava (BA e BV). Fonte: Moreira, J. (2006)**

Neste trabalho, a interpretação sísmica das rochas ígneas intrusivas e extrusivas, com geometria característica e de forte contraste de amplitude, teve como suporte a interpretação realizada nestes trabalhos citados da Bacia de Santos e do Mar do Norte. Através da calibração sísmica-poço, estas fácies ígneas foram interpretadas e suas propriedades acústicas foram estimadas através dos perfis, auxiliando na determinação e compreensão da expressão sísmica das mesmas. Do conjunto de poços disponibilizados, somente os poços A e D (1-BRSA-557-RJS e 1-BSS-69-BS respectivamente) possuem amostras de rochas de testemunhos, descrição de amostras laterais e de lâminas. As medidas radiométricas não foram disponibilizadas e, a idade de formação das assembleias de rochas ígneas, foi interpretada principalmente com base nas relações estratigráficas observadas no dado sísmico. A expressão “no Albiano”, aqui empregada, significa uma intrusão discordante que se formou quando as rochas já haviam sido depositadas e a expressão “do Albiano”, evidencia uma deposição de ígneas concomitante e, na maioria dos casos, representadas por eventos magmáticos extrusivos e concordantes com o mergulho deposicional.

### 3.2-Calibração Sísmica-Poço.

Na área de estudo foi possível calibrar os poços A (1-BRSA-557-RJS) e D (1-BSS-69-BS) com os dados sísmicos 3D e 2D respectivamente. No poço A primeiramente fez-se a correção do perfil sônico através do ajuste de tendência obtida pela curva de *check-shot*. Este método de correção objetiva adicionar a tendência do aumento da velocidade, com a profundidade, capturada pela aquisição tipo *check-shot*, onde os receptores instalados em cotas pré-definidas dentro do poço registram a amplitude de tiro de fontes acústicas, situadas em superfície, próximas ao mesmo. A tendência do perfil sônico original é extraída e ajustada aos pontos de registro de tempo de trânsito e de profundidade, sendo posteriormente somada ao resíduo do sônico original. De posse do perfil sônico corrigido calculou-se a curva de velocidade intervalar, no intervalo de amostragem de 0.2 m, e a velocidade média obtida a partir da integração do tempo de trânsito. A figura 5 ilustra a sequência de passos necessários deste a correção do perfil sônico até a geração da curva e a função de velocidade média estimada.

A tabela tempo-profundidade ajustada ao *checkshot* foi utilizada para a calibração do sismograma sintético. Este último foi construído através da convolução de um pulso (*wavelet*), extraído estatisticamente do dado sísmico, com a função refletividade (derivada da impedância) que foi calculada através dos perfis de densidade e da velocidade intervalar do perfil sônico corrigido. As etapas desta calibração são ilustradas na figura 6 onde se observa uma boa calibração do sismograma sintético com o dado sísmico.

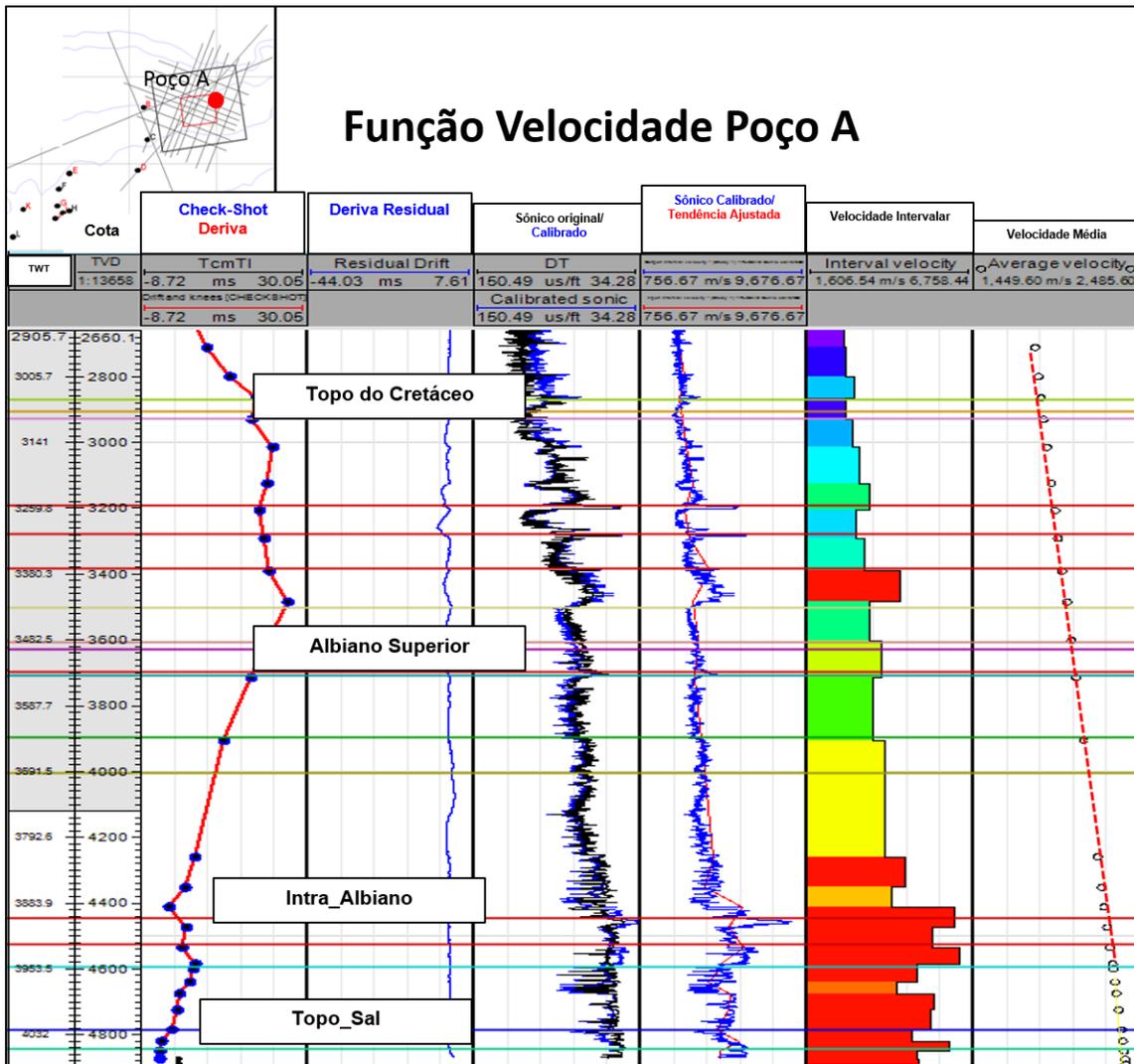


Figura 5. Perfis de velocidades intervalar e média do poço chave “A” (1-BRSA-557-RJS) da área de trabalho, construídos a partir do perfil sônico ajustado.

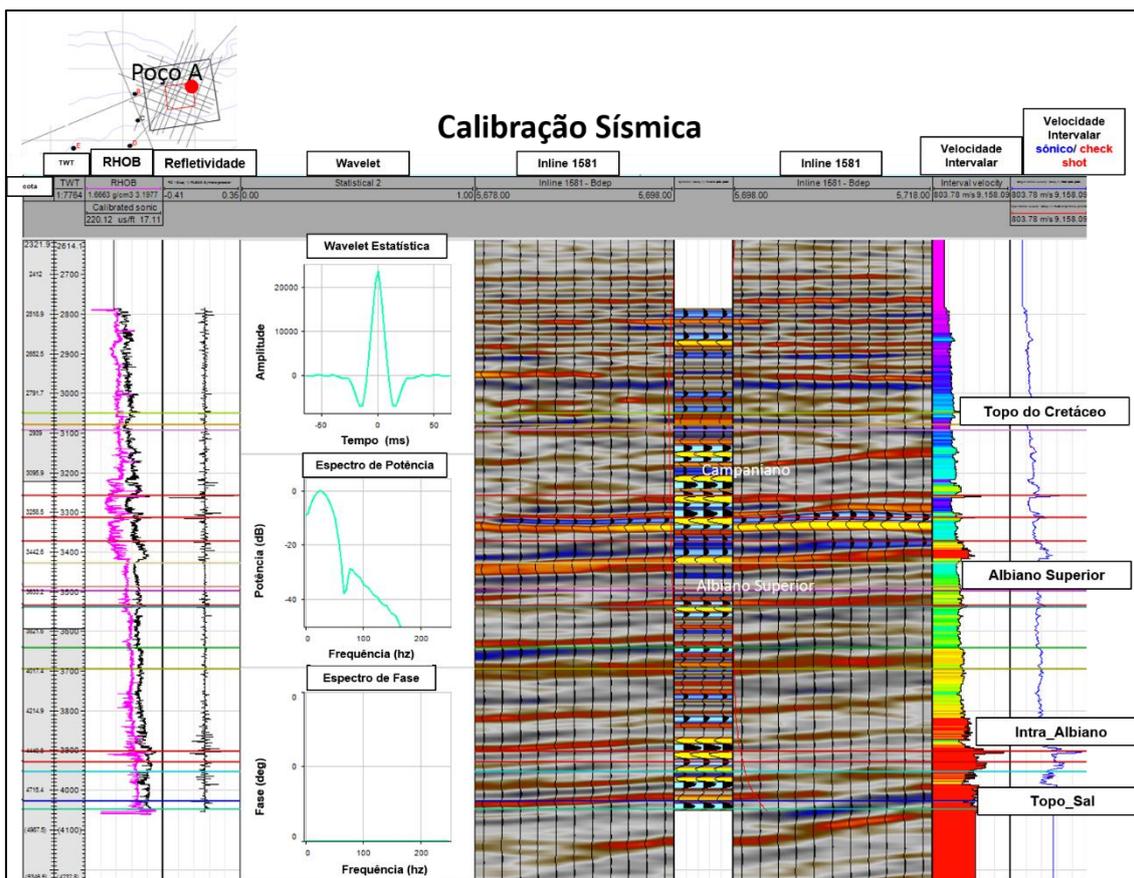


Figura 6. Calibração sísmica do poço A com a sísmica 3D da área de trabalho.

Outro poço importante na calibração foi o poço D (1-BSS-69-BS) cujo ajuste possibilitou a extrapolação da função velocidade do poço A para além do domínio da sísmica 3D. No perfil sônico original do poço D calculou-se a velocidade intervalar e, a partir da primeira amostra, fez-se a interpolação até o valor de 1500m/s (velocidade da lâmina d'água) sendo este valor mantido constante até o *datum*. Através da função tempo-profundidade foi ajustado o sismograma sintético calculado com a função refletividade extraída do perfil sônico (derivada da velocidade intervalar) convolvida com uma *wavelet* Ricker de fase zero. Na figura 7 são ilustrados os perfis, a calibração com o dado sísmico 2D e a função da velocidade média até o topo do Sal. Interessante observar que o gradiente de velocidade das funções dos poços A e D são muito próximos o que permite a extrapolação desta função para toda a área de interesse englobando tanto a sísmica 3D como as seções sísmicas 2D regionais.

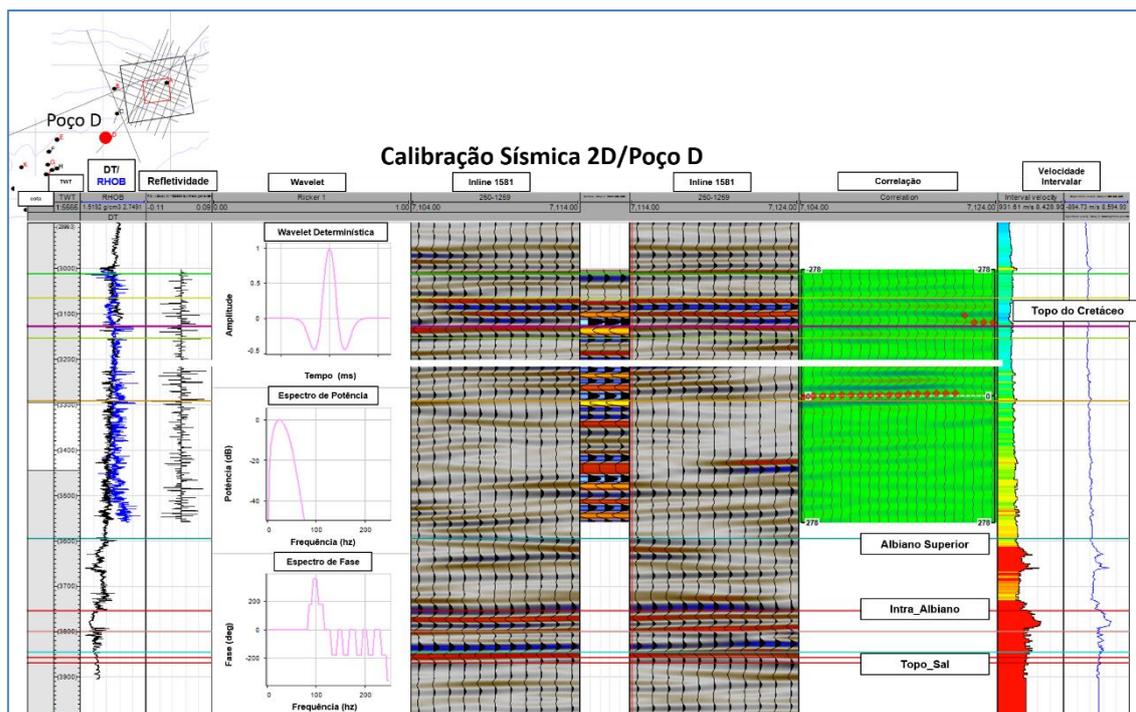


Figura 7. Calibração sísmica do poço D com a sísmica 2D da área de trabalho.

### 3.3-Interpretação Sísmica Estratigráfica e Estrutural

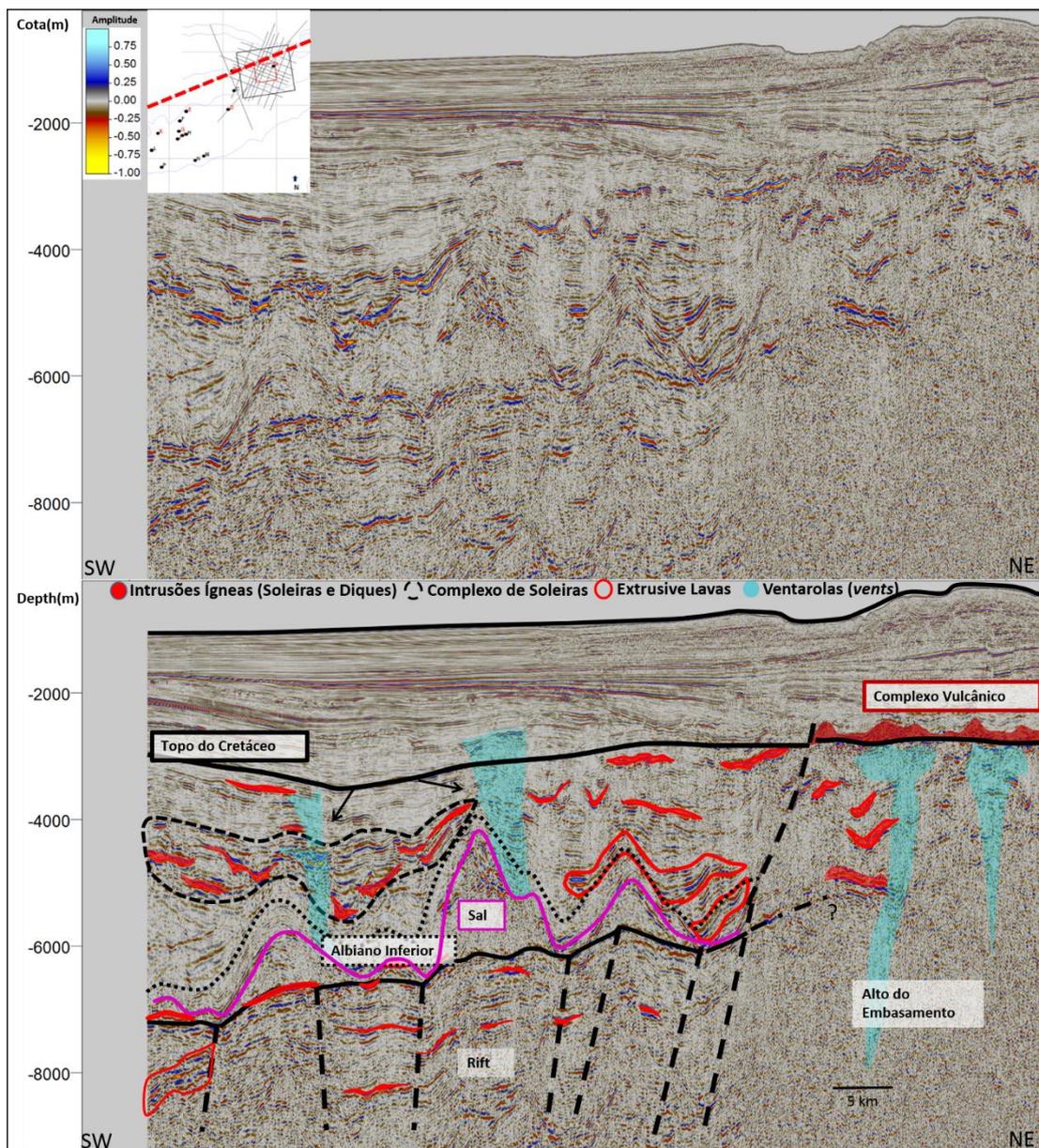
A seção rifte apresenta baixa razão sinal/ruído o que dificulta o reconhecimento dos horizontes e das falhas e, apesar disso, foi possível interpretar a presença do alto do embasamento e algumas intrusões ígneas associadas. A Base do Sal é mapeada com um pico de amplitude positiva configurando um fechamento estrutural na região centro-oeste sobre um alto local do embasamento.

Nas áreas de grandes espessuras do Pós-Sal, o Topo do Sal apresenta um pico de amplitude negativa, onde sua impedância é mais baixa que os sedimentos sobrepostos de alta densidade. A amplitude positiva característica do topo do sal aparece nas porções mais rasas onde a sobrecarga sedimentar é menor. O Albiano Superior é composto principalmente por carbonatos finos, enquanto que o Albiano Inferior é formado por calcarenitos de elevada velocidade intervalar.

As camadas de siliciclásticos argilosos, intercalados com arenitos, compõem o intervalo entre o Albiano e o topo do Cretáceo. Esta sucessão apresenta um espessamento e aumento da razão areia/folhelho de modo ascendente. Na seção do Terciário a intercalação de arenitos e margas, do talude e da bacia profunda, caracteriza

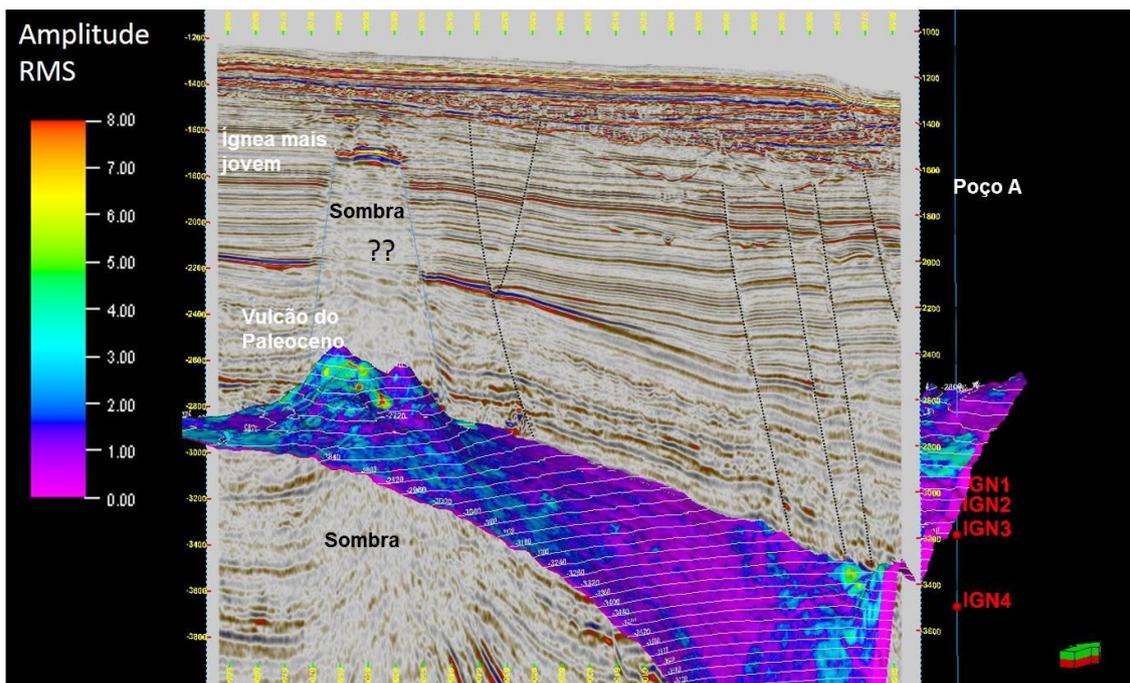
o intervalo entre o Paleoceno e o Oligoceno. Em sequência, uma sucessão de facies lamosas preenche o restante da bacia.

Uma representação esquemática mostrada na figura 8 ilustra a interpretação sísmica 2D regional com as principais sequências do Cretáceo e as feições ígneas reconhecidas na área. A partir de Sudoeste para Noroeste o embasamento torna-se mais raso e a natureza dos corpos ígneos muda em proporção de complexos de *sills* (soleiras) para os tipos ígneos extrusivos. *Sills* esparsos, diques e intrusões do tipo vitória-régia tornam-se pequenos a partir da base da seção Albiana para o topo do Cretáceo, onde o limite da sequência erosiva, em certas áreas, é similar ao limite superior de geometrias típicas de *mounds* associados a escapes hidrotermais.



**Figura 8.** Interpretação sísmica de uma seção semi-regional “Chave” da área de trabalho.

Duas sucessões de vulcões e fluxo de lavas intercaladas com sedimentos, de espessura média total de 225 metros, compõem o evento magmático extrusivo da transição do Paleoceno-Eoceno. Abaixo destas sucessões vulcano-sedimentares observam-se regiões com expressão sísmica de baixa coerência, caracterizadas por fácies caóticas e zonas de sombra de amplitude, causadas pelo espalhamento do sinal sísmico, nas interfaces entre as rochas magmáticas e os sedimentos siliciclásticos (figura 9). Um dos principais objetivos deste estudo de iluminação é entender e quantificar este efeito de sombra, e da baixa coerência da amplitude, nas sequências sotopostas a estas sucessões extrusivas.



**Figura 9. Exemplos, na área de trabalho, de zonas de sombra e/ou baixa coerência do sinal sísmico abaixo de corpos ígneos extrusivos.**

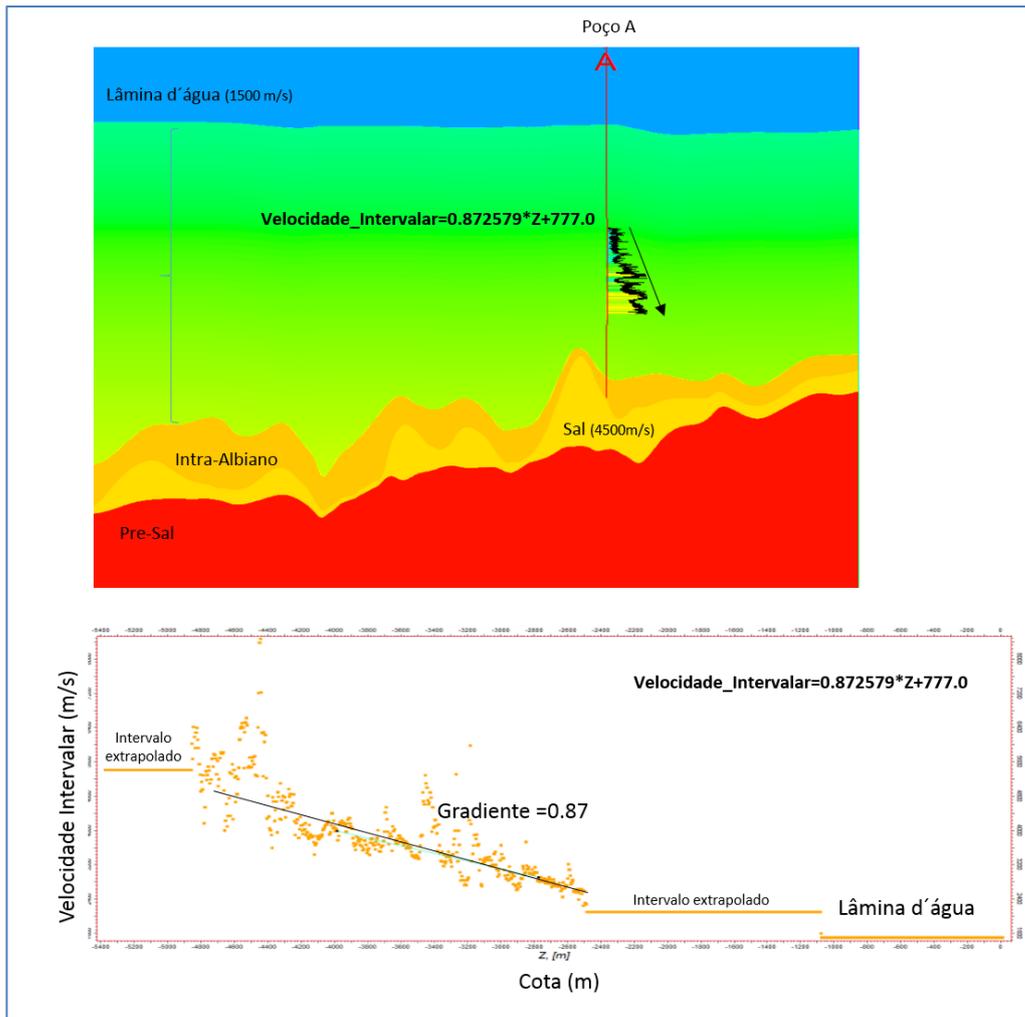
Na seção do Albiano foram interpretadas feições extrusivas em reflexões de fortes contrastes de impedância e paralelas ao acamamento. Estes corpos foram calibrados nos perfis do poço A (1-BRSA-557-RJS) e descritos em amostras de calha como rochas ígneas e os demais corpos ígneos, interpretados entre o topo do Albiano até o topo do Cretáceo, foram reconhecidos como intrusões de diabásio. No dado sísmico estas intrusões ígneas (soleiras), de alta amplitude, tiveram o topo e a base interpretados de forma discordante ao acamamento. Outra feição intrusiva relevante ao estudo de iluminação foram as “vitória-régias”, definidas por um centro circular com bordas abruptas, causadoras de difrações localizadas e que se somam ao sinal sísmico.

### **3.4- Conversão Tempo-Profundidade.**

Os horizontes regionais interpretados foram usados para definir as camadas do modelo de velocidade intervalar que posteriormente, convertido para velocidade média pelo método de Dix, foi utilizado tanto na conversão tempo-profundidade como para a modelagem sísmica. A velocidade da coluna d’água utilizada foi de 1500m/s e para o

modelo de velocidade, entre o fundo do mar e o topo do Intra-Albiano, foi utilizada a interpolação das funções lineares de velocidade média dos poços A e D com gradiente igual a 0.87. No intervalo do Albiano Inferior até o Topo do Sal foi calculado o gradiente de velocidade igual a 0.34 (figura 10). Do topo da camada de Sal até a profundidade máxima do modelo foi utilizada a velocidade de 4500m/s, uma vez que o horizonte mais profundo de interesse é a Base do Sal.

Após a conversão tempo-profundidade do volume sísmico 3D de amplitude, o mesmo foi utilizado como dado de entrada para a extração e investigação de vários atributos que auxiliaram na interpretação de detalhe da distribuição e geometria corpos ígneos. As figuras 11 e 12 mostram respectivamente os poços A e D calibrados nos dados sísmicos convertidos para a profundidade. Nas figuras 13 a 16 são mostrados os mapas regionais convertidos para profundidade e a figura 17 ilustra, em perspectiva, os topos dos corpos ígneos e da camada de Sal mapeados através da integração dos dados sísmicos 2D e 3D.



**Figura 10. Função velocidade média definida para a conversão tempo-profundidade.**

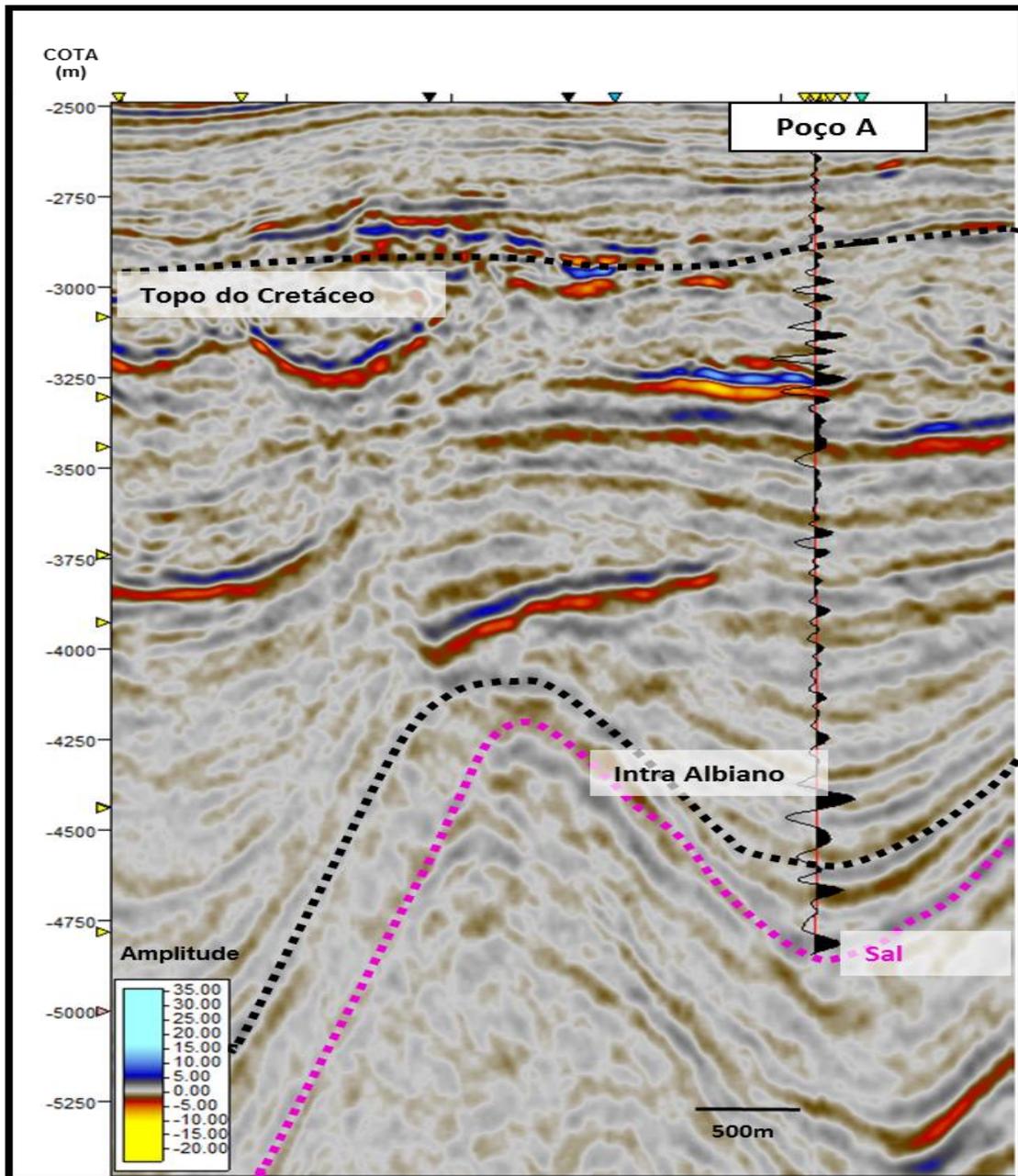
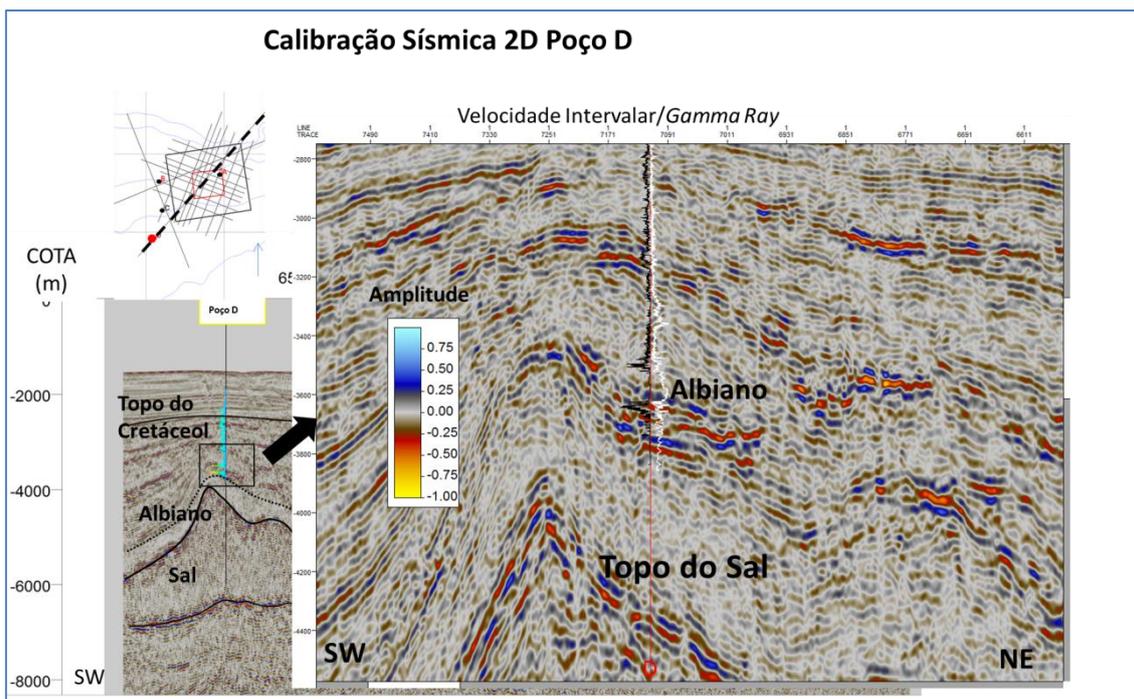


Figura 11. Seção sísmica *inline* convertida para profundidade e calibrada com o sismograma sintético do poço A.



**Figura 12. Seção sísmica 2D, de direção NE-SW, convertida para profundidade e calibrada com o poço D.**

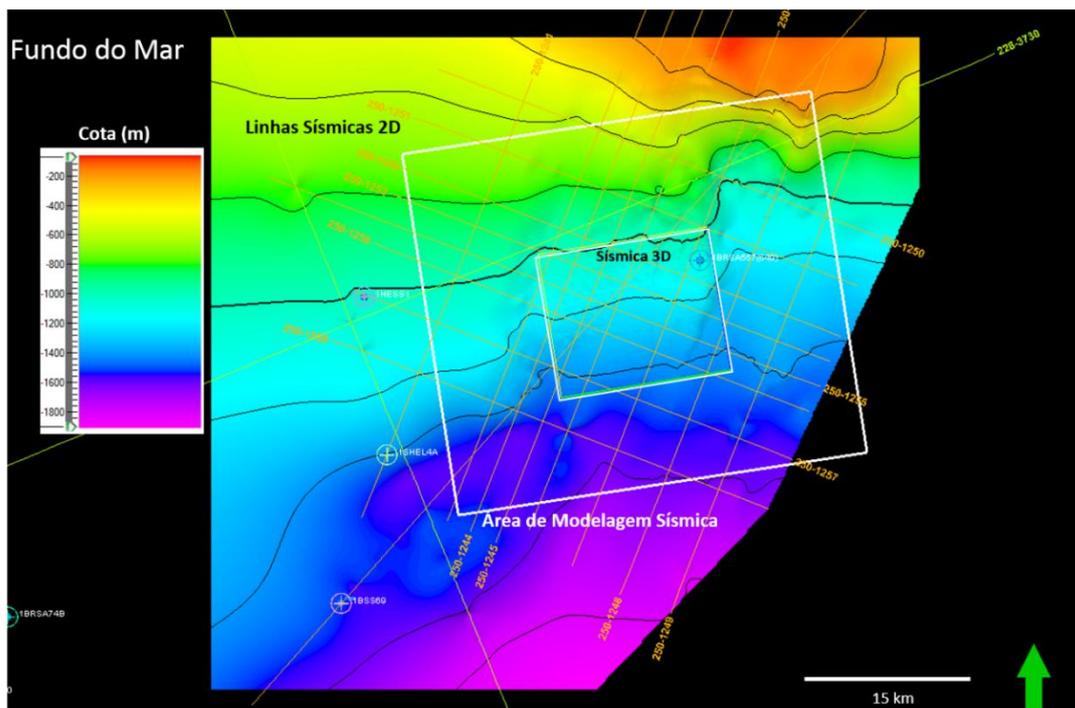


Figura 13. Mapa regional em profundidade do fundo do mar. As linhas sísmicas 2D são representadas na cor laranja.

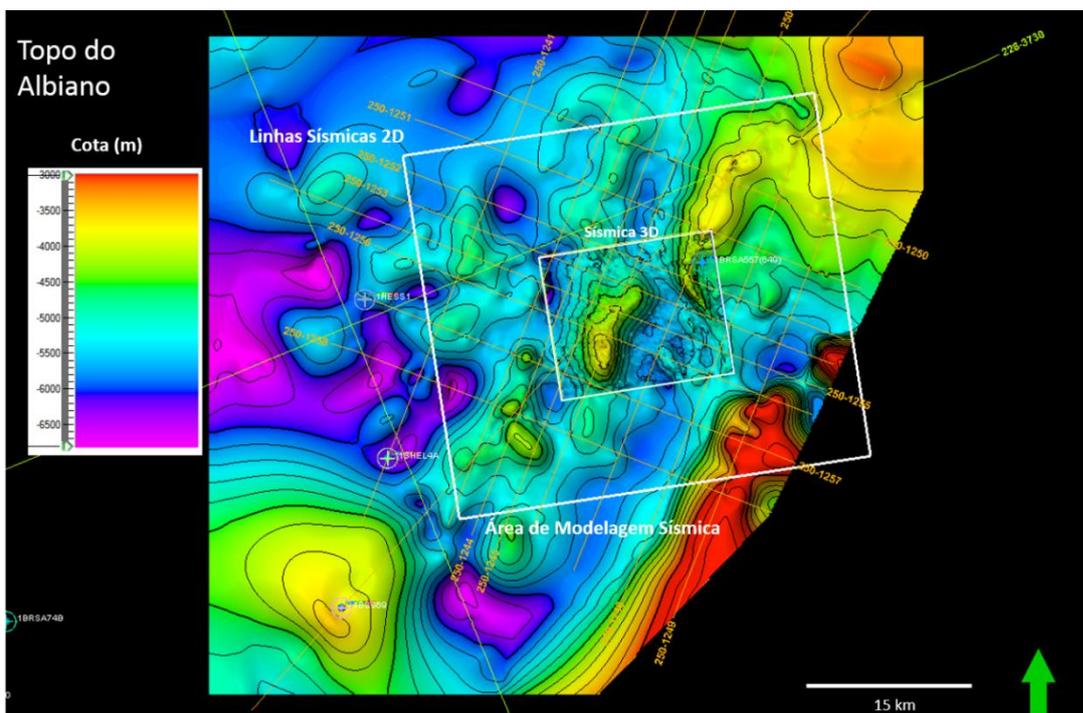
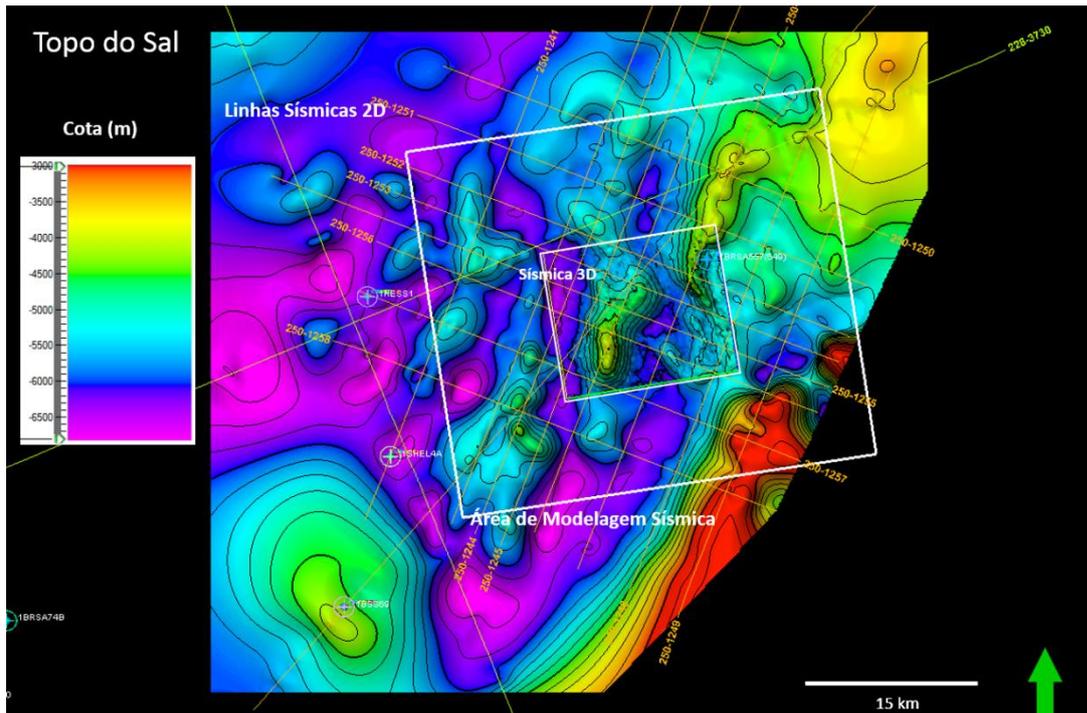
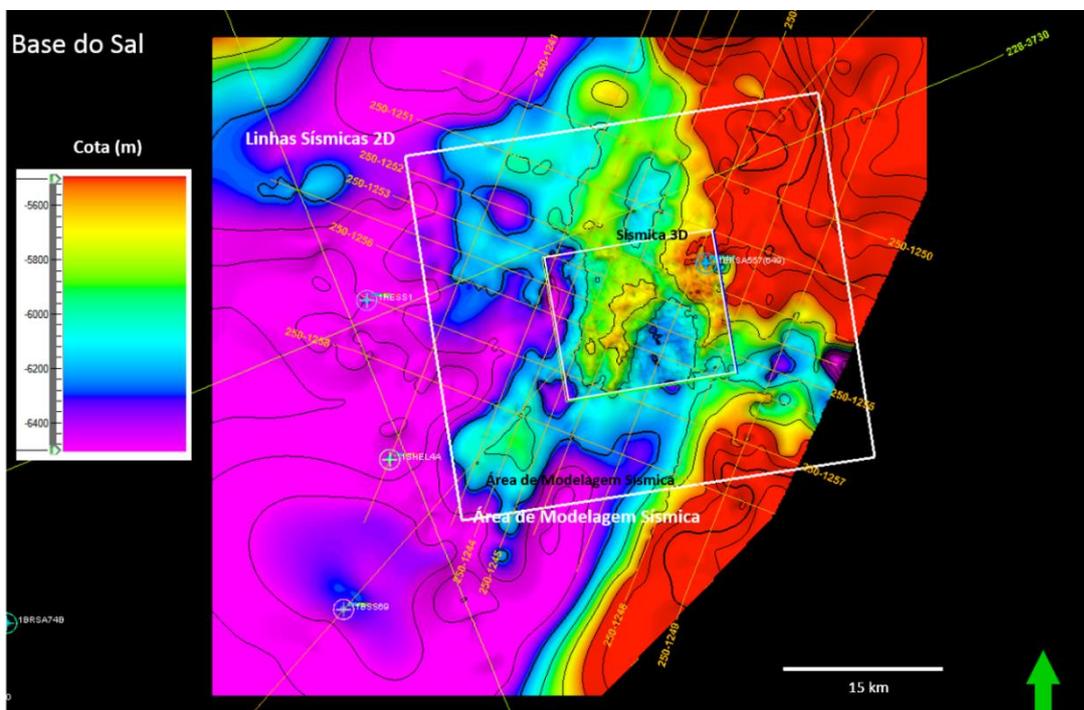


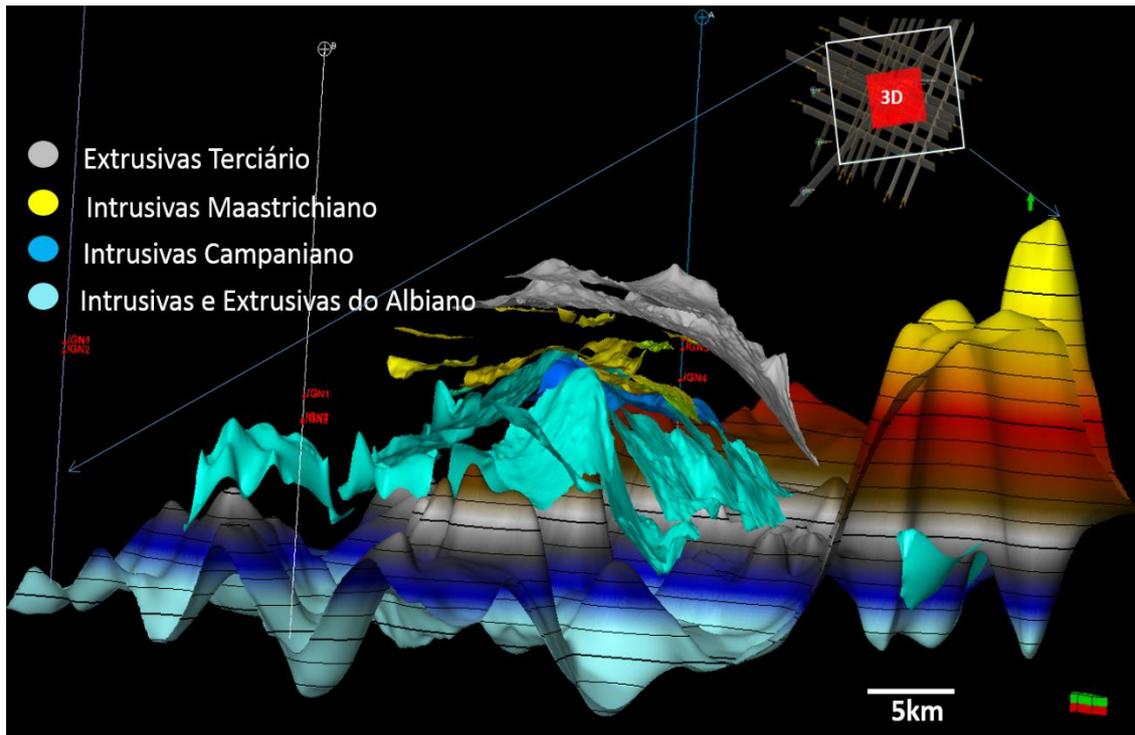
Figura 14. Mapa regional em profundidade do topo do Intra-Albiano. As linhas sísmicas 2D são representadas na cor laranja, o retângulo menor representa a área da sísmica 3D e o retângulo maior a área de interesse de modelagem sísmica.



**Figura 15.** Mapa regional em profundidade do topo do sal. As linhas sísmicas 2D são representadas na cor laranja, o retângulo menor representa a área da sismica 3D e o retângulo maior a área de interesse de modelagem sísmica.



**Figura 16.** Mapa regional em profundidade da base do Sal. As linhas sísmicas 2D são representadas na cor laranja, o retângulo menor representa a área da sismica 3D e o retângulo maior a área de interesse a modelagem sísmica.



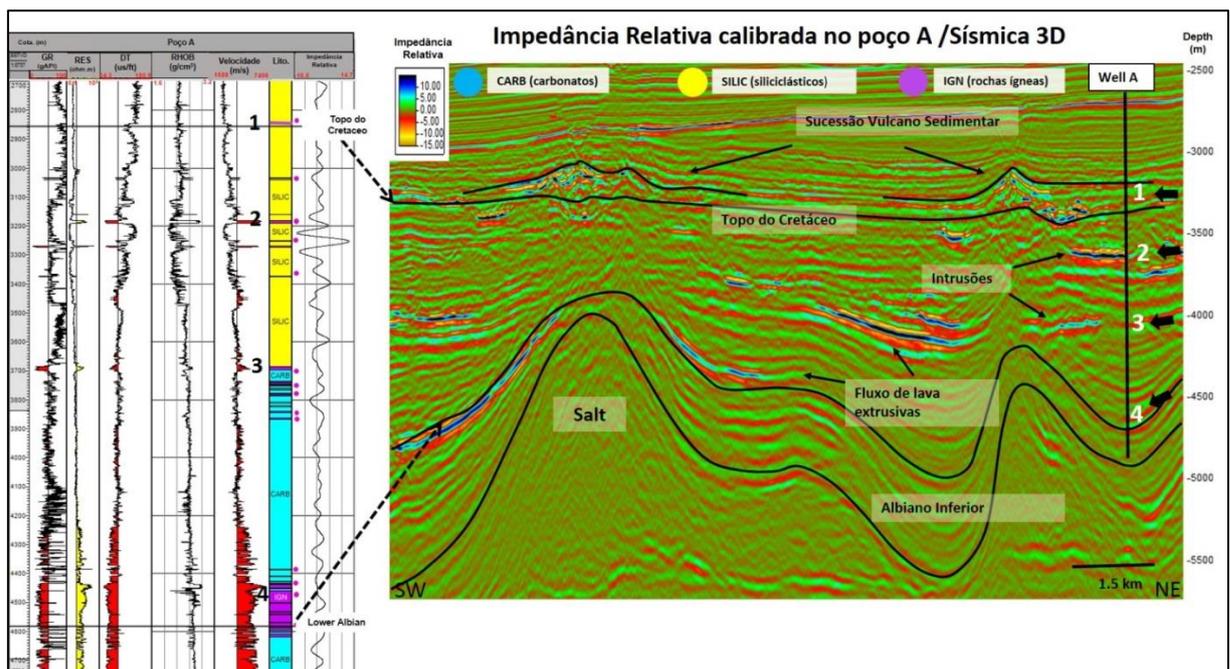
**Figura 17. Representação em perspectiva das superfícies do topo dos corpos ígneos e da camada de Sal a partir da integração da interpretação dos dados sísmicos 2D e 3D.**

### 3.5-Detecção dos Corpos Ígneos com Atributos Sísmicos 3D.

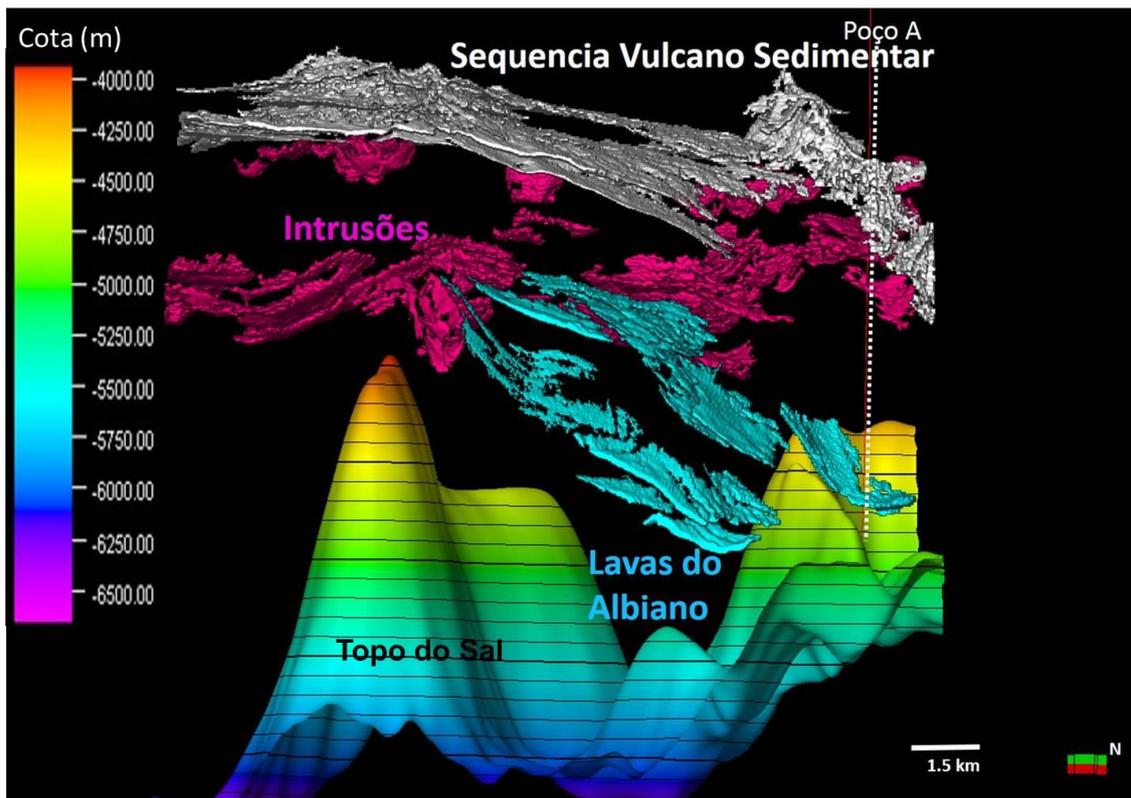
Neste trabalho, os atributos sísmicos foram bastante relevantes para delimitar a geometria externa dos corpos ígneos, que são o alvo principal de estudo e constituem parte do modelo geológico utilizado no estudo de iluminação dos objetivos mais profundos.

Os corpos ígneos identificados na amplitude sísmica foram individualizados tridimensionalmente através da extração de subvolumes geológicos (*geobodies*) a partir intervalos pré-definidos na curva de opacidade do volume de impedância acústica relativa calibrada no perfil de impedância do poço A (figuras 18 e 19). Na figura 18 as principais ocorrências de rochas ígneas indicadas pelos números de 1 a 4 nos perfis e na seção de impedância relativa, mostram a associação dos diferentes tipos de corpos ígneos e sua distribuição na estratigrafia. O tipo 1, mais raso, é interpretado entre o Paleoceno e o Eoceno e representado de forma conspícua na seção sísmica por duas sucessões vulcano-sedimentares. O poço A, na posição em que foi perfurado, atravessou somente uma pequena espessura de rochas ígneas associadas a este evento extrusivo. As

rochas ígneas, correspondentes aos números 2 e 3, são intrusões de diabásio que ocorrem entre o topo do Intra-Albiano e o topo do Cretáceo. As rochas ígneas indicadas pelo número 4, interpretadas como extrusões do Albiano, são quase imperceptíveis na seção sísmica devido ao baixo contraste com os carbonatos de alta velocidade. Na figura 19 onde são mostrados em perspectiva os *geobodies* dos corpos ígneos, é mais fácil separar os domínios das sequências vulcano-sedimentares mostrados na cor cinza claro, dos corpos intrusivos representados pela cor magenta e das extrusões mais profundas na cor azul. Importante ressaltar aqui que o poço A, apesar de ser muito importante no reconhecimento destes distintos eventos, não atravessou as maiores espessuras destes corpos. Também na figura 19 é possível visualizar as intrusões do tipo vitória-régia, de menor porte, situadas próximo ao topo do Cretáceo e da base das sequências vulcano-sedimentares. Estes corpos, apesar de serem comparativamente pequenos, produzem um efeito bastante destrutivo na imagem sísmica dos eventos sotopostos.



**Figura 18. Principais ocorrências de rochas ígneas interpretadas nos perfis do poço “A” e no dado sísmico de impedância relativa: 1-extrusivas, 2 e 3, intrusivas e 4 extrusivas.**



**Figura 19. Geobodies dos corpos ígneos extraídos automaticamente a partir da curva de opacidade do dado de Impedância Relativa.**

No sentido de validar a dimensão e a geometria dos *geobodies*, extraídos a partir do volume de opacidade da impedância relativa, foi verificada a correlação deste atributo e da amplitude com um atributo geométrico 3D computado no *software* Petrel.

Segundo Jain *et al.* (1988), em uma imagem qualquer, as bordas representam mudanças locais significativas e tipicamente ocorrem no limite entre duas regiões distintas. A mudança local na intensidade de uma imagem normalmente é associada a uma descontinuidade, tanto no valor medido como na sua derivada primeira. As descontinuidades podem ter a forma de escada, onde o valor da intensidade muda de um valor em um lado da descontinuidade para um valor diferente no lado oposto, ou podem assumir a forma de linha quando a intensidade muda e retorna para o valor inicial na curta distância. Se o conteúdo de frequência do sinal não for suficientemente elevado para resolver feições de “curta distância”, então as formas de escada e de linha podem aparecer como rampas e triângulos. Um algoritmo detector de borda identifica pontos ou fragmentos de descontinuidades e, os une e alinha, nas direções de menor variabilidade e desta forma, ortogonalmente, se obtém a maior variabilidade de intensidade da propriedade. Um algoritmo de detecção de borda contém três passos: a

filtragem de ruídos, a detecção de descontinuidades realizada através do cálculo de gradiente da magnitude e a definição de valores de corte do gradiente para filtragem de valores espúrios. Em alguns casos, aplica-se uma estimativa de localização e orientação das bordas baseada em distribuição de probabilidades.

Em interpretação sísmica a detecção de borda pode ser utilizada tanto para identificar os limites dos corpos contrastantes com as rochas encaixantes, como para detectar falhas e fraturas. A maioria das rochas ígneas é identificada pelas bordas que são marcadas por forte contraste de amplitude e, um atributo geométrico de detecção, pode realçar os limites das descontinuidades não observáveis no dado de amplitude. Os ruídos sísmicos, as marcas de aquisição sísmica e também as bordas de sombra de iluminação podem ser ressaltadas em um atributo de detecção de borda. Por esta razão este tipo de atributo deve ser utilizado em conjunto com os atributos de intensidade, como a própria amplitude e a impedância, para averiguação do sentido geológico da interpretação.

Muitos algoritmos de detecção de borda foram desenvolvidos com base em distintos critérios de seleção das amostras utilizadas no cálculo do gradiente. O atributo geométrico *3D Edge Detection* (Petrel), utilizado neste trabalho, baseia-se no conceito de detecção de borda ou descontinuidade ressaltada e opera em volumes que representam a variabilidade ou a variância da amplitude. O algoritmo corresponde a um teste estatístico que busca a evidência de bordas ou cristas nas imagens sísmicas de amplitude, testando diferentes orientações na busca de um segmento de linha que passa por pontos de interesse. O resultado deste teste estatístico é um valor “z” que representa uma aproximação da classificação de uma soma padrão normalizada.

A partir deste resultado z-estatístico calcula-se o valor P (métrico), que indica a probabilidade de algo parecer como uma linha em uma imagem de carácter aleatório. Esta aproximação objetiva simultaneamente suprimir os efeitos do ruído e localizar a borda de forma acurada. O resultado  $-\log(P(z))$  fornece um significado métrico direto sendo os valores altos associados as descontinuidades.

A figura 20 mostra, em uma seção sísmica NE-SW, os *geobodies* dos corpos ígneos transferidos para o *grid* sísmico e sobrepostos ao dado de amplitude. A figura 21 mostra uma seção NE-SW do atributo *3D Edge Detection* com a interpretação dos topos das rochas ígneas extraídas a partir dos *geobodies*.

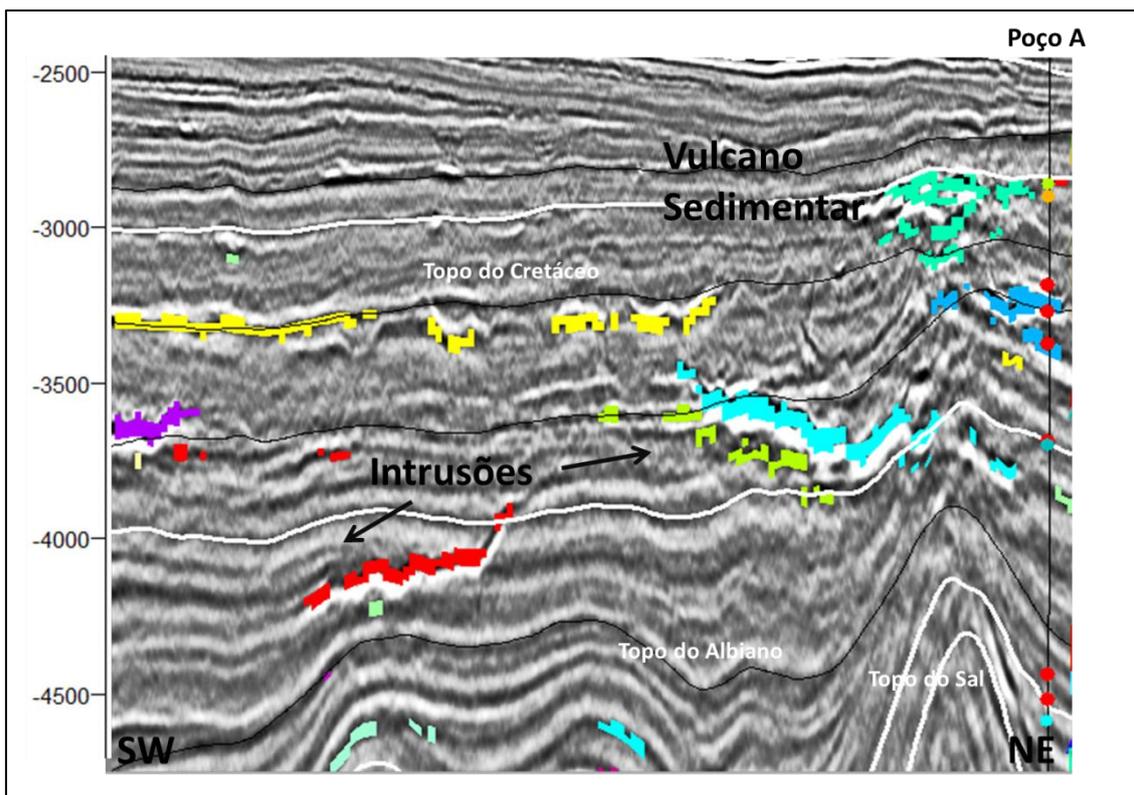


Figura 20. *Geobodies* dos corpos ígneos transferidos para o *grid* do dado sísmico 3D. Seção *inline* do dado sísmico de amplitude calibrada no poço A.

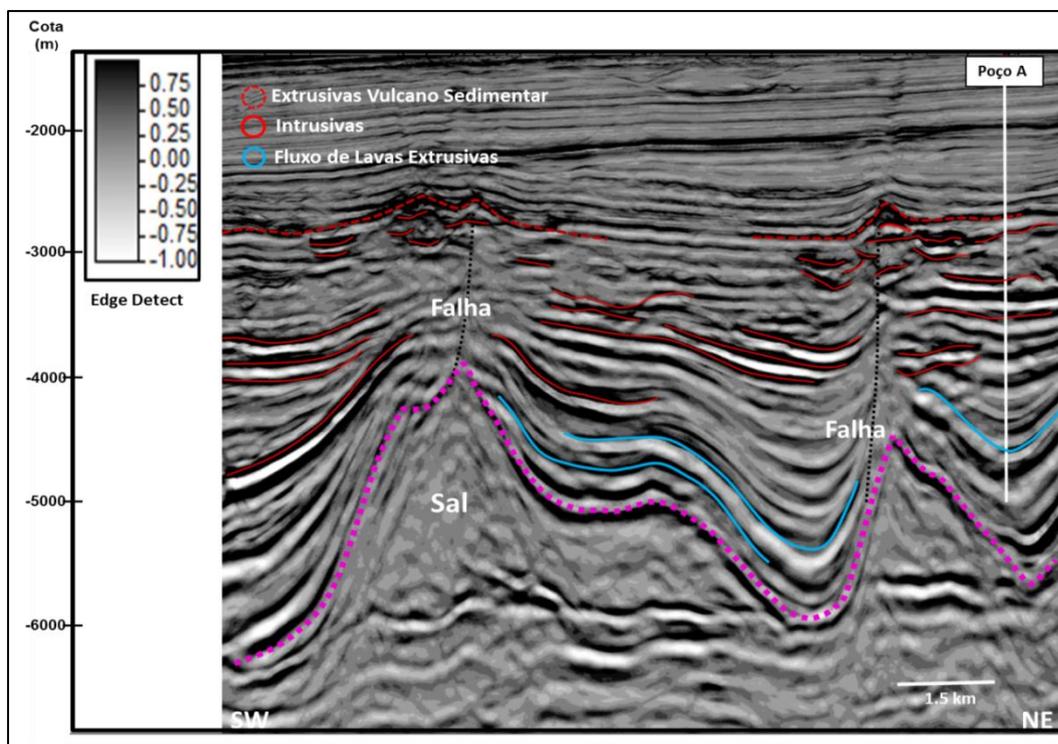


Figura 21. Seção sísmica NE-SW (*inline*) do atributo 3D *Edge Detection* com a interpretação das rochas ígneas extraídos a partir dos topos dos *geobodies*.

No intervalo correspondente ao Paleógeno foram reconhecidas duas sucessões vulcano-sedimentares com espessura média aproximada de 225 metros. A distribuição e geometria destas sucessões são observadas através da extração da amplitude nos horizontes estratigráficos do topo, intermediário e da base das mesmas. Na figura 22 é possível observar, através das elevadas amplitudes, a distribuição dos elementos geométricos típicos de um magmatismo extrusivo. Os fluxos de lavas aparecem como lobos proximais aos vulcões e como lençóis mergulho abaixo. A figura 23, extraída do aplicativo *Google Earth*, mostra a imagem de um sistema análogo de vulcões e lavas formado durante a formação de um rifte em um processo de distensão recente de crosta litosférica no norte da Etiópia.

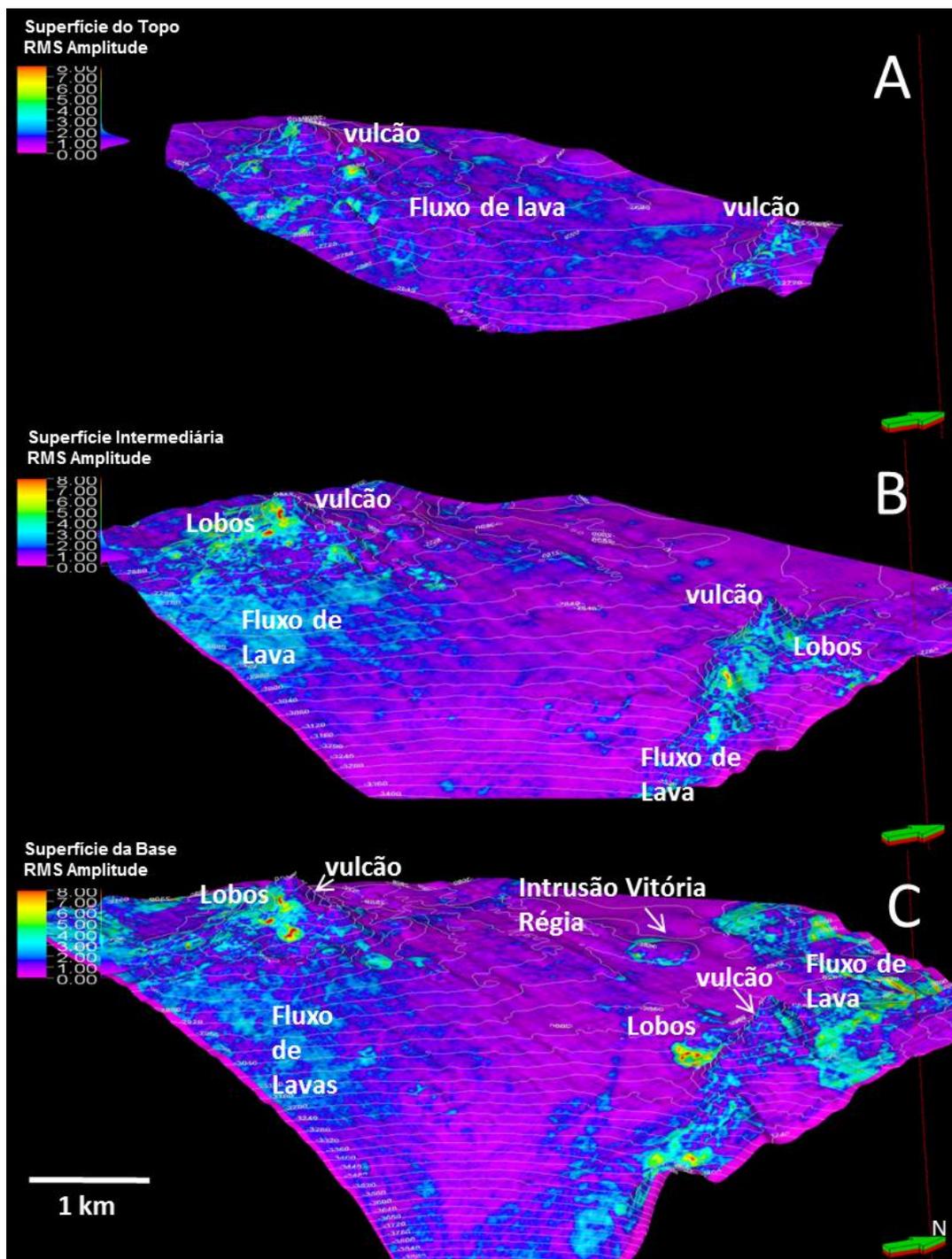
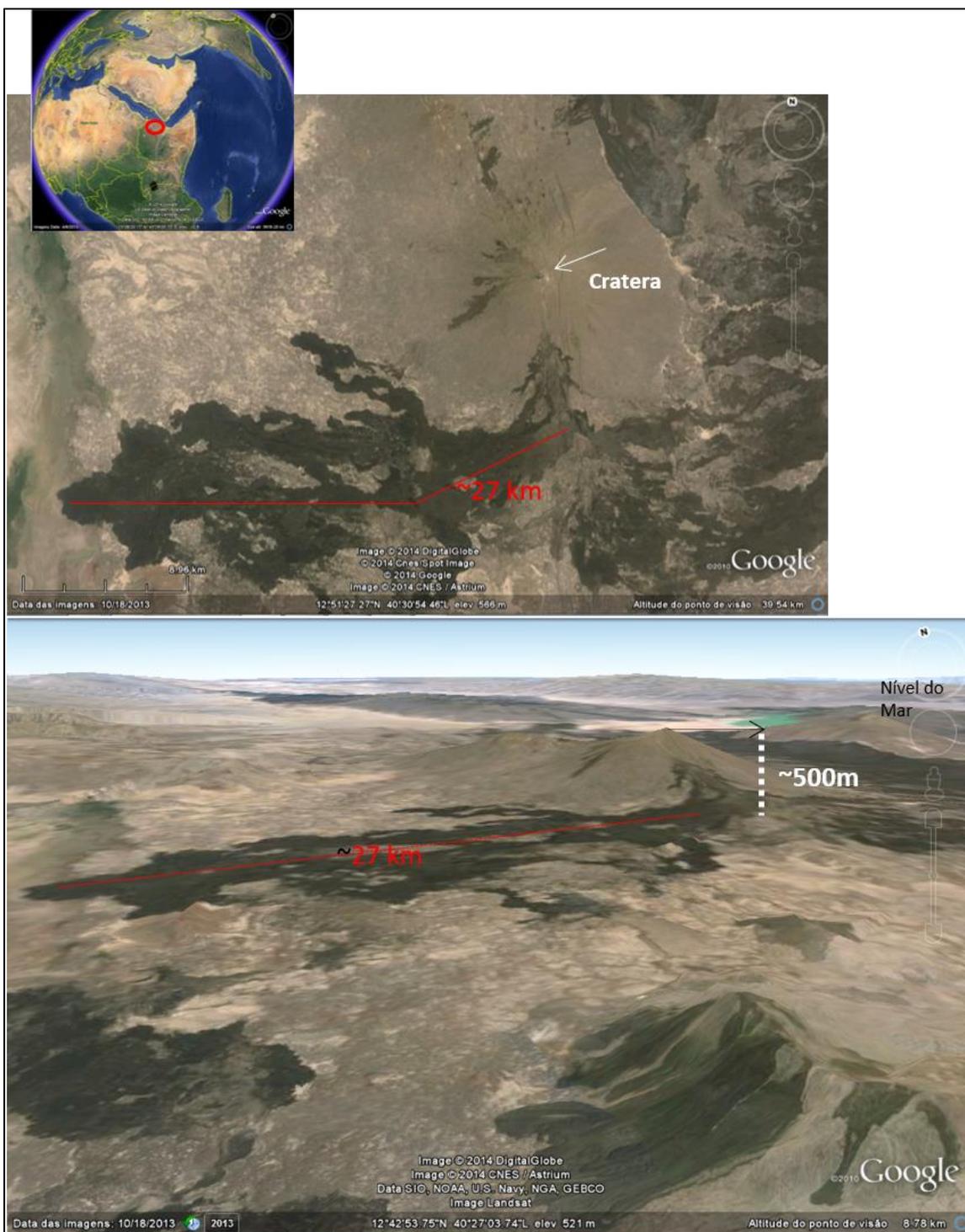


Figura 22. Amplitude *RMS* (*Root Mean Square*) extraída a partir do (a) Topo, (b) Meio e da (c) Base da sucessão vulcano-sedimentar do Terciário. Da base para o topo o paleofluxo de lava se espalha para os baixos enquanto que os lobos de alta amplitude dos flancos desaparecem.



**Figura 23. Sistema análogo de vulcões e lavas formado durante a formação de um rifte em um processo de distensão recente de crosta litosférica no norte da Etiópia. Fonte: Google Earth.**

Todos os *geobodies* dos corpos ígneos, extraídos automaticamente a partir da curva de opacidade da impedância relativa, definem regiões tridimensionais. Suas envoltórias foram definidas a partir da extração automática, realizada no *software* Petrel, do topo e da base de cada *geobody*. Estas superfícies serviram de dado de entrada para a quantificação das propriedades acústicas de perfis de poços e para modelagem geológica e sísmica do método do traçado de raio.

#### **4.0-Propriedades Acústicas das Rochas Ígneas.**

As rochas ígneas podem apresentar uma ampla variação de propriedades acústicas, dependendo da composição, densidade, faturamento, porosidade e grau de alteração. Segundo Planke *et al.* (2003) a velocidade sísmica de depósitos extrusivos vulcânicos pode variar de 1500m/s (camadas saturadas por água) a 6000m/s (porção maciça interna dos fluxos de basaltos). Os corpos máficos intrusivos normalmente apresentam velocidades mais elevadas variando tipicamente entre 5000m/s a 7500m/s dependendo da composição, espessura, e da profundidade da intrusão. As sequências vulcânicas podem ser homogêneas, acamadadas (fluxos de basaltos sub-aéreos), progradantes (sequências vulcanoclásticas) ou caóticas (fluxos de detritos).

Neste trabalho, através dos perfis de poços, foram reconhecidas e classificadas rochas ígneas com valores de altas densidades e velocidades, de valores baixos e constantes de *gamma ray* e através dos ciclos de pequeno comprimento de onda de elevados valores de resistividades.

#### **4.1- Interpretação das Litofácies Ígneas em Perfis de Poços.**

De todos os 16 poços utilizados neste projeto somente 8 poços atravessaram as rochas ígneas que foram identificadas em amostras de calha. São eles os poços A,B,E,D,G,I,J,K que estão identificados no mapa da figura 1 e na tabela 1 do capítulo 1 desta tese. O poço A (1-BRSA-557-RJS) além de ser recente e estar localizado na área de interesse do estudo de iluminação, possui boa calibração com a sísmica 3D e uma suíte completa de perfis litológicos, acústico, de resistividade e descrição de amostras laterais de rochas. Por esta razão este poço foi escolhido como “chave” na validação do estudo estatístico global.

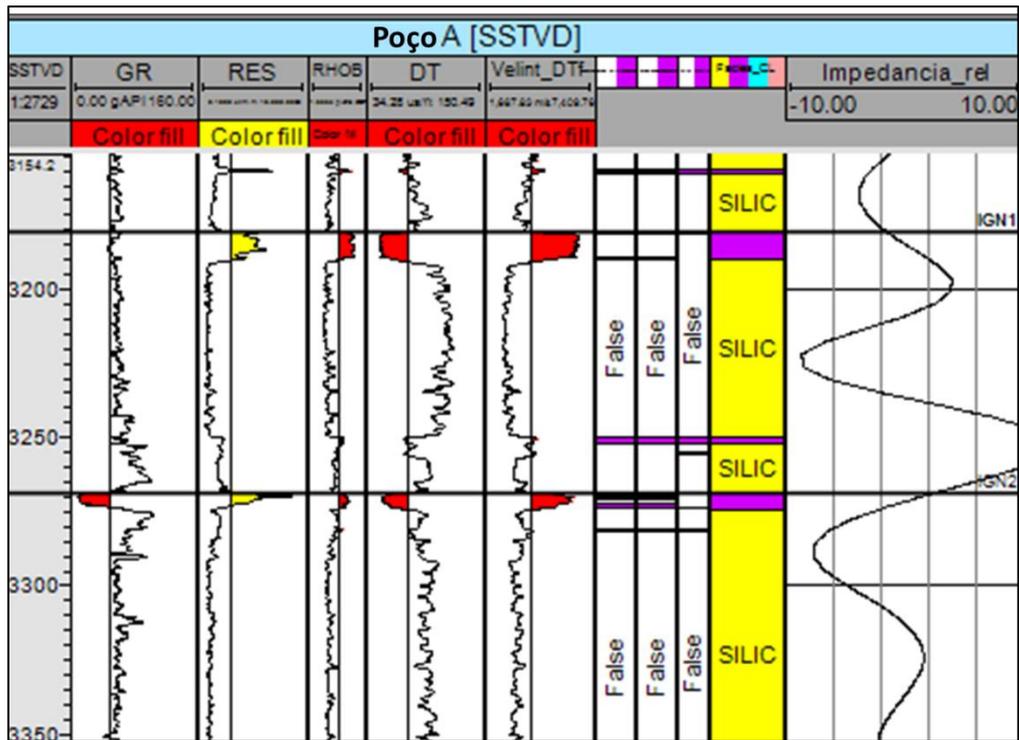
No poço A, que possui descrição litológica mais detalhada, foram testadas duas classes de correlações com três variáveis a partir dos valores dos perfis de (i) Densidade X Velocidade X Resistividade e (ii) Densidade X Velocidade X *Gamma Ray*, nos intervalos de ocorrência das rochas ígneas descritas em amostra de calha. As camadas de carbonatos finos cimentados (margas) possuem valores de resistividade muito elevados e semelhantes à resposta das rochas ígneas. Desta forma, a correlação de Densidade X Velocidade X *Gamma Ray*, além de possuir amostragem mais homogênea mostrou-se mais adequada para a classificação das rochas ígneas.

Para os demais poços da área a correlação “bi-variada” de Densidade X Velocidade apresentou resultado mais assertivo na classificação global. A região definida pelos intervalos de densidade de 2.45 g/cm<sup>3</sup> e 2.96 g/cm<sup>3</sup> e o de velocidade intervalar entre 4000m/s e 6900m/s, mostrou maior correlação entre estes perfis com a ocorrência de rochas ígneas identificadas nos poços, discriminando claramente as mesmas dos sedimentos siliciclásticos.

Através dos valores de corte, inferiores e superiores, destas classes que discriminam as rochas ígneas foi definido um subgrupo amostral para a análise estatística. Definida a variável categórica representada pelo valor igual a um (1), correspondente às rochas ígneas, e zero (0) aos demais tipos litológicos, foi aplicado um filtro de seleção para a subclassificação das rochas ígneas. A discriminação final das rochas ígneas no intervalo do Cretáceo Superior do poço A, considerado chave pela calibração com o dado sísmico, é mostrada na figura 24 juntamente com o perfil de impedância relativa. Na figura 25 é mostrado o resultado desta classificação no intervalo correspondente ao Albiano. O resultado da classificação do poço A com outros três poços (B,D e E), onde também foram constatadas rochas ígneas em amostras de calhas, é mostrado na figura 26. As rochas ígneas estão representadas pela cor roxa, as siliciclásticas pela cor amarela e a cor azul representa o intervalo carbonático (Albiano).

Mesmo tendo sido utilizada a amostragem completa dos perfis de densidade e de velocidade intervalar dos poços para a definição dos parâmetros de corte de classificação, observa-se através das figuras 25 e 26 que este procedimento não foi totalmente efetivo no intervalo carbonático do Albiano.

Desta forma, na seção carbonática do Albiano, a discriminação das rochas ígneas constituiu um desafio devido à resposta similar entre as ígneas extrusivas e os calcarenitos de alta impedância. Neste intervalo tanto as rochas ígneas como os carbonatos de plataforma de alta energia apresentam baixos valores de *gamma ray* e elevados valores de densidade, de resistividade e de velocidade intervalar. O padrão em caixa dos perfis de resistividade e de *gamma ray*, reconhecidos por litologia, foi o critério qualitativo utilizado na discriminação entre as rochas ígneas e os carbonatos do Albiano.



**Figura 24.** A discriminação final das fácies ígneas (cor roxa) a partir dos perfis de *gamma ray*, de resistividade, de densidade e do sônico no intervalo do topo do Cretáceo do poço A.

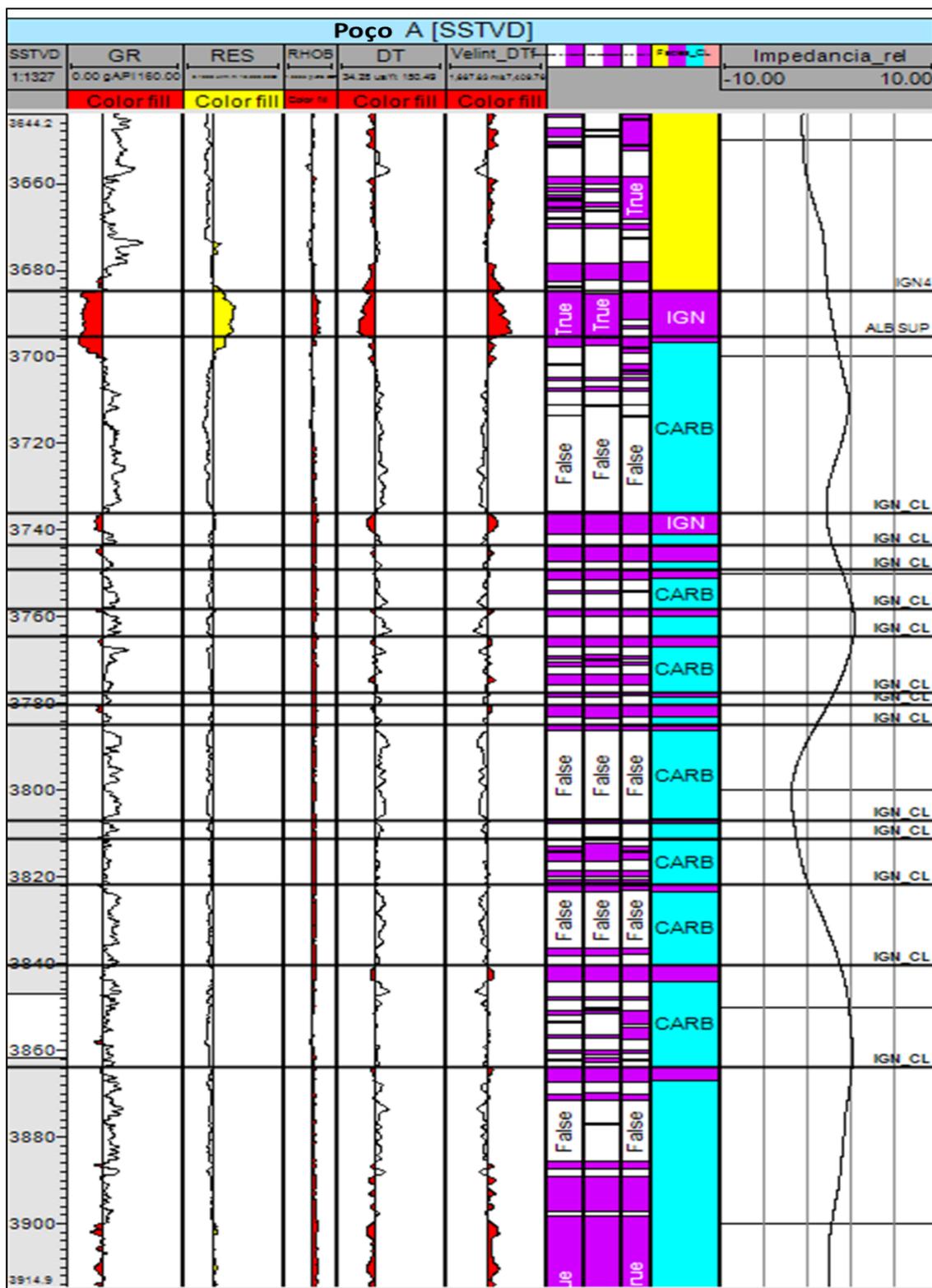


Figura 25. A discriminação final das fácies ígneas (cor roxa) a partir dos perfis de *gamma ray*, de resistividade, de densidade e do sônico no intervalo do Campaniano e Albiano do poço A. A fácies representadas na cor amarela são siliciclásticos e em azul os carbonatos.

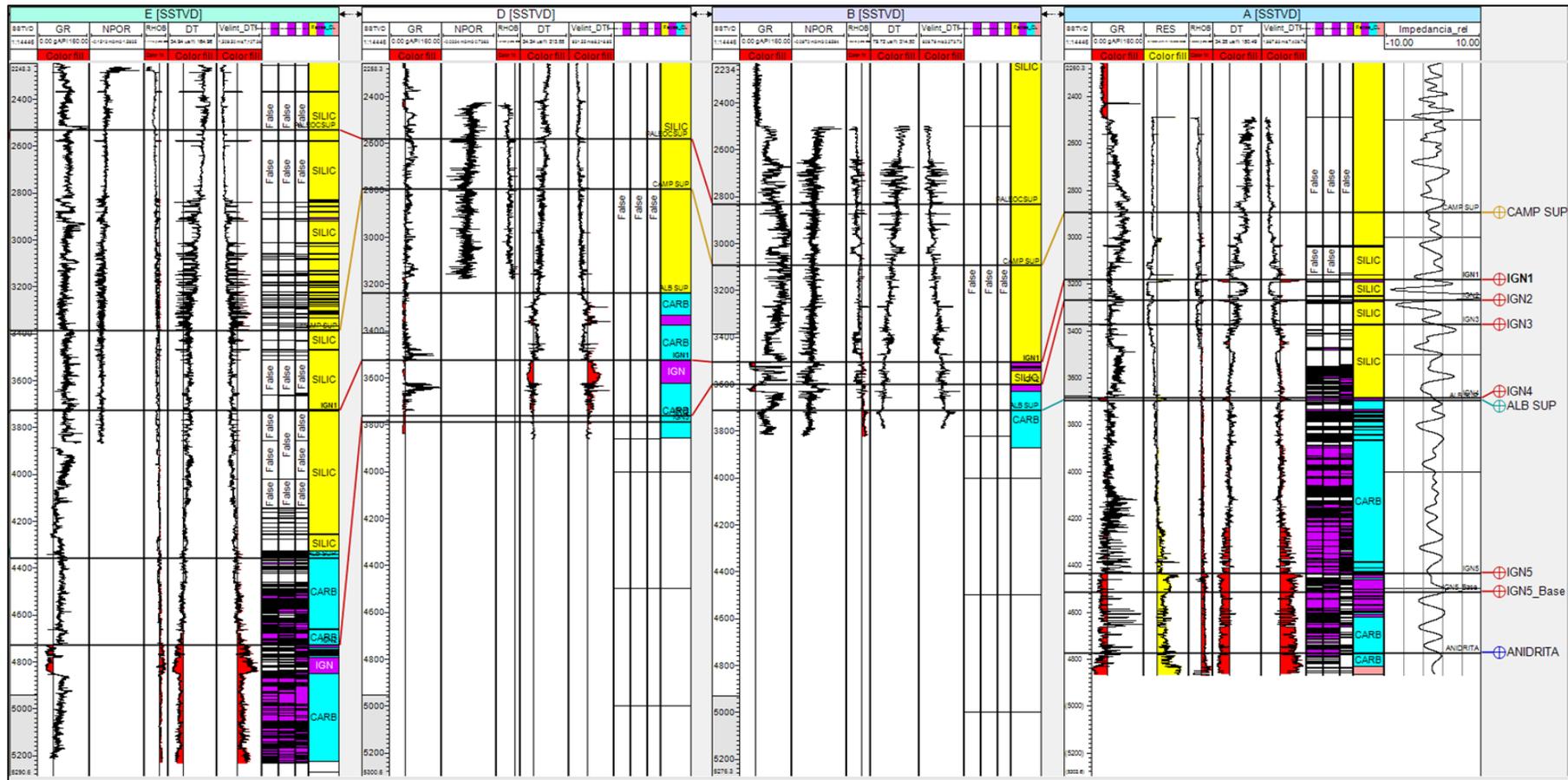
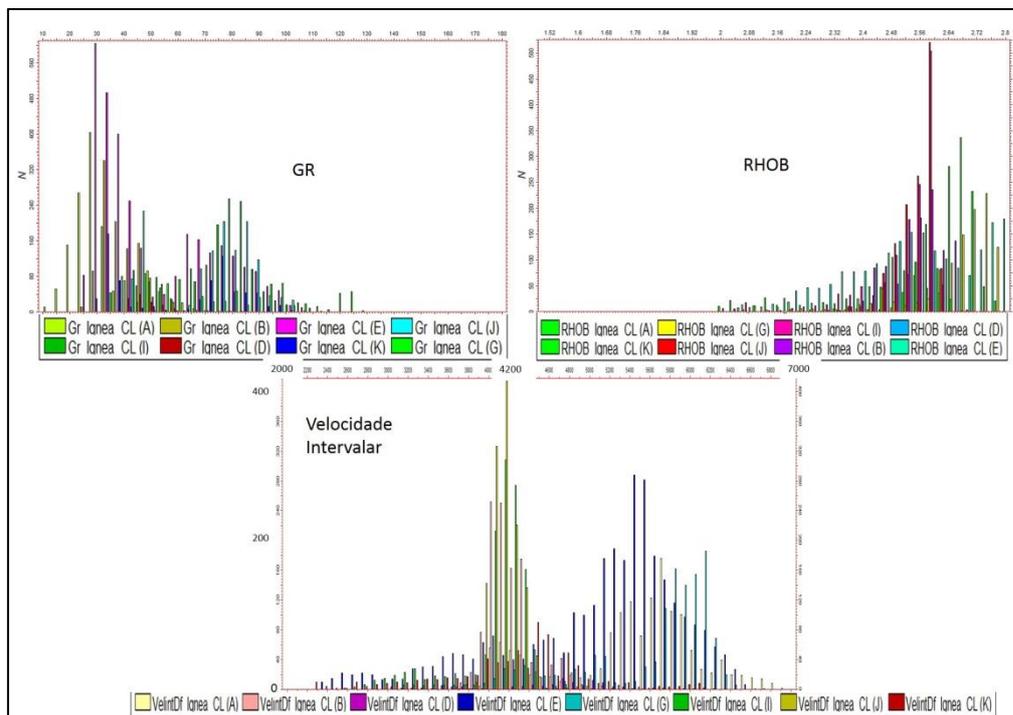


Figura 26. Classificação das fácies ígneas (roxo), siliciclásticas (amarelo) e carbonáticas (azul) dos poços B, C e D mais próximos e estratigraficamente correlacionados com o poço chave A.

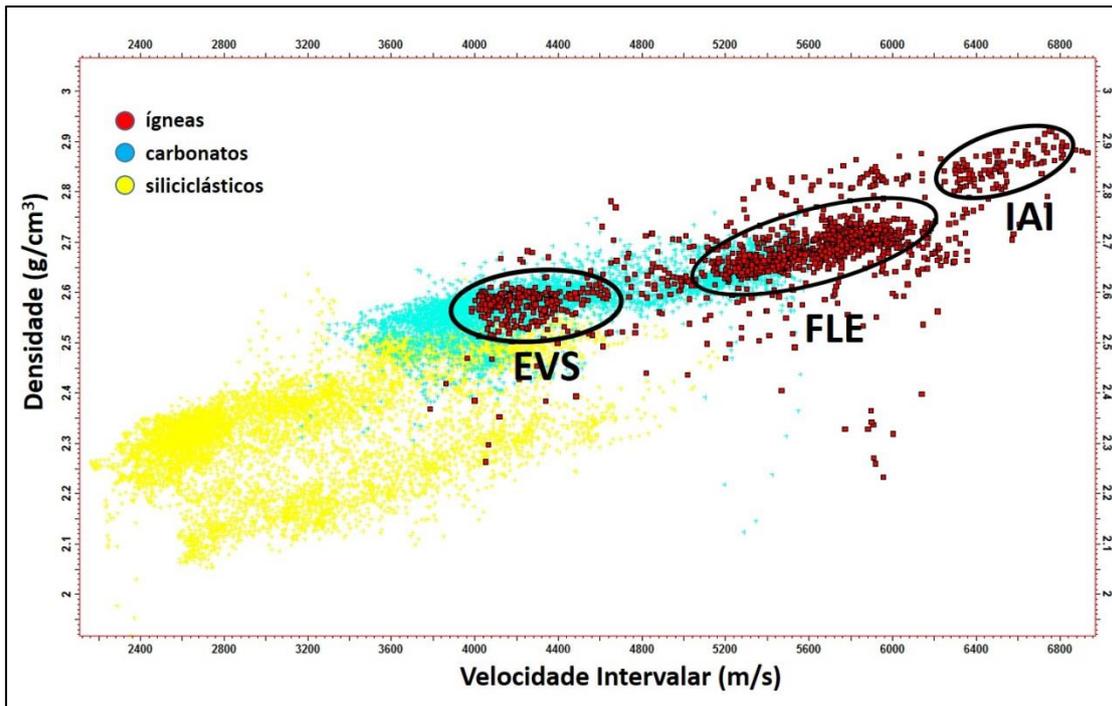
## 4.2 - Quantificação das Propriedades Acústicas.

A partir da discriminação global entre rochas siliciclásticas, carbonáticas e as rochas ígneas foram calculados os histogramas dos perfis de *gamma ray*, de densidade e de velocidade intervalar nos intervalos classificados como rochas ígneas em todos os poços (figura 27). Nesta figura observa-se que os histogramas mostram uma bimodalidade conspícua com uma fraca tendência de desenvolvimento de uma terceira subclasse no sentido dos elevados valores de velocidade intervalar.



**Figura 27. Histogramas de *gamma ray*, densidade e velocidade intervalar das fácies ígneas dos poços da área de trabalho.**

No poço A, três subgrupos de litologias ígneas, foram identificados nos perfis e subclassificados com as seguintes propriedades médias de velocidade intervalar e densidade: (1) 6500m/s-2.88g/cm<sup>3</sup>-**Intrusivas de Alta Impedância (IAI)**, (2) 5500m/s-2.67g/cm<sup>3</sup>-**Fluxo de Lavas Extrusivas (FLE)** e (3) 4300m/s-2.55g/cm<sup>3</sup>-**Extrusivas Vulcano Sedimentares (EVS)**. A figura 28 ilustra o gráfico de correlação de densidade e velocidade intervalar do poço A com a representação das três subclasses de rochas ígneas.



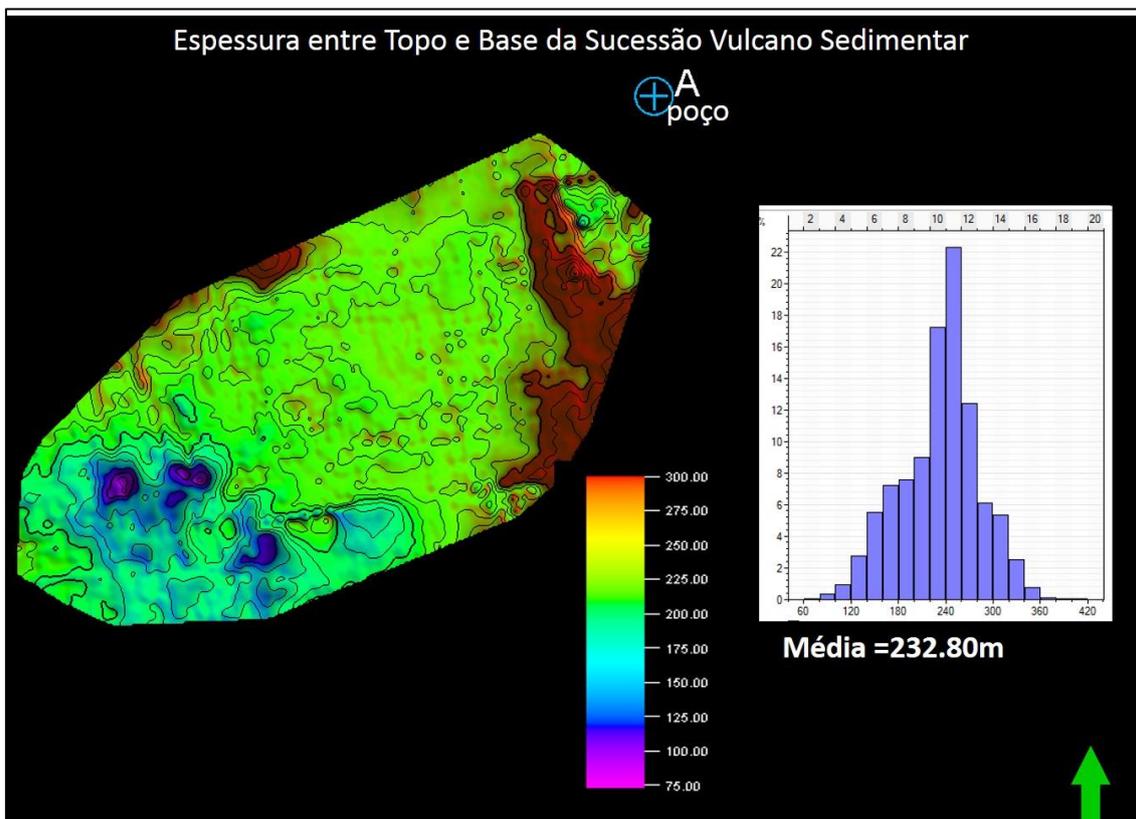
**Figura 28. Reconhecimento e subclassificação das fácies ígneas em IAI\_Intrusivas de Alta Impedância, FLE\_Fluxo de Lavas\_Extrusivas e EVS\_Extrusivas Vulcano Sedimentar.**

As fácies sísmicas ígneas EVS correspondem à sucessão vulcano-sedimentar do Terciário, a fácies FLE correspondem aos eventos sísmicos interpretados como fácies ígneas extrusivas originadas através dos fluxos de lava do Albiano e as IAI as intrusões de elevada impedância interpretadas nos intervalos do Cretáceo Médio e Superior.

Em seções sísmicas as fácies EVS e FLE são paralelas ao acamamento sedimentar e possuem resposta intermediária de impedância. Os corpos ígneos correspondentes as fácies IAI, reconhecidos no dado sísmico como intrusões, são discordantes ao acamamento sedimentar e destacados por forte contraste de amplitude.

A figura 29 ilustra o mapa de espessura do intervalo estratigráfico correspondente ao Terciário onde estão contidas as duas sucessões vulcano-sedimentar sendo uma mais espessa situada a nordeste e outra a sudoeste. Neste intervalo estas sucessões vulcano-sedimentares foram interpretadas e subdivididas em EVS\_1 e EVS\_2 e, nos respectivos topos, foi computado um mapa de velocidade intervalar média extraída do volume 3D extrapolado a partir do perfil sônico. Entre o topo e a base deste intervalo estratigráfico foi computada matematicamente uma superfície que representa uma mediana onde foi atribuída a média vertical da amplitude RMS (*Root Mean Square*). Nos locais onde a

amplitude *RMS* excedeu o valor de corte de 1.6, indicando a presença de fácies sísmicas ígneas extrusivas, o valor de velocidade dos sedimentos foi substituído pelo valor de 4500 m/s (figuras 31 e 32). Para todo intervalo a média de velocidade intervalar final calculada tanto para EVS\_1 e EVS\_2 foi de 3550m/s e o mesmo procedimento foi aplicado para o cálculo da densidade obtendo-se uma média de 2.37g/cm<sup>3</sup> (figura 33).



**Figura 29.** Mapa de espessura do intervalo estratigráfico correspondente às sucessões vulcano-sedimentares do Terciário. As anomalias de espessura correspondem aos paleovulcões preservados.

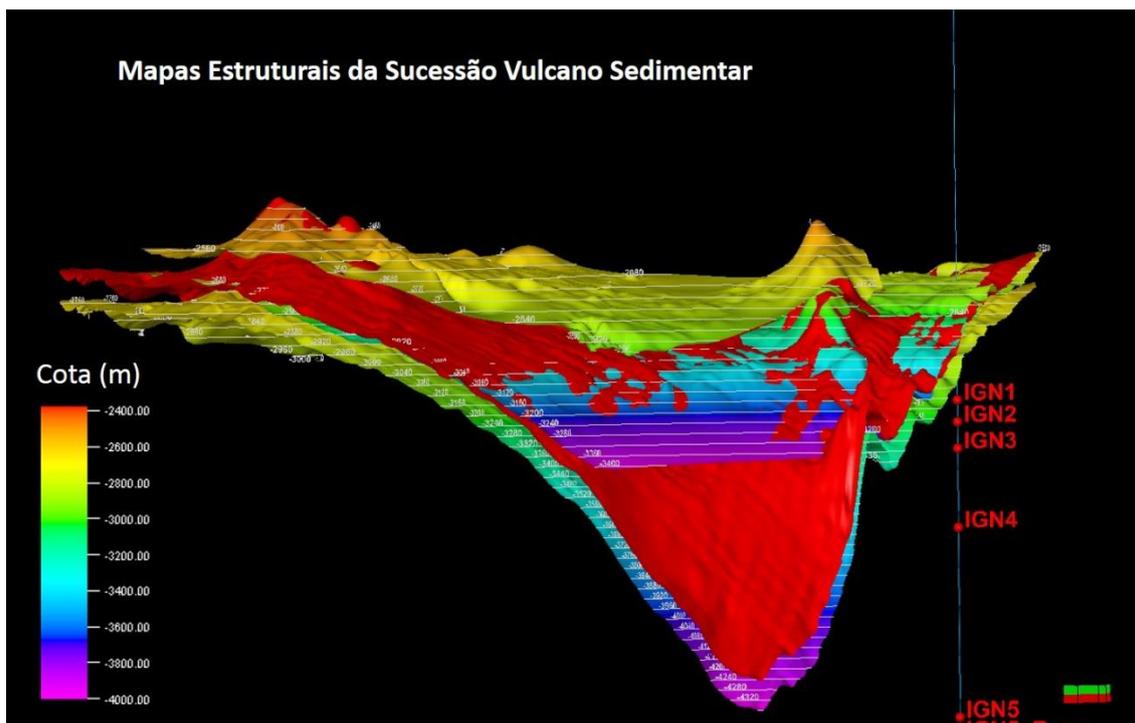


Figura 30. Topo e a base e superfície mediana (vermelho) da sucessão vulcano sedimentar.

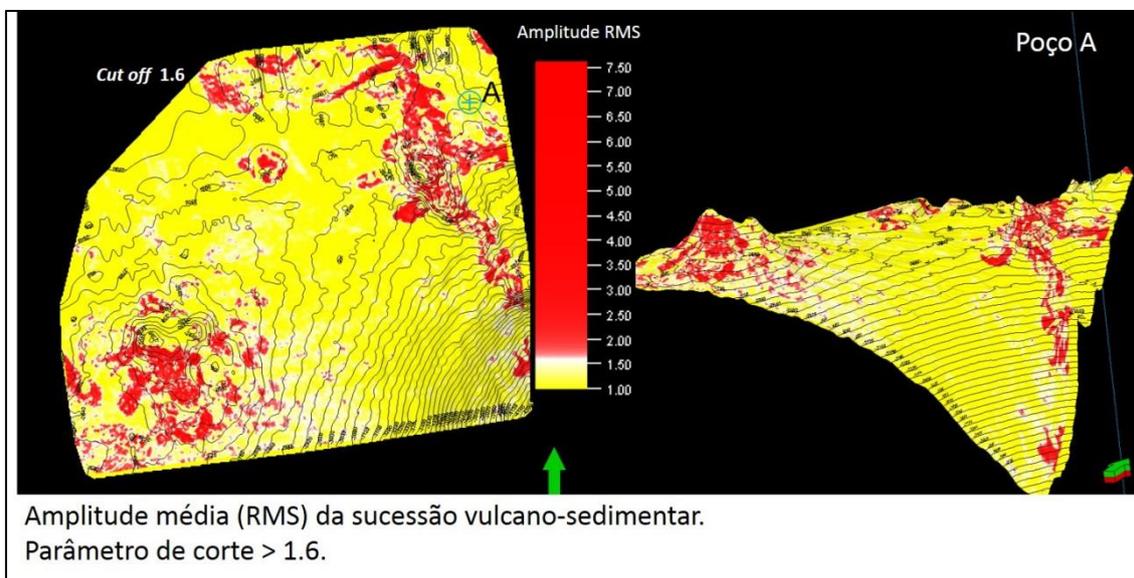
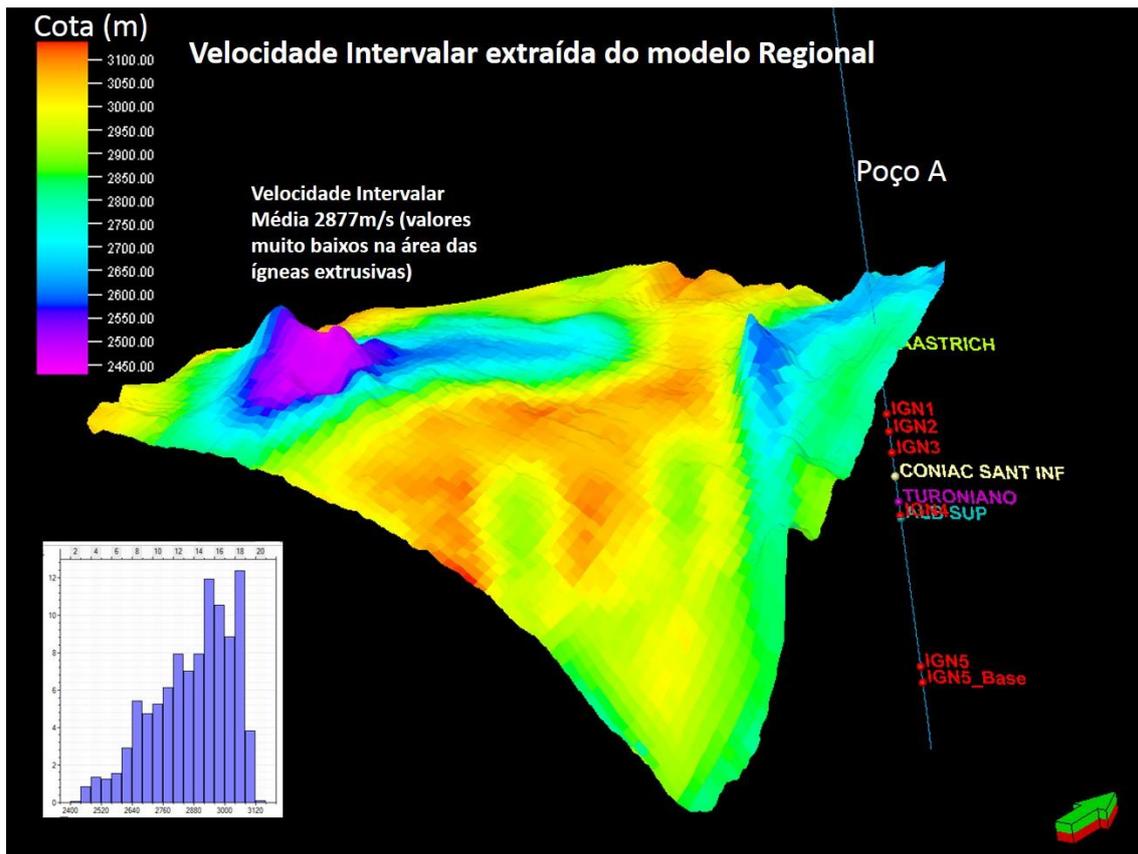
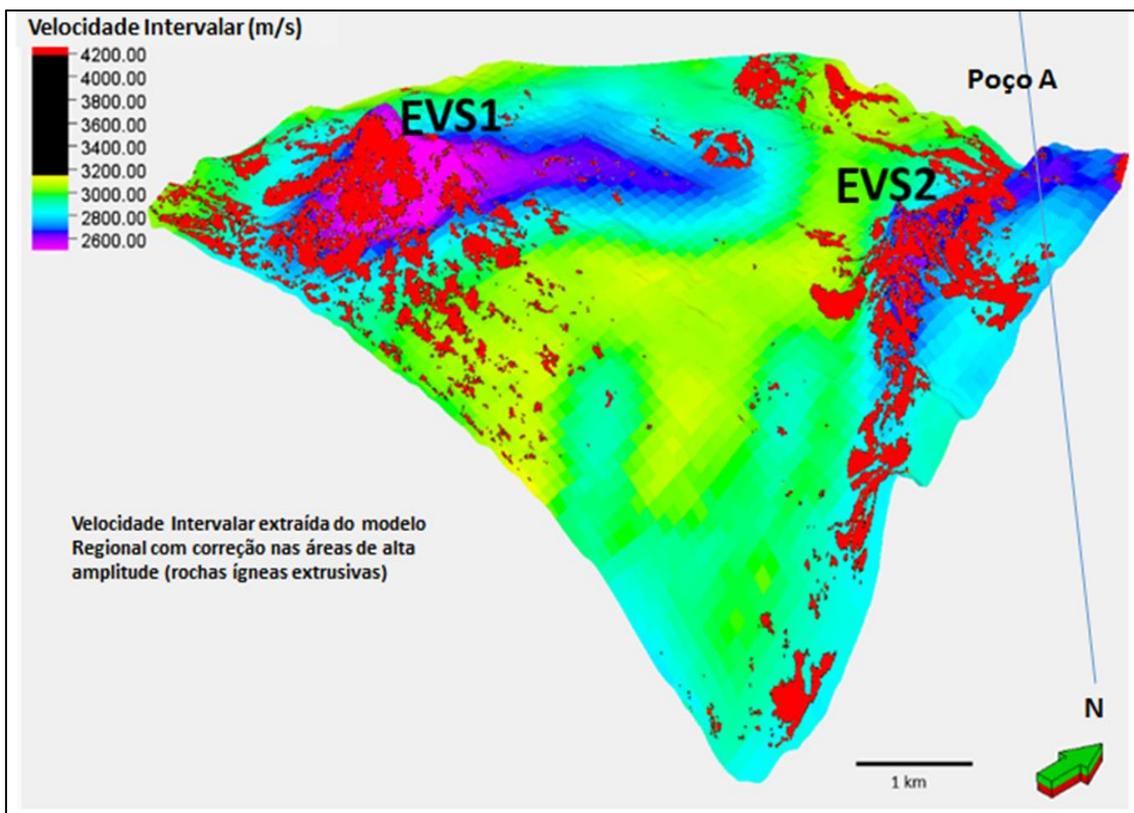


Figura 31. Superfície mediana onde foi atribuída a média vertical da amplitude RMS (Root Mean Square). Nos locais onde a amplitude RMS excedeu o valor de corte de 1.6, foram atribuídas às fácies sísmicas ígneas extrusivas EVS (cor vermelha).



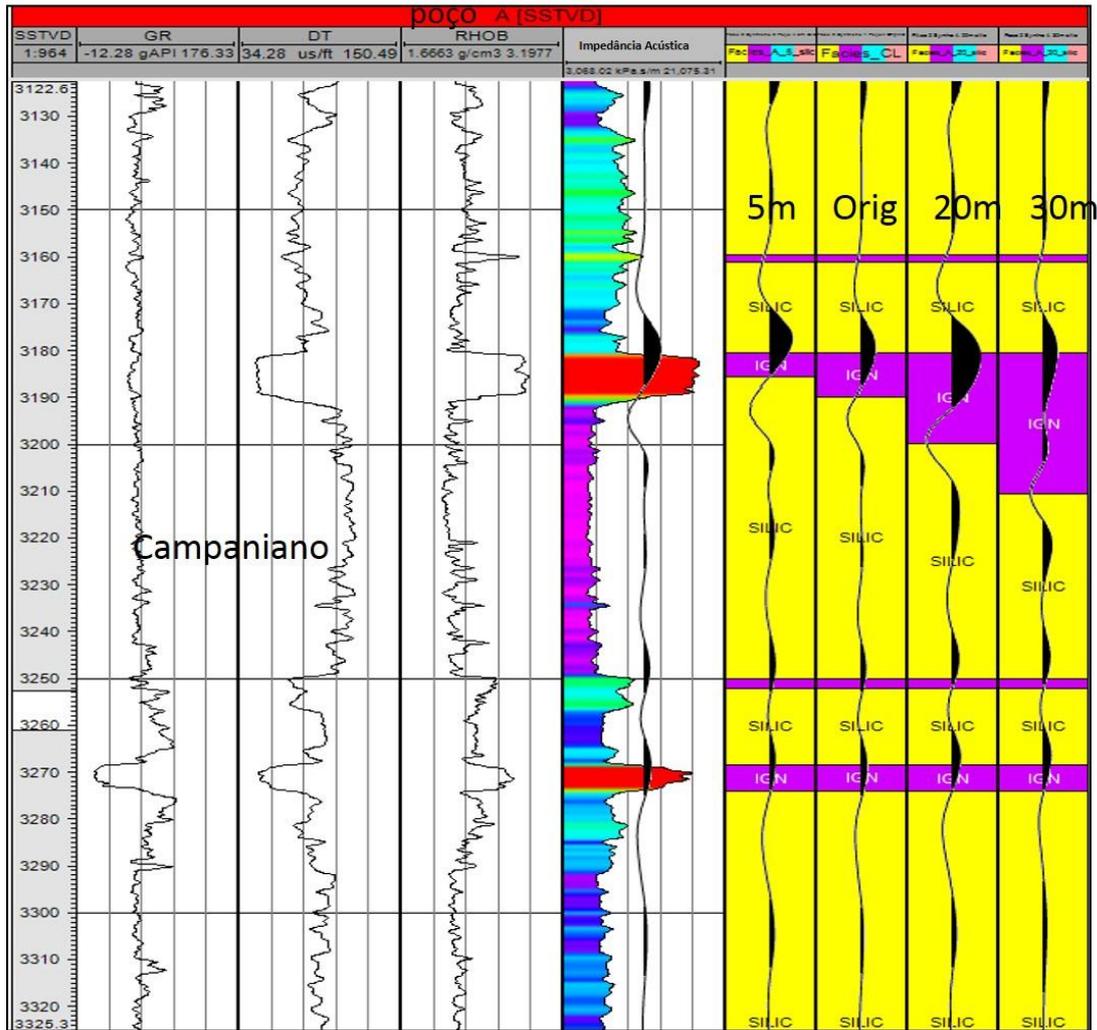
**Figura 32.** Velocidade intervalar média da sucessão vulcano sedimentar do terciário.



**Figura 33. Modelo 2D final de velocidade intervalar para sucessão vulcano-sedimentar (fácies EVS\_1 e EVS\_2).**

Através da interpretação dos perfis acústicos do poço A observam-se pequenas espessuras de rochas ígneas intrusivas cuja impedância é da ordem de 20000 KPa s/m. No intervalo específico entre as cotas de -3180m e -3190m, o perfil sintético da figura 34 mostra que o pulso representado pela amplitude positiva (pico preto) apenas detecta o sinal desta rocha e não resolve sua espessura e, que sua amplitude negativa (pico branco), não coincide exatamente com a base da camada intrusiva. No painel à direita da figura 34, ilustrado em amarelo, são mostrados modelos sintéticos de resolução sísmica para as espessuras da camada de rocha ígnea de 5m, 10m, 20m e 30m. Acima de 20 metros a espessura é resolvida pelo perfil sintético modelado com uma “*wavelet*” determinística de fase zero e frequência dominante igual a 50 Hertz.

A espessura média de cada corpo ígneo mapeado no dado sísmico excede o limite mínimo de 20m de resolução e por esta razão foi possível mapear o topo e base dos mesmos. Através das superfícies do topo e da base, os corpos ígneos foram modelados tridimensionalmente e inseridos como blocos “flutuantes” no modelo de *background* suave, representante da sobrecarga sedimentar, construído para a técnica de modelagem sísmica acústica por traçado do raio.

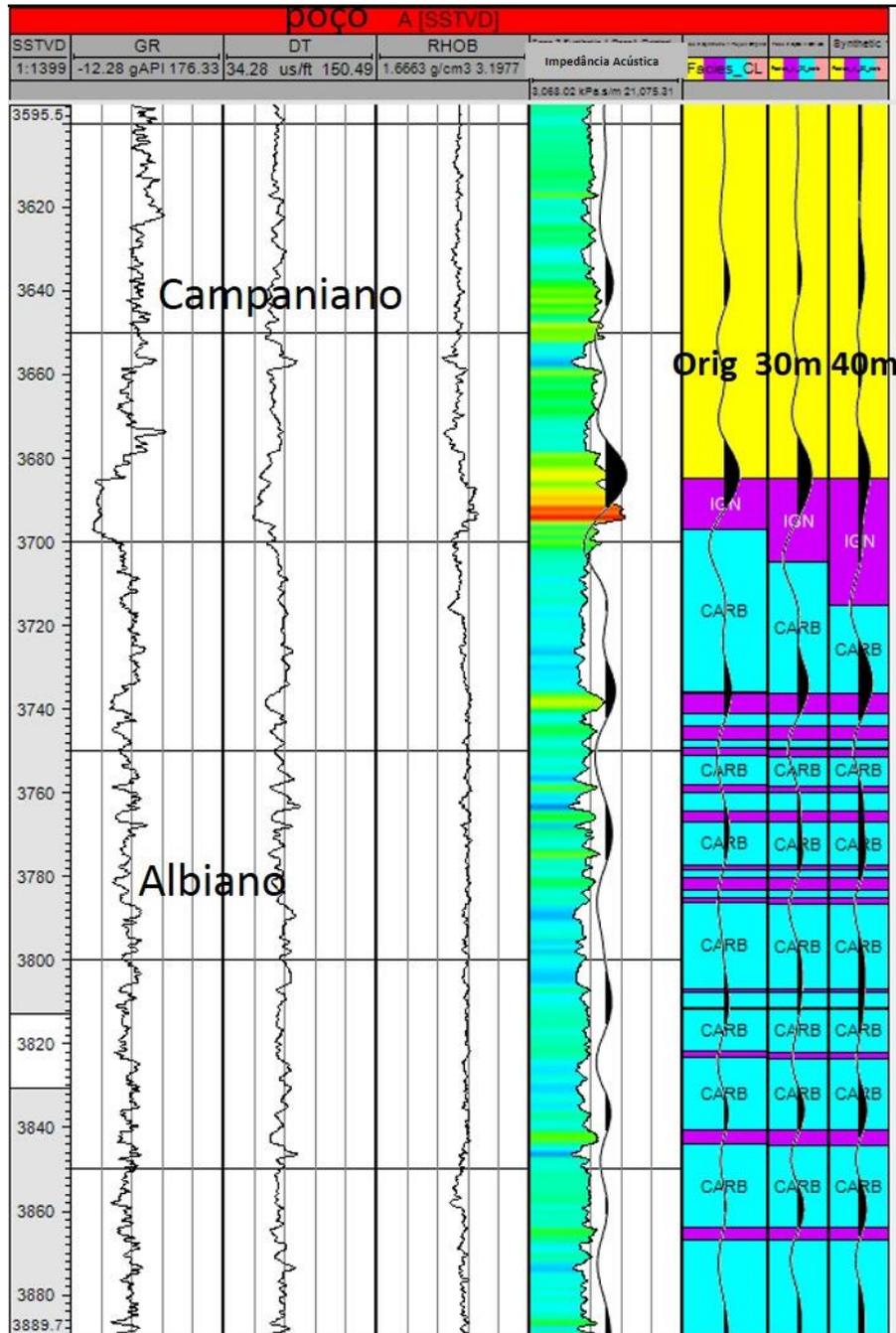


**Figura 34. Modelagem sísmica de resolução e resposta de amplitude das rochas ígneas da seção siliciclástica.**

As camadas extrusivas do Albiano tiveram sua resposta de amplitude modelada nos cenários de variação de espessura de 20m, 30m e 40m (figura 35). No poço A esta sucessão apresenta espessura média em torno de 18m e é resolvida no perfil sintético somente a partir de 30m de espessura. As espessuras médias das camadas FLE\_2 e FLE\_8 de rochas extrusivas do Albiano são de 62m e 50m respectivamente.

A tabela 3 resume os valores médios de espessura dos corpos ígneos dos intervalos do Cretáceo e do Terciário mapeados na interpretação sísmica.

Todos estes corpos ígneos mapeados são espessos e possuem geometria bastante complexa podendo contribuir para o desenvolvimento de sombra de iluminação sísmica nos objetivos mais profundos. Tal suspeita justifica a inclusão destes corpos ígneos na construção de modelos geológicos que permitam avaliar, através do traçado de raio, o impacto global e localizado na amplitude da região mais profunda investigada.



**Figura 35. Modelagem sísmica de resolução e resposta de amplitude das rochas ígneas da seção carbonática**

<b>Corpos Ígneos</b>	<b>Espessuras (m)</b>
<b>EVS_1-Extrusiva Vulcânica Sedimentar</b>	<b>~225</b>
<b>EVS_2-Extrusiva Vulcânica Sedimentar</b>	<b>~225</b>
<b>IAI_1-Intrusiva</b>	<b>57</b>
<b>FLE_1-Extrusiva do Albiano</b>	<b>62</b>
<b>IAI_3-Intrusiva</b>	<b>53</b>
<b>IAI_4-Intrusiva</b>	<b>36</b>
<b>IAI_5-Intrusiva</b>	<b>34.5</b>
<b>IAI_6-Intrusiva</b>	<b>38</b>
<b>IAI_7-Intrusiva</b>	<b>32</b>
<b>FLE_2-Extrusiva do Albiano</b>	<b>50</b>
<b>IAI_9-Intrusiva</b>	<b>35</b>

**Tabela 3. Classificação e espessura dos corpos ígneos.**

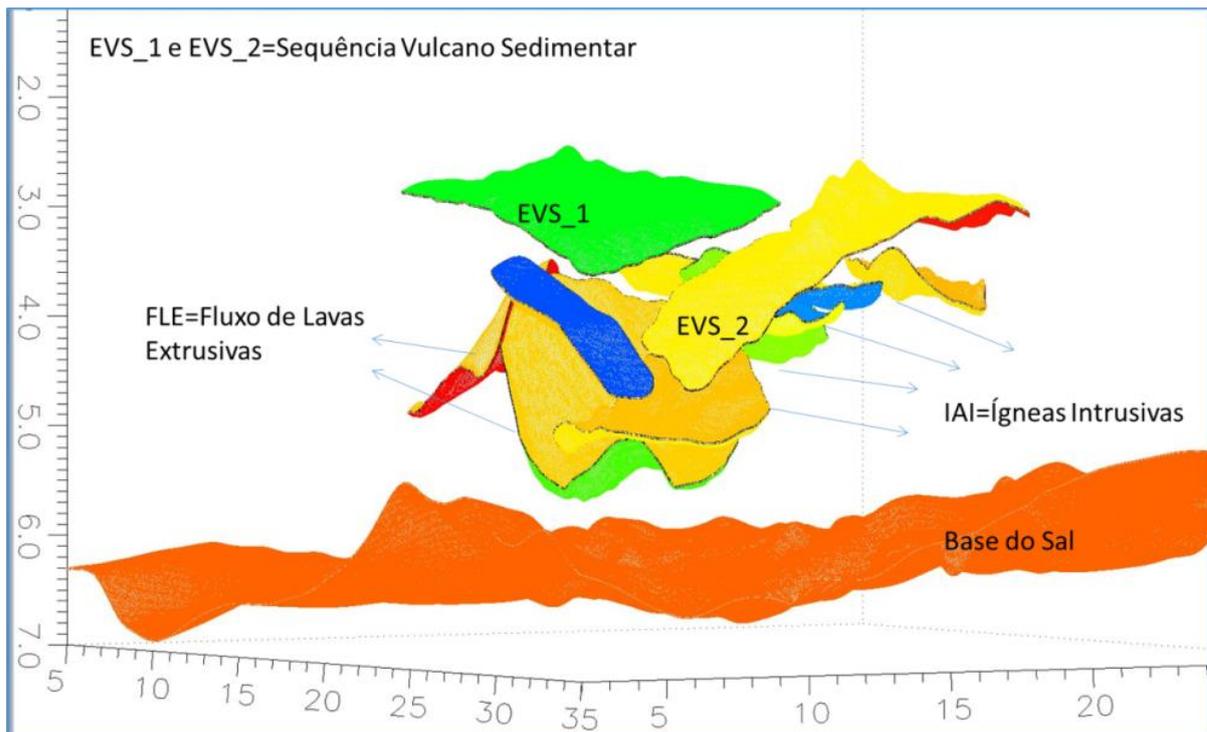
O reconhecimento de corpos ou sucessões de rochas ígneas com distintas geometrias e propriedades acústicas é uma etapa prévia e importante no estudo de iluminação sísmica. No capítulo anterior a geometria externa foi definida a partir dos *geobodies*, e neste capítulo, os valores médios das propriedades acústicas foram estimados para os subtipos EVS, FLE e IAI. Esta subclassificação permite atribuir modelos de impedância distintos e intimamente associados com a gênese das rochas ígneas, conferindo uma maior robustez na construção de cenários de modelos geológico e acústico que devem ser analisados separadamente e em conjunto com os demais elementos de impacto como a camada deformada de Sal. A construção destes modelos é descrita em detalhe no capítulo a seguir.

## **5.0-Modelagem Geológica e de Propriedades Sísmicas para o Traçado do Raio.**

### **5.1 - Construção do Modelo 3D Geológico.**

A primeira etapa de construção do modelo geológico 3D para o traçado do raio consistiu na interpolação de superfícies, a partir de uma malha regular dos horizontes sísmicos interpretados. O algoritmo do traçado de raio requer superfícies modeladas por triangulação com propriedades físicas de variações suaves. Foram modeladas as superfícies: Datum (nível do mar), Fundo do Mar, topo e base das duas sequências vulcano-sedimentares, topo e Base das rochas ígneas intrusivas e extrusivas do Cretáceo e os topos do Intra-Albiano, da camada de Sal e a Base do Sal.

Diferentemente das superfícies que delimitam os corpos ígneos, as superfícies do Fundo do Mar, do Intra-Albiano, do Topo do Sal e da Base do Sal ocorrem em toda a área. Na modelagem dos corpos ígneos foi necessário realizar um tratamento de truncamento, suavização e ajuste das bordas entre o topo e a base. As bordas ou quinas abruptas dos corpos intrusivos foram editadas para garantir a homogeneidade e o ajuste perfeito nos limites. As superfícies do Topo do Intra-Albiano e a da Base do Sal, além de serem utilizadas na construção do modelo, também são objeto de estudo de iluminação. A figura 36 ilustra em perspectiva a modelagem dos corpos ígneos e da superfície da base do sal.



**Figura 36. Perspectiva da modelagem dos corpos ígneos e da superfície da base do sal.**

## 5.2- Propriedades Sísmicas

Nesta etapa foram definidas regiões através da definição de “blocos” com propriedades acústicas (velocidade da onda P e densidade) correspondentes aos tipos litológicos classificados na etapa de interpretação dos perfis de poços. Para a definição da velocidade da onda S ( $V_s$ ), que não faz parte do conjunto dos perfis de poços, foram pesquisados na bibliografia valores estimados a partir de  $V_p$  e outras propriedades em rochas análogas.

Os blocos correspondentes à lâmina d’água e à sobrecarga sedimentar, do fundo do mar até o topo do Intra-Albiano, são aqui denominados de modelo *background*. Neste modelo *background*, da sobrecarga sedimentar, ocorrem predominantemente sedimentos siliciclásticos de velocidades acústicas e densidade que aumentam gradativamente em profundidade e, com base na interpretação sísmica, não foram identificadas heterogeneidades geológicas de fortes contrastes laterais de velocidade.

Para a lâmina d’água, o Intra-Albiano e a camada de Sal foram utilizados os valores médios constantes de  $V_p$  e densidade extraídos dos perfis. Na região da sobrecarga sedimentar (*background*) as funções de  $V_p$  e de densidade, variáveis com a

profundidade foram definidas através do perfis do poço A e extrapoladas para toda a área de modelagem. A figura 38 mostra o modelo de  $V_p$ , em perspectiva, e as figuras 39 e 40 mostram respectivamente o gráfico de densidade e o modelo de densidade.

### 5.2.1 Estimativa de $V_s$ para as Rochas Siliciclásticas.

Para o bloco da lamina d'água (LA), foi atribuída uma velocidade de onda  $V_p$  igual a 1500m/s e densidade igual a 1.0 g/cm<sup>3</sup>. As funções de velocidade intervalar do perfil sônico e a função densidade do poço A (1-BRSA-557-RJS) foram utilizadas para a construção do modelo de velocidade das ondas  $V_p$  compressionais e de densidade para o bloco da sobrecarga sedimentar (SS).

Várias metodologias de estimativa da velocidade da onda cisalhante  $V_s$ , a partir da velocidade da onda compressional  $V_p$ , têm sido propostas por diversos autores. As correlações empíricas obtidas a partir de medidas de perfis e de rochas, em áreas de litologias análogas, normalmente são elevadas e adequadas para a estimativa de tendências de  $V_s$  a partir de  $V_p$ . Porém, este método não é preciso na estimativa de valores absolutos de  $V_s$ . O desenvolvimento e o resultado dos equacionamentos, de base empírica, têm sido extensivamente descritos na literatura e, a ampla utilização deste método, tem sido reportada durante as últimas décadas por Castagna *et al.* (1993); Brocher (2005),(2008); Ameen *et al.* (2009); Yasar e Erdogan (2004).

Outra abordagem utilizada é a estimativa das propriedades elásticas obtidas através de medidas de laboratório das velocidades das ondas P e S por transmissão de um pulso em amostras de rochas (Birch, 1960; Christensen, 1974; Kern, 1982; Burlini e Fountain, 1993; Ji and Salisbury, 1993; Watanabe *et al.*,2007). A razão da velocidade compressional  $V_p$  e cisalhante  $V_s$  medidas em laboratório para misturas de argilas, quartzo e outros minerais de rochas, normalmente é utilizada em estudos onde não são disponíveis informações da velocidade  $V_s$  adquirida durante a fase de perfilagem de poço.

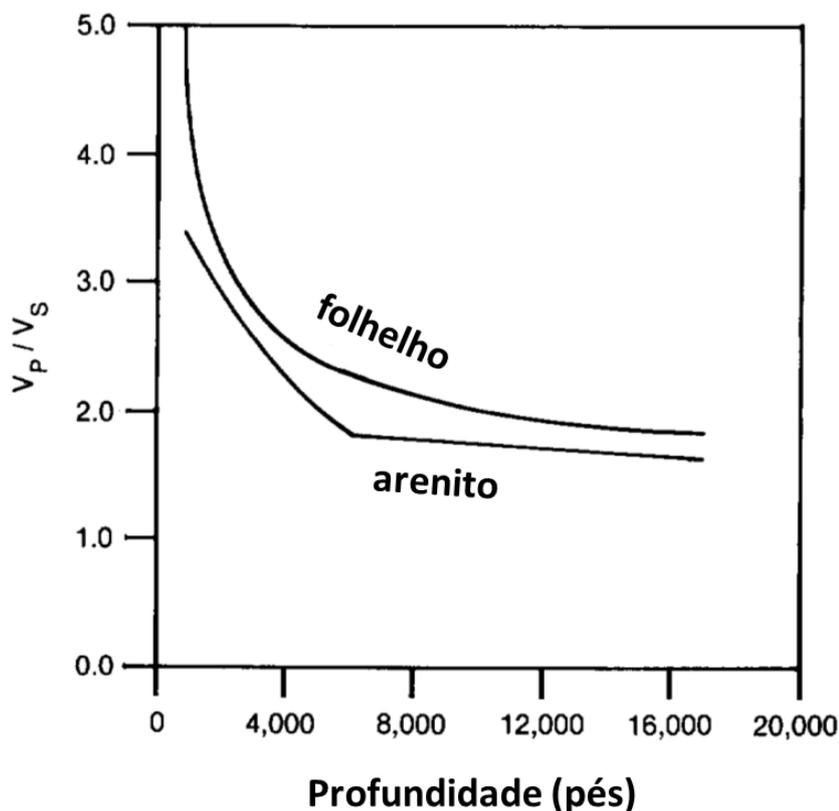
Na avaliação da sísmica de reflexão e das formações geológicas, Castagna *et al.* (1985), investigaram a relação  $V_p/V_s$  em misturas ternárias de quartzo, argilas e fluídos. Estes autores estabeleceram as relações gerais de  $V_p$  e  $V_s$  para as rochas siliciclásticas, obtidas através dos perfis sônicos e dos métodos sísmicos, comparando os dados proprietários com os dados extraídos da literatura. Os dados mostraram uma relação sistemática simples entre as velocidades das ondas compressionais  $V_p$  e de

cisalhamento  $V_s$ . Para as rochas siliciclásticas clásticas saturadas com água, a velocidade  $V_s$  é, de um modo aproximado, linearmente relacionada com a velocidade da onda compressional e a razão de velocidades compressional e cisalhante,  $V_p/V_s$ , diminui com o aumento da velocidade  $V_p$ . Além disso, estes autores utilizaram dados de velocidade de laboratório, proprietários e análogos, obtidos por amostras de tempo de trânsito com fonte de pulsos ultrasônicos, de frequência aproximada entre 200 kHz e 2 MHz. Para a obtenção das medidas, cada amostra é encamisada e colocada em um módulo (*vessel*) pressurizado ou sob uma estrutura de sobrecarga onde são aplicadas diferentes tensões à temperatura e pressão de fluido conhecidos.

A relação  $V_p/V_s$  aumenta tanto com o aumento do teor de argila, como com o aumento da porosidade sendo mais sensível a esta última. A variação do conteúdo argiloso pode ser muito maior que a de porosidade, e a razão  $V_p/V_s$  apresenta uma tendência de aumento com o conteúdo de argila, especialmente se considerarmos intervalos estratigráficos muito espessos.

Castanha *et al.*, (1985), construíram um gráfico de  $V_p/V_s$  em função da profundidade (figura 37) e a estimativa de  $V_s$  para os folhelhos foi feita através da relação linear com  $V_p$  por eles definida em laboratório. Estes autores combinaram as equações de Gassmann (1951) que levam em consideração os módulos *bulk*, das rochas e dos fluídos, e o módulo de cisalhamento das rochas. No gráfico da figura 37 observa-se que, na média, a razão de  $V_p/V_s$  do folhelho é da ordem de 10% superior à dos arenitos.

A partir deste gráfico, para a estimativa de  $V_s$  da sobrecarga sedimentar, foi utilizada a razão de  $V_p/1$ . A razão de 1.6 foi escolhida na curva do arenito devido a maior proporção desta litologia, interpretada no poço A, no intervalo compreendido entre as cotas médias de -1300m e -5800m.



**Figura 37.** Correlação de  $V_p/V_s$  com a profundidade definida a partir de medidas em amostras do Golfo do México de folhelhos e arenitos saturados com água. Castagna *et al.* (1985).

### 5.2.2 Estimativa de $V_s$ para as Rochas Carbonáticas.

Os sedimentos carbonáticos são altamente suscetíveis às alterações diagenéticas tanto na fase de deposição como durante o soterramento. Estas modificações alteram as propriedades elásticas da rocha e, por consequência, a velocidade do perfil sônico. O resultado é uma relação dinâmica entre diagênese, porosidade, tipo de poro e a velocidade do sônico. Desta forma espera-se uma ampla variação de velocidades em carbonatos, da ordem de 1700m/s a 6600 m/s para a onda compressional  $V_p$  e de 600m/s a 3500 m/s para velocidade da onda cisalhante  $V_s$  (Eberly *et. al.*, 2003).

Como as mudanças diagenéticas podem ocorrer mais rapidamente do que a compactação, o soterramento ou idade são menos importantes na análise de variação da velocidade com a profundidade. A velocidade é controlada pelos efeitos combinados da

litologia deposicional e diversos processos pós-deposicionais que alteram localmente sua tendência. O processo de cimentação diagenética, rasa ou profunda aumenta a rigidez da rocha resultando em um aumento de velocidade muito maior que o aumento devido à compactação. A velocidade pode aumentar rapidamente, por compactação nas porções de sedimentos carbonáticos preservados e, não se alterar, ou aumentar muito pouco nas porções cimentadas por diagênese.

Embora seja comum observar uma tendência geral de aumento de velocidade com a profundidade, as inversões de velocidade ou aumentos abruptos são comuns nas litologias carbonáticas. No poço A, observa-se na curva de tendência de velocidade intervalar, um salto de velocidade devido à presença de carbonatos plataformais bastante cimentados entre o topo do Intra-Albiano e o Topo do sal (figura 5 do capítulo 3),

Maleki *et al.* (2014) compararam o resultado da estimativa de  $V_s$  a partir da aplicação de métodos de inteligência artificial com equações empíricas em um campo de carbonato da Província de Khuzestan do sul do Iran, considerado nesta tese como análogo aos carbonatos plataformais do Albiano da Bacia de Santos. A partir desta consideração, e através do cálculo de velocidade  $V_p$  e da densidade média do intervalo constituídos pelos carbonatos, calculou-se  $V_s$  através da razão de  $V_p/V_s$  igual à 1.85. Esta razão tem origem na equação empírica de carbonatos proposta por Castagna *et al.* (1993) in Maleki *et al.* (2014). Para o intervalo carbonático do Intra-Albiano obteve-se velocidade  $V_s$  igual a 2423 m/s a partir da média da velocidade  $V_p$  de 4500m/s extraída do perfil sônico do poço A (figura 5, capítulo3).

### **5.2.3 Estimativa de $V_s$ para as Rochas Ígneas e para a Halita.**

Para definição da velocidade das ondas cisalhantes  $V_s$  nas rochas ígneas, foi utilizado como análogo o trabalho de Becker *et al.* (1994). Estes autores caracterizaram, através de amostragem de rochas ígneas, a estrutura acústica da porção rasa do embasamento de um centro ativo de espalhamento oceânico sujeito à ação hidrotermal. Através de testes de laboratório, foram analisados os efeitos das velocidades das ondas compressional e cisalhante em função da porosidade, densidade e mineralogia. De forma resumida, as velocidades das rochas ígneas foram medidas em amostras orientadas perpendicularmente e paralelas ao eixo dos testemunhos e submetidas a

sistemas com pressões confinantes variáveis e pressão de poros constante e igual a 2 Mpa.

Comparando-se as medidas de laboratório das intrusões rasas de diabásios, expostas a temperaturas variáveis e à ação focalizada de fluidos hidrotermais, Becker *et al.* (1994) não encontraram diferenças relevantes entre as propriedades físicas das mesmas com os basaltos profundos da cadeia meso-oceânica. Este resultado sugere que, para o mesmo tipo de rocha ígnea, o aumento da pressão devido ao soterramento não produz alterações relevantes nas velocidades  $V_p$  e  $V_s$ . Com base nesta conclusão e comparando-se as velocidades  $V_p$  das rochas ígneas do perfil sônico do poço A com os tipos litológicos análogos descritos por estes autores, foram utilizadas a média das medidas de velocidade “ $V_s$ ” para as rochas intrusivas IAI (diabásios) e extrusivas FLE (basaltos) e EVS (basaltos intercalados com sedimentos).

Justen *et al.* (2013) utilizando em laboratório equipamento de propagação de pulso sísmico de alta frequência para caracterização elástica de amostras de rochas evaporíticas do Aptiano das bacias costeiras brasileiras, obtiveram valores de  $V_p$  e  $V_s$  dos principais sais da composição. O sal de maior proporção da sequência evaporítica da Bacia de Santos é a halita e, por esta razão, para a camada de Sal do modelo foi utilizada a média dos valores de  $V_s$  publicados pelos autores citados.

Nas tabelas 4 e 5 são mostrados todos os valores de  $V_p$  e  $V_s$ , calculada a partir de  $V_p$ , e os valores de densidade. Estes valores são atribuídos como propriedades para cada bloco que representa as rochas ígneas modeladas, a lâmina d’água e as camadas do Intra-Albiano e do Sal.

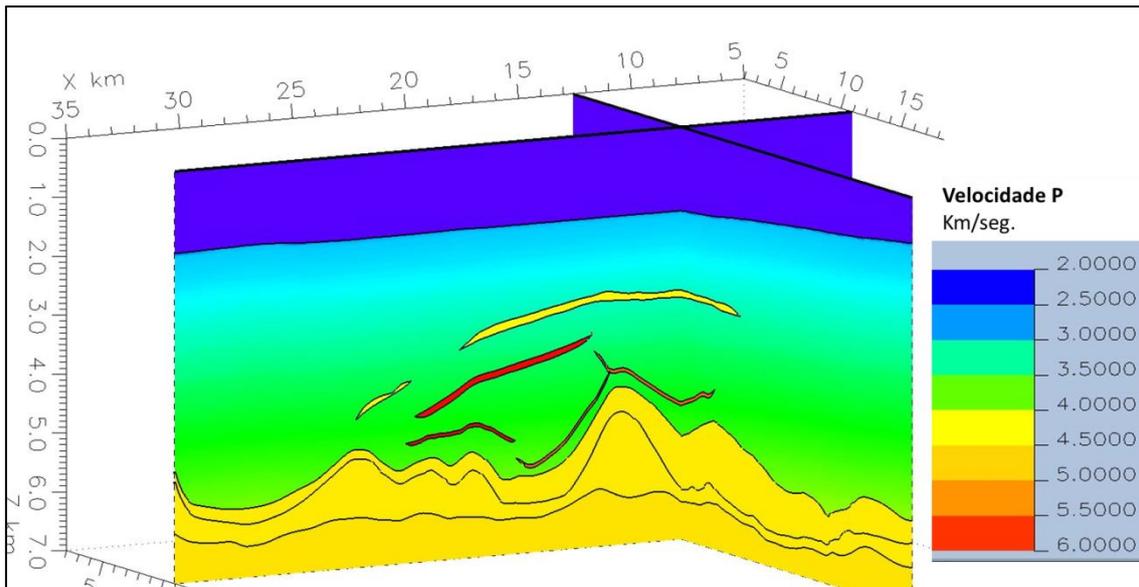


Figura 38. Modelo de velocidade da onda “P” compressional.

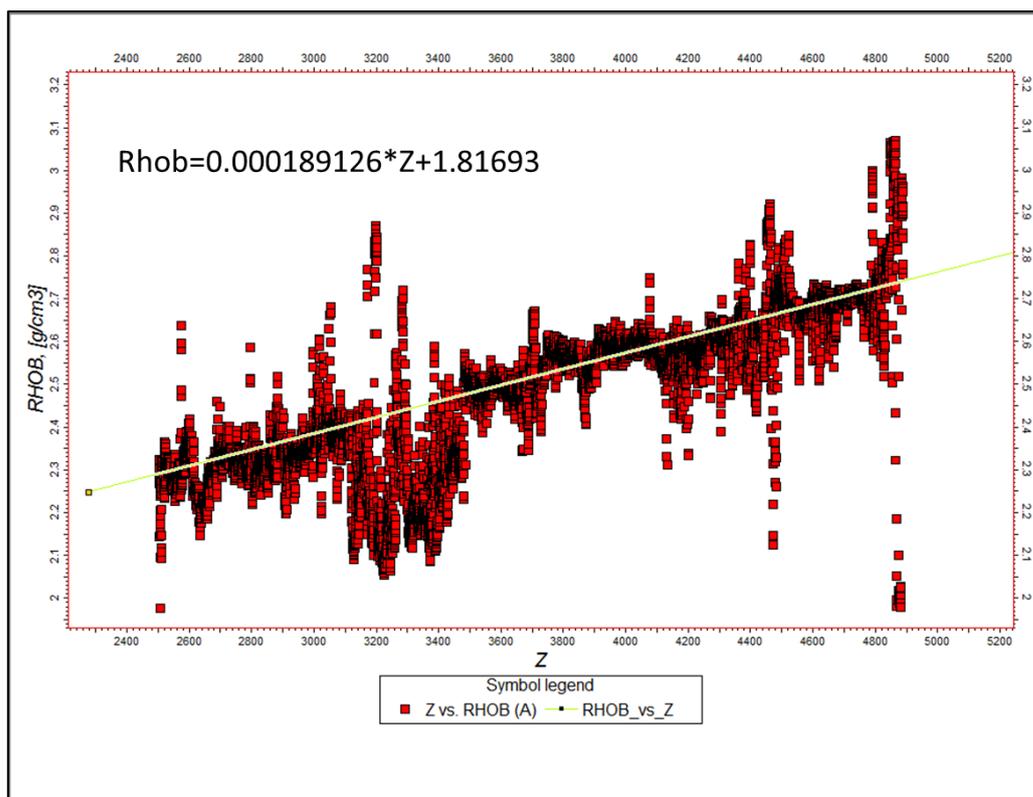
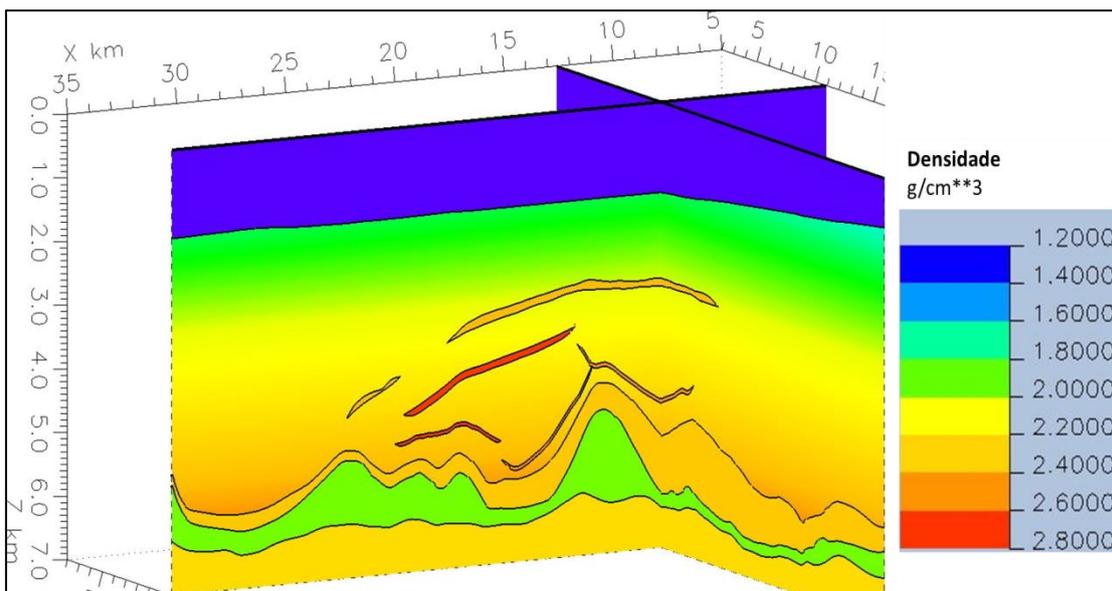


Figura 39. Função densidade, variável com a profundidade, da região da sobrecarga sedimentar (*background*)



**Figura 40. Modelo de densidade da sobrecarga sedimentar.**

<b>Propriedades Elásticas Rochas Ígneas</b>	<b>Vp (m/s)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b>Densidade (g/cc)</b>
EVS_1- Vulcano Sedimentar	4300	2530	2.55
EVS_2- Vulcano Sedimentar	4300	2530	2.55
IAI_1-Intrusiva	6500	3300	2.88
FLE_1-Extrusiva do Albiano	5500	3200	2.67
IAI_3-Intrusiva	6500	3300	2.88
IAI_4-Intrusiva	6500	3300	2.88
IAI_5-Intrusiva	6500	3300	2.88
IAI_6-Intrusiva	6500	3300	2.88
IAI_7-Intrusiva	6500	3300	2.88
FLE_2-Extrusiva do Albiano	5500	3200	2.67
IAI_9-Intrusiva	6500	3300	2.88

**Tabela 4. Propriedades elásticas dos corpos ígneos.**

Propriedades Elásticas Sequências	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidade (g/cc)
Lâmina d'água	1500	0	1.0
Sobrecarga Sedimentar	=1500+0.88*prof	Vp/1.6	=1.82+0.19*prof.
Carbonatos Intra-Albiano	4500	2423	2.50
Sal	4500	2584	2.00
Pré-Sal	4600	N.D.	2.40

**Tabela 5. Propriedades elásticas das sequências do modelo de *background*.**

### 5.3-Cenários de Modelagem Geológica.

Na etapa de modelagem geológica foram construídos cenários de menor a maior complexidade geológica de impacto no estudo de iluminação sísmica da Base do sal. No cenário mais simples somente a camada de Sal foi inserida e, para os cenários intermediários até os mais complexos, foram incluídos sucessivamente a camada do Intra-Albiano, os corpos ígneos intrusivos e por fim as sequências vulcano-sedimentares do Paleógeno. Em cada modelo geológico, representante de um dos cenários, foram definidos os respectivos blocos e propriedades.

Os cenários foram construídos para analisar as contribuições parciais dos elementos geológicos que são sobrepostos no modelo completo, impedindo assim a compreensão das causas do efeito de sombra na resposta de refletividade. Desta forma através do uso de modelos com distintos graus de complexidade geológica, é possível analisar os efeitos e causas isolados e combinados nas variações de amplitude associadas à intensidade de iluminação.

A área escolhida para a modelagem sísmica corresponde à área da sísmica 3D que abrange os altos estruturalmente fechados do Intra-Albiano e da Base do Sal. A estrutura do topo do Intra-Albiano, localizada na porção centro-oeste da área do 3D, situa-se sobre um diápiro de sal e a estrutura da Base do Sal, especialmente coincidente e mais estreita, situa-se sobre um alto local do embasamento. A figura 49 mostra a área de modelagem sísmica projetada sobre a Base do Sal e a tabela 6 resume os objetos que



<b>Modelo Geológico para o Traçado do Raio</b>	<b>Estudo de Iluminação</b>
Sucessões Vulcano Sedimentar (EVS) Sobrecarga Sedimentar Intrusões de Alta Impedância (IAI) Extrusivas do Albiano (FLE)	Intra-Albiano
Sobrecarga Sedimentar IntraAlbiano Camada de Sal	Base Sal
Sucessões Vulcano Sedimentar (EVS) Sobrecarga Sedimentar IntraAlbiano Camada de Sal	Base do Sal
Sucessões Vulcano Sedimentar (EVS) Sobrecarga Sedimentar Intrusões (IAI) Extrusivas do Albiano (FLE) IntraAlbiano Camada de Sal	Base do Sal

**Tabela 6. Modelos geológicos de traçado do raio.**

## 6.0 Estudo de Iluminação.

Em ótica, a iluminação é definida como a “intensidade de luz que atinge uma superfície” (Sheriff, 2002). Em sísmica, este conceito foi adaptado como “a energia de uma onda sísmica que incide em um refletor e é refletida” Laurain *et al.* (2004b).

Estudos de iluminação são utilizados principalmente para análise de viabilidade e definição de diferentes geometrias de aquisição sísmica. O método é bastante útil na estimativa de “*infill*” para o planejamento da aquisição em áreas de obstrução de equipamentos submarinos (Moldoveanu *et al.*, 2003 in Laurin *et al.*, 2004b). Após o processamento sísmico, os estudos de iluminação ajudam a compreender as variações de amplitude ou zonas de sombra. (VerWest *et al.*, 2001; Gereia *et al.*, 2003).

A distribuição uniforme de pontos de reflexão na superfície de iluminação representa o cenário ideal em termos de amostragem e, as zonas de sombra, normalmente são interpretas como imperfeições na construção da imagem (limitações de “imageamento”). O *software* Norsar utilizado neste projeto, de ampla aplicação comercial e também de pesquisa acadêmica na indústria do petróleo, é uma tecnologia de modelagem sísmica desenvolvida a partir do método do traçado do raio. Comumente aplicada para o planejamento da aquisição sísmica em áreas exploratórias geologicamente complexas, esta tecnologia também tem sido desenvolvida e aplicada em estudos de reservatórios.

Neste projeto o *software* Norsar foi utilizado principalmente para a análise de iluminação dos objetivos profundos afetados pela presença de corpos ígneos nas seções rasas e também pela existência de complexidade estrutural da sequência do Albiano e da camada do Sal.

### 6.1 Análise Estatística Azimutal dos Raios de Incidência.

Um estudo de iluminação pode ser realizado localmente, em uma estrutura (trapa) com potencial exploratório, ou no topo de um reservatório de hidrocarboneto. Esta área delimitada dentro do projeto de iluminação pode ser avaliada separadamente. O objetivo neste caso é definir a configuração fonte/receptor que garanta a melhor iluminação, sobretudo na área preferencial. As fontes e os receptores são colocados em todos os pontos da superfície do modelo e o traçado do raio é calculado a partir de todos os tiros para todos os receptores. O estudo de iluminação é restrito aos raios da área delimitada e

o número total de “hits” incidências, na posição dos receptores, é mostrado em um diagrama de rosetas.

O termo CMP (*common mid point*, ponto comum em profundidade), refere-se ao ponto intermediário entre a fonte e o receptor e o termo CRP (*common reflection point*, ponto comum de reflexão) refere-se ao ponto de reflexão na cela da superfície de iluminação. Os pontos CMP e CRP são aproximadamente coincidentes em um modelo geológico de camadas planas e horizontais e, para modelos com diápiros de sal esta suposição não é válida. Desta forma, para modelos geológicos 3D complexos, os estudos de iluminação devem ser realizados no domínio CRP, utilizando os ângulos de *take-off* (saída) dos raios que seguem a Lei de Snell na construção dos pares fonte/receptor que iluminam a localização específica e constituem um *CRP-gather* (Laurain, 2004b).

Os pares fonte/receptor de maior amplitude, ou outros atributos como número de incidência (*hit-count*), ângulos de incidência e a distância CMP-CRP são agrupados nos domínios do afastamento fonte e receptor (*off-set*) e do azimute. A partir destes agrupamentos de raios são construídos os diagramas de rosetas, para um ponto ou um conjunto de pontos CRP, que auxiliam na definição da geometria de aquisição.

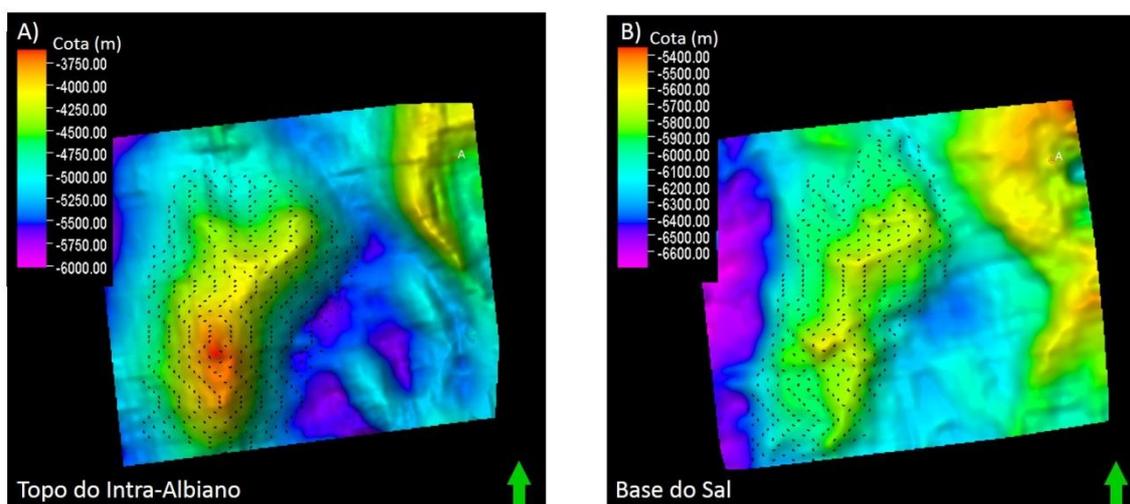
No caso do horizonte alvo do topo Intra-Albiano, a complexidade da iluminação é devida a presença de corpos ígneos situados nas seções mais rasas do Cretáceo até a seção do Terciário, onde duas sucessões vulcano-sedimentares foram mapeadas.

A iluminação da Base do Sal, outro horizonte objetivo, também é prejudicada pelas mesmas rochas ígneas e dependendo da direção de aquisição sísmica, pode apresentar regiões de sombra nas áreas próximas e abaixo das paredes de sal. Ao norte e nordeste da Bacia de Santos, a movimentação do sal causou uma forte estruturação da plataforma carbonática Albiana, espessa e de alta impedância, que também deve ser levada em consideração nos estudos de iluminação da seção do Pré-Sal.

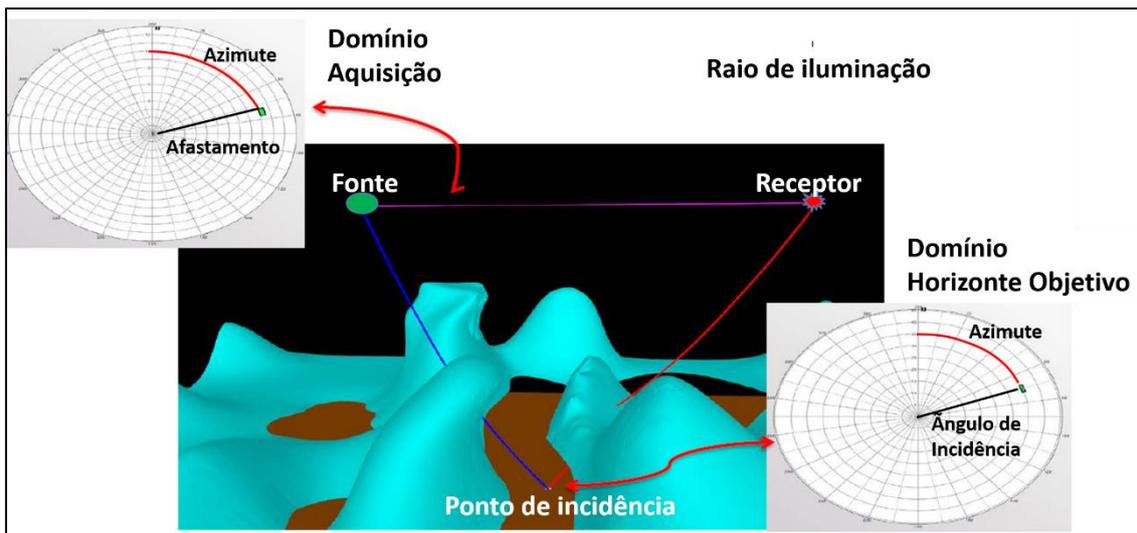
Os resultados do diagrama de roseta dependem muito da topografia e dos elementos da sobrecarga sedimentar e por esta razão, para cada horizonte objetivo, foi escolhido um conjunto de pontos nas áreas de fechamento estrutural sobrepostas ao alto do embasamento e sotoposta a sucessão vulcano-sedimentar EVS\_1. Nesta análise expedita, não são computados os efeitos de maior escala relacionados às variações estruturais e de espessura da camada de sal. O objetivo é buscar a geometria de aquisição mais adequada para a iluminação na área de fechamento estrutural tanto do topo do Intra-Albiano como da Base do Sal. As figuras 41(a) e 41(b) mostram os pontos

amostrais escolhidos para o Topo do Intra-Albiano e para a Base do Sal. A figura 42 mostra de forma esquemática a representação das variáveis em análise nos diagramas de roseta.

Para esta análise expedita de iluminação foram escolhidos três modelos de propagação; o primeiro sem rochas ígneas, o segundo somente com as rochas ígneas intrusivas e extrusivas do Albiano (IAI e FLE) e o terceiro representando o caso completo com as sucessões rasas vulcano-sedimentares (EVS).

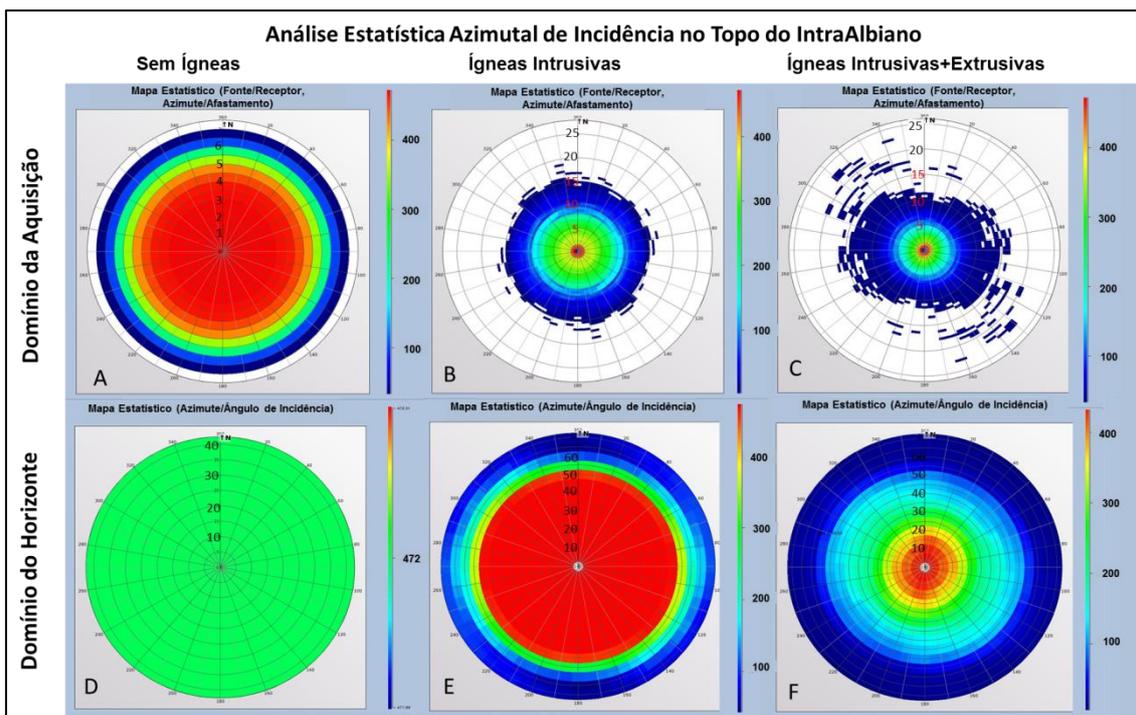


**Figura 42. Pontos Amostrais para análise de estatística azimutal. a) Topo do Intra-Albiano b) Base do Sal.**



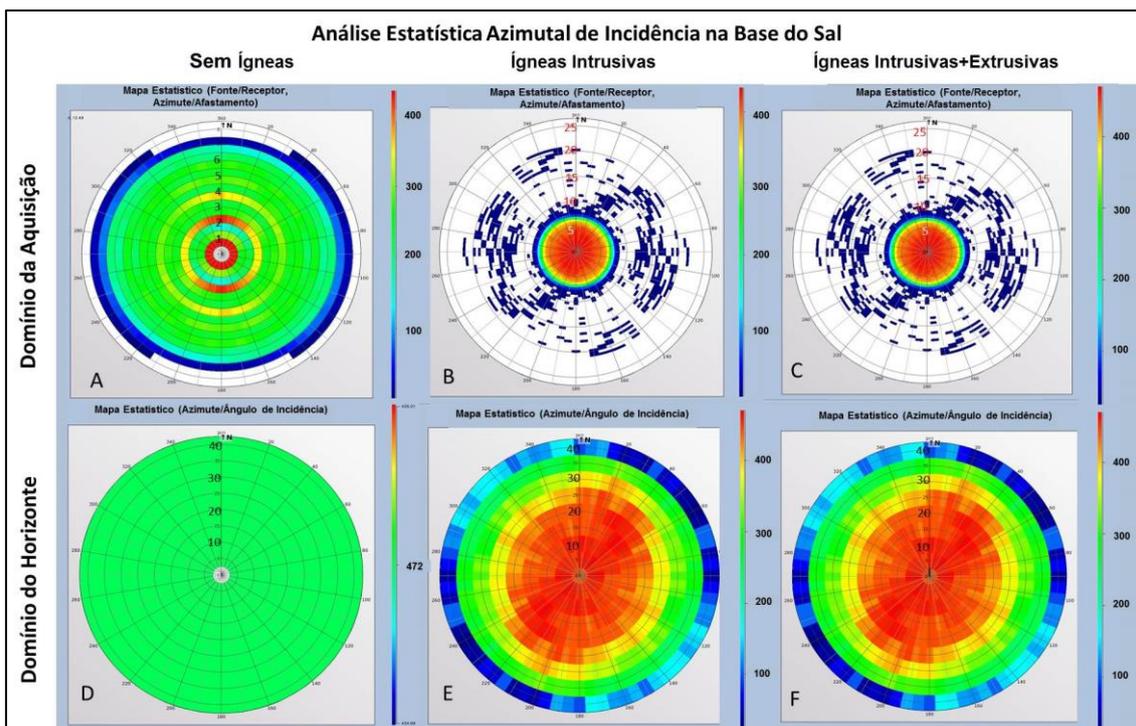
**Figura 43. Representação esquemática da construção dos diagramas de roseta.**

No estudo de raio de iluminação do Topo do Intra-Albiano (figura 43) observa-se, em todas as direções, que a região de maior incidência corresponde ao afastamento máximo de 6 km, tanto no caso mais simples (a) onde os raios se propagam livremente do fundo do mar até o objetivo como no segundo caso (b) em que os corpos ígneos (IAI e FLE) foram inseridos. Para a área destes pontos amostrais a variação estrutural do horizonte não causou impacto. No terceiro caso (c) onde foi inserido o modelo dos “vulcões” mais rasos (EVS1 e EVS2) verifica-se nos afastamentos mais longos, de baixa incidência, entre 10 km e 15 km reflexões na direção preferencial NW-SE. Também neste caso chama à atenção a quantidade de ocorrências esparsas na direção dos afastamentos mais longos. Estas contribuições podem ser devidas as reflexões laterais oriundas dos corpos de rochas ígneas de geometria abrupta e de forte contraste de velocidade. No diagrama de reflexões deste mesmo cenário observa-se, na variação de pequena escala de direção NE-SW, que o número de “chegadas” dos raios é maior para os ângulos de 15° graus de incidência (figura 43-f). Desta forma, nesta área específica, espera-se que a direção NE-SW de aquisição contribua mais para a iluminação de detalhe na área de fechamento do topo do Intra-Albiano.



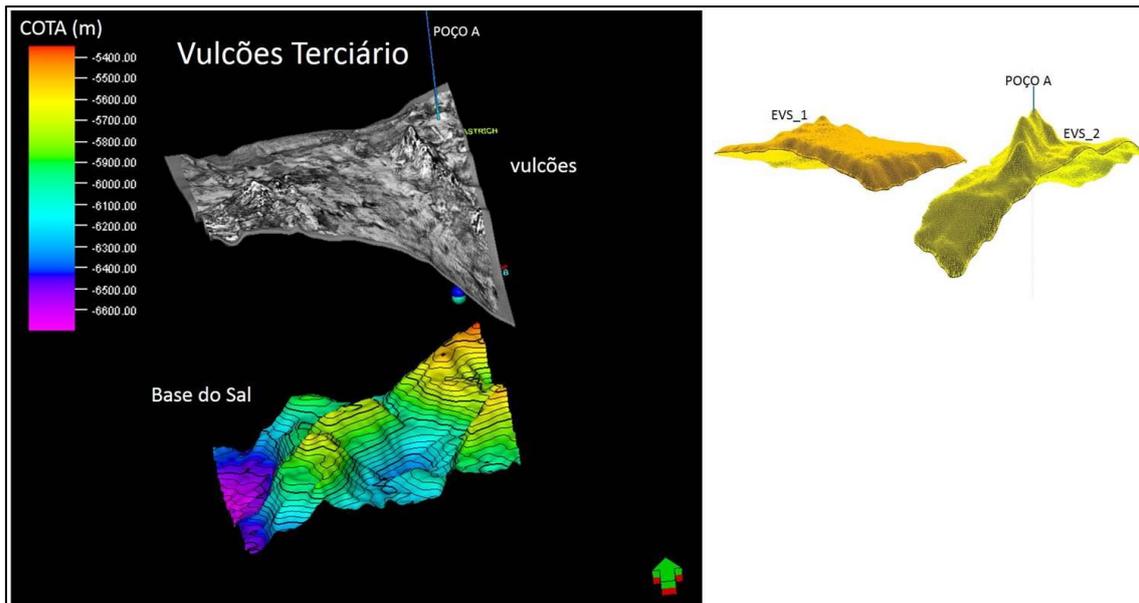
**Figura 44.** Diagramas de roseta dos pontos amostrais do Topo do Intra-Albiano construídos com o intervalo angular de 5° graus, medido a partir do Norte, e a 0.5 km de afastamento medido a partir do centro.

No estudo do raio de iluminação da Base do Sal (figura 44), observa-se nos diagramas de azimuth-afastamento de todos os modelos que número de reflexões até 7 km é quase homogêneo na varredura azimutal. Acima desta distância, o efeito da presença dos corpos ígneos é o mesmo para os modelos das figuras 44 (a) e 44 (b) com uma tendência de melhora na iluminação para os afastamentos mais longos nas direções NW-SE, de maior abertura azimutal, e na direção NE-SW em uma faixa azimutal mais restrita.



**Figura 45. Diagramas de roseta dos pontos amostrais da Base do Sal, construídos com intervalo angular de 5° graus, medido a partir do Norte, e passo de 0.5 km de afastamento medido a partir do centro.**

Os diagramas de reflexões (CRP) da Base do Sal mostram que a presença dos corpos ígneos causa um efeito negativo na direção NW-SE de iluminação. Até 30° graus de ângulo de incidência o número de reflexões é maior na direção NE-SW, cenário representado pelas figuras 44 (e) e 44 (f). Este resultado é coerente com o resultado no topo do Intra-Albiano e está relacionado à orientação NW\_SE do “paleovulcão” da sucessão vulcano sedimentar EVS\_1 (figura 45).



**Figura 46. Visualização e modelo do traçado de raio das sequências vulcano-sedimentares.**

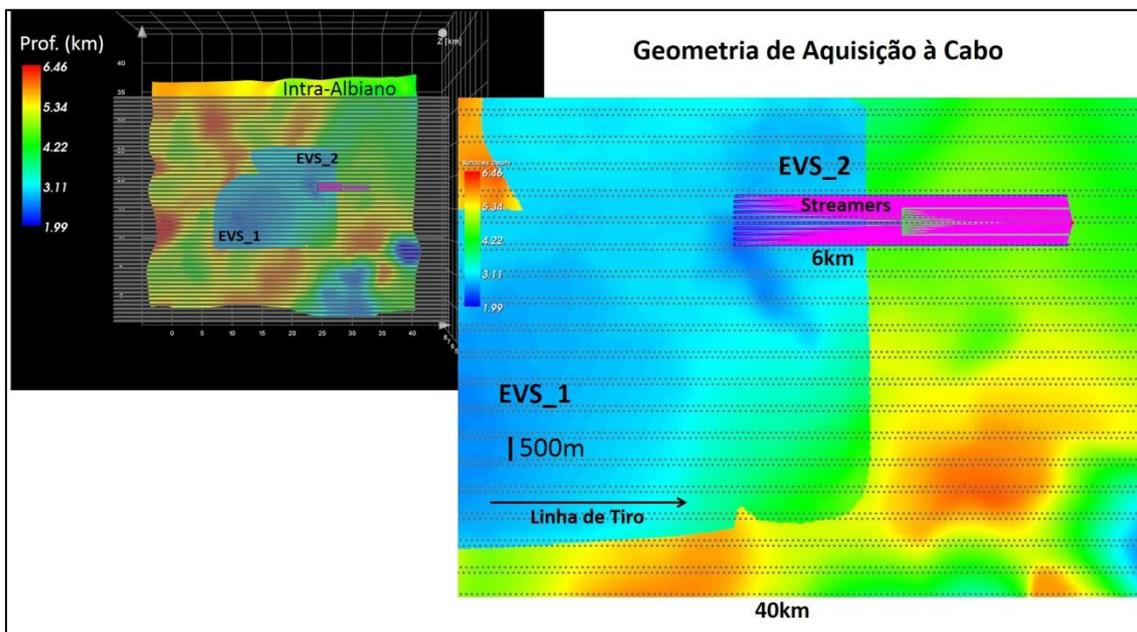
## 6.2-Aquisição Sísmica Convencional X *COIL*

A geometria de aquisição sísmica normalmente é definida através de testes que são realizados na etapa de análise de estatística azimutal como previamente descrito. Quando se quer entender o impacto individual dos “objetos” geológicos na iluminação dos objetivos mais profundos, são testados cenários de traçado de raio a partir de uma mesma geometria de aquisição. Estes cenários de traçado do raio são calculados a partir de cenários geológicos previamente definidos e descritos no capítulo anterior.

Com o resultado da análise estatística azimutal, conclui-se que os corpos ígneos atuam como anteparos que afetam a contribuição dos raios com afastamentos maiores que 6 km. Por esta razão, foi realizado um teste com uma aquisição *Coil* com maior distribuição azimutal e cabo mais longo (8 km) para testar a resposta de iluminação no cenário de maior complexidade geológica. A seguir são descritos, de modo sucinto, as geometrias de aquisição utilizadas na modelagem por traçado de raio.

Para reproduzir a cobertura aproximada e verdadeira do CMP da geometria de aquisição do dado original, foi simulada uma aquisição sísmica marinha a cabo com geometria e parâmetros similares com direção de aquisição aproximada igual a N81E. No sistema de coordenadas do projeto Norsar esta direção é paralela ao eixo “x”.

A configuração do tiro e dos receptores corresponde ao padrão de uma aquisição sísmica convencional com 56 linhas de tiro com comprimento igual a 40 km, espaçamento igual a 500 m e distância de 50 m de intervalo de tiros alternados (*flip flop*). A configuração de receptores foi definida com 10 cabos com espaçamento de 100 metros, *offset* mínimo de 100 metros, comprimento de 6 km e espaçamento de receptores igual a 25 metros. Este esquema de aquisição sísmica está representado na figura 46.



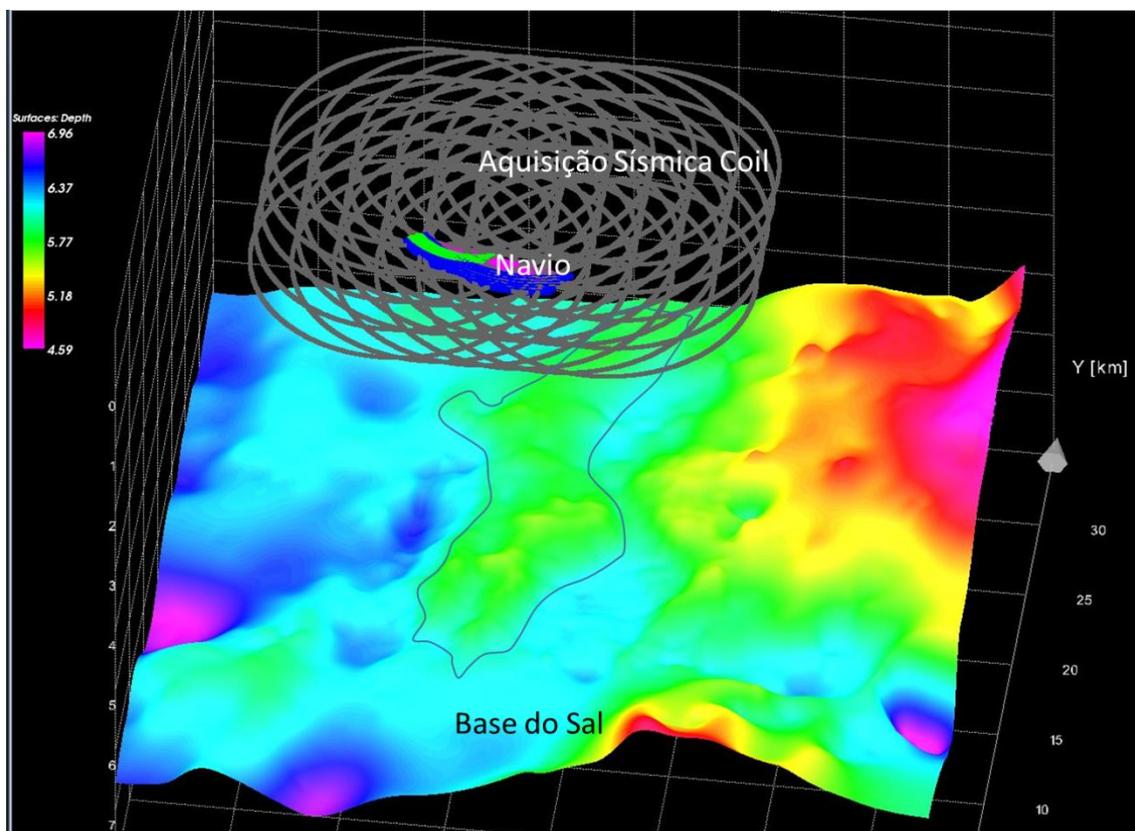
**Figura 47. Configuração da aquisição sísmica a cabo.**

O objetivo de modelar sísmicamente a resposta de amplitude com uma aquisição *Coil* foi o de melhorar a iluminação na área central do fechamento estrutural da Base do Sal. Cabe ressaltar que normalmente o custo deste tipo de aquisição é muito elevado e, por esta razão, na definição da geometria de aquisição considera-se a maximização da cobertura, a redução do tempo de aquisição e do custo computacional. Neste projeto os critérios de economicidade não são considerados e o objetivo é entender a intensidade do impacto geológico na iluminação, com cobertura máxima, descartando as limitações da amostragem azimutal.

No sistema *Coil* escolhido, a configuração do tiro é de 50 metros e o espaçamento entre os receptores é de 25 metros, dispostos em seis cabos de 8 km de comprimento e afastamento mínimo de 100 metros. Este sistema de aquisição está posicionado a 2

metros de profundidade com a navegação partindo de oeste em direção a leste, no sentido horário em um círculo radial de 7 km e incremento de 2 km.

A figura 47 ilustra o esquema de aquisição *coil* definida na profundidade absoluta de 2 metros e em perspectiva com a base do sal.



**Figura 48. Configuração da aquisição sísmica *Coil*.**

A baixa iluminação sísmica pode ser atribuída a muitos fatores sendo o mais relevante relacionado à geometria de aquisição e ao modelo geológico. Considerando-se estes dois fatores somente o primeiro pode ser controlado. São muitas as possibilidades de geometrias e parâmetros de aquisição e, devido ao elevado custo e tempo de execução, as metodologias que permitem comparar os cenários de iluminação em um horizonte objetivo são importantes no processo de tomada de decisão.

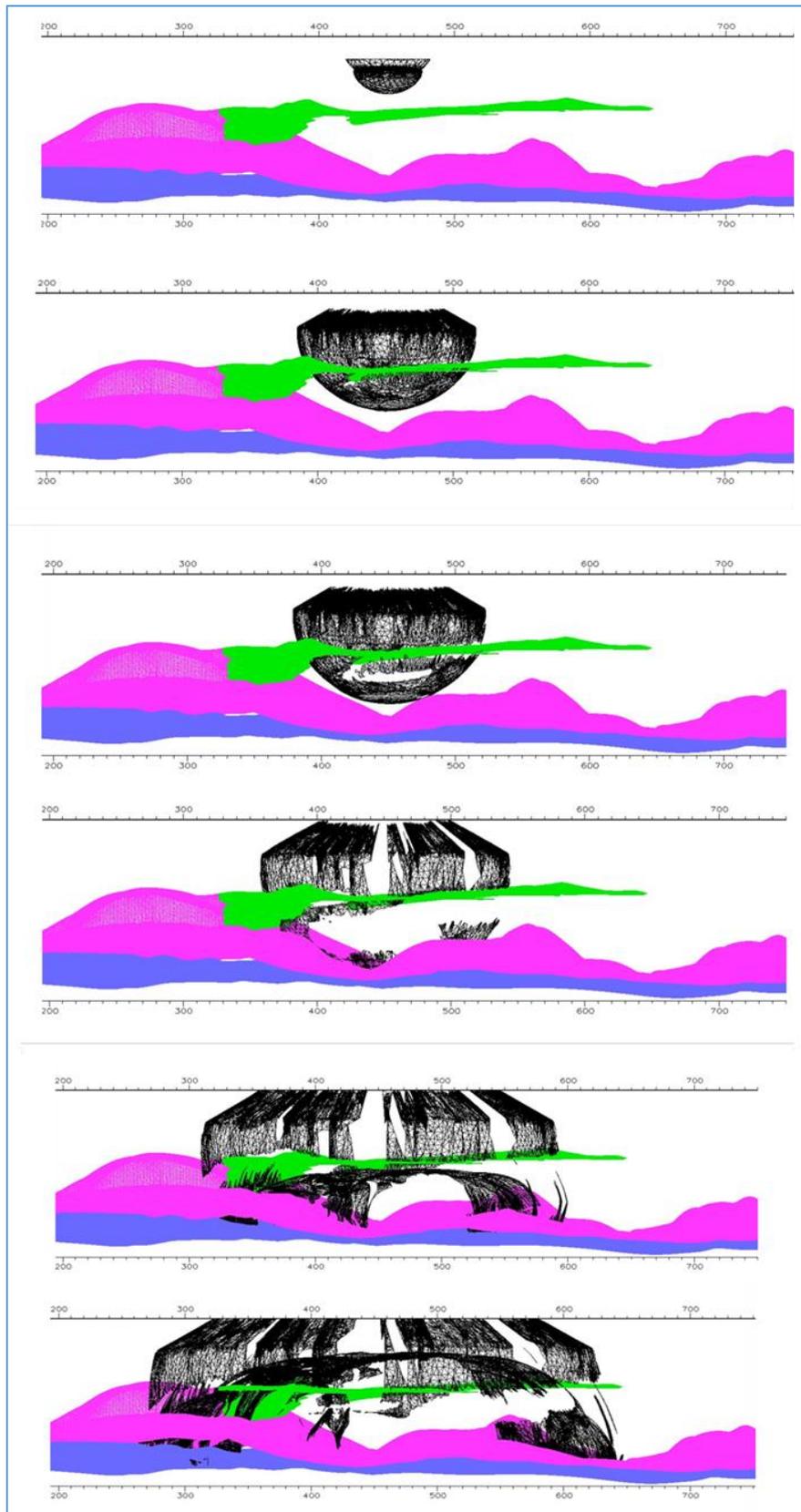
Definidos os cenários da modelagem geológica e as geometrias de aquisição o traçado do raio é então construído para toda a área do projeto.

### 6.3 Parametrização do Traçado de Raio

Na etapa modelagem sísmica foi utilizado o método de traçado do raio “*two point*” com construção de frente de onda desenvolvido por Vinje *et al.* (1993). O programa gera, por triangulação, uma frente de onda e a propaga através do intervalo de tempo e densidade de raios pré-definidos. Uma interpolação posterior é feita para transferir o dado registrado dos raios para o ponto receptor.

Sucessivas frentes de onda são geradas a partir da frente inicial nas interfaces do modelo, através de um número de raios constante e elevado controlado pela distância entre os raios vizinhos e pelos ângulos entre a normal e os triângulos da malha numérica. A distância máxima utilizada entre os raios foi de 0.5 km, com um ângulo máximo entre estes e a normal igual a 10 graus. O intervalo de tempo (“*time step*”) escolhido foi de 0.10s com tempo total de propagação de 10 s. O ângulo de mergulho utilizado em relação ao tiro (*down going*) e ao receptor (*up coming*) é de 90 graus com remoção dos raios pós-críticos. O algoritmo utilizado foi o de Taylor com nível de acurácia moderada.

Na figura 48 são ilustradas na seção E-W, em perspectiva frontal, o resultado da propagação de uma frente de onda definida por triangulação a partir de uma fonte pontual (tiro), com geometria de aquisição a cabo, no modelo que incorpora as sucessões vulcano-sedimentares (EVS\_1 e EVS\_2), o Topo do Sal e a Base do Sal. Na terceira imagem já é possível observar o efeito da perda de raios abaixo das sucessões vulcano-sedimentares (EVS\_1 e EVS\_2) fortemente contrastantes com o meio. Esta zona de sombra só pode ser “iluminada” com uma configuração de tiros mais afastados e cabos de receptores mais longos posicionados em várias direções.



**Figura 49. Propagação da frente de onda no modelo do traçado de raio com construção de frente de onda (perspectiva E-W frontal).**

#### 6.4-Métodos de Simulação de Amplitude.

O método mais simples de simulação consiste na soma das amplitudes de todos os raios que incidem em cada cela para gerar o mapa de amplitude de iluminação. Este mapa de iluminação (como o *hitmap*, números de reflexões, ou somatório) representam boas aproximações das amplitudes reais nos modelos constituídos por camadas planas e horizontais. Porém este método convencional é limitado para os modelos com topografia rugosa ou acidentado e a aproximação da amplitude estimada para amplitude sísmica real geralmente é pobre.

O aumento contínuo de capacidade computacional abre espaço para soluções mais complexas de estudo de iluminação. O estado da arte neste assunto de análise quantitativa de iluminação consiste em realizar a modelagem direta por Diferenças Finitas em um modelo 3D complexo seguido por uma migração baseada no tempo reverso (*RTM, Reverse Time Migration*) (Hoffmann,2001 *in* Laurin, 2004b). O método considera a propagação da onda e a amplitude é extraída automaticamente a partir dos eventos sísmicos modelados. O método é quase perfeito uma vez que o modelo de velocidade utilizado no processamento é o mesmo da modelagem de amplitude e da migração em profundidade. Esta abordagem é adequada em qualquer nível de complexidade, porém com custo elevado de CPU podendo em alguns casos inviabilizar a aplicação completa em uma determinada área. Na medida em que a capacidade computacional for aumentando, a solução completa de modelagem direta de propagação da onda, seguida do processamento e da migração tempo-profundidade, será cada vez mais acessível.

Como exemplos de implementação do método direto de modelagem por equação da onda são citados os trabalhos de Alves *et al.* (2008) e Silva *et al.* (2011). Alves *et al.* (2008) apresentam uma metodologia de estudo de iluminação guiada pelo horizonte sísmico objetivo com distintas geometrias de aquisição. Para avaliar a amplitude da iluminação em pontos específicos os autores utilizaram a função de Green, solucionada pelo método de diferenças finitas, através da aplicação da equação da onda completa, nas trajetórias de ida e de volta. Silva *et al.* (2011) desenvolveram a partir do método de Alves *et al.* (2008, 2009), uma metodologia de análise de iluminação qualitativa e quantitativa que evita mudanças de amplitude e de fase na resposta sísmica em função da assinatura da fonte contida na modelagem. Através da solução da equação da onda acústica, obtida pelo método de diferenças finitas, a amplitude máxima do campo de

onda é calculada para representar a matriz de energia em cada ponto do modelo de velocidade.

Os métodos de iluminação baseados em celas regularizadas (“*binning*”), a partir das reflexões calculadas pelo traçado do raio, oferecem alternativas mais eficientes em termos computacionais e flexíveis para os estudos globais de iluminação. Com a capacidade atual dos computadores é possível realizar estudos completos de iluminação (modelagem e iluminação) de uma área completa de aquisição sísmica, em algumas horas ou semanas.

Vinje (2000) e Laurain *et al.* (2002) introduziram a Amplitude Simulada Migrada (*SMA-Simulated Migrated Amplitude*) que leva em consideração tanto a zona de Fresnel como o sinal sísmico sintético. Baseado em uma aproximação de segunda ordem do campo do tempo de propagação ao redor de um ponto de reflexão, o método simula uma migração pré-stack, do dado sintético em profundidade, com o algoritmo de Kirchhoff. O processo é baseado nos resultados do traçado do raio que são regularizados em cela na superfície refletora e a amplitude, de cada chegada computada, é espalhada sobre a zona de Fresnel. Os resultados dependem do pulso sintético da fonte utilizada e da geometria do refletor objetivo e, os efeitos da sobrecarga sedimentar e dos anteparos geológicos rasos, podem ser percebidos na amplitude migrada final.

A partir de uma determinada aquisição sísmica o método de Amplitude Simulada Migrada (*SMA-Surface Simulated Amplitude*) do *software* Norsar, utilizado neste projeto, utiliza os traçados dos raios refletidos em um horizonte sísmico interpretado e modelado para este objetivo.

A equação da Amplitude Simulada Migrada corresponde a uma alteração da equação de Kirchhoff. A expressão matemática para uma migração de Kirchhoff, de acordo com Bleistein e Gray (2001) *in* Laurain *et al.* (2004a) pode ser escrita da seguinte forma:

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

onde  $x$  indica um ponto em profundidade,  $U$  o traço sísmico,  $F$  é o filtro de recuperação da forma do pulso original,  $\xi$  são as coordenadas do traço,  $\tau(x, \xi)$  é o tempo de trânsito da fonte para o receptor através de  $x$ ,  $W$  é o peso da migração e  $\beta(x)$  é a amplitude de migração em profundidade na posição  $x$ . Para um dado traço correspondente a um par

fonte/receptor, a função do tempo duplo de trânsito  $\tau(x, \xi)$  é computada em um modelo de velocidade em profundidade. Tradicionalmente isto é feito pelo traçado de raio e requer bastante tempo de CPU e espaço em disco. Cada amostra em tempo é espalhada ao longo da isócrona em profundidade. A imagem final  $\beta(x)$  de subsuperfície é obtida a partir da soma, em profundidade, dos traços de mesmo afastamento.

O método *SMA* é baseado no traçado dos raios refletidos e, conseqüentemente assume que o refletor alvo foi interpretado e utilizado o modelo. Não se trata de um método de “imageamento” e sim uma maneira de estimar as amplitudes PSDM para um determinado modelo e uma dada aquisição sísmica. São três as alterações da equação de Kichhoff para a implementação do método *SMA*: (1) o traço sísmico  $U(\xi, t)$  é substituído pelo traço computado pelo traçado do raio; (2) a função do tempo duplo de trânsito  $\tau(x, \xi)$  é substituída por uma aproximação paraxial de segunda-ordem baseada no traçado do raio; e (3) o empilhamento (soma) do pulso é feito, ao longo do refletor objetivo, somente na área de contribuição em torno do ponto conhecido de reflexão.

A eficiência do *SMA*, comparativamente com o PSDM, se deve ao fato de que o traço é somado somente em alguns nós ao longo do refletor enquanto que no PSDM, o empilhamento ocorre em todos os pontos do cubo sísmico 3D no domínio da abertura do operador de migração. Outra vantagem é que os tempos de trânsitos, em torno do ponto de reflexão, são computados por uma aproximação paraxial simples, baseada somente na teoria do raio especular (Cerveny & Psencik, 1984). Quando todos os traços são somados ao longo do refletor alvo, é gerado um mapa que aproxima a amplitude de um PSDM verdadeiro.

O método de iluminação *SMA*, para o estudo dos alvos do Intra-Albiano e da Base do Sal, é mais adequado por permitir a execução em vários cenários de modelagem em uma área de elevada complexidade 3D geológica. Dentro do escopo, do cronograma do projeto e dos recursos computacionais como tempo de CPU e espaço em disco, foi escolhida esta metodologia de estudo de iluminação disponível no *software* Norsar.

### **6.5-Simulação de Amplitude Migrada do Topo do Intra-Albiano e da Base do Sal.**

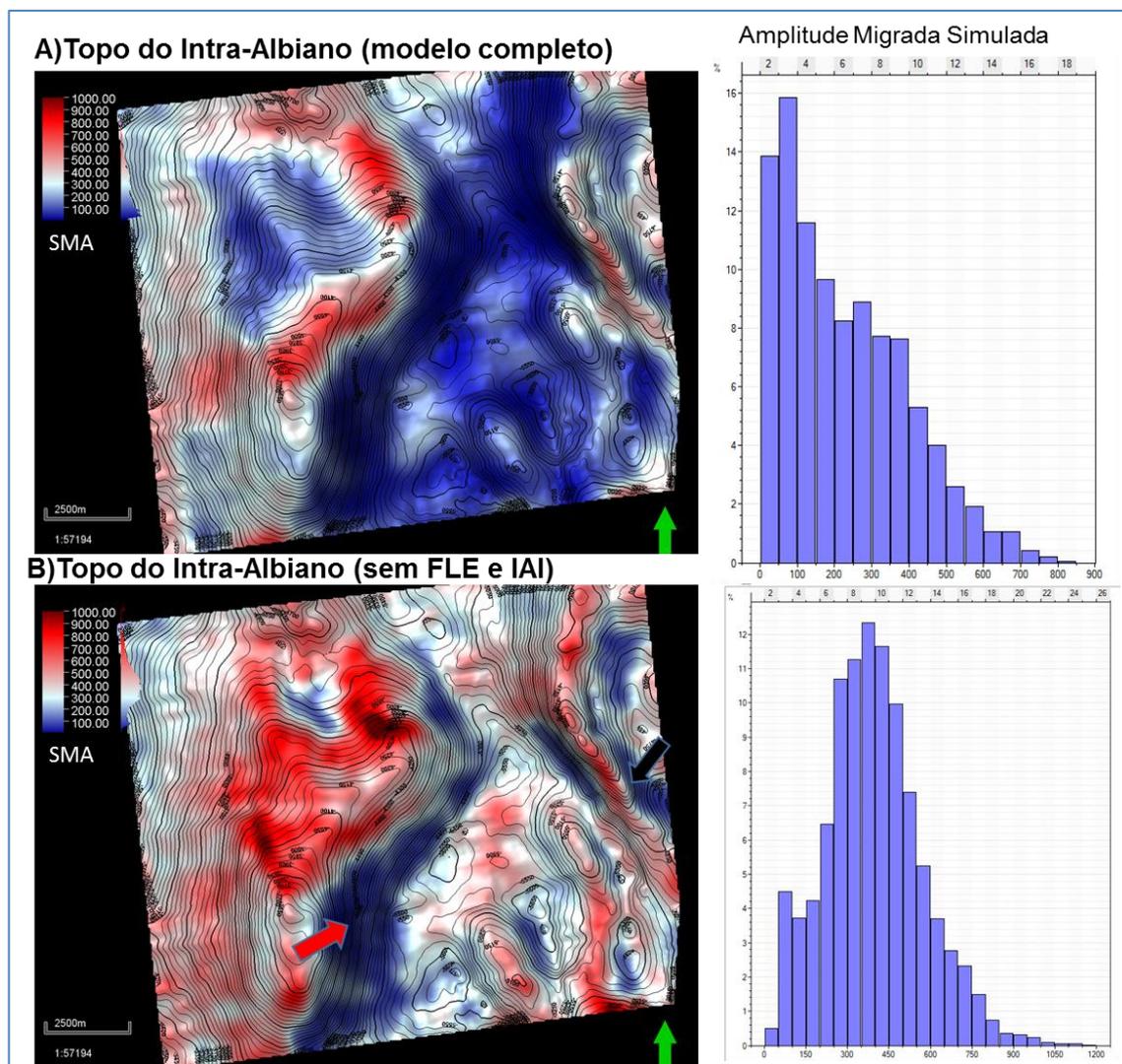
As amplitudes simuladas migradas (*SMA*) foram geradas através da migração dos eventos (reflexões) ao longo dos horizontes do Topo do Intra-Albiano e da Base do Sal. A *wavelet*, ou pulso sísmico, utilizada deve conter um conteúdo de frequência similar ao esperado no objetivo. O traço sintético “P-P” das reflexões da onda P é calculado e filtrado através da transformada de Hilbert de acordo com a dimensão do objetivo a ser iluminado. Com base no estudo de calibração sísmica-poço da área foi utilizada uma *wavelet* “ricker” de fase zero, com frequências dominantes de 50 hertz, para topo do Intra-Albiano e 40 hertz para a Base do Sal.

#### **-Amplitude Simulada Migrada do Topo do Intra-Albiano.**

O Intra-Albiano representa uma sequência carbonática que possui velocidade intervalar média de 4500m/s e densidade igual a 2.5 g/cm<sup>3</sup>. Na área, a configuração estrutural do Topo do Intra-Albiano está relacionada com a morfologia da sucessão salífera sotoposta, a qual é definida por dois diápiros circundados por “minibacias” que são preenchidas pelos sedimentos siliciclásticos do Cretáceo. Nas regiões onde estas “minibacias” são muito espessas, a velocidade intervalar na região mais profunda, chega a ser mais alta ocorrendo variações de fase e de amplitude ao longo do Topo do Intra-Albiano. Adicionalmente, o forte contraste de impedância e a complexidade estrutural do topo do Intra-Albiano, orientado na direção N-S e com mergulhos para W-E, também contribuem para o efeito de sombra de iluminação. Por esta razão para compreender o efeito da presença das rochas ígneas na variação de amplitude *SMA* do topo do Intra-Albiano, foram comparados os mapas calculados a partir dos modelos de traçado de raio completo (figura 50 (a)) com o cenário do traçado do raio onde foram excluídos os corpos ígneos intrusivos (IAI) da seção do Cretáceo e os extrusivos (FLE) do Albiano (figura 50 (b)).

Nos mapas de *SMA*, com sobreposição do contorno estrutural do topo do Intra-Albiano, as baixas amplitudes estão representadas na cor azul e as altas amplitudes pela cor vermelha. Embora fosse esperada uma homogeneidade, levando-se em consideração que a geometria de aquisição é quase ortogonal as estruturas do Intra-Albiano, no mapa do modelo completo da figura 50 (a), observa-se uma sombra ampla e intensa de

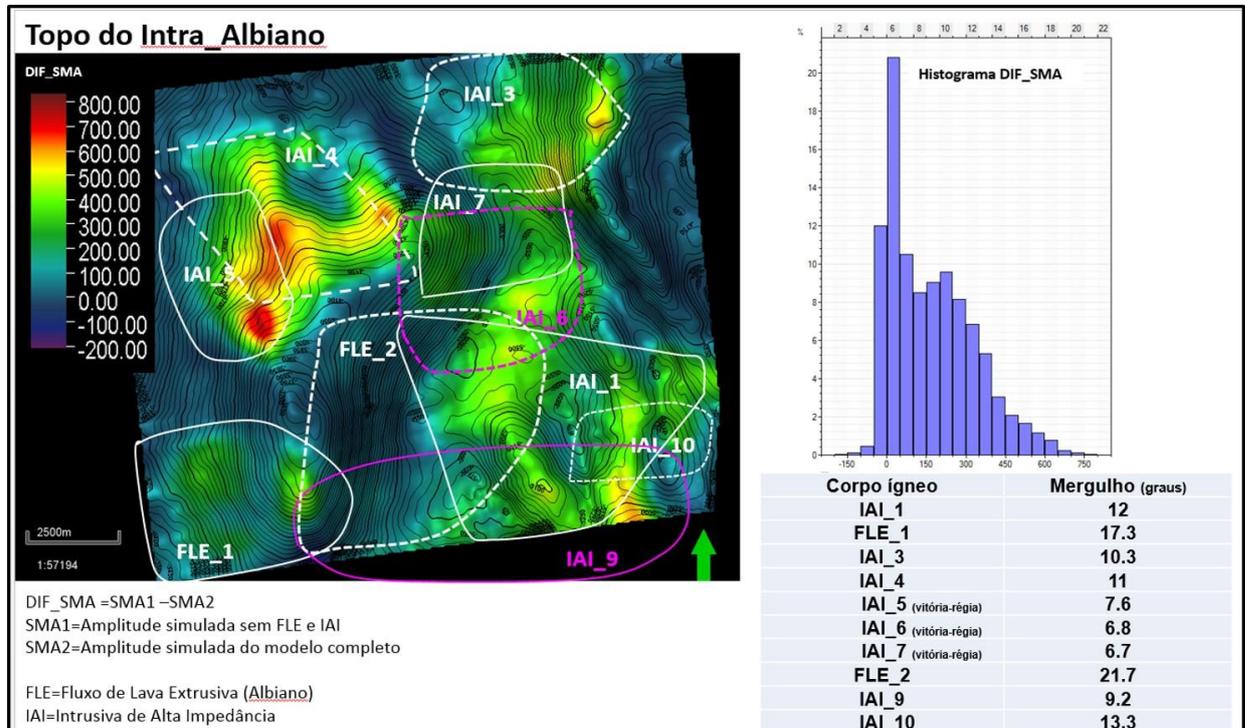
iluminação na porção centro-oeste e outra menos intensa e de menor tamanho a noroeste da área. Na figura 50 (b) é indicado o efeito de sombra de iluminação causado pela sucessão vulcano-sedimentar do Paleógeno (EVS\_2) e a uma forte sombra centro-oeste associada a uma suave inflexão estrutural.



**Figura 50. Mapas e histograma de SMA do Topo do Intra-Albiano. a) Modelo geológico completo do traçado de raio e b) Modelo do traçado de raio sem as rochas extrusivas do Albiano (FLE) e sem as intrusivas do Cretáceo (IAI). Na figura b, a seta preta indica o efeito de sombra da sequência vulcano-sedimentar EVS\_2 e, a seta vermelha indica o efeito de sombra causada pela inflexão estrutural da sequência do Intra-Albiano.**

A diferença entre o mapa de SMA sem os corpos ígneos FLE e IAI e o mapa SMA do modelo completo, mostra o impacto na iluminação de cada corpo ígneo e a relação

com a sua geometria e orientação. Este mapa de diferença é apresentado na figura 51 com os polígonos que representam os limites de projeção bidimensional dos corpos ígneos e seus respectivos mergulhos mostrados na tabela da mesma figura.



**Figura 51. Mapa e histograma, do Topo do Intra-Albiano, da diferença de SMA sem os corpos ígneos FLE e IAI e do SMA do modelo completo.**

Os valores baixos das diferenças dos mapas de SMA, representados pela cor azul escuro, estão relacionados ao baixo contraste de impedância a oeste, à forte sombra devido à inflexão do Intra-Albiano na porção centro-sul e à ocorrência da sucessão mais rasa vulcano sedimentar (EVS\_2) do Terciário situada a nordeste. Comparando-se as informações da tabela com o mapa e o histograma da figura 51 é possível interpretar os efeitos, isolados ou combinados, dos corpos ígneos no estudo de iluminação.

Os corpos extrusivos do Albiano FLE\_1 e FLE\_2 possuem os maiores mergulhos, com o efeito de sombra do primeiro isolado e bem marcado no mapa. O efeito da extrusão FLE\_2 é misturado à zona de sombra do flanco estrutural da sequência do Intra-Albiano. Além disso, este efeito é somado aos dos corpos ígneos intrusivos IAI\_1, IAI\_6 e IAI\_9 onde se verifica uma diferença acentuada do SMA, mais a leste, em torno do valor de 400 a 500.

Nas áreas onde estão presentes os corpos ígneos intrusivos do tipo vitória-régia IAI\_5, IAI\_6 e IAI\_7 observam-se também efeitos similares. O corpo IAI\_5, mais raso e de geometria bastante complexa, possui base plana circundada por uma intrusão vertical e irregular, formando pontos de difração que espalham o raio resultando em uma zona de sombra intensa que é somada ao efeito de sombra da intrusão situada abaixo. Os efeitos de sombra dos demais corpos intrusivos IAI\_6 e IAI\_7 também são mascarados pela sombra do flanco estrutura.

As demais intrusões IAI\_1, IAI\_3, IAI\_4, IAI\_9 e IAI\_10 se concentram nos baixos estruturais e a sobreposição de seus efeitos, onde são verticalmente coincidentes, resulta na ampla sombra de iluminação da porção centro-oeste.

### **-Amplitude Simulada Migrada da Base do Sal.**

Todos os efeitos de iluminação relacionados à presença das rochas ígneas e à complexidade estrutural observados nos mapas de SMA do Topo do Intra-Albiano também foram observados no mapa de iluminação do horizonte da Base do Sal. A estruturação da camada de sal sobreposta constitui um fator adicional complicador na análise da iluminação. Uma vez que a morfologia da sequência carbonática do Albiano foi definida pela tectônica salífera, espera-se que as zonas de sombras relacionadas a esta configuração estrutural sejam espacialmente coincidentes.

Para efeito de comparação na figura 52 (a), (b) e (c) são mostrados respectivamente o SMA calculado a partir do modelo do traçado de raio livre de rochas ígneas (EVS, IAI e FLE), do modelo completo e do modelo onde às ígneas intrusivas (IAI) e extrusivas do Albiano (FLE) são ausentes. Também na figura 52 (d) é mostrada a isópaca de sal com o contorno de 500 m representado em todos os mapas de SMA.

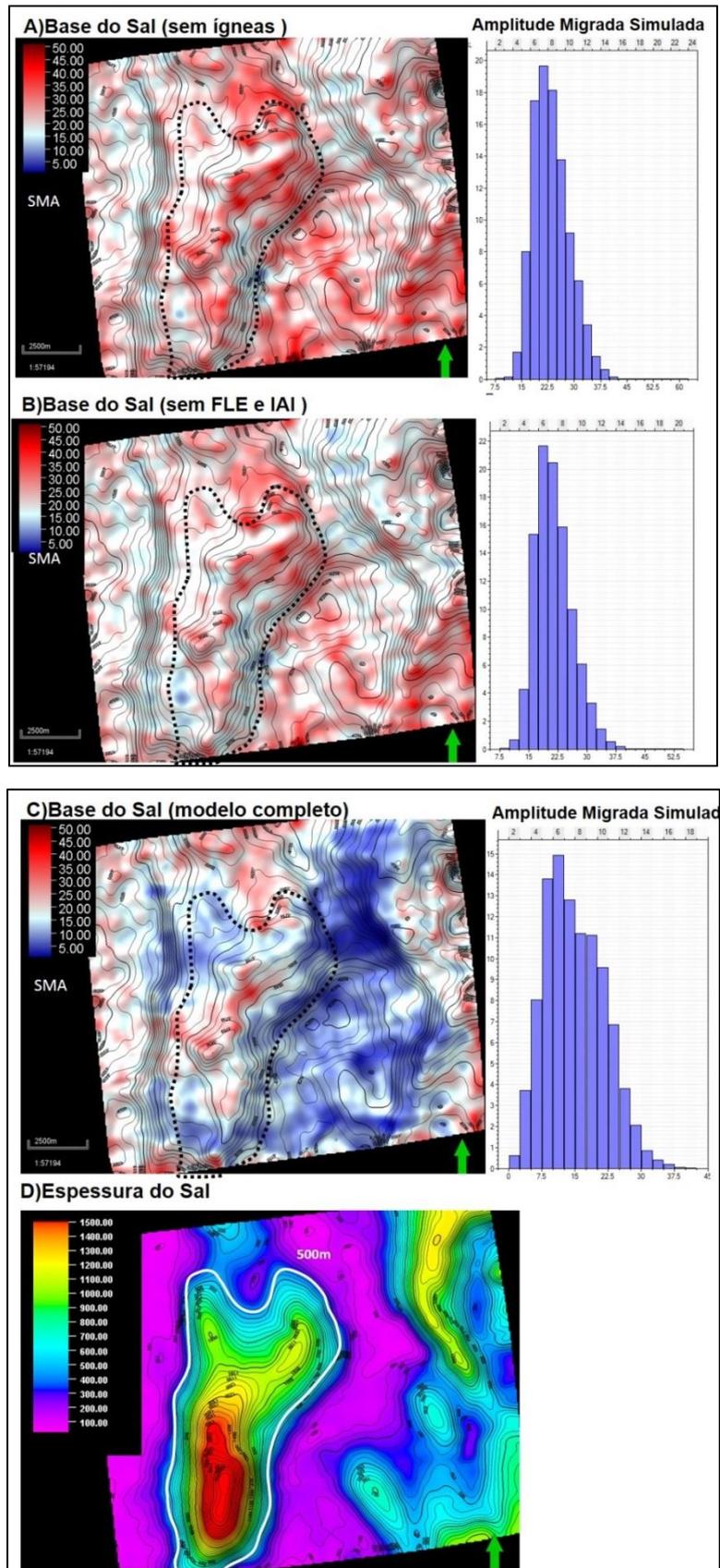
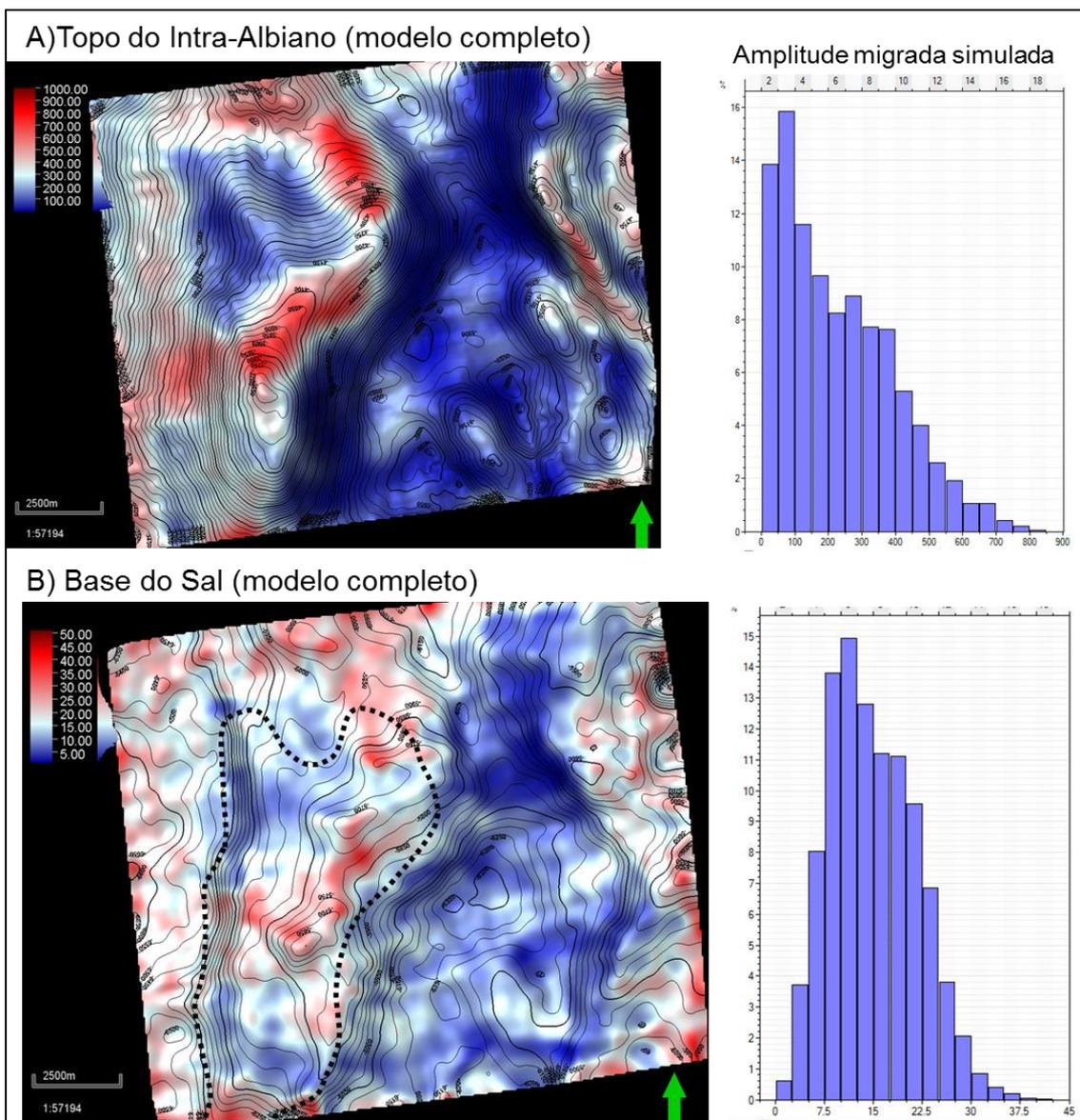


Figura 52. Mapas e histogramas de SMA da Base do Sal.

O grau de complexidade geológica do modelo de traçado de raio da seção compreendida entre o fundo do mar e o topo do Intra-Albiano aumenta nos cenários computados de *SMA* da figura 52 (a), 52 (b) e 52(c). Observa-se na figura 52 (a) que o mapa de *SMA* da base do sal é mais homogêneo com média global ligeiramente mais elevada se comparado com o cenário da figura 52 (b) onde se evidencia também o efeito da presença da sucessão vulcano-sedimentar (EVS\_2) na queda de amplitude simulada a nordeste da área. No mapa da figura 53 (b) observam-se, de forma mais atenuada, as mesmas zonas de sombra dos corpos ígneos que as observadas na figura 53 (a) do Topo do Intra-Albiano. No respectivo histograma além da queda global da amplitude média do *SMA* observa-se uma dispersão maior que reflete a heterogeneidade da iluminação principalmente quando comparado ao mesmo efeito no topo do Intra-Albiano.

Enquanto que no topo do Intra-Albiano as zonas de sombra são mais homogêneas e concentradas, na Base do Sal, a sombra dos corpos ígneos se mistura com os efeitos das variações estruturais da camada de Sal e da sequência do Intra-Albiano. As inflexões de pequena escala relativa às variações de espessura do Sal causam sombras pontuais e intensas que fazem aumentar a variabilidade da amplitude *SMA*. Observa-se nos histogramas das figuras 53 (a) a e 53 (b) que a média e o desvio padrão do *SMA* da Base do Sal são relativamente bem menores que do topo do Intra-Albiano.



**Figura 53. Comparação entre os mapas e os histogramas de SMA do Topo do Intra-Albiano e da Base do Sal calculados com o modelo geológico completo. O polígono pontilhado da figura b representa o contorno da isópaca de 500m da camada de sal.**

Na figura 54 (a) e 54 (b) são mostrados respectivamente os mapas de diferença de SMA sem as ígneas FLE e IAI e também sem as EVS subtraídas do SMA do modelo completo de traçado de raio. Estes mapas apesar de visualmente parecer o contrário, possuem valores mais baixos que as mesmas diferenças computadas para o topo do Intra-Albiano (figura 51). Isto é devido ao maior impacto na iluminação da Base do Sal associado à variação estrutural da sequência carbonática do Intra-Albiano e do Sal.

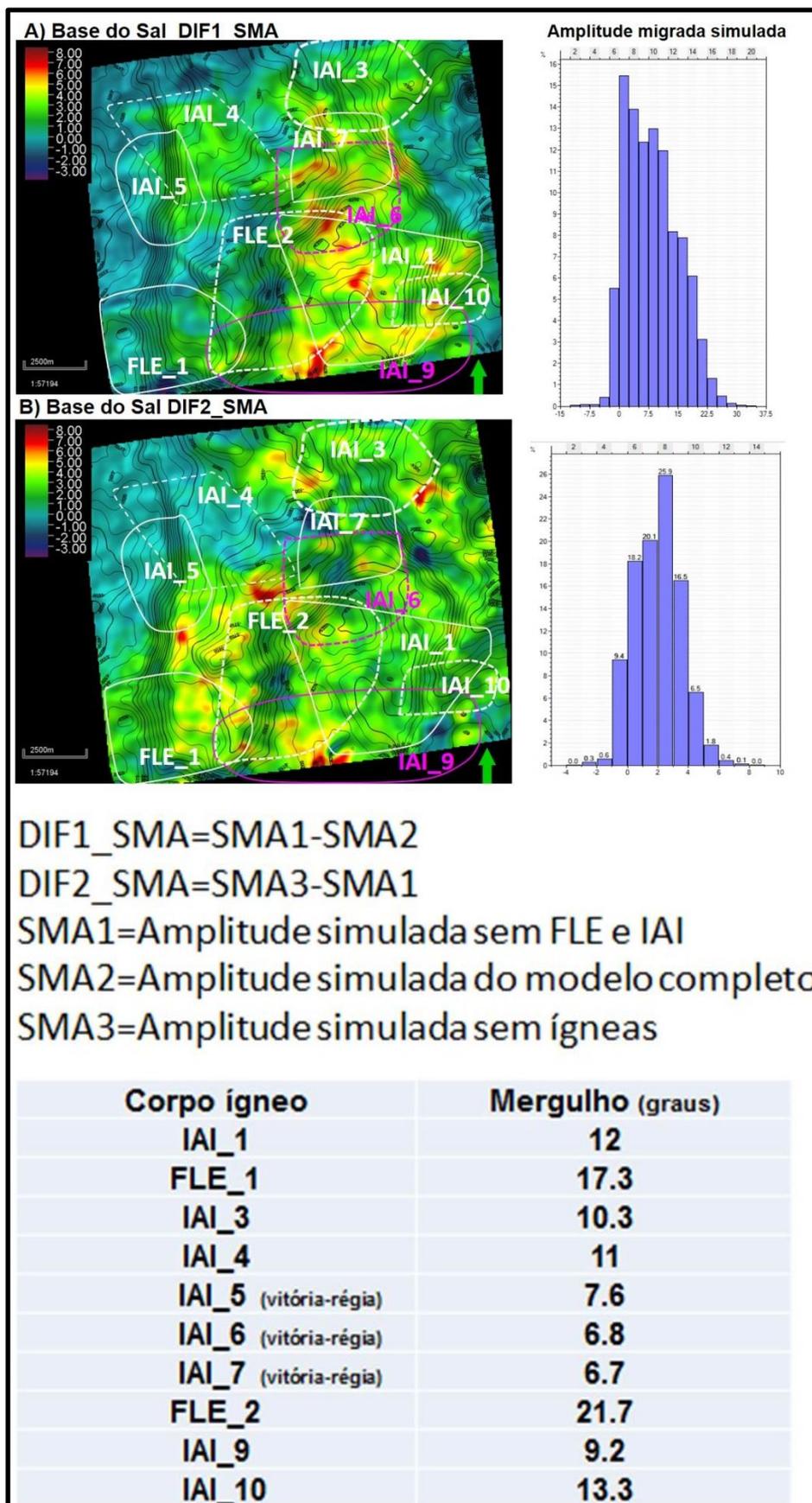
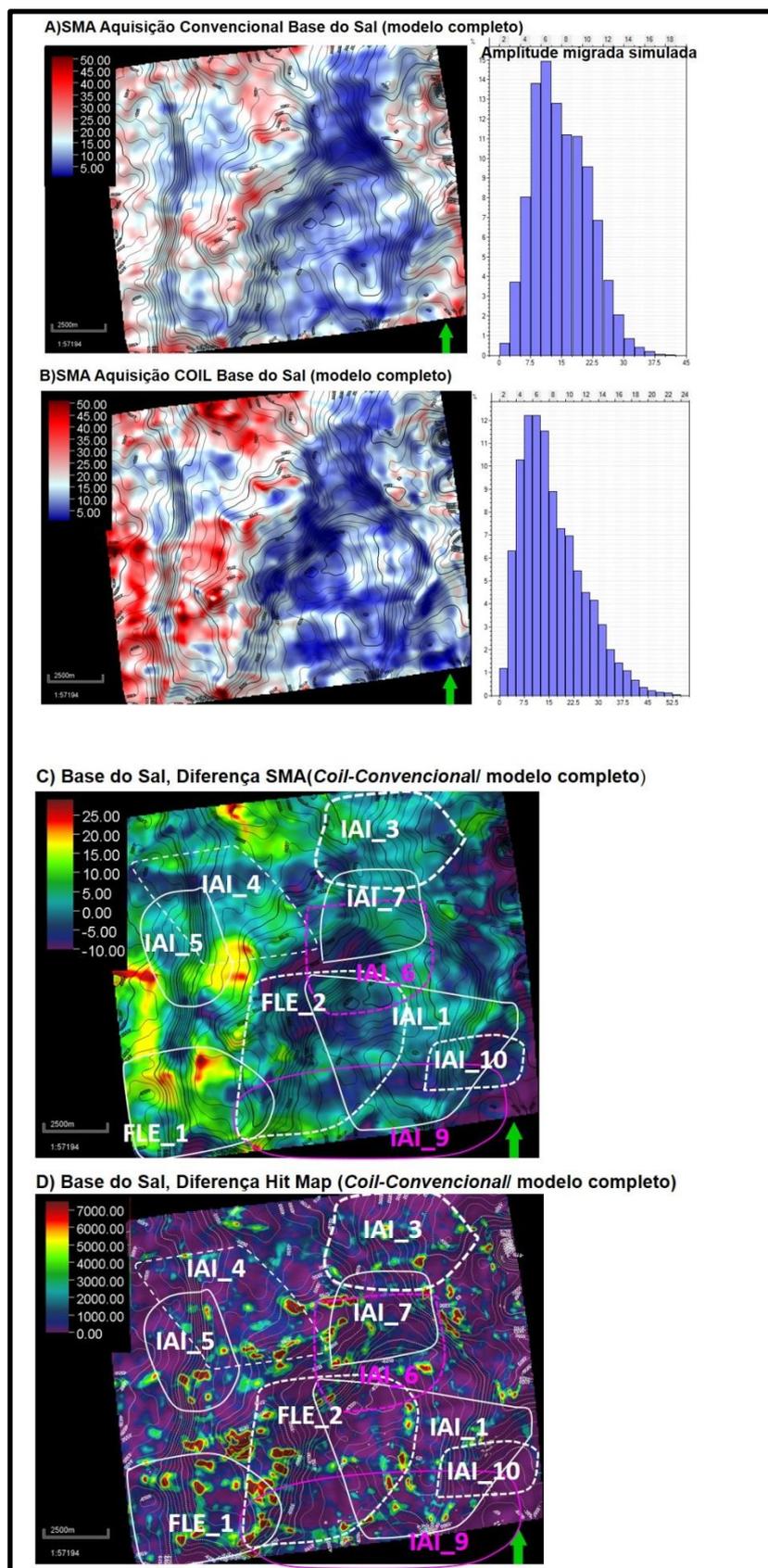


Figura 54. Mapa e histograma de diferença do SMA, com e sem os corpos ígneos, da Base do Sal.

Todos os cenários de amplitude simulada *SMA*, calculados para os objetivos do Topo do Intra-Albiano e da Base do Sal, foram realizados a partir de modelos de traçado do raio executados com a geometria de aquisição convencional a cabo. Esta geometria, próxima a verdadeira, não é a ideal em uma área geologicamente complexa com um objetivo de iluminação profundo, situado em torno de 5000 metros, como a Base do Sal.

Para testar uma aquisição com maior distribuição azimutal e cabo mais longo, foi gerado o mapa de *SMA* da Base do Sal a partir do modelo completo de traçado do raio executado com a geometria de aquisição do tipo *Coil*. Nas figuras 55 (a) e 55 (b) são comparados os mapas de iluminação *SMA* do modelo completo das aquisições convencional e *Coil* e, nas figuras 55 (c) e (d), são mostrados os mapas de diferença do *SMA* e o mapa de diferença do número de incidência dos raios para a aquisição *Coil* e convencional a cabo.



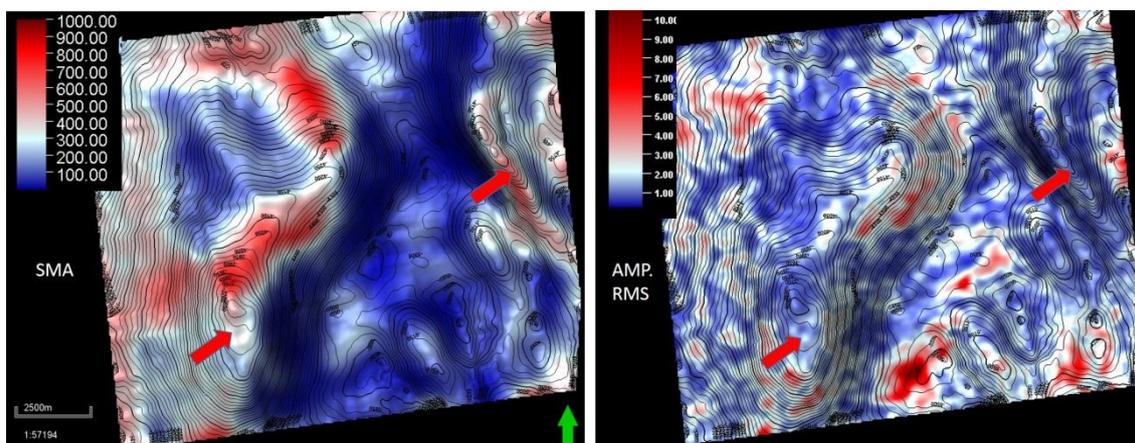
**Figura 55.** Comparação entre os mapas de SMA e diferenças, entre a aquisição a cabo e *Coil*, da Base do Sal.

Como esperado, a média global da amplitude simulada da aquisição *Coil* é maior que a média da aquisição convencional e, na área sudoeste do fechamento estrutural da base do sal, verifica-se uma melhora considerável na iluminação. Tanto nos mapas de diferenças do *SMA* como no de incidência, este aumento localizado da amplitude simulada mostra que a execução de uma aquisição *Coil*, de maior distribuição azimutal, melhora a iluminação de forma relevante nas áreas de ocorrência dos corpos extrusivos FLE\_1 e FLE\_2 que apresentam maior mergulho. Este resultado mostra que, para este cenário geológico, o maior comprimento do cabo da aquisição *Coil* resulta em um número de incidência maior de raios de longo afastamento contribuindo para uma melhor iluminação.

## 6.6-Comparação entre Amplitude Simulada Migrada e a Amplitude Real.

### -Topo do Intra-Albiano.

A comparação entre os mapas de amplitude simulada com o mapa de amplitude RMS (*Root Mean Square*), extraída em uma janela de 10ms e deslocada 4ms verticalmente para cima a partir do topo do Intra-Albiano, é ilustrada nas figuras 56 (a) e 56 (b).

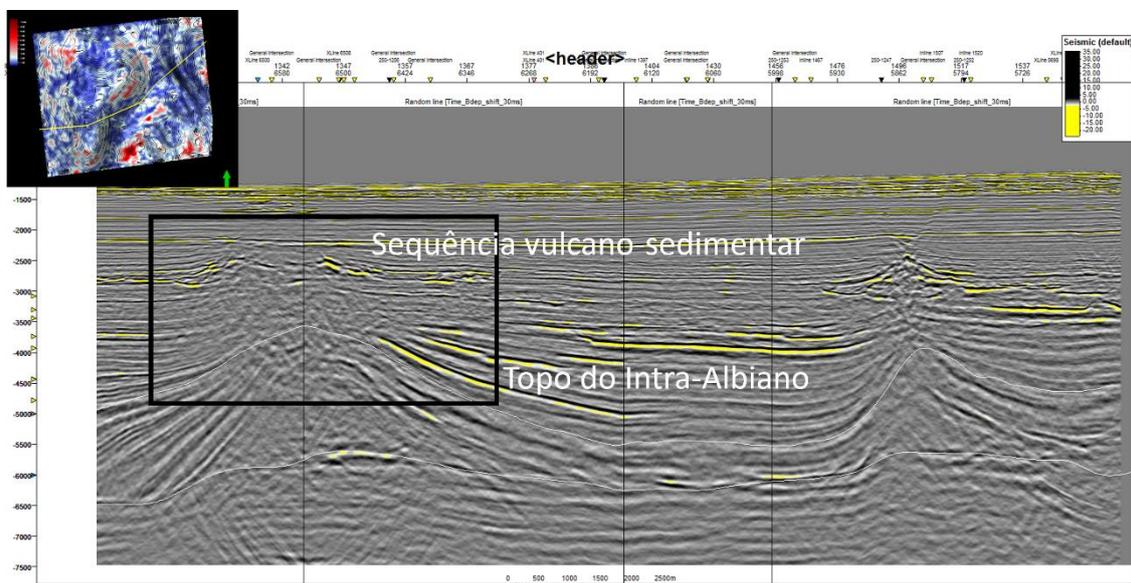


**Figura 56. Comparação entre o mapa de SMA e o mapa de amplitude *RMS* verdadeira (AMP.) extraída em uma janela de 10ms com descolamento vertical negativo de 4ms a partir do Topo do Intra-Albiano.**

Comparando-se os mapas é necessário primeiramente desconsiderar as variações de pequena escala do dado real que possui um espectro de frequência mais amplo que a amplitude simulada limitada a 50 Hz. Observa-se em ambos os mapas a presença das áreas de sombra das rochas ígneas na porção centro-oeste e noroeste. Como parte do resultado desta tese Cortez e Santos (2016), simulando a amplitude no Topo do Intra-Albiano, a partir de um modelo de traçado de raio construído para analisar o efeito da geometria complexa dos vulcões na iluminação, observaram o mesmo efeito de sombra na porção noroeste desta área.

Na figura 56 quando se comparam os mapas observa-se que, nos locais dos fechamentos estruturais, ocorrem discrepâncias indicadas com setas vermelhas (figuras 56 (a) e 56 (b)). Estas anomalias de baixa amplitude verificadas no dado real e ausentes no mapa de SMA podem estar relacionadas à presença de ruídos sísmicos não

solucionados no processamento. A figura 57 mostra uma seção sísmica de direção *inline* onde verificam-se ruídos situados abaixo dos vulcões na área coincidente com a zona de sombra.



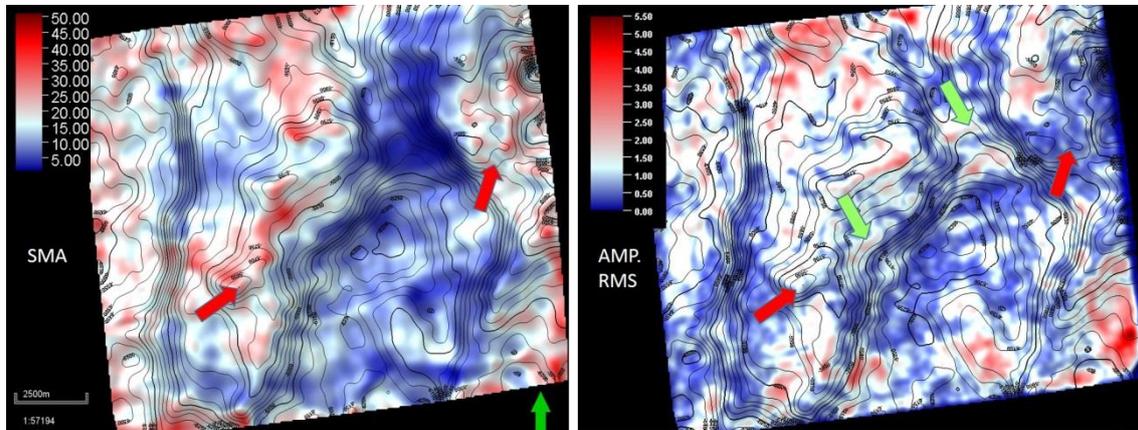
**Figura 57.** Seção sísmica de direção *inline* onde se verifica a presença de ruídos situados abaixo dos vulcões na área coincidente com a zona de sombra.

### **-Base do Sal.**

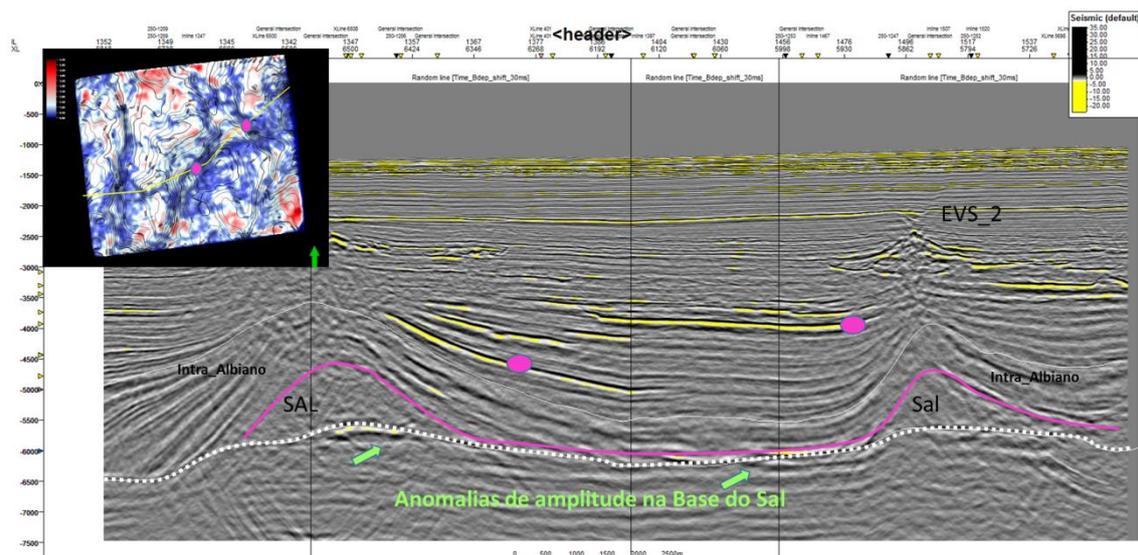
Na base do sal foi extraída a amplitude *RMS* do dado real em uma janela de 20ms, deslocada 10ms verticalmente para baixo, e sua comparação com o mapa de *SMA* é mostrada na figura 58. No mapa de amplitude *RMS* do dado real é nítida a correlação entre a forte estruturação da camada de sal e a baixa iluminação da Base do Sal onde as zonas mais fortes de sombra estão alinhadas com a maior variação de espessura da mesma. Localmente observa-se o mesmo efeito de queda de amplitude devido aos ruídos mais rasos (setas vermelhas) e um aumento local da amplitude associadas a anomalias existentes na base do sal (setas verdes).

Como observado no mapa de amplitude do topo do Intra-Albiano, na seção sísmica da figura 59, observa-se que as rochas ígneas dos corpos extrusivos (FLE) e intrusivos (IAI) presentes na área de “minibacia” da seção pós-sal também contribuem para o efeito de sombra na base do sal. O efeito de sombra dos demais corpos é sutil e de difícil comparação por estarem presentes na mesma escala de variabilidade dos

efeitos dos ruídos, das variações intrínsecas de amplitude e das diferenças de posicionamento entre os métodos de migração *PSTM* e *SMA*.



**Figura 58. Comparação entre o mapa de SMA e o mapa de amplitude *RMS* verdadeira extraída em uma janela de 20ms com descolamento vertical positivo de 10ms a partir da Base do Sal.**



**Figura 59. Seção sísmica onde se observa que as rochas ígneas dos corpos extrusivos (FLE) e intrusivos (IAI), representados pontos de cor rosa na área de mini bacia da seção pós-sal também contribuem para o efeito de sombra na Base do Sal.**

## 7.0-Conclusão.

A interpretação sísmica regional revelou a existência de pelo menos dois ciclos de magmatismo expressivo. São observados complexos de “*sills*” (soleiras) nas partes profundas da bacia, ocorrências de rochas intrusivas esparsas e mergulhantes, desde o Aptiano até o final do Cretáceo, e eventos extrusivos do Albiano e do Paleógeno, com paleovulcões neste último.

Os estudos de iluminação sísmica de uma área Nordeste da Bacia de Santos mostraram que os corpos ígneos do Cretáceo e do Terciário, e as geometrias complexas da sequência de carbonatos do Albiano e da camada de Sal, afetam intensamente as respostas de amplitude dos alvos exploratórios do Intra-Albiano e da Base do Sal.

A geometria externa, a orientação, a posição em profundidade e o contraste de impedância dos corpos ígneos são aspectos relevantes que, em conjunto, modificam a resposta de refletividade dos horizontes alvos. As rochas ígneas intrusivas de alta impedância, e mergulhos estruturais acentuados, atuam como anteparos às trajetórias ortogonais das ondas sísmicas de afastamento fonte/receptor mais curtos, gerando sombras de iluminação nos objetivos mais profundos. Os corpos ígneos intrusivos do tipo vitória-régia, além de apresentar forte contraste de impedância com os sedimentos encaixantes, possuem uma geometria circular com “quinas” na borda que atuam como pontos de difração. Os corpos ígneos poucos inclinados como as soleiras ou as rochas extrusivas, que podem ou não estar intercaladas com sedimentos, contribuem menos na geração de sombras de iluminação.

A interpretação sísmica de detalhe, prévia ao estudo de iluminação, é necessária para caracterizar a resposta sísmica do(s) produto(s) de um ou mais eventos magmáticos em toda a seção geológica de modelagem sísmica. A associação entre os tipos de corpos ígneos, a relação com a rocha encaixante e a presença de fácies sísmicas caóticas resultantes da deformação causada pela ascensão do magma e/ou dos fluídos magmáticos, ajudam a entender a evolução do magmatismo e sua resposta sísmica. Em áreas afetadas por magmatismo, a diminuição de amplitude acompanhada ou não de menor coerência do sinal sísmico não está necessariamente relacionada a problemas de iluminação em objetivos mais profundos. O “caminho” da ascensão magmática, a depender da pressão de poros dos sedimentos, pode ser composto por rochas bastante deformadas e fraturadas que se expressam sísmicamente como fácies caóticas.

Os elementos geológicos de alto contraste de impedância com os sedimentos de “background”, como as rochas ígneas e as sequências carbonáticas e evaporíticas, quando sobrepostos verticalmente, produzem um efeito combinado que resulta em regiões complexas de sombra de iluminação. Neste caso, frente à necessidade de um planejamento de aquisição sísmica, é necessário definir cenários de modelagem geológica, para que o traçado de raio e a simulação de amplitude auxiliem no estudo de causa e efeito, tanto parcial como combinado, de cada objeto investigado. A análise estatística, realizada em uma amostragem de pontos comuns de reflexão (*CRP*) sobre uma área delimitada, consiste em um método eficiente e rápido para a escolha do afastamento fonte-receptor e do azimute que resulte na melhor imagem nos distintos cenários de menor a maior complexidade geológica.

O estudo de iluminação realizado com a Amplitude Simulada Migrada (*SMA*) da Base do Sal, em distintos cenários geológicos, possibilitou avaliar o impacto isolado e combinado dos corpos ígneos e das sequências do Intra-Albiano e do Sal. Este método de modelagem e de simulação de amplitudes mostrou-se eficiente e robusto quando os resultados são comparados com as amplitudes verdadeiras extraídas do dado sísmico original.

A aquisição sísmica de ampla varredura azimutal, apesar de mais dispendiosa em termos de custos e tempo de execução, é indicada para garantir, em toda a área de interpretação sísmica, uma iluminação sísmica homogênea de alvos profundos sotopostos a uma geologia complexa.

Os atributos sísmicos geométricos combinados com um atributo de intensidade como a amplitude ou impedância, são fundamentais para a extração automática de corpos tridimensionais (*geobodies*) através a curva de opacidade. A definição precisa da geometria externa dos corpos ígneos de alta impedância é uma etapa prévia de alto impacto no estudo de iluminação dos objetivos mais profundos.

As propriedades sísmicas, extraídas dos perfis de Vp e Densidade, das rochas ígneas intrusivas (IAI) e vulcano-sedimentares (EVS) são fortemente contrastantes com as propriedades das rochas siliciclásticas encaixantes. As rochas ígneas extrusivas do Intra-Albiano possuem impedância similar à dos carbonatos, de modo que outras fontes de dados, como os perfis litológicos e descrição de rochas, são necessárias para a classificação das mesmas.

No estudo de iluminação de vários cenários complexos de modelos geológicos e de traçado de raio, o método de Amplitude Migrada Simulada (SMA) é indicado por demandar menos recursos, de CPU e espaço em disco, do que o método de modelagem direta por equação da onda. Com o avanço computacional, é esperado que os métodos diretos substituam gradualmente a técnica do traçado de raio e de estimativa de amplitude. Através da modelagem direta por equação da onda outros parâmetros importantes, do meio e de propagação, podem ser considerados: tais como os módulos de rigidez e de elasticidade, a anisotropia sísmica, a absorção e os ruídos. Os modelos geológicos e de traçado de raio construídos neste trabalho podem servir para projetos futuros de mestrado e doutorado em modelagem sísmica realizada através do método da equação da onda.

## 8.0 Referências Bibliográficas

- Alves, G.C., Bulcão, A., Filho, D.M.S., Theodoro, C.E., Santos, L.A., Guimarães, M.A.G., 2008. *Target Oriented Illumination Analysis Using Wave Equation*. SEG Las Vegas 2008 Annual Meeting p. 163-167.
- Ameen, M.S., Smart, B.G.D., Somerville, J.M., Hammilton, S., Naji, N.A., 2009. *Predicting Rock Mechanical Properties of Carbonates from Wireline Logs*. *Marine Petroleum Geology*, v.26, p.430–444.
- Becker, H.M.G., Villinger, H.W., Konyukhov, B.A., Iturrino, G.J., Christensen, N.I., 1994. *Seismic Velocities of Diabase and Basalt from Middle Valley Sills and Flows, Northern Juan de Fuca Ridge*. In Mottl, M.J., Davis, E.E., Fisher, A.T., & Slack, J.F. (Eds.), 1994 *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, v.139, p.597-612.
- Birch, F., 1960. *The Velocity of Compressional Waves in Rocks to 10 kbars: Part 1*. *Journal of Geophysical Research*, v.65, p.83–1102.
- Brocher, T.M., 2005. *Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the earth's crust*. *Bulletin Seismological Society of America*, v.95, p.2081–2092.
- Burlini, L. & Fountain, D.M., 1993. *Seismic anisotropy of metapelites from the Ivrea-Verbano zone and Serie dei Laghi (northern Italy)*. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v.78, p.301–317.
- Castagna, J.P., Batzle, M.L. & Eastwood, R.L., 1985. *Relationships between Compressional-wave and Shear-wave Velocities in Clastic Silicate Rocks*. *Geophysics*, v.50, no.4, p.571-581.
- Castagna, J.P., Batzle, M.L., Kan, T.K., 1993. *Rock physics-The link between rock properties and AVO response*. In: Castagna, J.P., and Backus, M., (Eds.), *Offset-dependent reflectivity-Theory and practice of AVO analysis: Investigations in Geophysics*, v. 8, p. 135–171.
- Cerveny, V., Klimes, L. & Psencik I., 1984. *Paraxial Ray Approximations in the Computation of Seismic Wavefields in Inhomogeneous Media*. *Geophys., J. R. Astron. Soc.*, p. 89-104.

- Christensen, N.I., 1974. *Compressional wave velocities in possible mantle rocks to pressures of 30 kilobars*. Journal of Geophysical Research, **v.79**, p.407–412.
- Eberly, G.P, Baechle, G.T, Anselmetti, F.S., Incze, M.L., 2003. *Factors Controlling Elastic Properties in Carbonate Sediments and Rocks*. The Leading Edge, p.654-660.
- Gallagher, J.W. & Dromgoole, P.W. 2007. *Exploring below the basalt, offshore Faroes: A case history of sub-basalt imaging*. *Petroleum Geoscience*, **v.13**, p.213–225.
- Gassmann, F., 1951. *Elastic waves through a packing of spheres*. Geophysics, **v.16**, p.673-685.
- Gerea, C., Riise, O., Assouline, F. & Rhodes, M., 2003. *3D Prestack Depth Migration and Illumination Analysis- A Case Study from OffShore Norway*. Abstracts, 65<sup>th</sup> EAGE Conf., Stavanger: A37.
- Jain, A.K., 1989. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice Hall Inc., Chapter 5.11, p.163-174.
- Ji, S.C., Salisbury, M.H., 1993. *Shear-wave Velocities, Anisotropy and Splitting in the High Grade Mylonites*. Tectonophysics, **v.221**, p. 453–473.
- Justen, J.C.R., Vargas Jr, E.A, Alves, I. & Souza, L.S., 2013. *Análise das Propriedades Elásticas de Rochas e Minerais Evaporíticos*. 13th International Congresso f the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.
- Kern, H., 1982. *P- and S-wave Velocities in Crustal and Mantle Rocks under the Simultaneous Action of High Confining Pressure and High Temperature and the Effect of the Rock Microstructure*. In: Schreyer, W. (Ed.), High-Pressure Research in Geosciences. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, p. 15-45.
- Laurain, R., Vinje, V. & Strand, C., 2004a. *Simulated Migration Amplitude for Improving Amplitude Estimates in Seismic Illumination Studies*. The Leading Edge, p. 240-245.
- Laurain, R., Gelius, L.J., Vinje, V., & Lecomte, I., 2004b. *A Review of 3D Illumination Studies*. Journal of Seismic Exploration, **v.13**, p.17-37

- Maleki,S., Moradzadeh,A., Riabi, G.R., Gholami,R. & Sadeghzadeh,F., 2014. *Prediction of Shear Wave Velocity Using Empirical Correlations and Artificial Intelligence Methods*. Journal of Astronomy and Geophysics, **v.3**, p.70-81.
- Moldoveanu, N., Sim Lee, K. & Jorgensen, P., 2003. *Onboard 3D &4D Subsurface Target Illumination: A Tool to Optimize Streamer Marine Acquisition*. Expanded Abstr., 73<sup>rd</sup> Ann. Internat. SEG Meeting, Dallas: 4-7.
- Moreira,J.L.P., Esteves,C.A.,Rodrigues,J.J.G. & Vasconcelos, C.S., 2006. *Magmatismo, Sedimentação e Estratigrafia da Porção Norte da Bacia de Santos*. Boletim Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, **v. 14**, n. 1, p. 161-170.
- Oreiro, S.G., 2006. *Magmatismo e Sedimentação em uma Área na Plataforma Continental de Cabo Frio, Rio de Janeiro, Brasil, no intervalo Cretáceo Superior – Terciário*. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, **v. 14**, n. 1, p. 95-112.
- Pequeno, M.A., 2009. *Albian/Maastrichtian Tectono-Stratigraphic Evolution of Central Santos Basin, Offshore Brazil*. Universidade do Texas, Austin.
- Planke,S & Cambray, H., 1998. *Seismic Properties of Flood Basalts from Hole 917A Downhole Data, Southeast Greenland Volcanic Margin*. In: Saunders, A.D., Larsen, H.C., & Wise, S.W., Jr. (Eds.), 1998 *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **v.152**.
- Planke,S., Jamtveit,B., Sørensen,M.A., Myklebust, R., Svensen,H., Rasmussen,T., Rey, S.S. & Bernd, C., 2003. *Volcanic Processes and Deposits on Rifted Margins and in Sedimentary Basins*. Extended Abstract - Rio2003 – p.14-18.
- Planke,S., T.Rasmussen,T.,Rey, S.S., & R. Myklebust,R., 2005. *Seismic Characteristics and Distribution of Volcanic Intrusions and Hydrothermal Vent Complexes in the Vøring and Møre basins*. In: Dore', A. G. & Vining, B. A. (eds) *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives*— Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference, Geological Society, London, p. 833-844.

- Reynisson, R.F., Ebbing, J. & Skilbri, J.R., 2007. *Magnetic and Gravity Fields in an Integrated Approach to the Sub-Basalt Imaging Problem*. In: EM, Gravity and Magnetic Methods: A New Perspective for Exploration, EGM 2007 International Workshop Innovation Capri, Italy, April 15 -18.
- Sheriff, R.E., 2002. *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, SEG, Tulsa, OK.
- Silva, F.V., Bulcão, A., Mansur, J.W., Alves, G.C., Santos, L.A, Soares, Filho, D.M. S., 2011. SEG Technical Program 2011: p. 137-141.
- Smallwood, J.R. & Maresh, J. 2002. *The Properties, Morphology and Distribution of Igneous Sills: Modelling, Borehole Data and 3D Seismic Data from the Faeroe–Shetland Area*. In: Jolley, D.W. & Bell, B.R. (eds) *The North Atlantic Igneous Province. Stratigraphy, Tectonic, Volcanic and Magmatic Processes*. Geological Society, London, Special Publications, v.197, p.271–306
- VerWest, B., Liang, J., Hobbs, R. & Young, K., 2001. *Understanding Amplitude Variations in 3D Acquisition and Processing for Sub-Salt Imaging*. Expanded Abstr., 71<sup>st</sup> Ann. Internat. SEG Meeting, San Antonio: 601-604.
- Vinje, V., Iversen, E., and Gjøystdal, H., 1993. *Traveltime and Amplitude Estimation Using Wavefront Construction*. *Geophysics*, v. 58, p. 1157-1166.
- Yasar, E., Erdogan, Y., 2004. *Correlating Sound Velocity with the Density, Compressive Strength and Young's Modulus of Carbonate Rocks*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.41, p. 871–875.
- Watanabe, T., Kasami, H., Ohshima, S., 2007. *Compressional and shear wave Velocities of Serpentinized Peridotites up to 200 MPa*. *Earth Planets Space*, v.59, p. 233–244.