

MARCELO KULEVICZ BARTOSZECK

**ANÁLISE MULTITEMÁTICA DE DADOS GEOLÓGICOS
E SISMICA DE REFLEXÃO :
UM ENSAIO METODOLÓGICO - ESTUDO DE CASO GRUPO ITARARÉ**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau Mestre, pelo Curso de Pós-Graduação em Geologia Exploratória, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla
Co-orientadores: Dr. Augustinho Rigoti
Prof. Dr. Ciro Jorge Appi

CURITIBA
2004

Bartoszeck, Marcelo Kulevicz

Análise multitemática de dados geológicos e sísmica de reflexão :
um ensaio metodológico - estudo de caso Grupo Itararé / Marcelo
Kulevicz Bartoszeck. - Curitiba, 2004.

x, 105f. : il., tabs.

Orientador: Sidnei Pires Rostirolla.

Co-orientadores: Augustinho Rigoti, Ciro Jorge Appi.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor
de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Geologia
Exploratória.

1. Método sísmico de reflexão. 2. Geologia - Processamento
de dados. 3. Grupo Itararé. I. Rostirolla, Sidnei Pires. II. Rigoti,
Augustinho. III. Appi, Ciro Jorge. IV. Universidade Federal do Paraná.
V. Título.

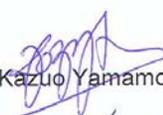
CDD 550.285

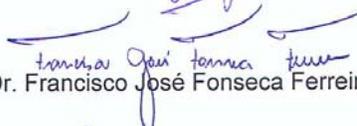
TERMO DE APROVAÇÃO

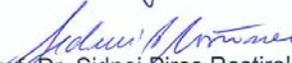
Marcelo Kulevicz Bartoszeck

“ANÁLISE MULTITEMÁTICA DE DADOS GEOLÓGICOS E
SÍSMICA DE REFLEXÃO: UM ENSAIO METODOLÓGICO –
ESTUDO DE CASO GRUPO ITARARÉ”

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em
Geologia, Área de Concentração Geologia Exploratória, da
Universidade Federal do Paraná, Comissão formada por:


Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto - USP


Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira - UFPR


Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla - UFPR
Presidente

Curitiba, 22 de novembro de 2004.

RESUMO

As áreas de estudo desta pesquisa envolveram rochas pertencentes ao Grupo Itararé – Bacia do Paraná, localizadas em afloramentos nas cidades de Ponta Grossa (próximo ao parque estadual de Vila Velha) e Lapa, ambas no estado do Paraná. O principal objetivo foi a descrição de uma seqüência metodológica que utilizou várias técnicas como: mapeamento geológico, aquisição e processamento de dados de sísmica de reflexão rasa, ensaio geoestatístico com as amplitudes sísmicas e a geração de volumes sísmicos. Foi necessária a adoção de duas áreas de estudo para contemplar as principais etapas do desenvolvimento metodológico proposto, com enfoque geológico na Lapa e geofísico em Vila Velha. Os principais litotipos mapeados na Lapa foram arenitos, diamictitos, conglomerados e folhelhos descritos no mapa geológico. A resposta geofísica deste local não atingiu os resultados esperados, foram encontrados poucos refletores, sendo necessária a aquisição de dados geofísicos em outra porção correlata, no caso a área de Ponta Grossa. A investigação geológica na Lapa gerou o conhecimento das principais variações litológicas na Serra do Monge, assim como o mapeamento destas. Foram definidas cinco unidades litológicas com base no litotipo predominante e posição estratigráfica. Os principais lineamentos estruturais foram correlacionados com grandes feições presentes em escala de bacia definidos por trabalhos anteriores. Também foram investigadas falhas e fraturas em escala de afloramento. Na região próxima ao Parque de Vila Velha foram realizados levantamentos sísmicos de reflexão visando alvos rasos, até aproximadamente 250 metros de profundidade. O resultado foi o imageamento do substrato, incluindo uma correlação com as associações litológicas e falhas visíveis em campo. Os ensaios sísmicos de calibração e parametrização realizados em ambas as áreas de estudo foram essenciais para a solução de diversos problemas, como a fixação de geofones em rocha, geometria dos arranjos e posicionamento da fonte sísmica. No processamento dos dados sísmicos foram executados exaustivos testes que resultaram em seções de boa qualidade na área de Ponta Grossa e ainda pouco refinadas na área da Lapa. Os principais processos numéricos que contribuíram para melhorar as seções sísmicas foram a deconvolução preditiva, filtragem de frequências e o emudecimento das primeiras quebras. A técnica CDP (*common depth point*) foi utilizada através da análise de velocidade CVS (*Constant velocity stack*) e correção NMO (*normal move out*). Através da construção de semivariogramas, o ensaio geoestatístico demonstrou a provável dependência espacial das amplitudes sísmicas, sendo possível a transformação de dados 2D em uma informação volumétrica para uma interpretação tridimensional. O ensaio geoestatístico demonstrou que a técnica pode ser utilizada com dados sísmicos, como visualizado pelo patamar bem definido em alguns semivariogramas, principalmente nas buscas das amostras realizadas em azimutes paralelos à direção de levantamento das linhas sísmicas. Foi executado um teste na geração de um cubo sísmico preliminar visando à correlação deste com informações geológicas extraídas de fotografias aéreas.

ABSTRACT

The study areas of this research involve rocks of the Itararé Group – Paraná Basin, which outcrop in the region of Ponta Grossa (near Vila Velha park) and Lapa cities, in Paraná state. The main objective was the description of a methodological sequence that uses various techniques like: geological mapping, shallow reflection seismic, a geostatistic assay with seismic amplitudes and seismic cube generation. Moreover to contemplate the main stages of the methodological development, it was necessary to adopt two study areas, with geological approach in Lapa and geophysical approach in Vila Velha. The main rock types mapped in Lapa area are sandstones, diamictites, conglomerates and shales, described in the geological map. The geophysical response of this area did not provide the expected results, being necessary the geophysical data acquisition in another correlated area, in this case the Ponta Grossa area. The geological investigation in the Lapa region generated the knowledge and mapping of the main lithologic variations in the Monge mountain range. In this mapping, five lithologic units are defined, based on the predominant rock type and its stratigraphic position. The main structural lineaments are correlated to large alignments present in basin scale, as defined by previous works. Faults and fractures at outcrop scale also were studied. The seismic reflection surveys carried out in Ponta Grossa region are processed and interpreted for shallow targets, down to approximately 250 meters depth. The result was the subsurface anisotropy imaging, including an earlier correlation with lithologic associations and faults observed in the field. Several seismic calibration and parameterization field tests were done in both areas to solve problems such as the placement of geophones in outcropping rock, array geometry and seismic source position. In the seismic data processing, exhaustive testing was done to achieve good quality seismic sections in Ponta Grossa area and still poorly refined in the Lapa area. The main numeric processes applied to seismic data, which contributed to improve the seismic section aspects, are the predictive deconvolution, frequency filters and mute of first breaks. The CDP (common depth point) technique was used by means of CVS (constant velocity stack) velocity analysis and NMO (normal move out) correction. Through constructions of semivariograms, the geostatistic assay shows the probable spatial dependency of the seismic amplitudes, being possible the transformation of 2D data to volumetric information for 3D interpretation. The geostatistic assay carried out, demonstrated that this technique is useful and can be used with seismic data, as observed in well defined sill in some semivariograms, specially in sample search done at directions parallel to the surveys. A preliminary seismic cube was executed aiming the correlation with geologic information like aerial photographs.

AGRADECIMENTOS

Desejo registrar os meus sinceros agradecimentos a todos que de uma forma colaboraram para a realização desta dissertação. A CAPES pela ajuda financeira concedida na bolsa de Mestrado. Principalmente aos amigos de projeto que sempre estiveram dispostos ao trabalho pesado no campo, muitas vezes dormindo em barracas, debaixo de chuva, jantando macarrão instantâneo dentro de uma Kombi. Agradeço também ao meu orientador que sempre atrelado em inúmeras tarefas conseguiu nortear muito bem todo este trabalho. Não posso deixar de colocar um agradecimento especial a minha companheira e amiga Adriane que sempre esteve presente e me apoiou nas horas mais difíceis. Eu dedico esta dissertação aos meus pais, Amauri e Maria Alice, que sempre me apoiaram em minhas decisões, apesar de não entender muitas delas.

VIVA A MONTANHA!!!

Sumário

| | |
|---|-----|
| Resumo | iii |
| Abstract | iv |
| Listas de Figuras e Tabelas | vii |
| | |
| I - Introdução | 1 |
| I.1 - Localização e Acessos | 2 |
| I.2 - Geologia das Áreas de estudo | 4 |
| I.3 - Materiais e Métodos | 7 |
| | |
| II - Análise de dados geológicos – Estudo de caso Lapa – PR. | 12 |
| II.1 - Localização dos afloramentos | 12 |
| II.2 - Geologia estrutural | 14 |
| II.3 - Estratigrafia | 24 |
| | |
| III - Imageamento | 32 |
| III.1 - Geologia | 32 |
| III.1.1 - Sensoriamento remoto | 32 |
| III.1.1.1 - Fotografias Aéreas | 32 |
| III.1.1.2 - Modelo Numérico de Elevação | 33 |
| III.1.1.3 - Imagens de Satélite | 35 |
| III.1.2 - Painéis de Afloramento | 35 |
| | |
| IV - Análise de dados sísmicos – Estudo de caso Vila Velha – PR | 39 |
| IV.1 - Sísmica de Reflexão | 39 |
| IV.2 - Planejamento das seções | 40 |
| IV.3 - Aquisição no campo | 41 |
| IV.4 - Processamento | 42 |
| IV.5 - Interpretação e correlação | 50 |
| | |
| V - Modelagem geométrica 3D | 70 |
| V.1 - A importância dos modelos volumétricos | 70 |
| V.2 - Representação de Volumes | 72 |
| V.3 - Visualização Tridimensional | 73 |
| V.4 - Adaptação de dados sísmicos | 73 |
| V.5 - Geração de mapas de fatias de tempo | 77 |
| V.6 – Ensaio geoestatístico | 82 |
| V.7 - Geração de cubo sísmico preliminar | 93 |
| | |
| VI – Conclusões | 100 |
| | |
| VII – Referências | 103 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Localização da área de estudo da Lapa. | 3 |
| Figura 2 – Localização da área de estudo de Ponta Grossa, as áreas destacadas em verde correspondem a locais com vegetação nativa. | 4 |
| Figura 3 – Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná (França & Potter 1988). | 5 |
| Figura 4 – Coluna estratigráfica de detalhe do Grupo Itararé (adaptado de Vesely & Assine, 2003). | 6 |
| Figura 5 – Sequência de eventos realizados no estudo, divididos em duas áreas distintas. | 8 |
| Figura 6 – Localização dos afloramentos descritos. | 13 |
| Figura 7 – Principais estruturas tectônicas da Bacia do Paraná propostos por Zalán <i>et al.</i> (1991). Em pontilhado o limite aproximado da Bacia do Paraná, o retângulo preto localiza a área de abrangência da imagem do satélite LandSat utilizada e o pequeno retângulo em cinza situa a área de estudo da Lapa. | 14 |
| Figura 8 – Sobreposição de lineamentos propostos por Trzaskos-Lipski <i>et al.</i> (inédito) aos interpretados por Zalan <i>et al.</i> (1991). | 15 |
| Figura 9 – Mapa geológico (mineropar, 1997) regional e lineamentos interpretados por Trzaskos-Lipski (inédito) e Zalán <i>et al.</i> (1991). | 16 |
| Figura 10 – Imagem do satélite LandSat 7/TM e lineamentos interpretados por Trzaskos-Lipski (inédito) e Zalán <i>et al.</i> (1991).. | 17 |
| Figura 11 – Imagem pseudoiluminada segundo a direção NE-SW e os lineamentos interpretados por Trzaskos-Lipski (inédito). | 18 |
| Figura 12 – Imagem pseudoiluminada segundo a direção NW-SE e os lineamentos interpretados por Trzaskos-Lipski (inédito). | 19 |
| Figura 13 – Divisão em compartimentos tectônico/geomorfológicos e em destaque com tons cinzas as porções onde afloram arenitos na área de estudo da Lapa (A). Localização da área em relação aos grandes lineamentos de Zálán <i>et al.</i> (1991) (B). | 20 |
| Figura 14 – Diagramas de frequência absoluta, construídos com lineamentos foto interpretados (escala 1:25000) e localização de sua área de abrangência. | 21 |
| Figura 15 - Frequência observada numa população de 152 atitudes obtidas em afloramentos. | 22 |
| Figura 16 - Afloramento composto por arenitos médios, imaturos. Ocorrem estratificações plano paralelas. As fraturas indicam um deslocamento do bloco baixo para leste. Este afloramento está localizado na escarpa oeste (figura 6 – mapa de pontos) e é correlacionado a porção superior da estratigrafia local. | 22 |
| Figura 17 - Afloramento composto por arenitos médios a grossos, por vezes conglomeráticos, intercalados com conglomerados. Representativo da porção média da estratigrafia local, ocorrem falhas de pequenos rejeitos, com planos muito contínuos e retilíneos. | 23 |
| Figura 18 - Afloramento do compartimento sul composto por: arenitos médios dispostos em estratos tabulares, bem selecionados e correlacionados ao topo da estratigrafia local. Foi observada uma pequena falha normal, com rejeito centimétrico, direção do mergulho 239/69, bloco noroeste alto. Ocorrem duas famílias marcantes de fraturas, uma NW-SE com caráter descontínuo e irregular, e outra NE contínua, anastomosada. | 24 |

| | |
|---|----|
| Figura 19 - Aspecto geomorfológico marcante da área de estudo da Lapa – PR, modelo numérico de terreno, em visão oblíqua, com foto aérea sobreposta (A), carta topográfica 1:50000 (B) e modelo numérico de terreno com visão oblíqua (C). | 24 |
| Figura 20 – Correlação entre perfis litológicos verticais realizados por Vesely (inédito) e as associações litológicas mapeadas. | 26 |
| Fig 21- Mapa geológico da região da Lapa - PR | 27 |
| Figura 22 - Afloramento correlacionado a base da estratigrafia local, constituído por: folhelhos, com seixos pingados, cor de chocolate. Este litotipo encontra-se deformado e dobrado. Ocorre uma falha inversa com retro-empurrão associado e estrutura do tipo <i>snake head</i> . | 28 |
| Figura 23 – Conglomerados da unidade B. | 29 |
| Figura 24 – Afloramento composto por arenitos médios a grossos, imaturos, predominantemente conglomeráticos na base, apresenta estratificações cruzadas planares, por vezes acanaladas, em geral de médio porte. | 29 |
| Figura 25 - Arenitos de cor avermelhada, grãos arredondados, sub-esféricos, granulometria de média a grossa, maduros, apresentando estratificação cruzada acanalada. | 30 |
| Figura 26 – Afloramento da unidade E. | 31 |
| Figura 27 - Mosaico das fotografias aéreas e localização, em vermelho, da área alvo para aquisição geofísica (A). Ampliação da área de detalhe (B) e indicando o posicionamento em relação ao estado do Paraná (C). | 33 |
| Figura 28 – Foto aérea digitalizada em cinco níveis de aumento (I até V) com as resoluções ópticas de 300 (A), 600 (B), 1200 (C) e 2400 (D) pontos por polegadas. | 34 |
| Figura 29 – Comparação entre modelos numéricos de terreno gerados a partir de curvas de nível na escala 1:50000 (A) e a partir de fotos aéreas em escala 1:10000, com gps diferencial (B). | 35 |
| Figura 30 – Perfis realizados em modelos numéricos de terreno gerados a partir da foto aérea escala 1:10000 (A) e carta topográfica escala 1:50000 (B). | 36 |
| Figura 31 – Correlação de geometrias em afloramentos com seções sísmicas em tempo. Afloramento localizado em afloramentos próximos a cidade da Lapa, na localidade de Pedra Alta (A). Seção sísmica realizada na Serra do Monge (B). | 37 |
| Figura 32 - O planejamento sísmico, de Vila Velha, diante dos obstáculos naturais e dos objetivos geológicos como falhas e estruturas sedimentares. | 41 |
| Figura 33 - Dado bruto, representando um tiro. | 44 |
| Figura 34- Resultado após as etapas de deconvolução e emudecimento das primeiras quebras. | 45 |
| Figura 35 – Resultado após a correção topográfica inicial e filtragem de frequências. | 45 |
| Figura 36 – Painel de velocidades onde são criados pontos para a correção NMO. | 46 |
| Figura 37 – Resultado da análise de velocidade e correção NMO. | 47 |
| Figura 38 - Primeira seção empilhada. | 47 |
| Figura 39 - Filtragem de baixas e altas frequências na seção empilhada | 48 |
| Figura 40 – Deconvolução pós empilhamento. | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 41 – Detalhe da seção sísmica empilhada e processada. | 48 |
| Figura 42 – Seção Sísmica localizada na Fazenda Rivadávia. | 50 |
| Figura 43 – Seção sísmica localizada na Fazenda Rivadávia, com interpretação dos eventos marcantes. | 51 |
| Figura 44 – Correlação em tempo com unidades geológicas identificadas em perfis litológicos verticais, logs geofísicos de raios gama e sônico, e amostras de calha de alguns poços. Não foram realizadas amostragens em todos os poços. | 52 |
| Figura 45. – Correlação entre as perfilagens geofísicas, descrição de amostras de calha, associações litológicas e seção sísmica. Os refletores esperados estão marcados por linhas pretas, ocorrendo em mudanças bruscas da litologia. | 53 |
| Figura 46 – Seção entre poços realizados na Fazenda Rivadávia. | 54 |
| Figura 47 – Critérios para a interpretação de falhas (A) e horizontes (B). | 55 |
| Figura 48 – Localização da área para teste de critérios para interpretação sísmica de horizontes e falhas. | 56 |
| Figura 49 – Padrão de cores e escala, selecionados para a interpretação sísmica. | 57 |
| Figura 50 – Falhas interpretadas em uma seção sísmica. | 58 |
| Figura 51 – Falhas, traços subverticais, e horizontes, traços subhorizontais, interpretados em uma seção sísmica. | 58 |
| Figura 52 – Visualização conjunta de seções sísmicas no momento da interpretação e visão em planta . | 59 |
| Figura 53– Visualização em 3D de seções sísmicas. | 60 |
| Figura 54 – Superfícies geradas sem e com influência das falhas. Note que estão sinalizadas as diferenças marcantes entre os dois métodos. | 61 |
| Figura 55 – Traços de falha não associados vistos em três dimensões. | 62 |
| Figura 56 – Visualização 3d planos de falha e seções sísmicas. | 63 |
| Figura 57 – Interação 3D entre planos de falhas e seções sísmicas. | 64 |
| Figura 58 – Visualização simultânea de vários sistemas de interpretação. | 65 |
| Figura 59 – Plano de falha que causa interrupção e inflexão de refletores. | 66 |
| Figura 60 – Correlação em planta de falha interpretada e foto aérea. | 67 |
| Figura 61 – Projeção de diversas falha interpretadas nas seções sísmicas na superfície. | 68 |
| Figura 62 – Mosaico fotográfico do perfil de afloramentos equivalente ao levantamento sísmico. | 69 |
| Figura 63 - Etapas de transformação dos dados sísmicos. | 75 |
| Figura 64 - Fatia de 46ms visualizada em planta junto com foto aérea. (A). Fatia de 140 ms mesclada com a foto aérea (B). | 78 |
| Figura 65 – Histogramas das amplitudes sísmicas referentes as fatias 50ms (a), 100ms (b), | 81 |

| | |
|--|----|
| 150ms (c) e 200ms (d). | |
| Figura 66 – Semivariograma e suas principais propriedades. | 82 |
| Figura 67 – Esquema do arranjo sísmico na área de Vila Velha (A) e exemplo do cone de busca (B) na análise de amostras em semivariogramas. | 83 |
| Figura 68 – Semivariogramas do azimute 13, perpendicular as linhas sísmicas representando um busca de 10 metros (a) e 2 metros (b). | 84 |
| Figura 69 – Semivariogramas do azimute 103, ao longo das linhas sísmicas representando um busca de 10 metros (a) e 2 metros (b). | 84 |
| Figura 70 – Semivariograma com ajuste dos modelos (a) “efeito buraco” (hole effect) e modelo esférico (b). | 85 |
| Figura 71 – Semivariograma gerado com busca perpendicular às seções sísmicas com três amostras próximas(a), e com a média de três amostras (b). | 86 |
| Figura 72 – Cubos utilizados para o ensaio geoestatístico 3D. | 87 |
| Figura 73 – Janela de 50 ms da seção sísmica e detalhe em cinza a porção selecionada para o cubo 1. | 87 |
| Figura 74 – Janela de 100ms da seção sísmica e em detalhe a porção selecionada para o cubo 1. | 88 |
| Figura 75 – Seção sísmica com o cubo 1 em cinza, representando uma análise com a resolução original, e o cubo 2, linha pontilhada, representando uma área com 25% da resolução original, mas abrangendo uma área maior ao longo da seção sísmica. | 89 |
| Figura 76 – Seção sísmica original (A) e seção reamostrada (B) com 25% do total de amostras. | 90 |
| Figura 77 – Seção sísmica original (A) e com amostragem de 2.5ms (b) gerada através de reamostragem. | 91 |
| Figura 78 – Semivariogramas das áreas 1 e 2 selecionadas para o ensaio geoestatístico. A – passo de 1 metro, tolerância e mergulhos de 22.5 graus e larguras (vertical e horizontal) de 22.5 metros; B – passo de 5 metros, tolerância e mergulhos de 22.5 graus, largura vertical de 17 metros e horizontal de 1 metro; C – passo de 5 metros, tolerância e mergulhos de 22.5 graus e larguras (vertical e horizontal) de 1 metro; D – passo de 5 metros, tolerância e mergulhos de 22.5 graus e larguras (vertical e horizontal) de 10 metros. | 92 |
| Figura 79 – Primeira modelagem volumétrica das amplitudes sísmicas, utilizando o interpolador vizinho mais próximo, a escala de cor representa os valores de amplitudes sísmicas. | 94 |
| Figura 80 - Cubo sísmico fatiado em tempo e com seções N-S. | 95 |
| Figura 81 - Cubo sísmico e foto aérea da área de estudo (A). Cubo sísmico cortado em 150ms pela foto aérea do local de estudo (B). | 96 |
| Figura 82 - Cubo sísmico mesclado pela foto aérea e fatia de 140ms em primeiro plano. | 98 |
| Figura 83 - Cubo sísmico cortado pela foto aérea e pela seção sísmica original. | 99 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Programas utilizados. | 10 |
| Tabela 2 - Síntese dos principais materiais e equipamentos e seus usos neste estudo. | 11 |
| Tabela 3 – seqüência litológica observada por Maack, 1946. | 25 |
| Tabela 4 – Estatística univariadas das fatias em tempo analisadas. | 78 |

I - INTRODUÇÃO

As áreas de estudo englobam rochas do Grupo Itararé, Bacia do Paraná, localizadas na faixa leste de afloramentos desta bacia. Mais especificamente em duas áreas alvo situadas nos municípios de Lapa e Ponta Grossa. Na região da Lapa foi estudada a porção conhecida como Serra do Monge, realçada no terreno pela predominância de arenitos. Na região de Ponta Grossa foram estudadas rochas próximas ao Parque Estadual de Vila Velha, as quais também são destacadas no relevo pela sua grande quantidade de arenitos.

Foram realizados levantamentos geológicos da área da Lapa, através do mapeamento das principais unidades litológicas. Na área de Vila Velha foram adquiridas seções sísmicas de alta resolução para a correlação com as unidades geológicas visíveis em campo. Esta seqüência metodológica visou os procedimentos de aquisição, processamento e integração dos dados geológicos e geofísicos. Os valores de amplitudes sísmicas extraídos das seções também foram analisados em sua dependência espacial através de um ensaio geoestatístico. Este resultou em semivariogramas com patamares bem definidos em direções paralelas aos levantamentos de campo.

A pesquisa, realizada nesta dissertação, pertence ao campo da geologia exploratória, as questões fundamentais que orientaram o trabalho estão relacionadas à possibilidade de imagear a anisotropia geológica das áreas de estudo, através de métodos geofísicos e geológicos. Para isso, foram realizados testes exaustivos utilizando os equipamentos e ferramentas computacionais disponíveis. A pesquisa possui caráter metodológico, visando o desenvolvimento de tecnologias de imageamento de rochas aflorantes. O nível de detalhamento foi compatível com as tecnologias empregadas e com o tempo de aplicação. A principal hipótese que norteou esta pesquisa foi baseada no princípio de que os métodos geofísicos sísmicos e geológicos geram informações, em duas ou três dimensões, que podem ser transformadas em imagens, com formato uniforme para visualização e interpretação geológica e ou geofísica. O leitor encontrará aqui uma abordagem principalmente metodológica e multidisciplinar, com descrições superficiais da geofísica e da matemática envolvida. A dissertação está encadeada de forma a descrever seqüencialmente todas as atividades multitemáticas, divididas em duas grandes etapas: análise geológica e a análise sísmica, sendo que cada uma delas ocorreu

concentrada em duas áreas geologicamente distintas, respectivamente nas regiões da Lapa e Vila Velha. Esta divisão ocorreu devido à baixa resposta sísmica na primeira área, que prejudicou a correlação dos dados geológicos e geofísicos. No entanto cabe ressaltar que foram realizadas na área da Lapa as fases de aquisição e processamento sísmico resultando em seções que ainda não permitiram uma interpretação definitiva. Como a meta inicial previa o desenvolvimento de todas as atividades geológicas e sísmicas, resultando em modelos 3D, foi necessário agregar outra região para a análise sísmica, no caso Vila Velha, uma vez que os dados sísmicos obtiveram uma melhor qualidade e foi possível desenvolver metodologicamente as fases de aquisição, processamento, carregamento de um projeto sísmico, interpretação sísmica e modelagem numérica, ainda que está última em caráter preliminar.

O presente trabalho constitui um dos sub-projetos do projeto *MODRES - Modelagem de Potenciais Reservatórios Fraturados em Superfície para auxílio exploratório em subsuperfície*, financiado pela Finep/Petrobras, o qual visa a modelagem da anisotropia e unidades de fluxo em reservatórios fraturados, enfocando a análise petrofísica e o imageamento geofísico de rochas aflorantes e subaflorantes.

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, o primeiro introdutório. O segundo descreve os trabalhos de cunho geológico realizados na Lapa. O terceiro corresponde aos métodos de imageamento realizados em ambas as áreas de estudo, descrevendo os principais resultados de cada metodologia. O quarto descreve a sísmica de reflexão utilizada, abordando a aquisição, processamento e interpretação. Para finalizar, o quinto capítulo engloba as etapas de modelagem geométrica, um ensaio de análise de dependência espacial das amplitudes sísmicas utilizando geoestatística e a geração de uma cubo sísmico preliminar.

I.1 - Localização e Acessos

Para contemplar os objetivos do projeto, no qual a dissertação de mestrado está inserida, e ao mesmo tempo contribuir para o conhecimento geológico do estado do Paraná, foram estudadas duas áreas. No início deste projeto havia sido selecionada apenas uma, mais precisamente a região da Lapa, porém, como decorrência de trabalhos em conjunto com outros pesquisadores, foi incluída outra, situada na região de Ponta Grossa, próximo ao Parque de Vila Velha. A primeira, Lapa, foi abordada com enfoque metodológico nos levantamentos geológicos e a segunda, Ponta Grossa,

com ênfase na aquisição e processamento de dados sísmicos, utilizando dados geológicos de outros autores.

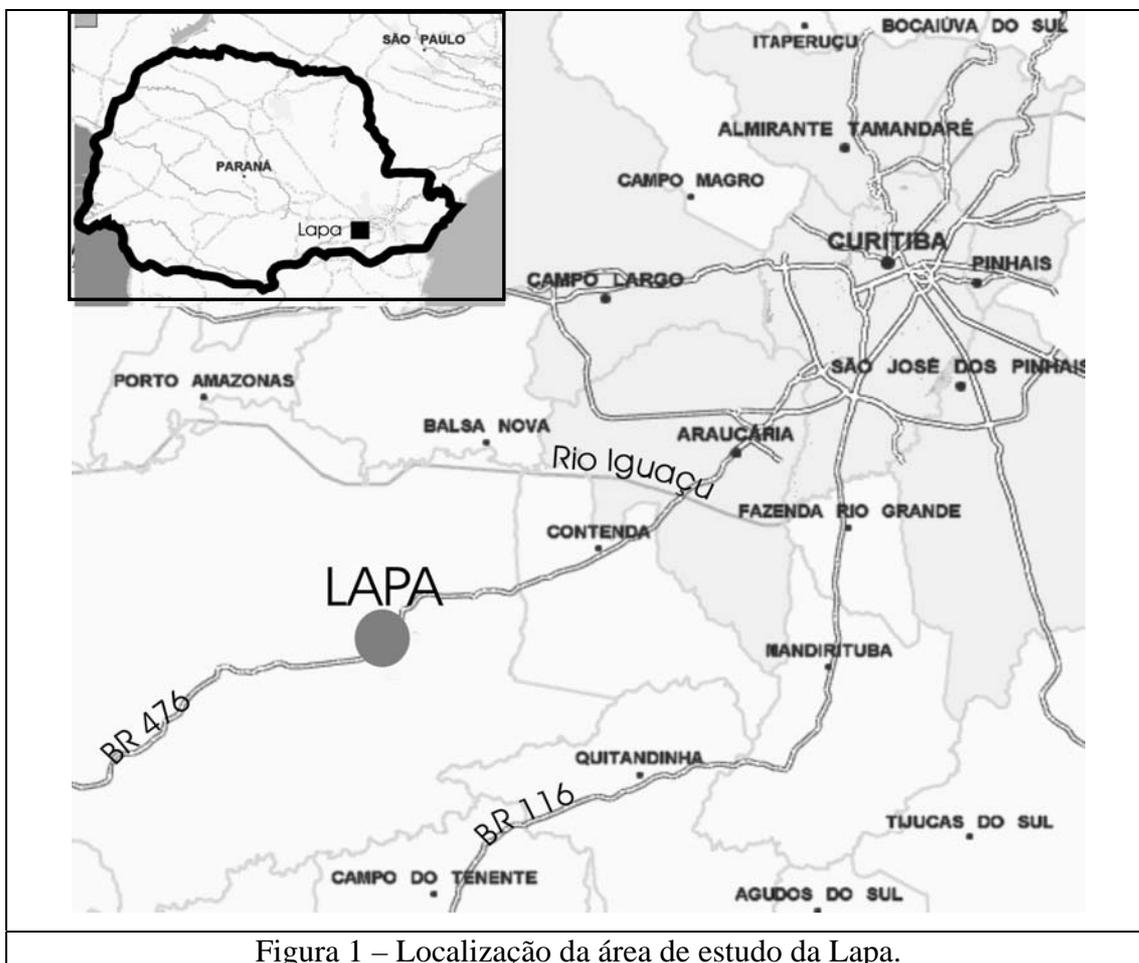
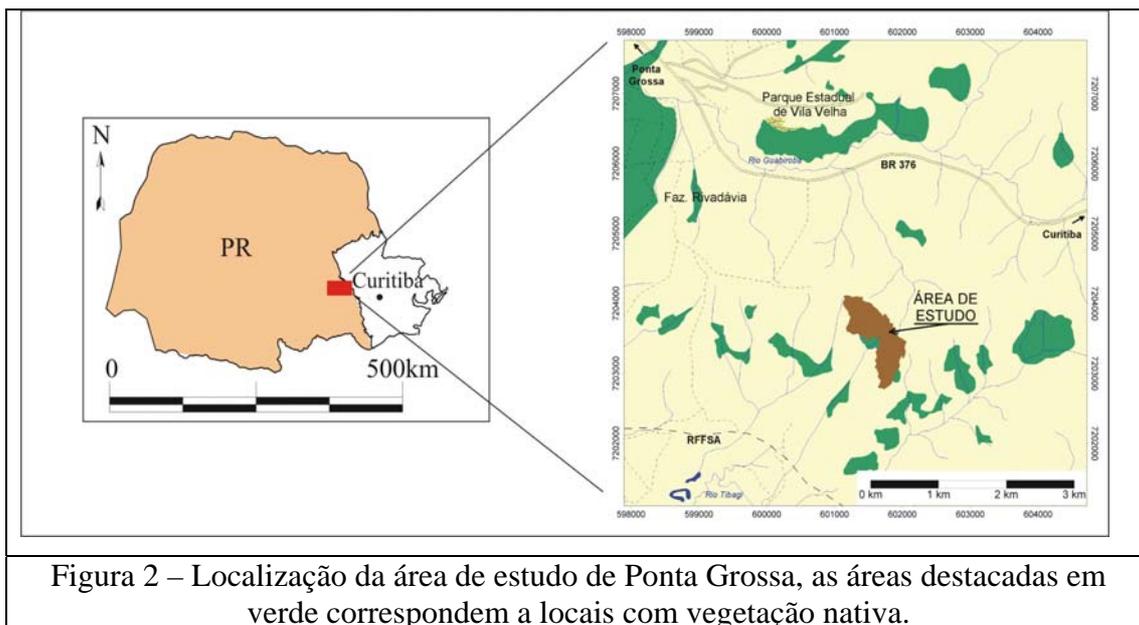


Figura 1 – Localização da área de estudo da Lapa.

A primeira área localiza-se nas imediações da cidade da Lapa (Figura 1), na faixa de afloramentos do Grupo Itararé, borda leste da Bacia do Paraná. Esta região foi escolhida em função da riqueza de afloramentos e fácil acesso, a principal rodovia da região é a BR-476, cerca de 70 quilômetros de Curitiba.

A segunda área localiza-se nas imediações do Parque de Vila Velha, Ponta Grossa, e engloba também uma pequena porção de afloramentos do Grupo Itararé. A Figura 2 indica a localização desta área de estudo.



I.2 - Geologia das áreas de estudo

As áreas selecionadas contêm rochas que fazem parte do Sistema Petrolífero Ponta Grossa – Itararé. Estudos na Bacia do Paraná (Figura 3), reconheceram que o Grupo Itararé é o melhor reservatório para hidrocarbonetos, por estar em contato direto com os folhelhos da Formação Ponta Grossa (França & Potter 1988); por conter corpos maciços de arenito com qualidades de reservatório; por possuir rochas potencialmente capeadoras representadas por lamitos seixosos, siltitos e diques de diabásio além de apresentar indícios de hidrocarbonetos.

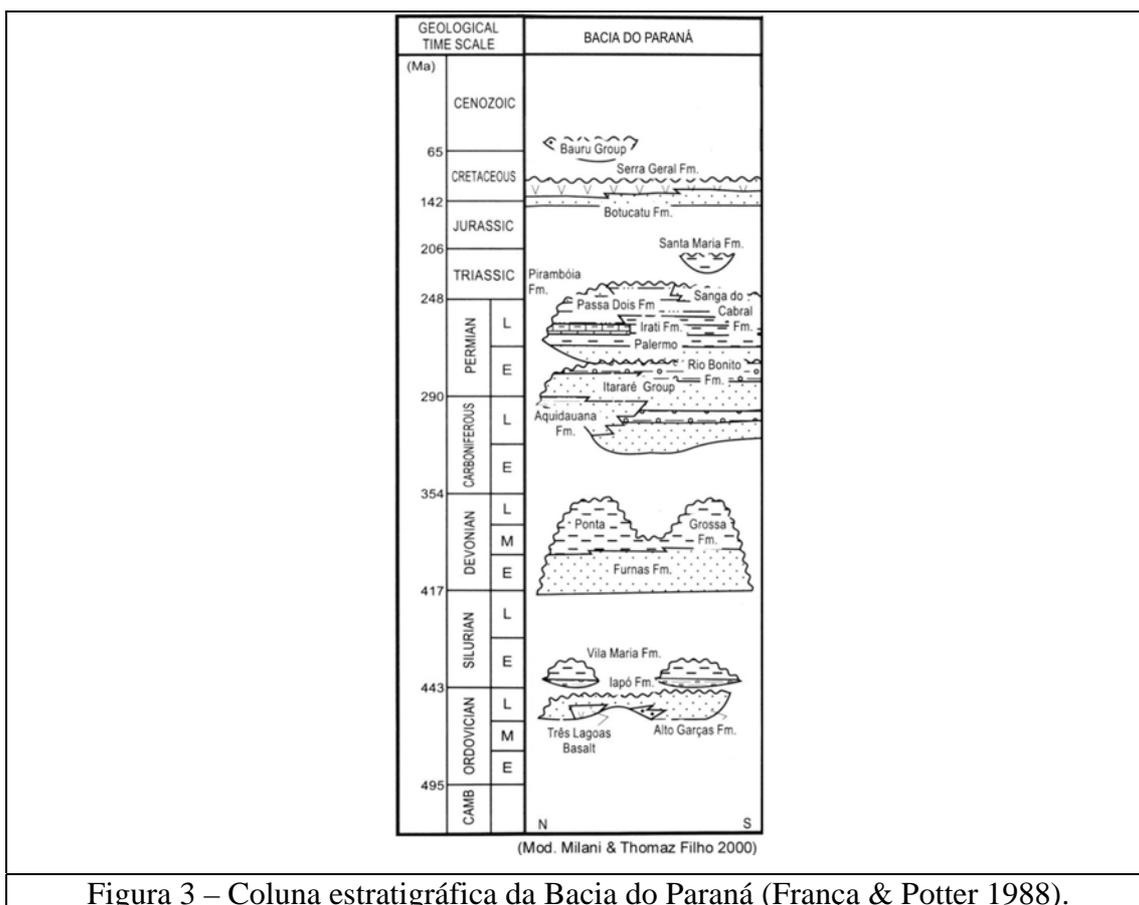
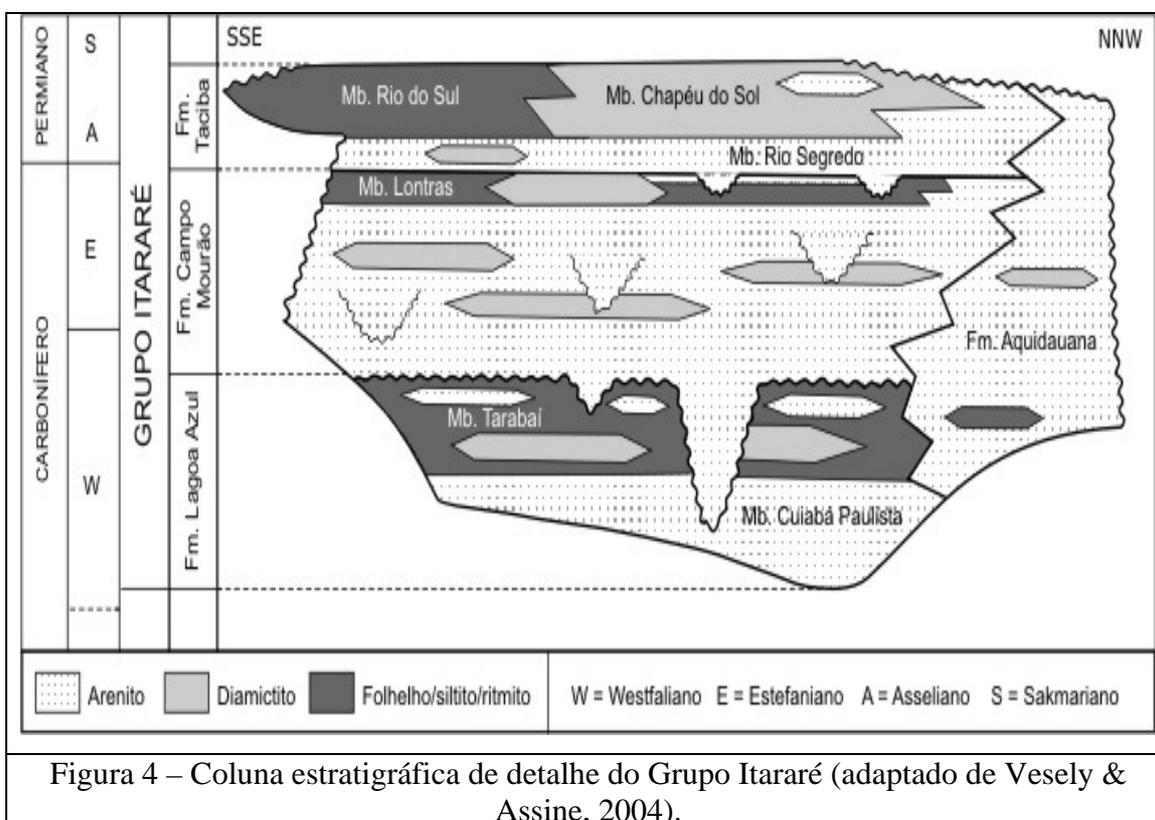


Figura 3 – Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná (França & Potter 1988).

A Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica alongada na direção NS e localiza-se na porção centro-leste do continente sul-americano, abrangendo uma área de aproximadamente 1.600.000 km², a qual se estende pelo Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai. Na Argentina e no Uruguai é denominada de Chaco-Paraná. Segundo Milani & Thomaz Filho (2000), as seqüências cratônicas do Fanerozóico, Plataforma Sul-Americana, formaram-se desde o início do Ordoviciano até o Cretáceo, ocupando mais de 3,5 milhões de km², distribuídos em cinco grandes bacias sedimentares: Solimões, Amazonas, Parnaíba e Paraná no Brasil, e Chaco-Paraná na Argentina, Paraguai e Uruguai.

O termo Itararé, para designar uma unidade geológica, foi usado primeiramente por Oliveira (1927), o qual caracterizou a Série Itararé como constituída por todos os sedimentos com influência glacial na Bacia do rio Itararé, no estado de São Paulo. A partir dos trabalhos de Gordon (1947) e Maack (1946), a série foi elevada à Grupo Itararé. O Grupo Itararé é a unidade litoestratigráfica mais espessa da Bacia do Paraná. Na base é composta por depósitos continentais, que passam para marinhos no sentido do topo. França & Potter (1988) subdividiram o

grupo em quatro formações: Lagoa Azul, Campo Mourão, Taciba e Aquidauana, cujo detalhamento (Vesely & Assine 2004), pode ser observado na Figura 4.



As principais características das formações do Grupo Itararé são descritas a seguir:

Formação Lagoa Azul: seção basal do Grupo Itararé, pouco aflorante, ocorre principalmente na porção central da bacia. É subdividida em Membro Cuiabá Paulista, unidade arenosa basal, e Membro Tarabaí, unidade superior argilosa.

Formação Campo Mourão: unidade central do grupo, predominantemente arenosa na base passando para folhelhos, siltitos, lamitos seixosos e diamictitos no topo. Esta formação ocorre praticamente em toda a bacia, também são observadas interdigitações com a Formação Aquidauana ao norte. Em dois poços perfurados no estado do Paraná encontrou-se indícios de hidrocarbonetos. Possui o Membro Lontras, unidade composta por folhelhos e diamictitos.

Formação Taciba: porção superior do grupo, é composta por lamitos seixosos, arenitos, folhelhos e siltitos. Foi depositada concordantemente à Formação Campo Mourão. A Formação Taciba é subdividida em membros Rio Segredo, Chapéu do Sol e Rio do Sul.

As rochas da Lapa e Vila Velha são objeto de estudos geológicos desde meados do século XX. Segundo Maack (1946), a Série Itararé na região da Lapa pode ser dividida em dez unidades litológicas, as quais resultam numa espessura aproximada de 140 metros.

França *et al.* (1996) reconheceram o Arenito Lapa como sendo o produto do preenchimento de um canal subaquoso, alimentador do Arenito Vila Velha.

Canuto *et al.* (1997) também observaram uma relação genética entre o Arenito Lapa e o Arenito Vila Velha. Interpretaram o Arenito Lapa como resultado do preenchimento de um túnel-vale subglacial com até 80 metros de diâmetro, enquanto o Arenito Vila Velha como produto de sedimentação marinha rasa, sob influência de marés.

Segundo d'Avila, (1999) o Arenito Lapa pode ser dividido em várias fácies sedimentares, de acordo com a granulação e estrutura sedimentar.

O intervalo de detalhe estudado pertence, segundo França *et al.* (1996), a Formação Campo Mourão. Em torno do ressalto topográfico, que caracteriza as rochas predominantemente arenosas na região, afloram diamictitos, folhelhos, arenitos e conglomerados, com maior ocorrência de pelitos. Através de vários perfis litológicos verticais descritos, Vesely (inédito) confirmou a correlação estratigráfica sugerida por França (op. cit).

I.3 – Materiais e métodos

Na área da Lapa o imageamento da anisotropia geológica foi executado através de métodos do tipo direto, a partir de dados de campo. Enquanto na área de Vila Velha, o método geofísico indireto utilizado foi o da sísmica de reflexão rasa. A seqüência de atividades pode ser observada na Figura 5.

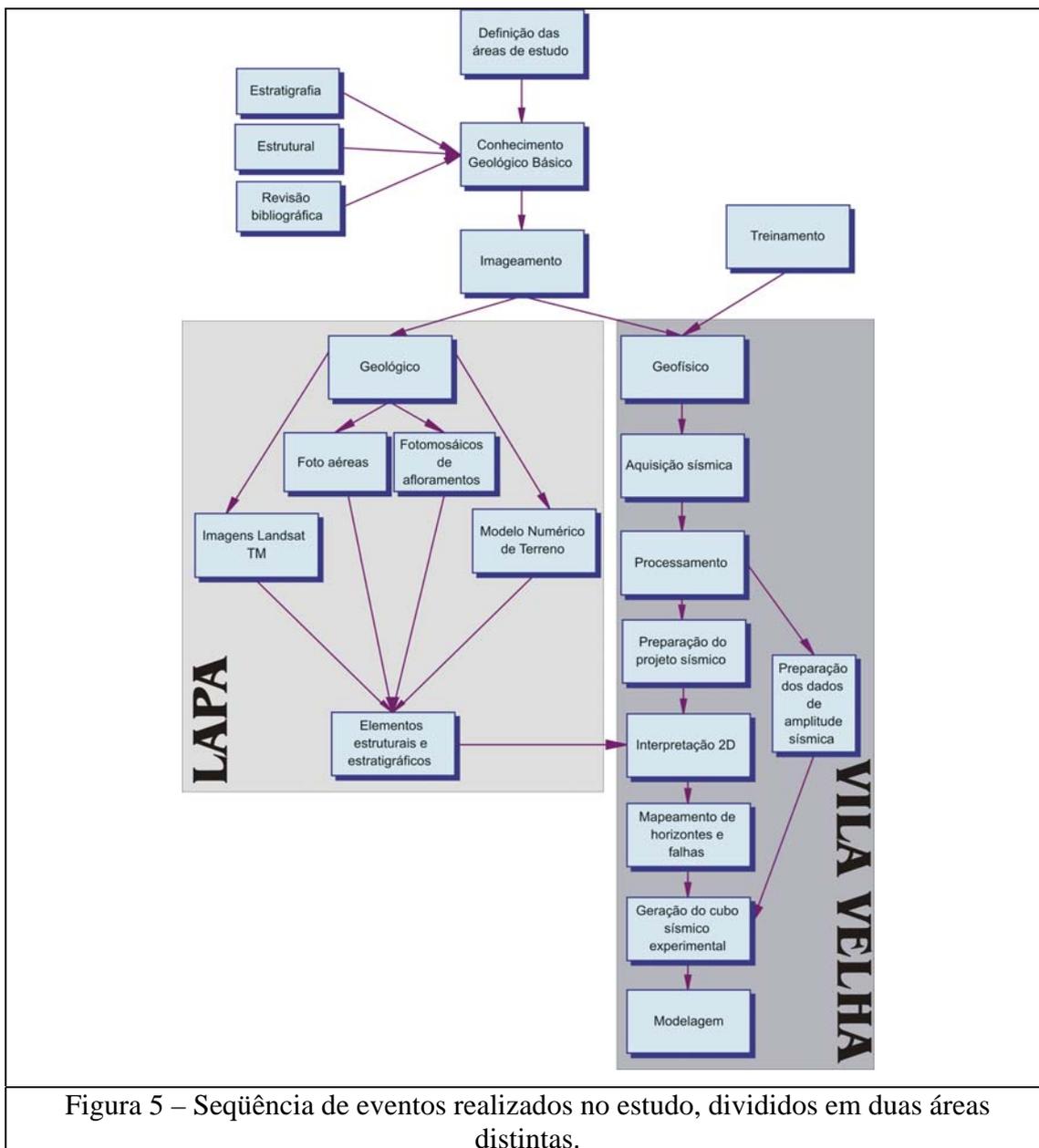


Figura 5 – Seqüência de eventos realizados no estudo, divididos em duas áreas distintas.

Os perfis geológicos verticais foram construídos com base nas principais mudanças granulométricas e composicionais, além da caracterização das estruturas sedimentares mais marcantes. Os resultados foram importantes para a definição do empilhamento estratigráfico e das espessuras das unidades sedimentares. Possuem precisão moderada e resolução decimétrica.

Os mosaicos de afloramentos foram construídos com o auxílio de máquinas fotográficas digitais. A partir deles foram traçados os principais elementos estratigráficos e estruturais, como contatos entre litologias, forma dos estratos e falhas. A precisão é variada, quando um mosaico representa um afloramento com muita variação topográfica, espessuras falsas ou mesmo geometrias incorretas podem

ser interpretadas. A correção topográfica de um mosaico fotográfico é extremamente complexa e demorada, inviabilizando sua execução até o momento. A resolução pode variar de decimétrica a métrica, enquanto fotografias de detalhe podem representar feições centimétricas.

Os parâmetros de aquisição das seções sísmicas foram otimizados para identificar alvos com até cerca de 250 metros de profundidade. A sísmica de alta resolução pode ser aplicada tanto em grandes profundidades como em situações rasas. Anderson *et al.* (1997) mostram, de maneira extremamente acessível, o uso da sísmica de reflexão rasa, com informações práticas e sem muito aprofundamento matemático. As seções sísmicas utilizadas encontram-se no formato Seg2, conforme sugerido pela *Society of Exploration Geophysicists* (SEG) para sísmica rasa. Estas seções foram processadas através de procedimentos usuais sugeridos por vários autores (Anderson *et al.* 1997, Baker 1999). Depois de processados e interpretados, os horizontes sísmicos podem ser correlacionados com equivalentes estratigráficos, representando mudanças geológicas que são refletidas nas seções em função do contraste de velocidade e densidade. Esta impedância acústica é a base da prospecção sísmica, podendo ser negativa ou positiva. A detecção de um refletor depende de quatro fatores básicos: 1) fonte de ondas elásticas potente; 2) razão sinal-ruído elevada; 3) arranjo adequado dos geofones e 4) processamento computacional criterioso. Cada um destes fatores possui limitações que podem produzir falsos refletores ou ocultar feições reais. Hesthammer *et al.* (2001) discutem muito bem estes problemas de interpretação, utilizando um caso real de sísmica profunda.

O objetivo principal deste estudo não é a aquisição ou o processamento sísmico, entretanto, o conhecimento dos princípios básicos sobre os mesmos é fundamental para a modelagem sísmica. As seções sísmicas possuem precisão moderada, que pode ser refinada com a realização de perfilagem sônica e de densidade, em poços próximos. A resolução é métrica a decamétrica, variando numa mesma seção, em profundidade e ao longo da linha, devido à atenuação das ondas elásticas provocada pelas rochas.

Os principais programas, materiais e equipamentos utilizados na pesquisa, assim como suas aplicações estão listados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Programas utilizados.

| Programa | Utilização |
|--|---|
| Seismic Processing Workshop – SPW. Parallel Geoscience Corporation ® . http://www.parallelgeo.com | Processamento sísmico e visualização de seções sísmicas nos domínios do tiro e da distância em tempo ou profundidade. |
| RockWare Visual Seismic (RVS). RockWare Inc ®, Earth Science Software. http://www.rockware.com | <ul style="list-style-type: none"> - Visualização sísmica. - Amarração geográfica das seções sísmicas. - Interpretação de horizontes e de falhas em seções sísmicas. - Correlação com poços. - Geração de superfícies. |
| Rockworks 2002. RockWare Inc ®, Earth Science Software. http://www.rockware.com | <ul style="list-style-type: none"> - Geração de volumes. - Visualização de superfícies. - Análise estrutural. - Análise estatística. - Integração de dados tridimensionais. |
| Visual_SUNT 6.6 W GeoSoft Geophysical Software http://www.wgeosoft.ch/ | <ul style="list-style-type: none"> - Processamento sísmico. - Exportação de amplitudes em formato texto. |
| Sistema Geovisual 2.1 Jorge Kazuo Yamamoto / USP | <ul style="list-style-type: none"> - Análise geoestatística. - Modelagem tridimensional. |
| Spring 4.0 – Inpe http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html | <ul style="list-style-type: none"> - Análise de imagens de satélite. - Análise de fotos aéreas, traçado de quebras de relevo, lineamentos. - Locação de pontos, geração de perfis topográficos. - Geração de superfícies. |
| DXF2XYZ 1.3 Guthrie CAD/GIS Software. http://www.guthcad.com.au | <ul style="list-style-type: none"> - Conversão de arquivos do formato dxf em arquivos texto. |
| CorelDRAW 10. Corel Corporation. http://www.corel.com | <ul style="list-style-type: none"> - Desenhos esquemáticos, conversão de arquivos, edição de figuras. |
| Matriz2xyz. Freitas (2003) | <ul style="list-style-type: none"> - Conversão de matrizes no formato texto para arquivos xyz. |
| Geographix 2002. Landamark. | <ul style="list-style-type: none"> - Carregamento de seções sísmicas. - Interpretação de horizontes sísmicos e falhas. -Amarração com coordenadas geográficas. - Geração de superfícies. |

Tabela 2 - Síntese dos principais materiais e equipamentos e seus usos neste estudo.

| Materiais / Equipamentos | Utilização |
|--|---|
| Fotografias aéreas (escalas 1:70000, 1:25000 e 1:10000). | - Fotointerpretação de quebras de relevo e lineamentos. - Localização de afloramentos. - Navegação. - Locação de detalhe das linhas geofísicas. - Modelagem numérica de terreno. |
| Imagens do Satélite Landsat 7 TM. | - Interpretação de lineamentos regionais. |
| Carta topográfica (escala 1:50000 – IBGE). | -Modelagem numérica de terreno. -Localização estradas e acessos. -Posicionamento geográfico de afloramentos. |
| Equipamento Sísmico Geometrics | -Levantamento Sísmico |
| Materiais geológicos de campo. | -Descrição de afloramentos, amostragens. |

II – ANÁLISE DE DADOS GEOLÓGICOS – ESTUDO DE CASO LAPA - PR

Um dos principais critérios para a seleção das áreas de estudo foi a qualidade das exposições rochosas. Sem a existência de bons afloramentos as interpretações geológicas e geofísicas seriam muito mais frutos do conhecimento prévio do intérprete, do que embasadas nos atributos sedimentares e tectônicos descritos no campo. Os estudos da geologia local foram iniciados com consulta aos trabalhos anteriores e, concomitante, o sensoriamento remoto, como parte do imageamento. A fase seguinte foi composta por diversos trabalhos de campo na área da Lapa, com descrição de afloramentos e localização de áreas potenciais para levantamentos geofísicos. As melhores exposições rochosas foram imageadas através de painéis fotográficos, no sentido de observar e interpretar as principais geometrias existentes. O conhecimento final deste levantamento foi um melhor entendimento da distribuição espacial da estratigrafia e tectônica da área de estudo da Lapa.

II.1 - Localização dos afloramentos

Estruturas sedimentares, direção das estruturas tectônicas e tipos litológicos foram as principais informações obtidas com a descrição de afloramentos. Pequenas variações granulométricas e indicativos de fluxos trativos ou gravitacionais dificilmente serão observadas pelos métodos geofísicos atuais, restando ao geólogo de campo anotar estas informações, constituindo base para o entendimento dos modelos geológicos. Apesar do trabalho não focar o mapeamento faciológico, o posicionamento dos afloramentos descritos foi importante para a confecção do mapa geológico final da Lapa, permitindo corrigir algumas quebras de relevo aproximadas ou inferidas.

Foram descritos 31 afloramentos, coletadas informações litológicas e mais de 150 atitudes estruturais. A figura 6 mostra a localização destes pontos, com base na carta topográfica em escala 1:50000, onde as concentrações se dispõem ao longo da porção arenosa e nos segmentos utilizados pelos levantamentos sísmicos.

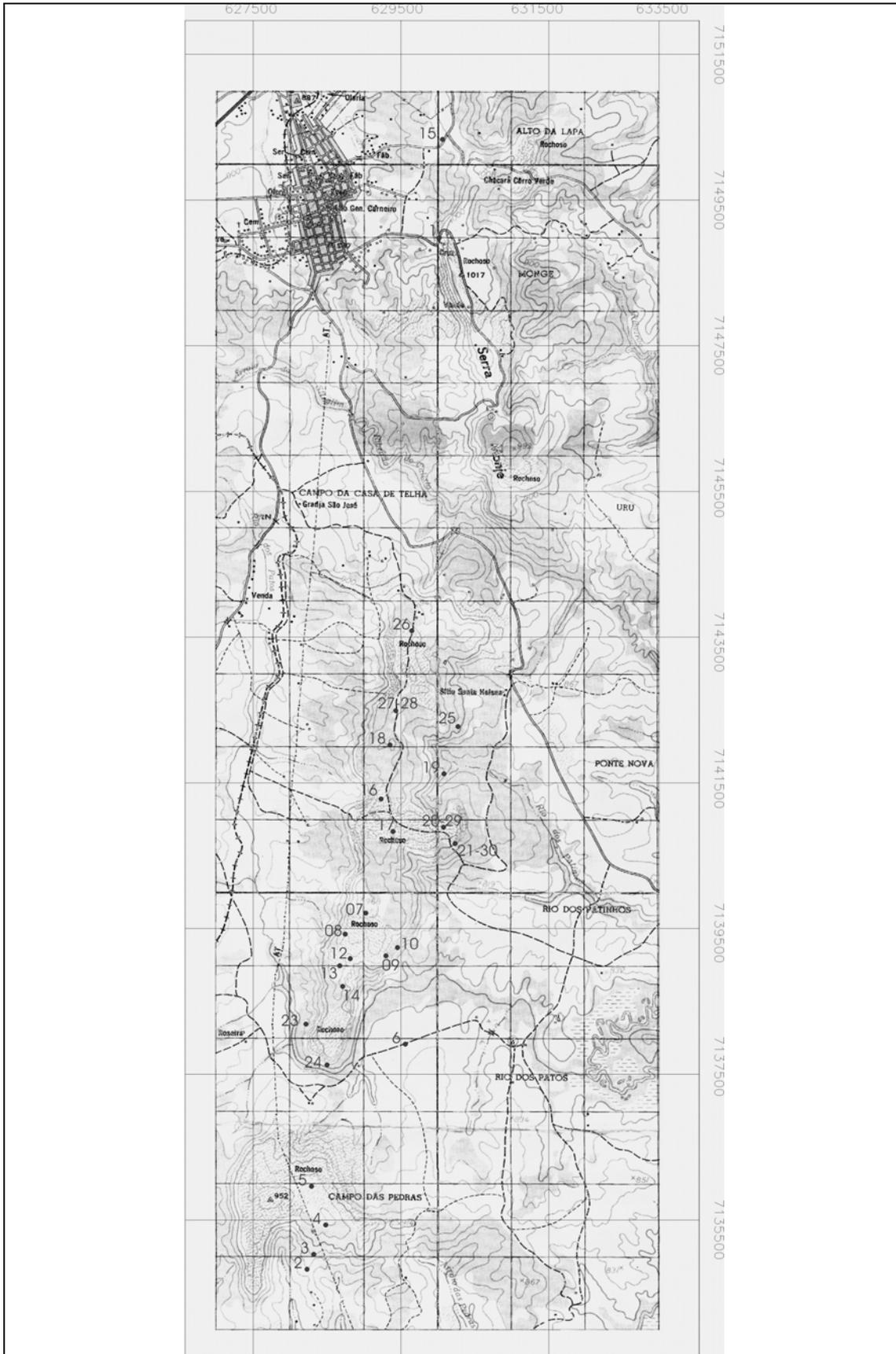
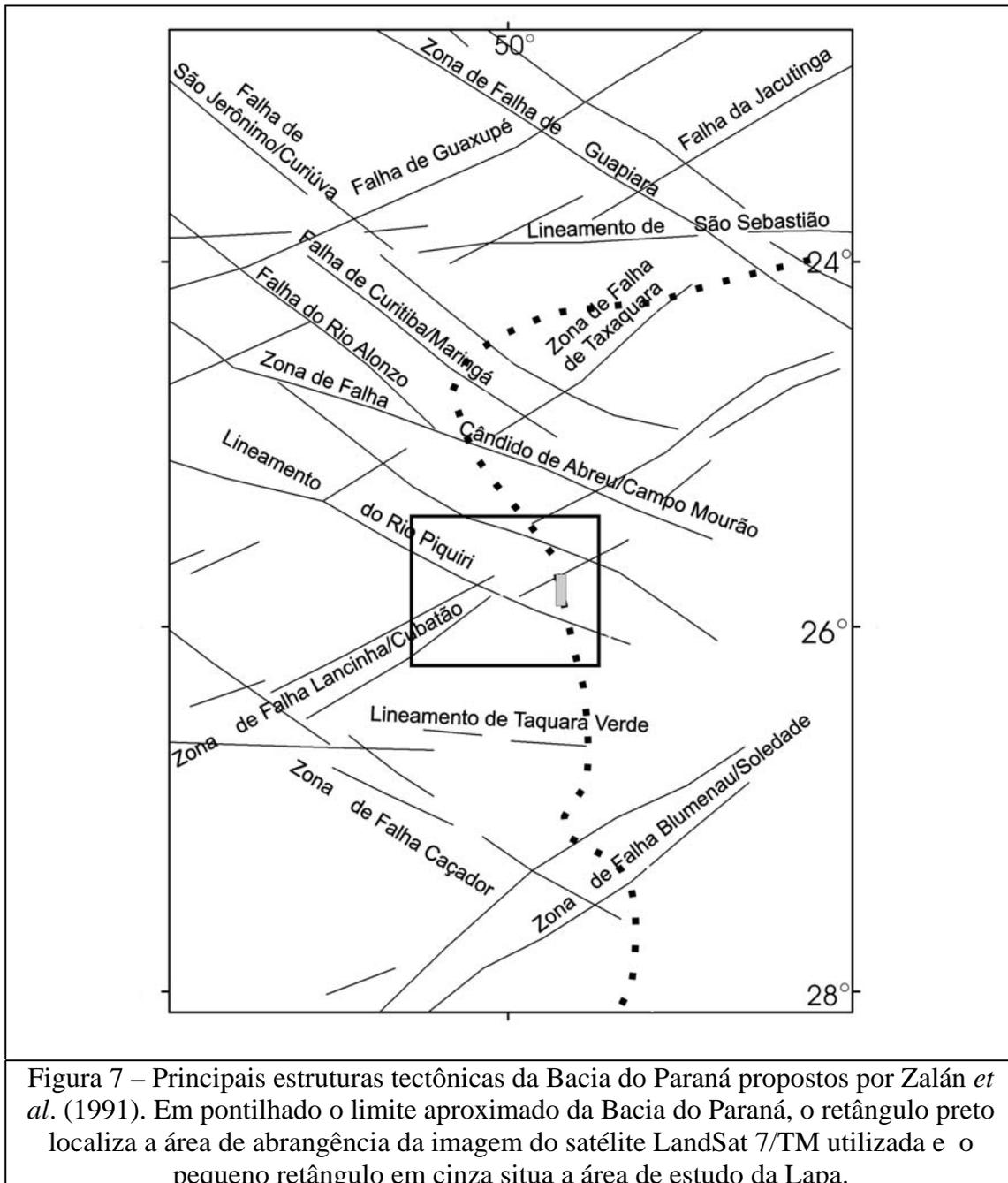


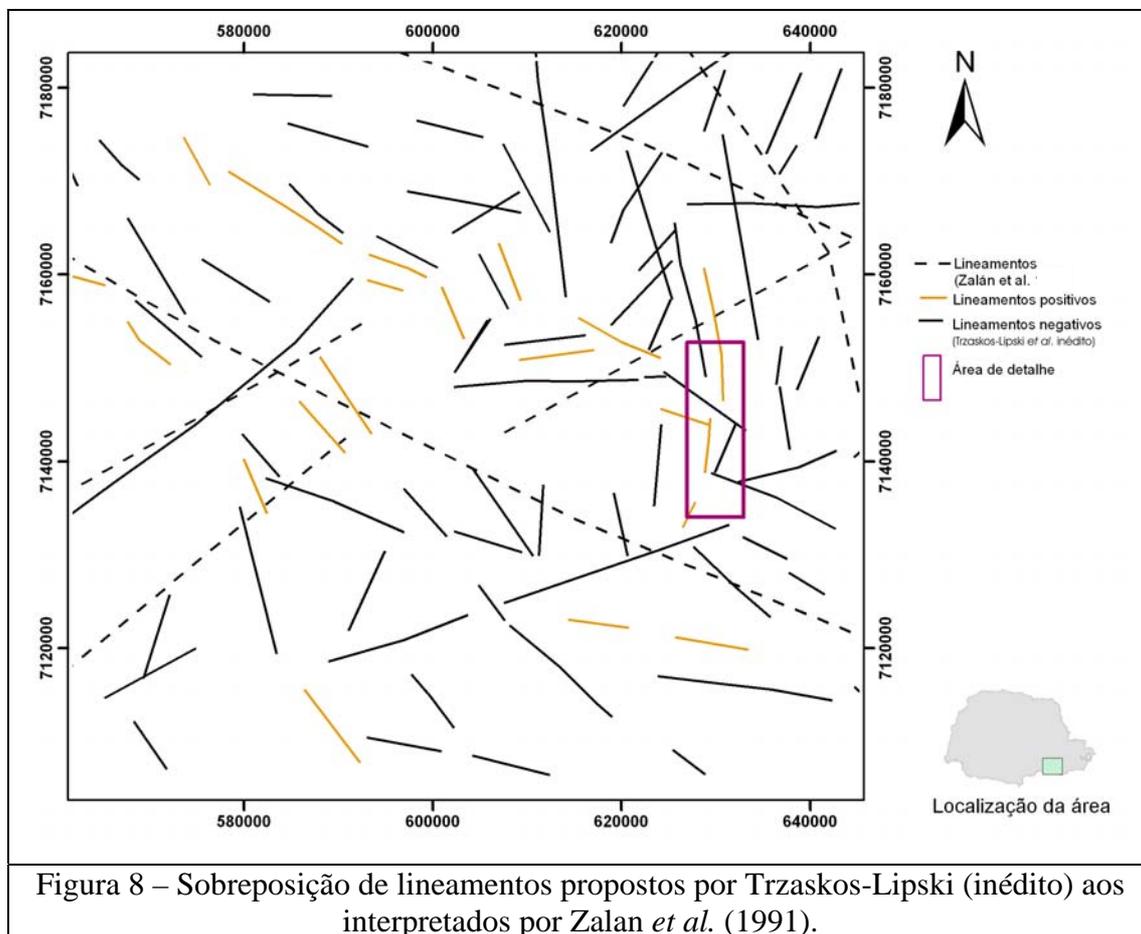
Figura 6 – Localização dos afloramentos descritos.

II.2 – Geologia estrutural

Zalán *et al.* (1991) descreveram três sistemas principais de estruturas tectônicas na Bacia do Paraná, os quais são apresentados na Figura 7: NE-SW (relacionado às estruturas do seu embasamento); NW-SE (associado ao Arco de Ponta Grossa) e E-W (relacionado a zonas de fraturas oceânicas).



Trzaskos-Lipski (inédito) sobrepôs sua interpretação de lineamentos geomorfológicos, baseados em imagens de satélite e no modelo numérico de elevação, aos lineamentos propostos por Zalán *et al.* (1991), como pode ser observado na Figura 8.



Trzaskos-Lipski (inédito) observaram, na sobreposição de sua proposta de lineamentos com a interpretação de Zalán *et al.* (1991), uma falta de coincidência espacial em alguns traços e, devido a esta característica, aventaram algumas inferências. Uma das hipóteses considera a escala e a qualidade do mapa impresso dos lineamentos regionais. Outra possibilidade reside na inclinação das zonas de falhas relacionadas aos lineamentos interpretados regionalmente serem diferentes no embasamento e na bacia sedimentar, ocasionando uma posição diferenciada em superfície. Uma última possibilidade considera que as linhas traçadas segundo a geomorfologia são componentes menores dos grandes lineamentos que não produziram feições no relevo perceptíveis na escala de detalhe.

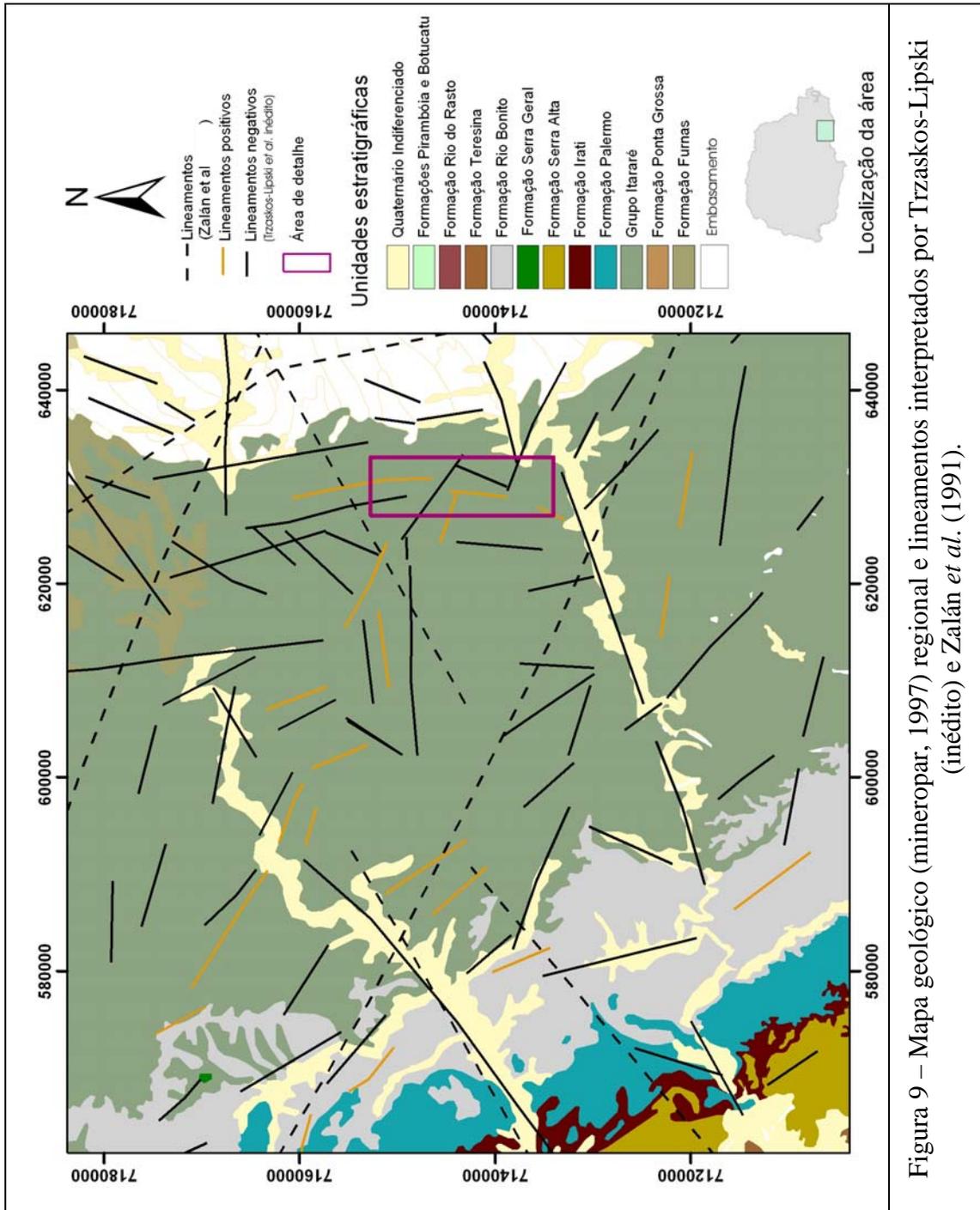
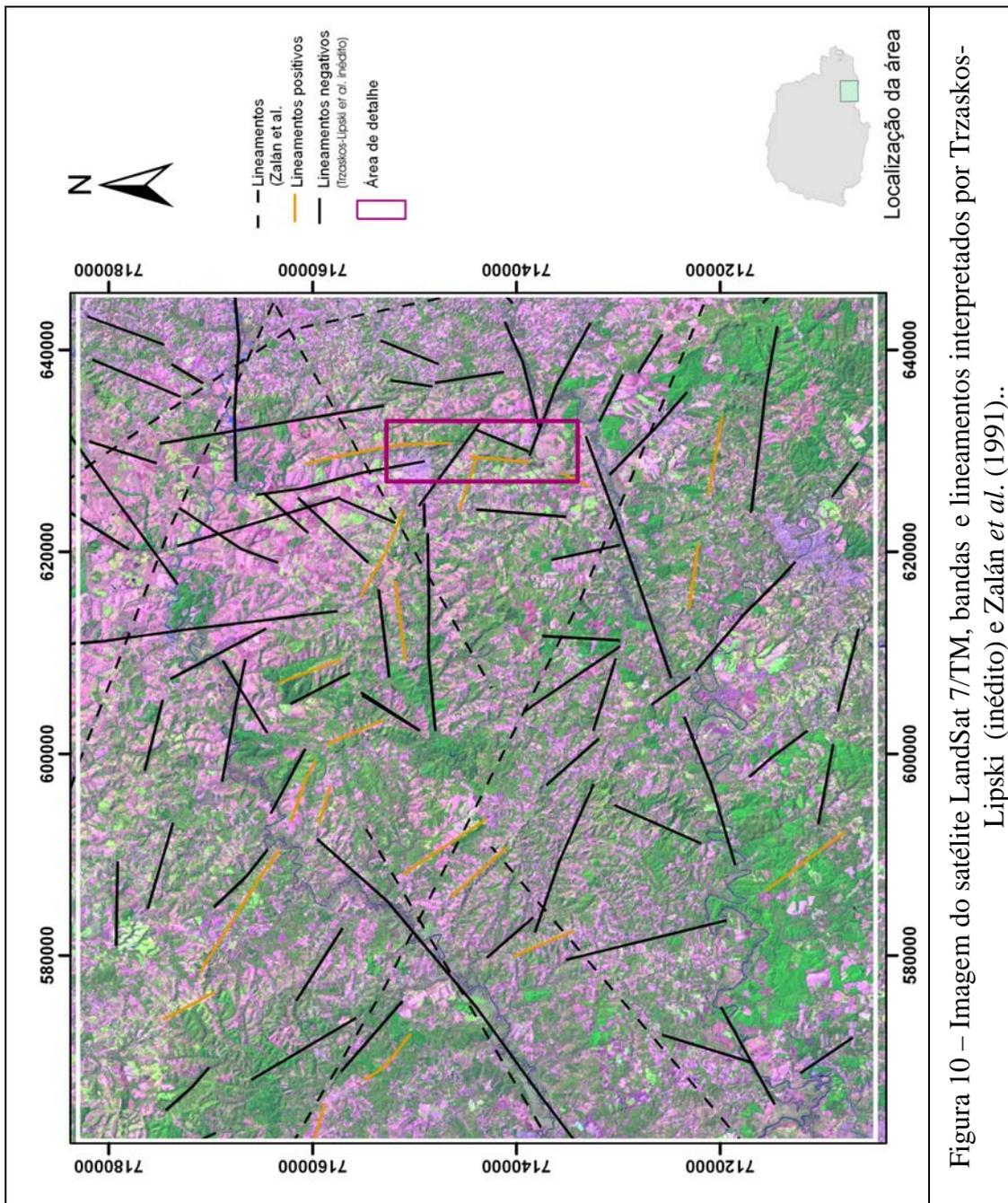


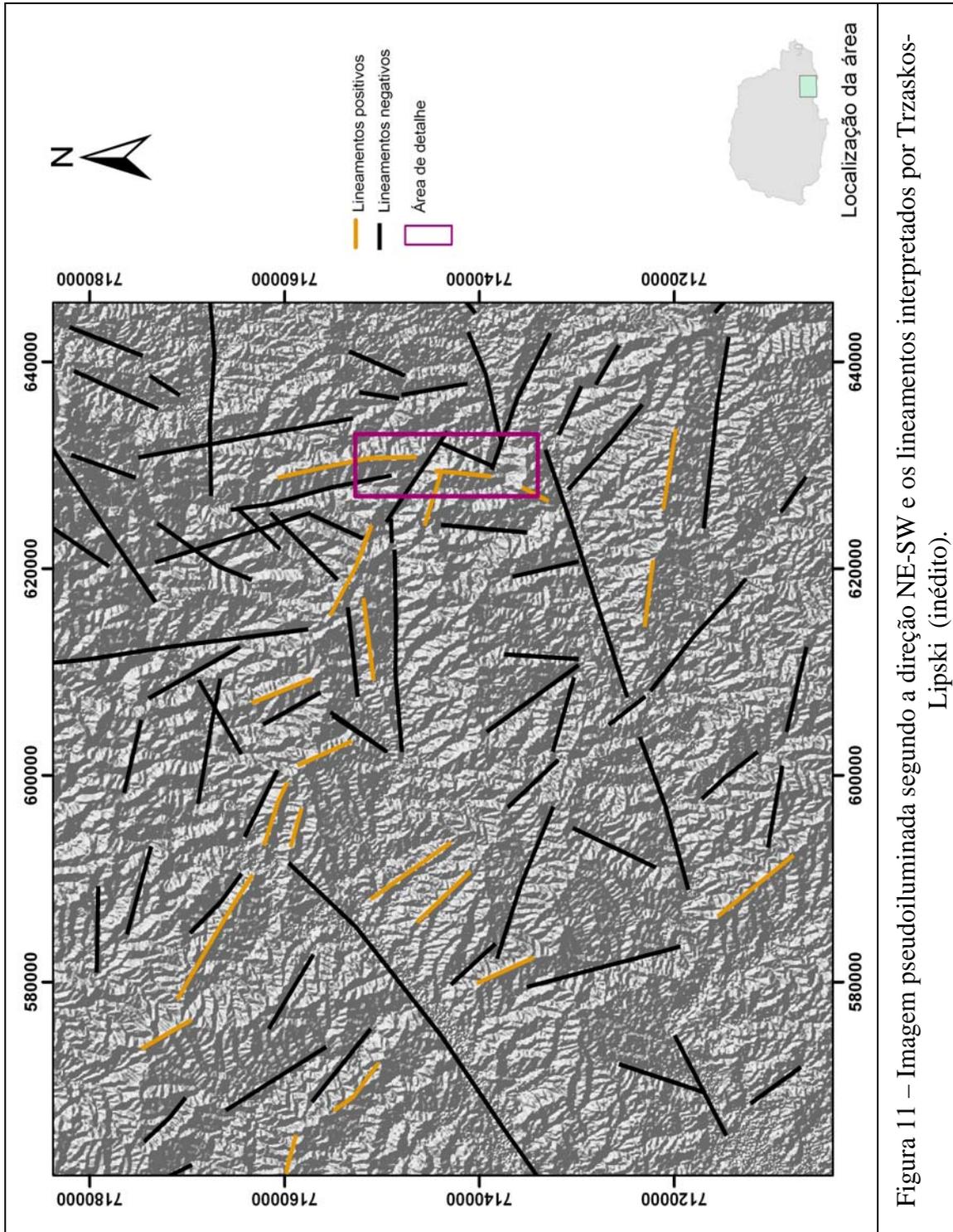
Figura 9 – Mapa geológico (mineropar, 1997) regional e lineamentos interpretados por Trzaskos-Lipski (inédito) e Zalán *et al.* (1991).

O mapa geológico sobreposto pelas interpretações (Figura 9) de Trzaskos-Lipski (inédito) e Zalán *et al.* (1991), mostra que os traços dos lineamentos dos primeiros autores, seguem os depósitos recentes dos grandes rios na Bacia do Paraná, e os lineamentos regionais, o mesmo tipo de estrutura geológica, estão mais evidentes no embasamento da bacia. Na imagem do satélite Landsat 7/TM (Figura 10) as diferentes formas de relevo, condicionadas pela geologia, realçam lineamentos geomorfológicos.



A correlação dos lineamentos definidos por Zalán *et al.* (1991) com as discontinuidades observadas na área de estudo, constituem uma maneira de inserir atributos locais, observados neste trabalho, e acrescentar informações sobre as zonas de influência dessas estruturas. As feições aqui observadas com direção NW-SE provavelmente estão relacionadas com o Lineamento do Rio Piquiri, enquanto aquelas dispostas segundo a direção NE-SW estão vinculadas com a zona de falha Lancinha-Cubatão.

As Figuras 11 e 12, pseudoiluminadas segundo as direções NE-SW e NW-SE, respectivamente, a título de comparação, foram produzidas com os mesmos limites geográficos da imagem do satélite Landsat 7/TM.



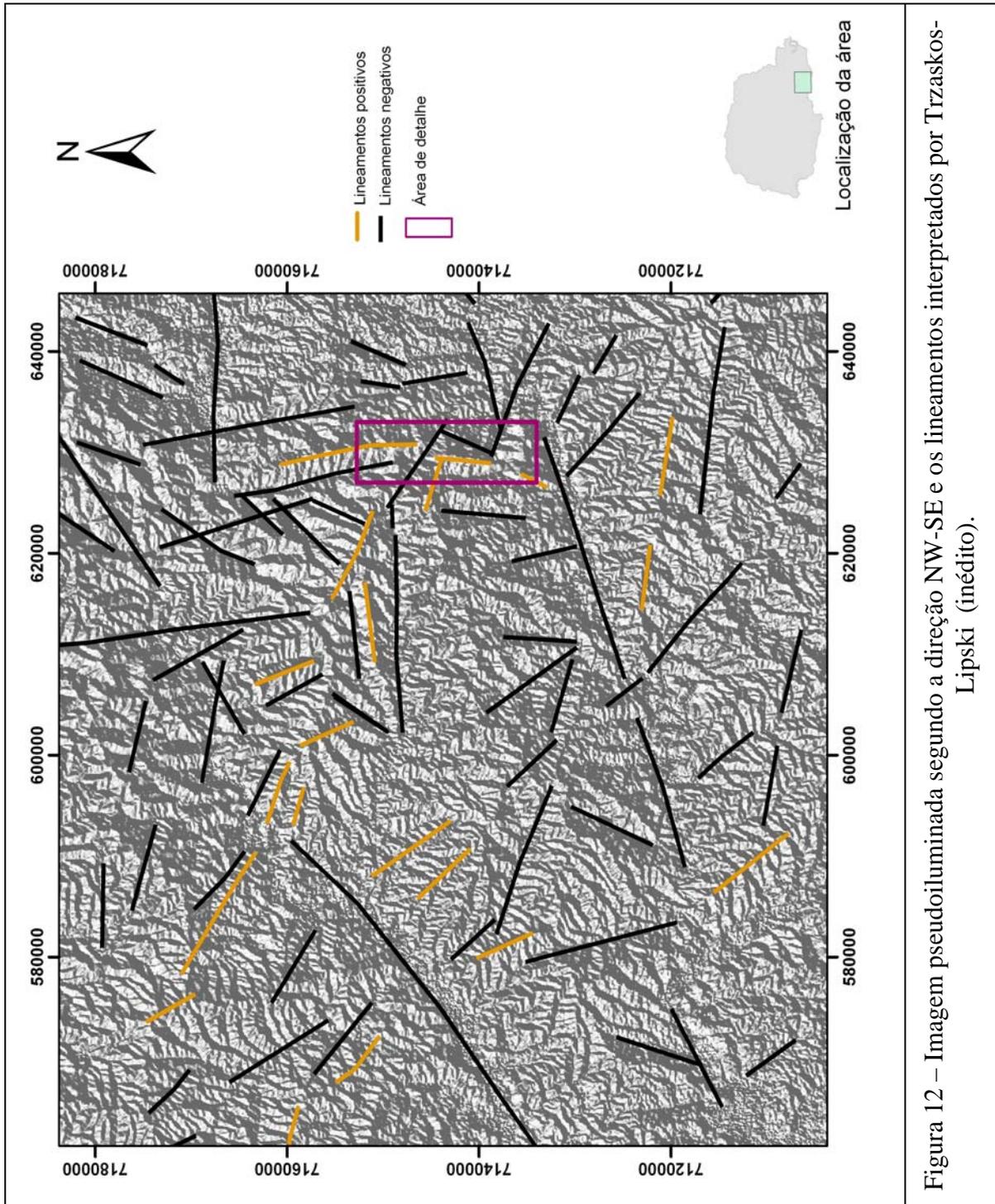
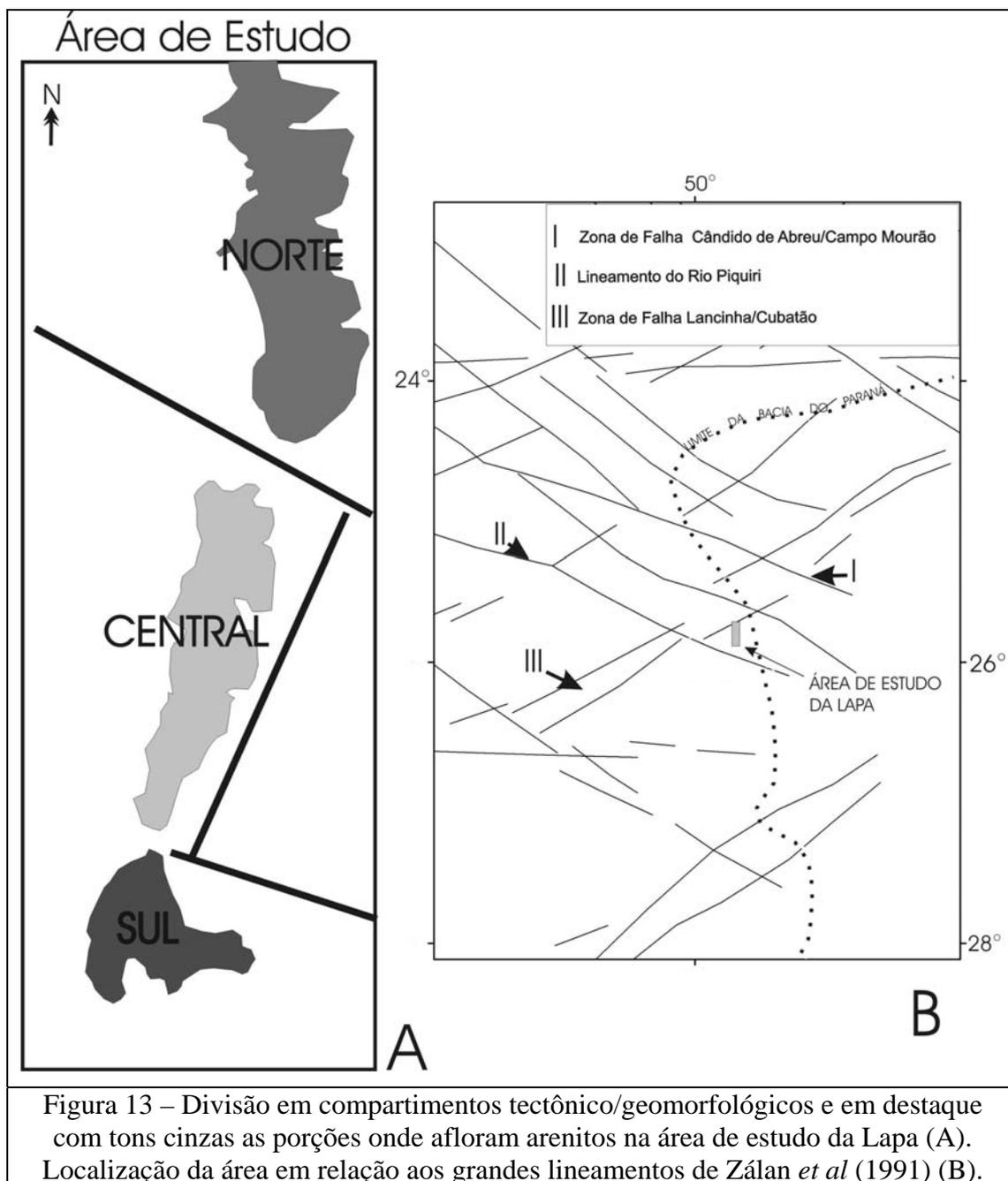


Figura 12 – Imagem pseudoiluminada segundo a direção NW-SE e os lineamentos interpretados por Trzaskos-Lipski (inédito).

Pode ser observado nas figuras anteriores, a presença de três lineamentos contidos na área de detalhe, enquanto ao sul, fora dos seus limites, existe um grande lineamento de direção NE-SW, provavelmente influenciando esta porção.

A Figura 13 ressalta, com tons de cinza, as discontinuidades das porções psamíticas, contidas nos compartimentos tectônicos. A presença de lineamentos e a

interrupção dos platôs arenosos permitiu que área de estudo fosse dividida em três regiões de influência tectônica: norte, central e sul.



A Figura 14 contém indicação das porções psamíticas, lineamentos e diagramas, baseados em fotos aéreas na escala 1:25000. Utilizando a separação por compartimentos, observa-se que ocorrem variações nas direções das principais estruturas, sendo na região norte a NE-SW mais marcante, seguida pela E-W, na porção central NE-SW e, no sul, ocorre uma dispersão das tendências.

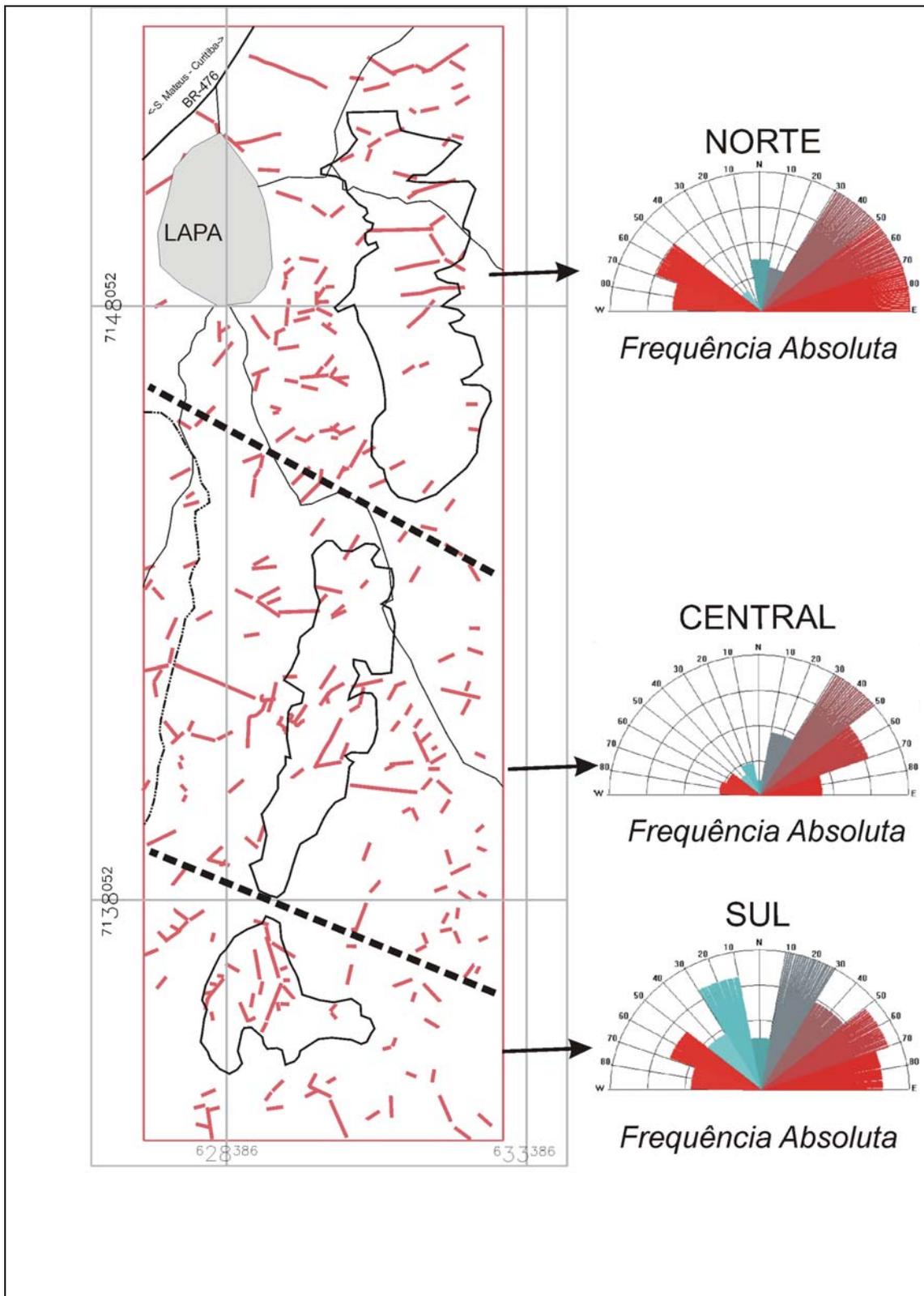
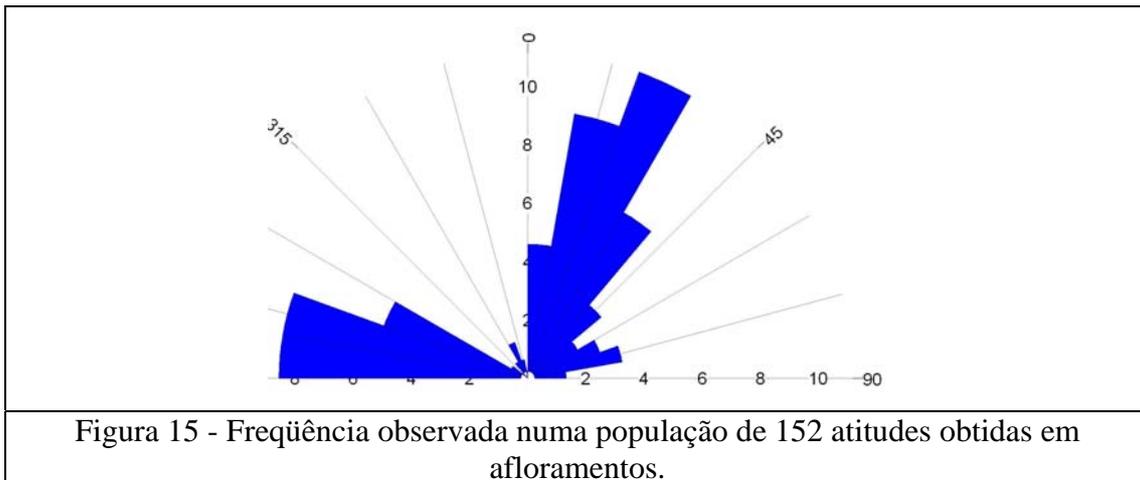


Figura 14 – Diagramas de frequência absoluta, construídos com lineamentos foto interpretados (escala 1:25000) e localização de sua área de abrangência.

O diagrama da Figura 15, de fraturas medidas em afloramentos, mostra que são predominantes as direções NE-SW e E-W.



Nos afloramentos localizados no compartimento norte, os aspectos mais marcantes da direção E-W foram algumas ocorrências de fraturas abertas descontínuas, preenchimento de óxidos (indiferenciados neste estudo) e deslocamentos aparentes destrais. Nas escarpas ocorrem fraturas de direção norte-sul com indicação de deslocamento do bloco baixo para leste. O rumo N-S também condiciona as escarpas neste bloco. A Figura 16 exemplifica uma feição do afloramento 1, localizado na estrada do Parque Estadual do Monge.

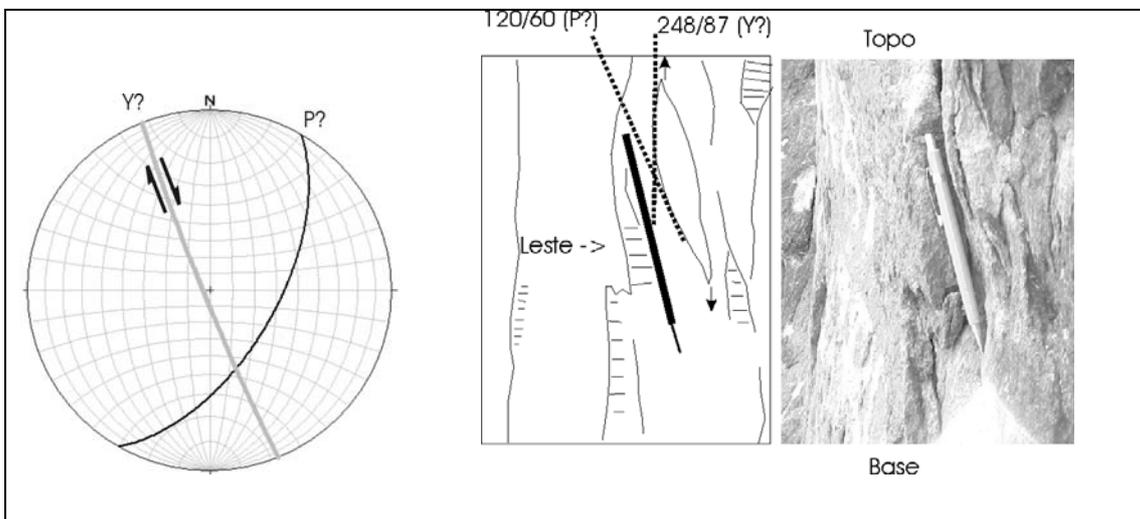


Figura 16 - Afloramento composto por arenitos médios, imaturos, observa-se que ocorrem estratificações plano paralelas. As fraturas indicam um deslocamento do bloco baixo para leste. Este afloramento está localizado na escarpa oeste (figura 6 – mapa de pontos) e é correlacionado à porção superior da estratigrafia local.

Dentre os afloramentos da porção central, os aspectos mais proeminentes da direção NE-SW são a continuidade, o aspecto retilíneo, por vezes apresentam caráter

normal com rejeitos centimétricos. Limitam as escarpas leste e oeste. Tal caráter é bem marcado apenas no extremo sul da região setentrional e no norte da porção meridional. Nesta região da área de estudo também ocorrem outras direções e a intrusão de um dique de rocha básica de direção W-NW. A Figura 17 mostra os deslocamentos tectônicos observados no afloramento 30, localizado na escarpa leste da porção arenosa.

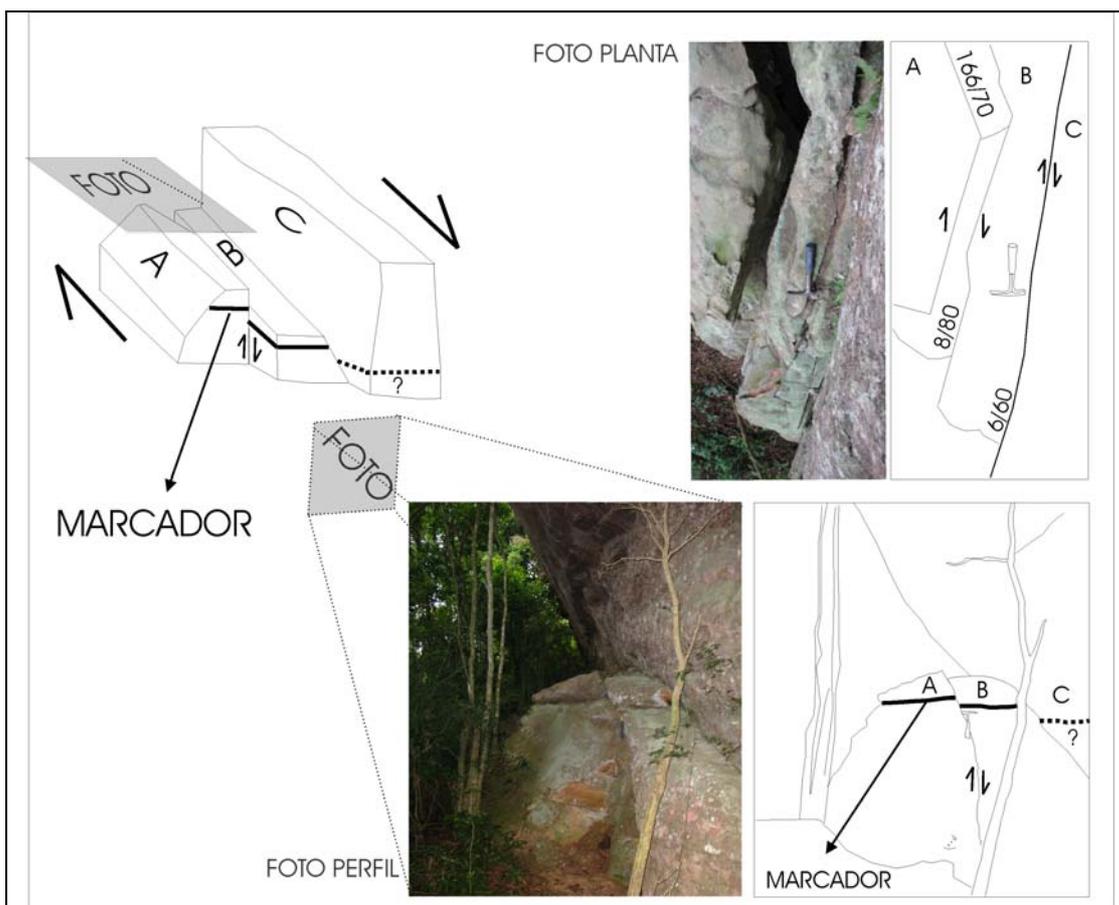


Figura 17 - Afloramento composto por arenitos médios a grossos, por vezes conglomeráticos, intercalados com conglomerados. Representativo da porção média da estratigrafia local, ocorrem falhas de pequenos rejeitos, com planos muito contínuos e retilíneos.

Os aspectos mais proeminentes da direção NW-SE em afloramentos localizados no compartimento sul consistem num aspecto de aparente movimentação normal com o compartimento norte mais alto. Quando ocorrem fraturas NE-SW elas são retilíneas e, por vezes, apresentam movimento destal aparente. A Figura 18 mostra um afloramento localizado no topo da estratigrafia da porção sul.

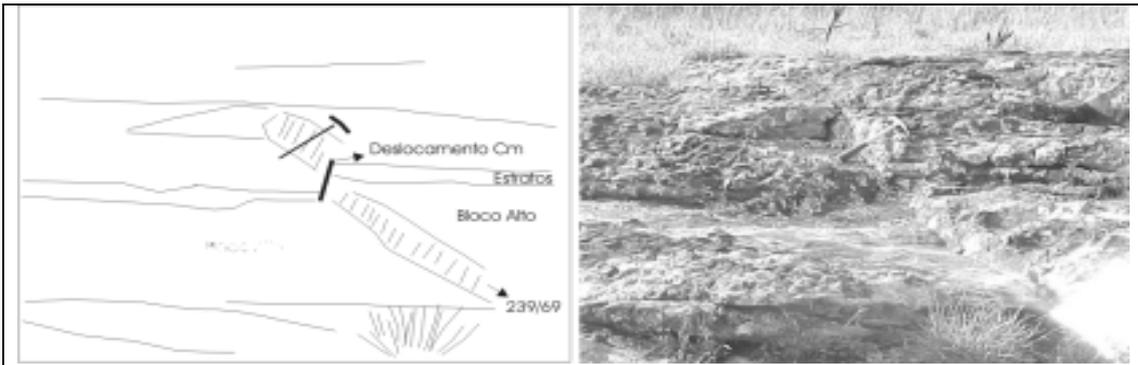


Figura 18 - Afloramento do compartimento sul composto por: arenitos médios dispostos em estratos tabulares, bem selecionados e correlacionados ao topo da estratigrafia local. Foi observada uma pequena falha normal, com rejeito centimétrico, direção do mergulho 239/69, bloco noroeste alto. Ocorrem duas famílias marcantes de fraturas, uma NW-SE com caráter descontínuo e irregular, e outra NE-SW contínua, anastomosada.

II.3 - Estratigrafia

As rochas estudadas fazem parte de um alto topográfico, facilitando a realização de perfis litológicos verticais. A Figura 19 apresenta esta característica do relevo e das rochas estudadas.

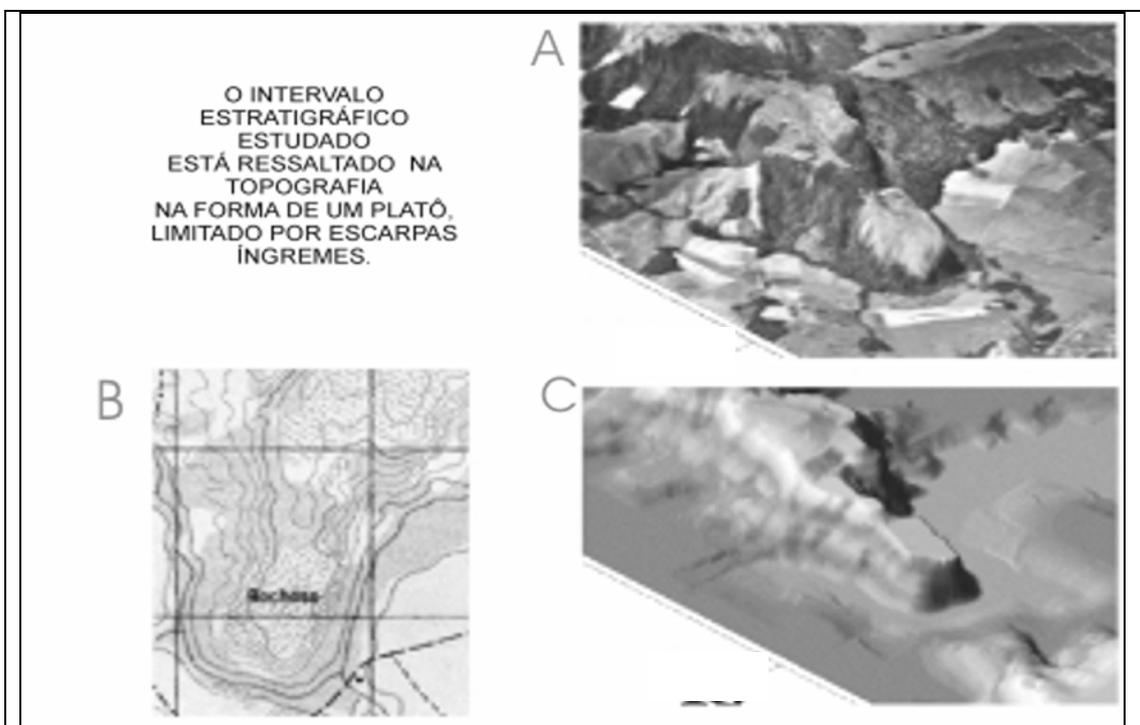


Figura 19 - Aspecto geomorfológico marcante da área de estudo da Lapa – PR, modelo numérico de terreno, em visão oblíqua, com foto aérea sobreposta (A), carta topográfica 1:50000 (B) e modelo numérico de terreno com visão oblíqua (C).

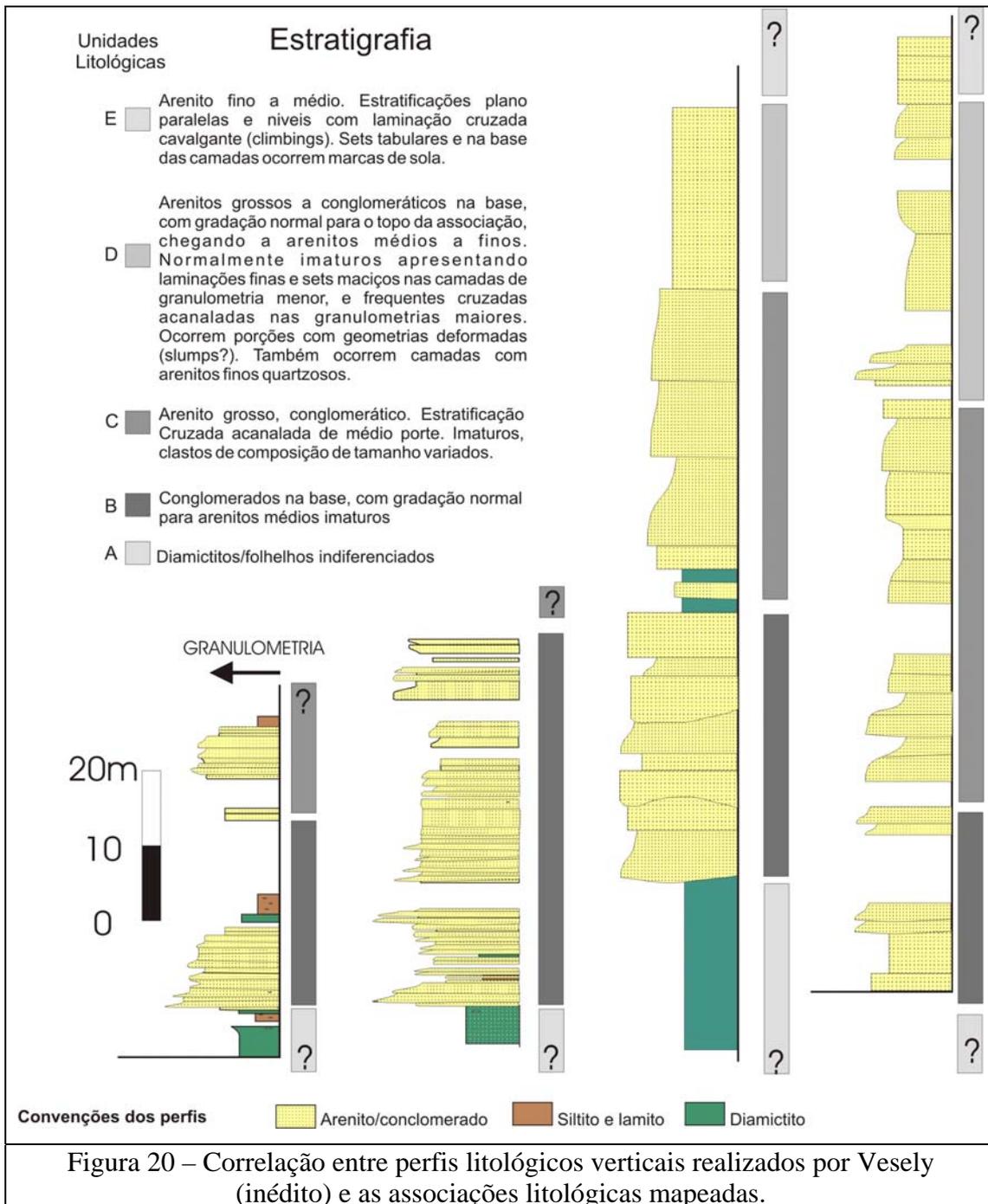
A interpretação do empilhamento estratigráfico observado no campo pode variar de autor para autor, porém, em geral, há consenso em termos descritivos. Trabalhos anteriores (d'Ávila 1999, França *et al.* 1996, Maack 1946) já observaram que a estratigrafia é representada por pelitos na base, seguido por conglomerados e arenitos conglomeráticos e arenitos médios a finos no topo.

Segundo Maack (1946) a Série Itararé na região da Lapa pode ser dividida em dez unidades litológicas (Tabela 3), resultando numa espessura aproximada de 142 metros.

Tabela 3 – Seqüência litológica observada por Maack (1946).

| Litotipo | Descrição | Espessura (m) |
|-----------------|--|----------------------|
| 10 | Arenito de granulação média, avermelhado, com seixos | 33 |
| 9 | Arenito de granulação grossa, avermelhado, com estratificação irregular | 10 |
| 8 | Camada de conglomerado | 1-2 |
| 7 | Arenito de granulação grossa, avermelhado, alternando irregularmente com arenito de granulação média | 8 |
| 6 | Tilito (cor avermelhada) | 11 |
| 5 | Sedimentos de drift, amarelo-cinzeno e verde-cinzeno com blocos e seixos | 5 |
| 4 | Varvitos, violeta a cor de chocolate com faixas verdes claras | 10 |
| 3 | Arenito cinzeno fluvio-glacial | 20 |
| 2 | Camadas de cor alternadamente branca e avermelhada clara ou amarelada, areno-argilosas, do tipo São Luiz do Purunã | 25 |
| 1 | Arenito claro flúvio glacial | 10-18 |
| | Total | 142m |

Nesta coluna estratigráfica ocorrem intercalações dos mesmos litotipos, variando as espessuras de cada fácies. Vesely (inérito) descreveu alguns perfis litológicos verticais na área da Lapa. A Figura 20 consiste numa simplificação dos perfis citados correlacionada com a geologia extraída do mapa geológico.



Visando registrar a variação geral, foi construído um mapa geológico da área de estudo (Figura 21) com base na localização dos afloramentos em carta topográfica. Foram levadas em consideração suas características geológicas e quebras do relevo fotointerpretadas. Pode-se observar na Figura 21 que a distribuição das associações estão condicionadas pelo relevo, ocorrendo variações em planta, principalmente devido a declividade elevada nas escarpas. Os principais litotipos foram agrupados de

acordo com sua predominância. Este agrupamento coincide, de uma forma geral, com as quebras de relevo observadas em campo e na fotointerpretação.

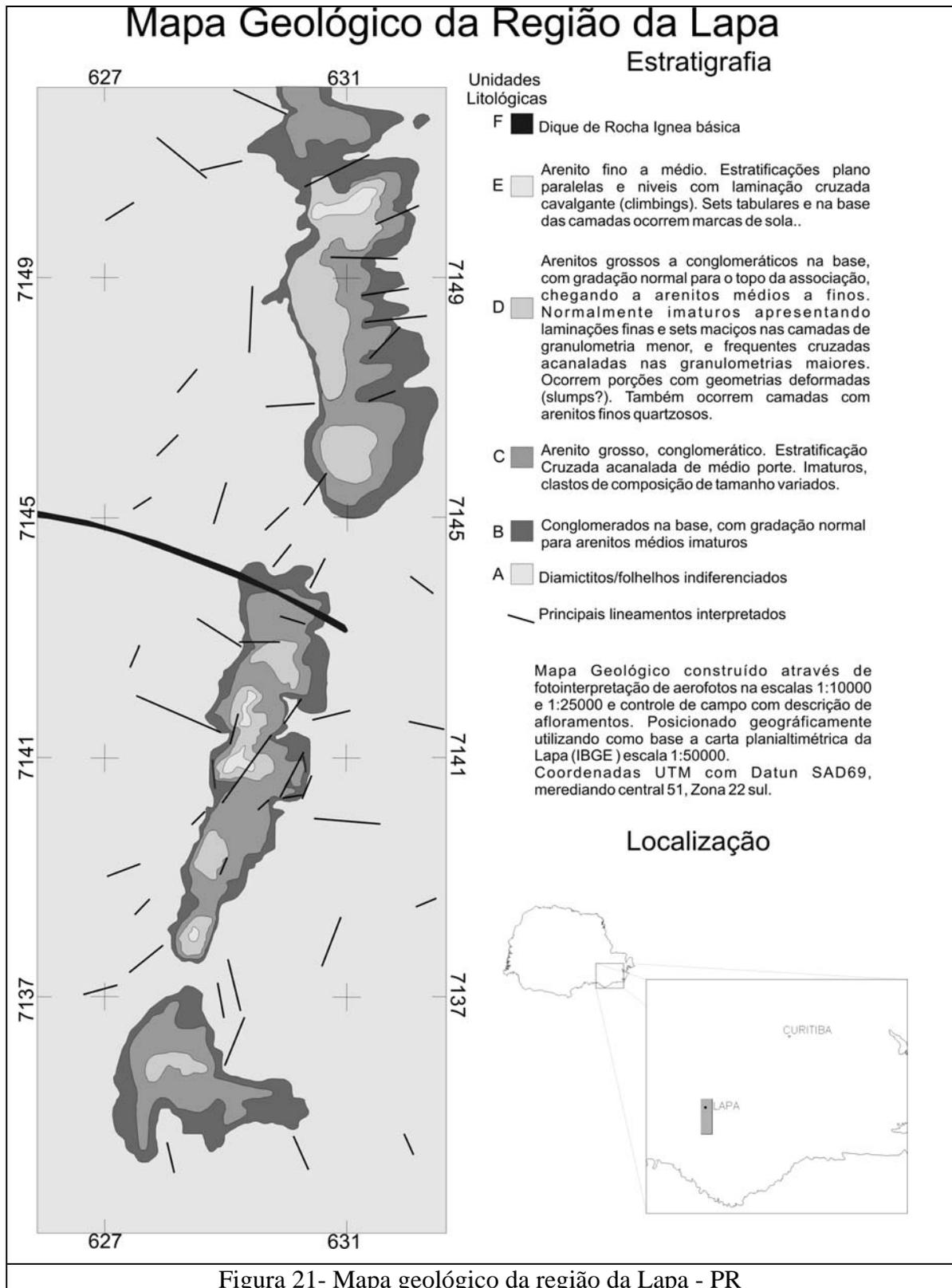
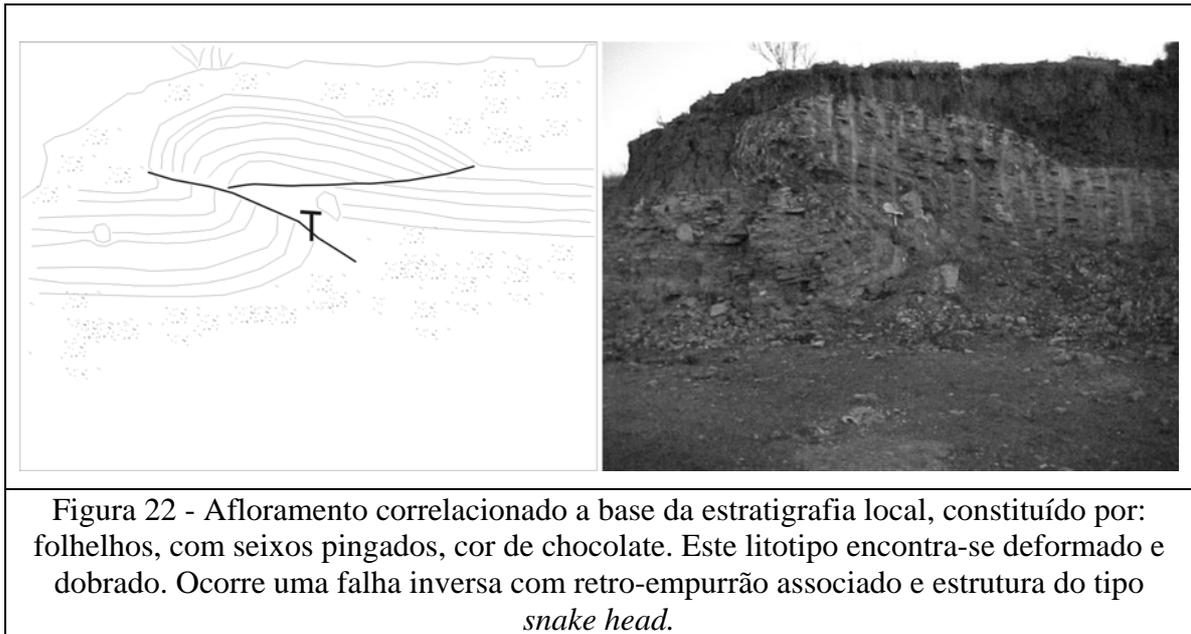


Figura 21- Mapa geológico da região da Lapa - PR

A unidade A, composta principalmente por diamictitos/folhelhos indiferenciados, compreende a maior parte do mapa geológico. Tais áreas foram pouco estudadas porque não contêm os elementos análogos a reservatórios que interessavam ao estudo. De forma geral esses litotipos possuem uma distribuição ampla com muita variação litológica. Ocorrem algumas feições geométricas que representam deslocamentos de massas, como mostra a Figura 22.



A unidade B, composta por conglomerados na porção inferior (Figura 23), com gradação normal para arenitos médios impuros, ocupa a base das unidades de interesse. Em contato erosivo com os diamictitos ou folhelhos, esta unidade litológica é freqüentemente encontrada no sopé das escarpas ou nos taludes.



Figura 23 – Conglomerados da unidade B.

A unidade C, composta principalmente por arenito grosso, conglomerático situada na parte inferior da estratigrafia local. A Figura 24 exemplifica um afloramento dessa porção.



Figura 24 – Afloramento composto por arenitos médios a grossos, imaturos, predominantemente conglomeráticos na base, apresenta estratificações cruzadas planares, por vezes acanaladas, em geral de médio porte.

A unidade D (Figura 25) indicativa do topo da coluna estratigráfica é composta principalmente por arenitos grossos, principalmente conglomeráticos na base, com gradação normal para o topo constituído por arenitos médios ou finos. Ocorre em todos os compartimentos estudados e ocupa pequenas porções do mapa.

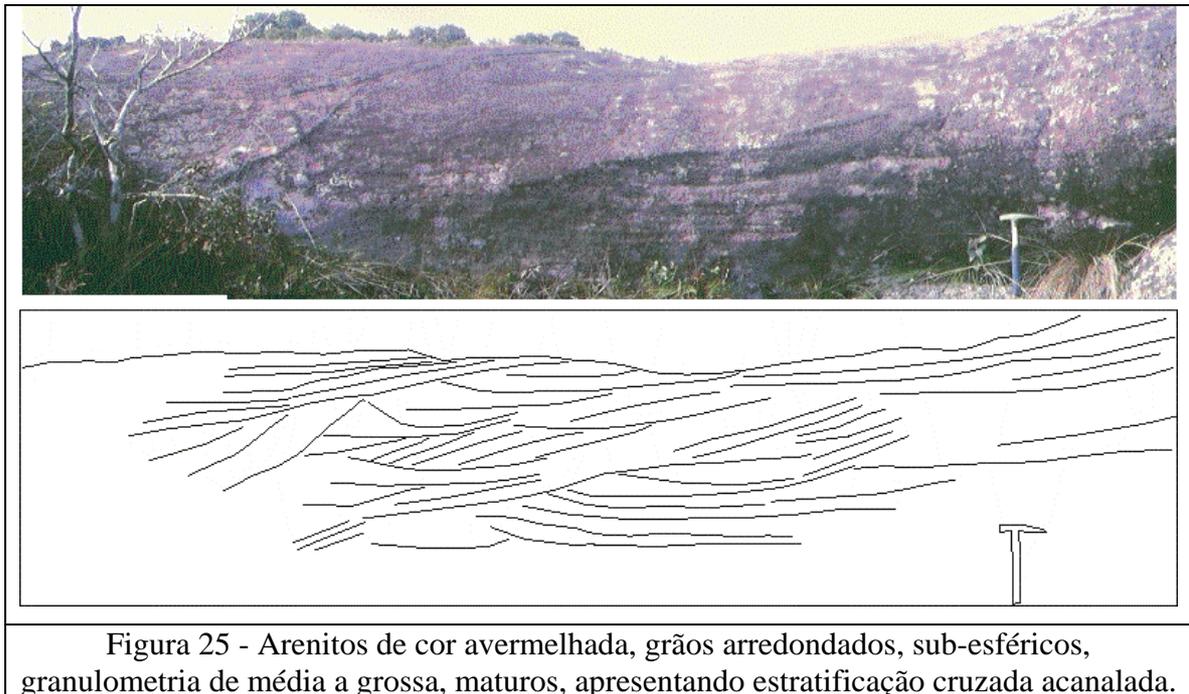


Figura 25 - Arenitos de cor avermelhada, grãos arredondados, sub-esféricos, granulometria de média a grossa, maduros, apresentando estratificação cruzada acanalada.

A unidade E (Figura 26) é a menos abundante e ocorre apenas nas porções mais elevadas da área de estudo. É composta por arenitos médios e finos, moderadamente selecionados e apresenta estratos tabulares de espessura centimétrica a métrica.

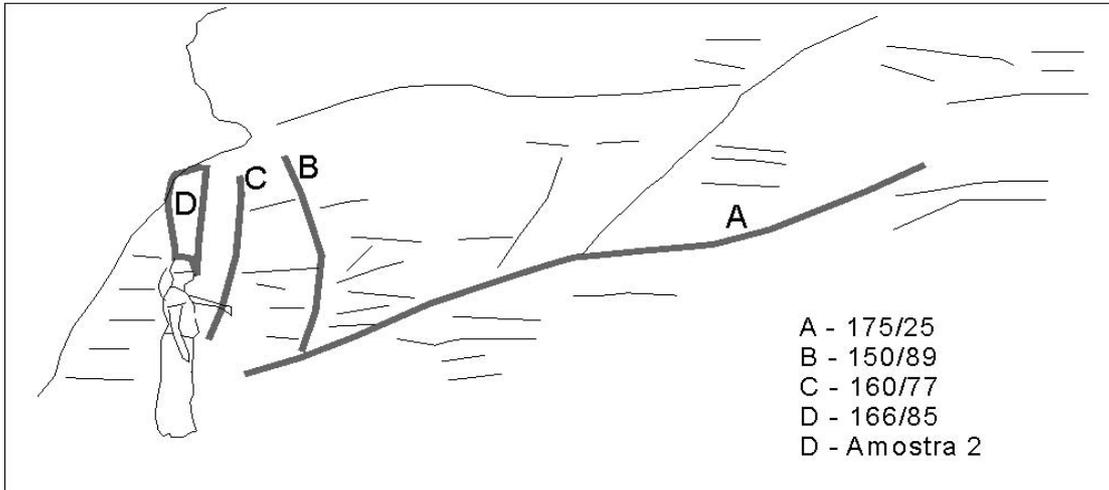


Figura 26 – Afloramento da unidade E.

III – IMAGEAMENTO

A aquisição dos dados geológicos e geofísicos foi realizada no campo e a partir de sensores remotos. Nesta etapa foi realizada a transformação dos dados físicos em dados digitais, os quais foram codificados nos formatos de imagens ou em arquivos numéricos.

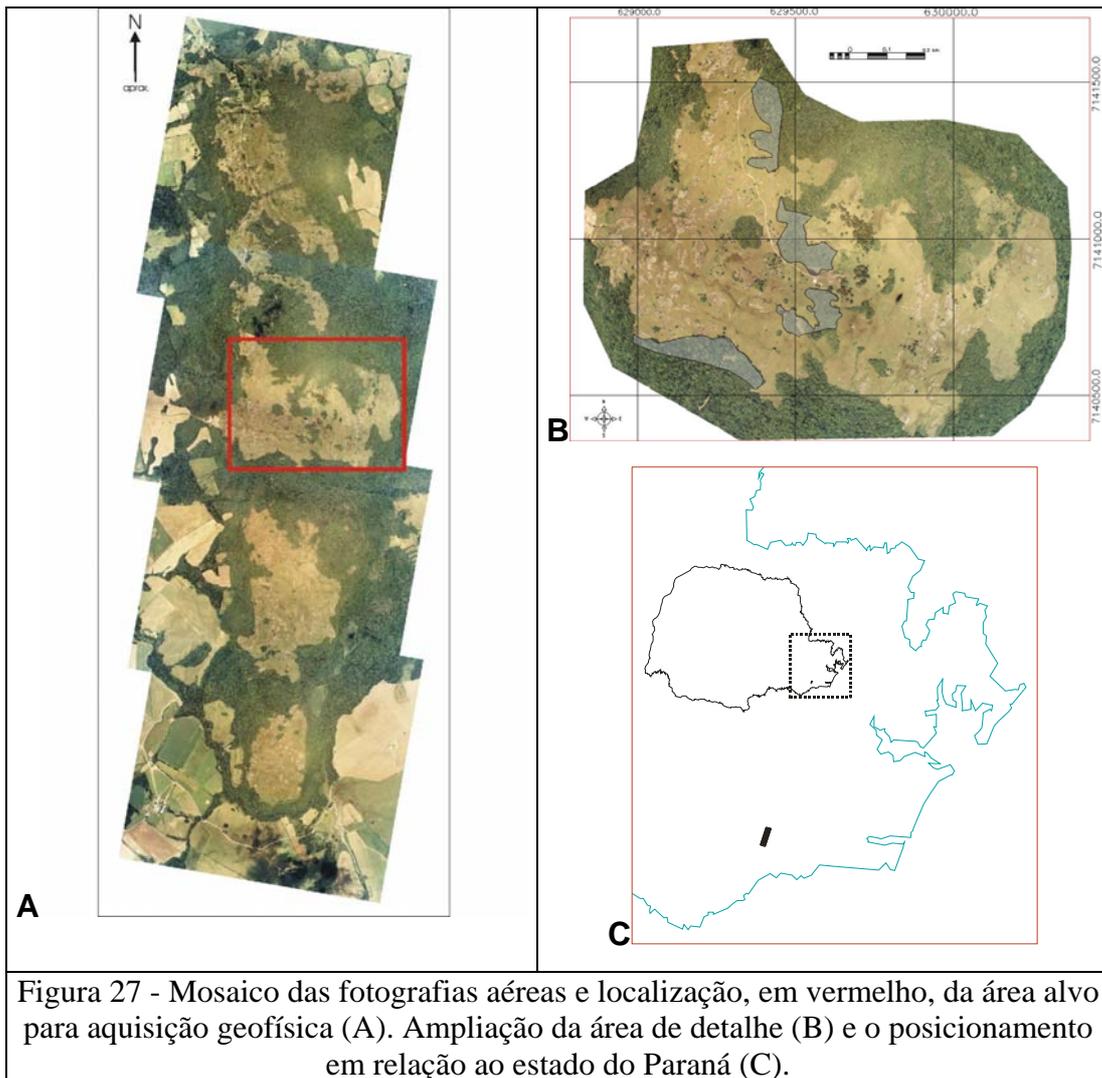
III.1 Geologia

Além das informações qualitativas descritivas, recolhidas em afloramentos, foram obtidos dados quantitativos, referentes a superfície topográfica e a interpretações em painéis de afloramento. Outros dados imageados foram fotos aéreas e imagens orbitais.

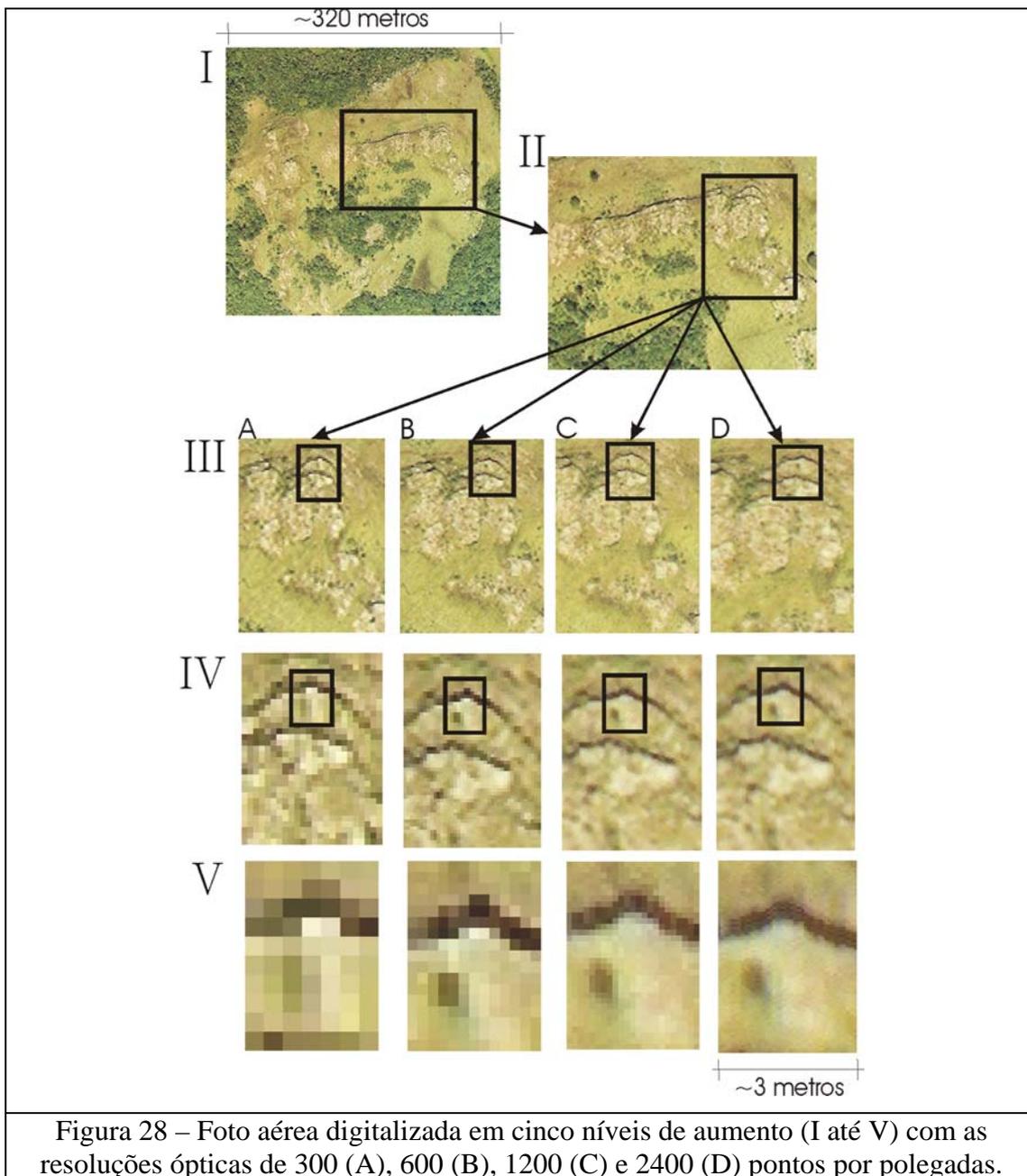
III.1.1 - Sensoriamento Remoto

III.1.1.1 - Fotos Aéreas

As fotos aéreas utilizadas encontram-se nas escalas 1:70000 e 1:25000, ambas da década de 80. Mas devido à necessidade de um melhor detalhamento, foi realizado um novo levantamento, na escala 1:10000 (executado pela empresa Aerosat), auxiliando na locação de linhas para o levantamento geofísico. Estas novas fotos aéreas foram fundamentais para a geração do modelo numérico de terreno, o qual foi construído com amostras de 10 em 10 metros. Pode ser observado na Figura 27 a localização deste levantamento fotográfico de detalhe.



As fotografias aéreas, reveladas em papel fotográfico, foram transformadas para o meio digital através de *scanners*. Foi observada uma diferença considerável, quando digitalizada com resoluções diferentes (Figura 28). Desta forma podem ser extraídas informações geológicas desde feições com mais de um quilometro (a fotografia aérea na escala 1:10000 possui 2.3km de lado) até estruturas com 300 ou até 3 metros de comprimento, como no teste realizado na Figura 28.



3.1.1.2 - Modelo Numérico de Elevação

O modelo numérico de elevação inicial foi gerado a partir de carta topográfica em escala 1:50000, a partir da digitalização de curvas de nível de 20 em 20 metros. Foi observada considerável diferença quando comparada com o novo levantamento da topografia do terreno. Entretanto ainda continua válido para análises regionais, por abranger uma área muito maior.

Como um dos objetivos do estudo é descrever metodologicamente a geração de modelos computacionais, as coordenadas espaciais mais apropriadas são do sistema UTM. O georreferenciamento foi realizado através da demarcação física de pontos na área de detalhe, com o uso de um sistema de posicionamento global (GPS) do tipo diferencial, utilizando uma referência de nível (RN) localizada na cidade da Lapa e uma outra no Centro Politécnico, em Curitiba. O erro final calculado, abaixo de 1 metro, indicou precisão adequada para o estudo em questão. Esta etapa contou com a colaboração dos professores e alunos do departamento de Geomática da UFPR. As duas imagens sombreadas (Figura 29), falsa iluminação de nordeste, mostram diferenças na rugosidade dos modelos numéricos de terreno.

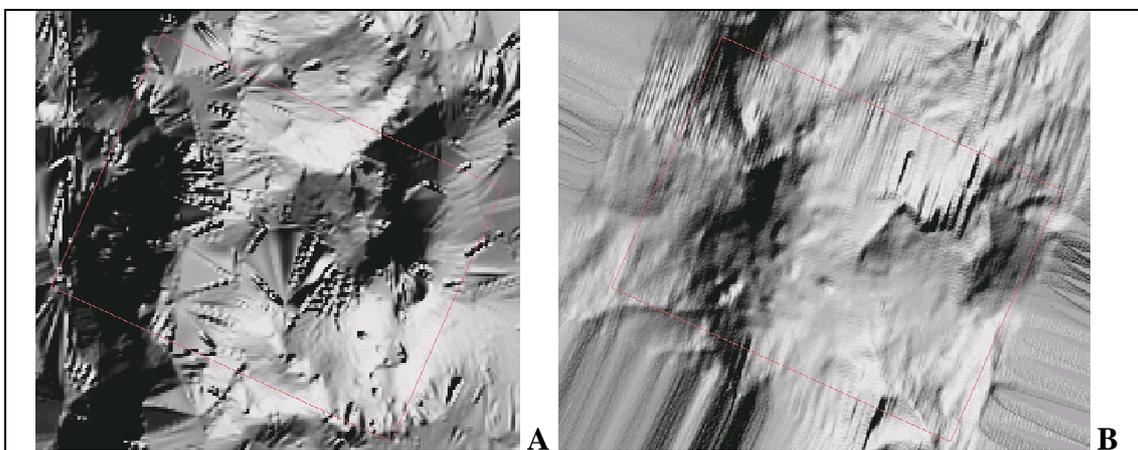
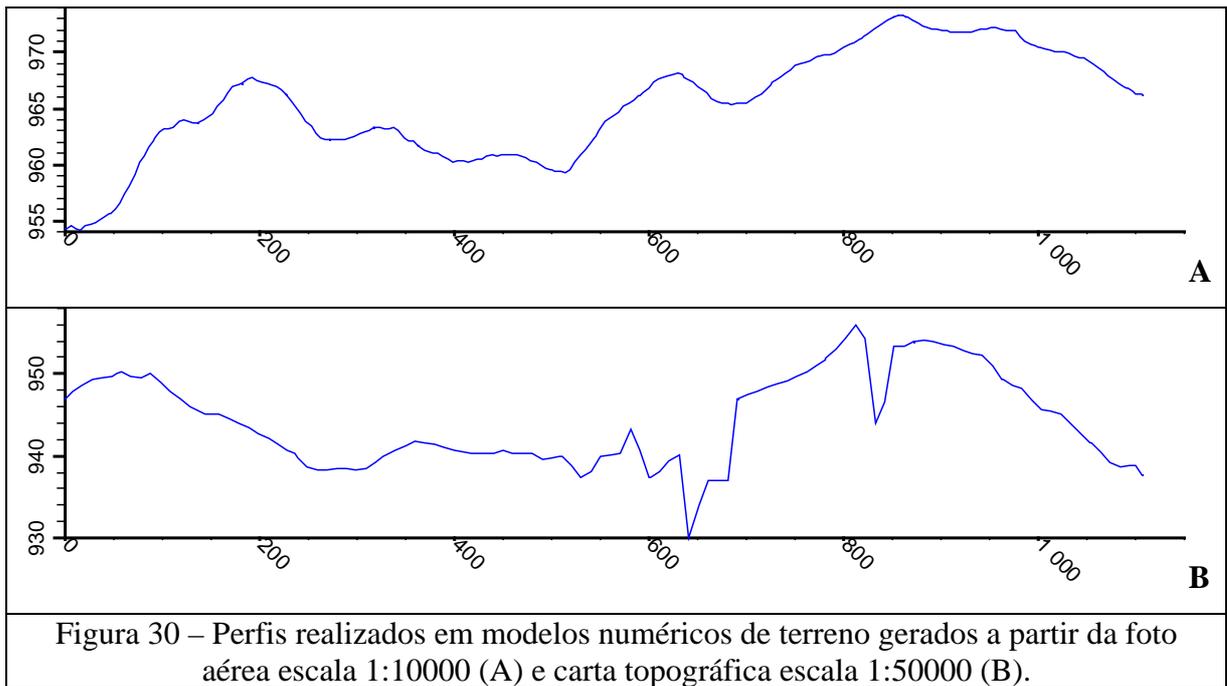


Figura 29 – Comparação entre modelos numéricos de terreno gerados a partir de curvas de nível na escala 1:50000 (A) e a partir de fotos aéreas em escala 1:10000, com GPS diferencial (B).

Com o objetivo de comparar os resultados foi realizado um perfil norte sul, no centro de cada imagem sombreada (Figura 29 A e B). Os perfis topográficos são utilizados para local as altitudes de cada geofone e ponto de tiro das linhas sísmicas, parâmetros de fundamental importância para as correções topográficas no processamento sísmico. A Figura 30 mostra a comparação entre os perfis gerados em cada modelo numérico de terreno.



A diferença entre os modelos numéricos, demonstrada através de perfis topográficos, denota que a variação abrupta na elevação, indicada na Figura 30 (B), implica em problemas na correção topográfica dos dados sísmicos. Na ausência de modelos mais precisos (Figura 30 - A), será necessário realizar levantamentos topográficos ao longo de cada seção sísmica adquirida.

3.1.1.3 - Imagens de satélite

Como a área de estudo é relativamente pequena (aproximadamente 108km², 18.8km de comprimento por 5.6km de largura), as resoluções das imagens de satélite disponíveis, Landsat 7/TM, com resolução espacial de 15 a 30 metros, foram utilizadas para o melhor entendimento da tectônica regional e a relação das estruturas verificadas em afloramentos e fotos aéreas com os lineamentos regionais.

3.1.2 – Painéis de afloramento

Kraft (2004) montou diversos painéis de afloramento na área de estudo de Ponta Grossa, visando mapear, em perfis, as variações faciológicas interpretadas. Segundo o autor, este método também se mostrou eficiente na geração de pseudopoços na modelagem geológica.

Na área de estudo da Lapa, a principal função dos painéis de afloramentos consistiu na comparação de suas geometrias com as seções sísmicas. A construção de fotomosaicos permitiu o traçado das principais geometrias estratigráficas e estruturais. Estas formas geométricas, ressaltadas pela erosão das rochas, revelaram contatos litológicos, faciológicos ou mesmo variações internas de estratos, resultando ou não em contrastes físicos, por exemplo, de velocidades de propagação de ondas elásticas. Geometrias interpretadas foram também identificadas nas seções sísmicas, mesmo sem a conversão de tempo para profundidade. A partir de uma aproximação da velocidade de propagação de ondas elásticas da rocha, pode-se também ratificar a coerência entre uma feição sísmica em tempo e uma estrutura semelhante, em metros, num afloramento (Figura 31).

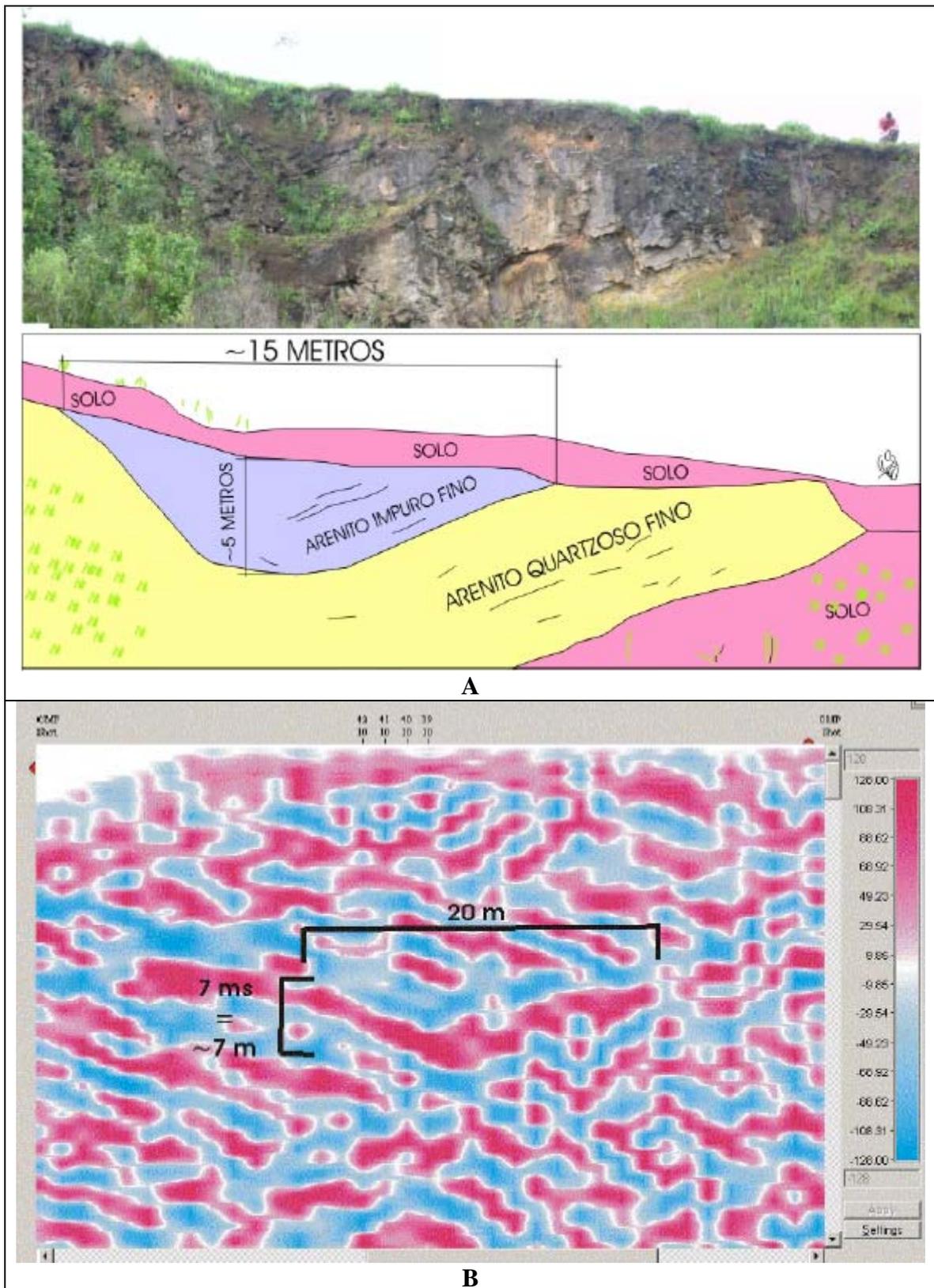


Figura 31 – Correlação de geometrias em afloramentos com seções sísmicas em tempo. Afloramento localizado próximo a cidade da Lapa, na localidade de Pedra Alta (A). Seção sísmica realizada durante os ensaios de aquisição sísmica na região da Lapa (B).

IV – ANÁLISE DE DADOS SÍSMICOS – ESTUDO DE CASO VILA VELHA - PR

Inicialmente foi proposto o uso dos dados sísmicos da região da Lapa, mas devido ao produto desta área não apresentar a resposta geofísica esperada, foram englobados na discussão metodológica as informações de Vila Velha. O método geofísico utilizado foi a sísmica de reflexão rasa terrestre. Os equipamentos disponíveis são de última geração e recomendados para o tipo de alvo escolhido, ou seja, rochas sedimentares com até aproximadamente 250 metros de profundidade. Como este sistema de aquisição foi adquirido já no decorrer da pesquisa, foram necessários muitos dias para o treinamento, por esta razão, neste capítulo, são discutidos aspectos metodológicos e conceituais mesclados com a discussão dos resultados adquiridos. A principal vantagem de possuir tal aparelhagem consiste na possibilidade de aprender e realizar todas as etapas de uma campanha sísmica: planejamento, aquisição, processamento, interpretação e modelagem.

IV.1 Sísmica de Reflexão

Basicamente este método consiste em produzir imagens da subsuperfície, a partir da propagação de ondas elásticas aplicadas na superfície do terreno e a respectiva recepção por sensores (geofones), distribuídos segundo arranjos 2D e 3D. Para obter bons resultados é necessário proceder várias etapas de processamento, as quais buscam realçar a razão sinal/ruído do registro sísmico.

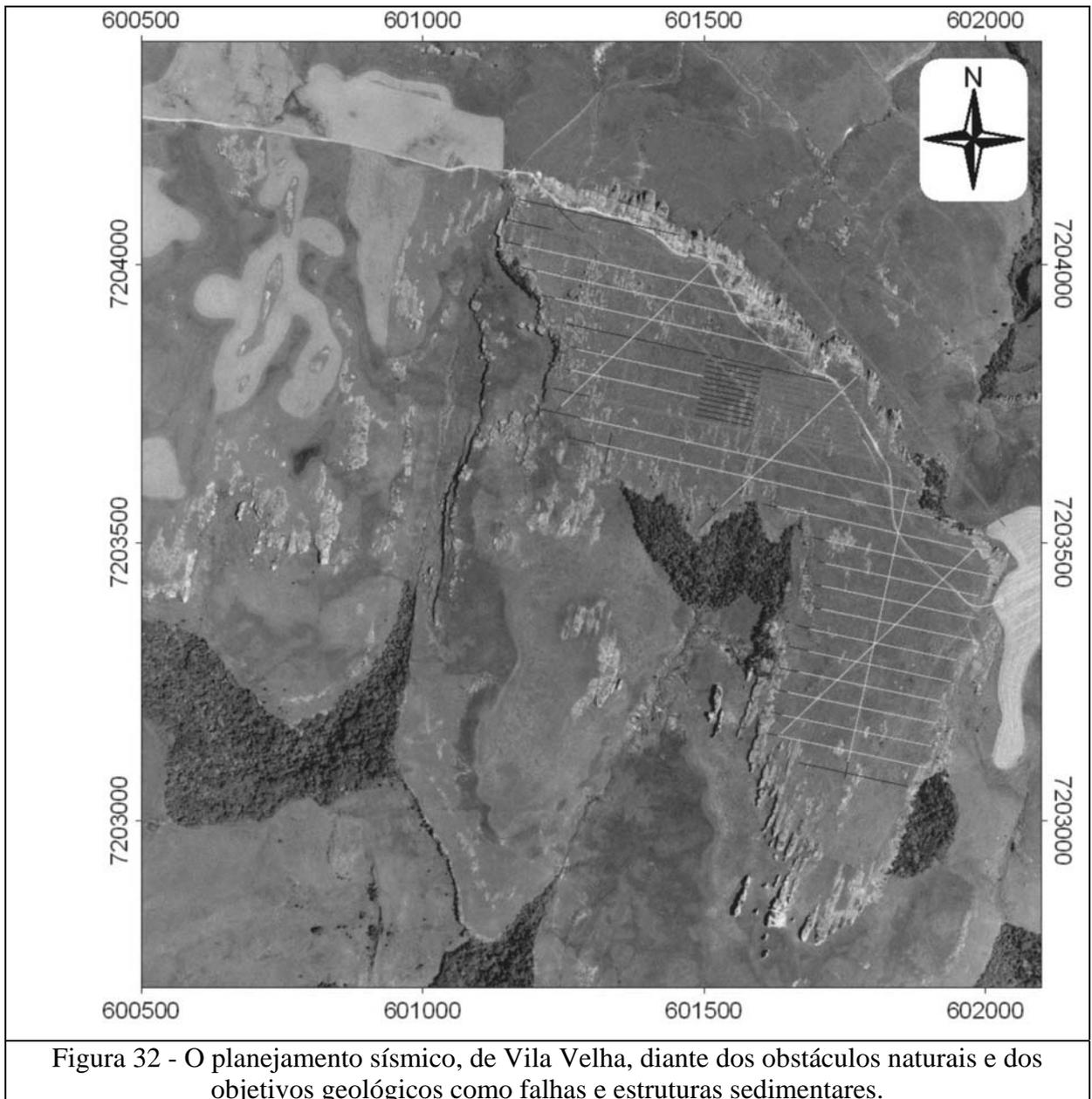
A sísmica de reflexão é o método geofísico mais utilizado na indústria petrolífera, e na última década foi aplicada em trabalhos geotécnicos, ambientais e exploracionistas normalmente enfocando profundidades menores. A bibliografia a este respeito é abundante, mas existe um livro clássico, *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data* de Oz Yilmaz, última edição publicada no ano de 2001, que engloba as principais características do método, o processamento e a interpretação. No campo mais específico de sísmica rasa, os livros são menos abundantes e, em certos pontos, muito específicos para um determinado problema. Algumas instituições americanas, como *Kansas Geological Survey*, possuem pesquisas nesta área. No Brasil, autores como Prado *et al.* (2002) da

USP e Dourado (1996) da Unesp, realizam pesquisas utilizando sísmica de alta resolução em áreas urbanas.

IV.2 - Planejamento das seções

Cada alvo de estudo exigiu um planejamento diferenciado devido a algumas diferenças no uso da terra, mas em comum as áreas selecionadas possuem um relevo plano e pouca vegetação, que são indicadas para a aquisição sísmica. Estas regiões são representadas por altos topográficos, íngremes nos limites da área de interesse, por vezes perfazendo paredões verticais com mais de 30 metros de altura. Porém, na Lapa, existem algumas áreas cobertas com vegetação, contidas nas reservas legais, das propriedades rurais. Estes obstáculos foram contornados, e as seções sísmicas puderam ser posicionadas de acordo com o espaço disponível, descartando locais com declividade elevada.

Na área de Vila Velha as seções sísmicas foram levantadas perpendiculares aos principais lineamentos tectônicos. A Figura 32 mostra o planejamento das linhas sísmicas, o qual levou em conta a topografia e os objetivos geológicos como falhas e geometrias sedimentares.



De acordo com os resultados das interpretações sísmicas, pôde ser definido um alvo de detalhamento para a aquisição de novas linhas. Na sísmica rasa, variações na topografia são problemáticas, diferindo da sísmica convencional que busca alvos profundos, portanto com pouca influência de pequenas variações topográficas.

IV.3 - Aquisição de campo

Após o planejamento e demarcação das linhas no terreno, pode-se iniciar a aquisição dos dados sísmicos. Fatores climáticos, que produzem ruídos, são muito perturbadores em um levantamento. Por exemplo, gotas de chuva sobre os sensores

atrapalham o sinal e devem ser eliminados ou minimizados pelo processamento. Apesar do equipamento ser resistente a água, muito atrasos no cronograma ocorreram devido à interferência das intempéries.

A área de estudo da Lapa é formada por pastos para engorda de gado, inviabilizando a montagem das linhas quando o rebanho estava solto. Devido a colaboração do superficiário, foi possível realizar aquisições aproveitando o período de intercalação entre duas grandes pastagens. A área de estudo de Ponta Grossa é inativa comercialmente, sendo formada por campos de vegetação rasteira a pequenos arbustos, colaborando muito para os levantamentos sísmicos.

Durante os levantamentos foi desenvolvido um sistema de aquisição mais aperfeiçoado, com a inclusão de equipamentos não usuais numa campanha sísmica. Os diversos pesquisadores e alunos de graduação que trabalharam nesta pesquisa foram fundamentais para o desenvolvimento da aquisição. Uma das fontes de energia utilizada necessitava de um furo com 4 centímetros de diâmetro por cerca de 30 cm de profundidade. Quando a posição de tiro ocorria em solo, o problema foi facilmente resolvido com um trado manual, mas muitas vezes ocorriam sobre rocha. O sistema mais prático foi a utilização de um gerador a gasolina e uma furadeira industrial, com broca para perfuração de rochas, o que afetou a logística na preparação das linhas. Uma maneira de contornar este problema foi a mudança para uma fonte externa, no caso a queda de um peso acelerado por elásticos. Este sistema é muito recomendado devido ao grande poder de repetição do sinal, melhorando consideravelmente a razão sinal/ruído. Em contrapartida o peso do sistema que possui mais de 200 quilos, sendo suportado por quatro pneus, envolve na montagem três pessoas e o auxílio de macacos mecânicos. A alternativa da marreta como fonte foi descartada devido a baixa repetibilidade e do desgaste físico do operador.

IV.4 - Processamento

Considerados por muitos geólogos e geofísicos como uma “arte”, o processamento sísmico é uma etapa complexa. Existem inúmeros fluxogramas de processamento e vários algoritmos matemáticos que pretendem aumentar a qualidade das seções sísmicas. O processamento de dados terrestres difere razoavelmente dos marítimos, sendo o primeiro muito mais perturbado por ruídos externos, o que influencia a tomada de velocidades ao longo do procedimento. No nosso estudo, a

aquisição é terrestre e de profundidade rasa, considerada como do tipo sísmica de alta resolução, devido ao uso de uma faixa de frequência mais alta que a empregada em processamento sísmico profundo. A resolução de uma seção sísmica é consequência de dois fatores principais: o espectro de frequência da fonte sísmica e a razão do sinal *versus* o ruído. Durante a aquisição foram utilizadas várias maneiras para otimizar estes dois pilares do método geofísico, como a soma de tiros na mesma posição, bom acoplamento dos sensores e cuidado com ruídos externos, por exemplo, pessoas caminhando na linha.

Os dados do campo, organizados no domínio do tiro, passaram por vários processos. Uma seqüência básica consiste em:

- Transformação de arquivos de campo em arquivos de processamento;
- Inserção de geometrias de aquisição;
- Retirada de ruídos explícitos;
- Correção topográfica;
- Deconvolução do sinal;
- Filtragem de frequências indesejadas;
- Análise de velocidades;
- Soma de sinal;
- Filtragens de continuidade lateral.

Estas etapas podem ou não estar presentes em todos os processamentos, assim como a ordem de aplicação pode variar, dependendo muito da experiência do analista e da qualidade dos dados.

Como exemplo do processamento de uma linha, seguem algumas figuras representativas das principais etapas executadas neste trabalho, utilizando como exemplo um mesmo tiro e ao final uma seção estaqueada. A Figura 33 representa a seção de um tiro, a qual é muito semelhante ao visualizado em campo no computador de controle.

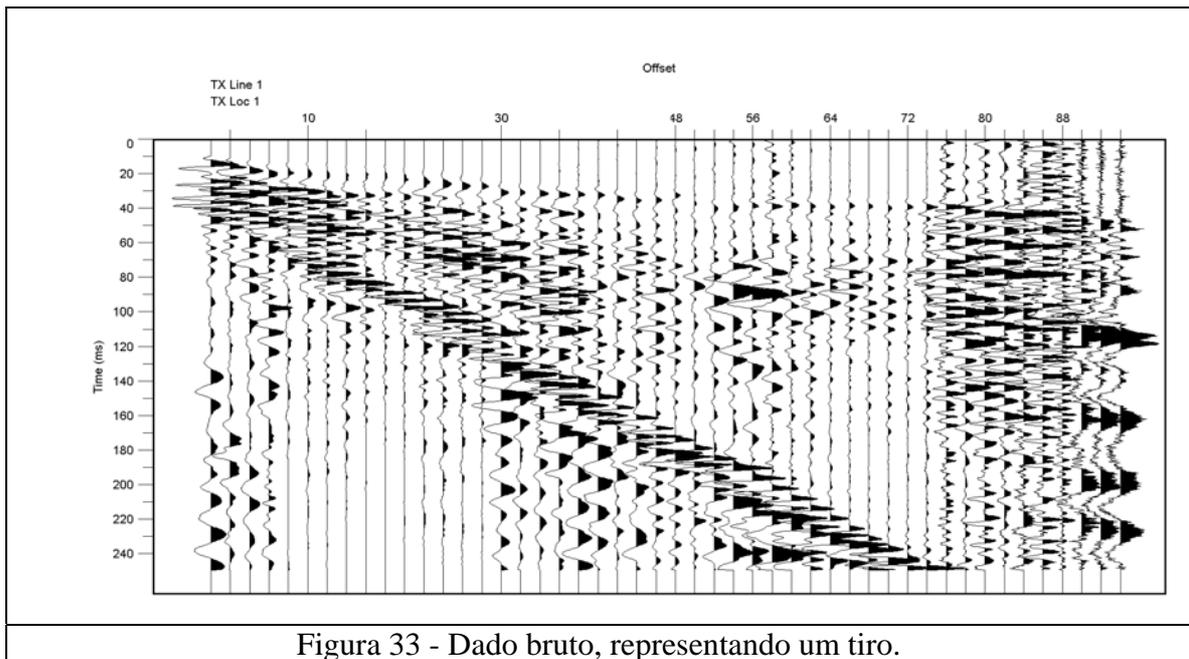
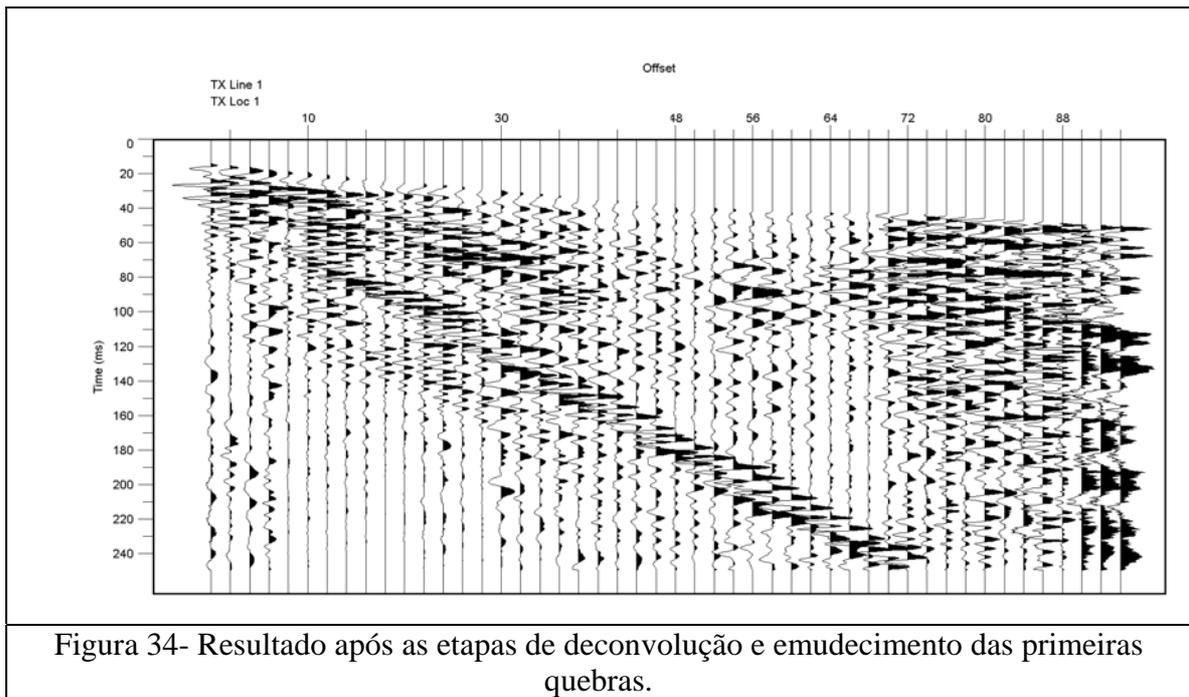


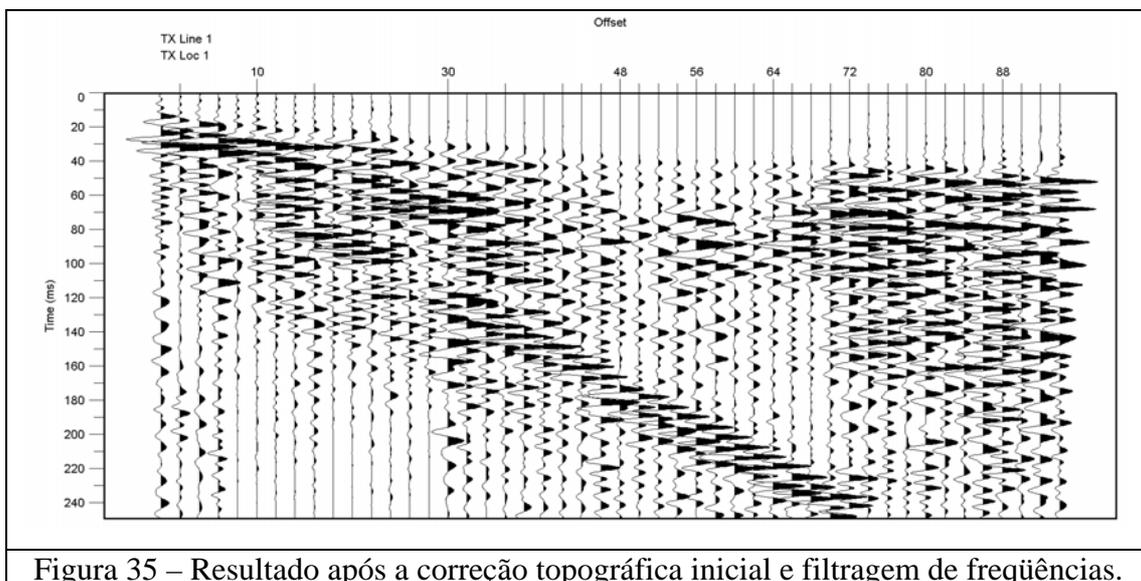
Figura 33 - Dado bruto, representando um tiro.

Cada seção sísmica é composta por inúmeros tiros, com arquivos parecidos com a Figura 33, onde cada traço representa um geofone. O eixo vertical indica o tempo de registro e o horizontal o número da estação da linha.

Uma das primeiras etapas no processamento consiste na deconvolução do sinal e no emudecimento das primeiras quebras. O primeiro é um procedimento que retira parte do sinal recebido pelos geofones, cuja subtração visa manter apenas o sinal refletido pela anisotropia geológica. O segundo pretende apagar as primeiras ondas que chegam nos geofones, sendo a sua maioria resultado das refrações numa mesma camada e não reflexões de diferentes camadas. A Figura 34 mostra os resultados após os procedimentos de emudecimento das primeiras quebras e da deconvolução do sinal. Os limites do emudecimento são definidos sobre cada arquivo de tiro. Já os parâmetros de deconvolução são obtidos através de uma autocorrelação das amplitudes.



O procedimento seguinte, Figura 35, corrige a topografia, a partir dos dados de cotas dos geofones. Também foi aplicado um filtro de passa banda de frequências, que permite uma eliminação de baixas e altas frequências não compatíveis com a resolução esperada. A correção topográfica pode ser complementada com os procedimentos de correção topográfica residual. Esta segunda etapa visa reduzir a influência da variação de espessuras das camadas de baixas velocidades, representadas por solos e ou rochas alteradas, muito porosas, que retardam a transmissão e recepção de ondas elásticas na superfície.



O próximo passo consiste na análise de velocidade. Os traços dos tiros que possuem um ponto de reflexão em comum são organizados em grupos, chamados de famílias CDP (*common depth point, ou CMP – common mid point*), as quais são colocadas em um painel, com velocidades de correção diversas (Figura 36). Este é o método de geração de painéis com velocidades constante agrupados por famílias com pontos em profundidade comum. Criando pontos nestes painéis, ao longo do tempo e da velocidade, resulta em um cartão com os dados para a correção NMO (*normal move out*).

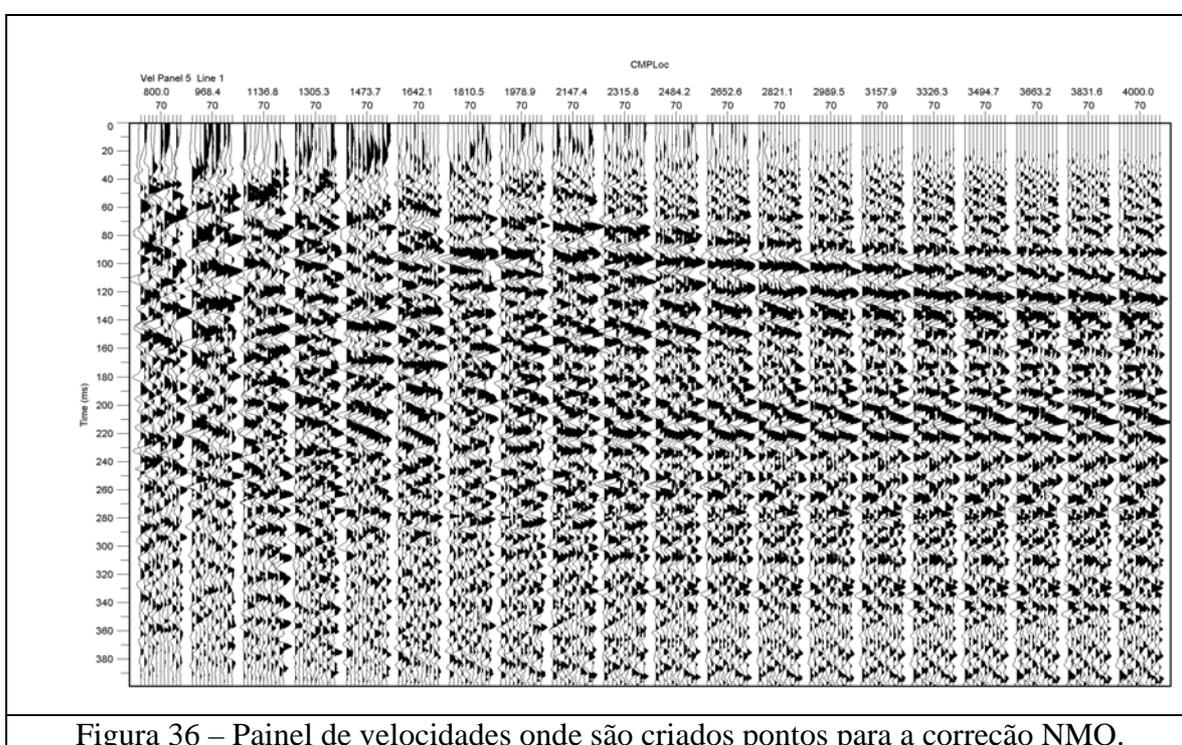
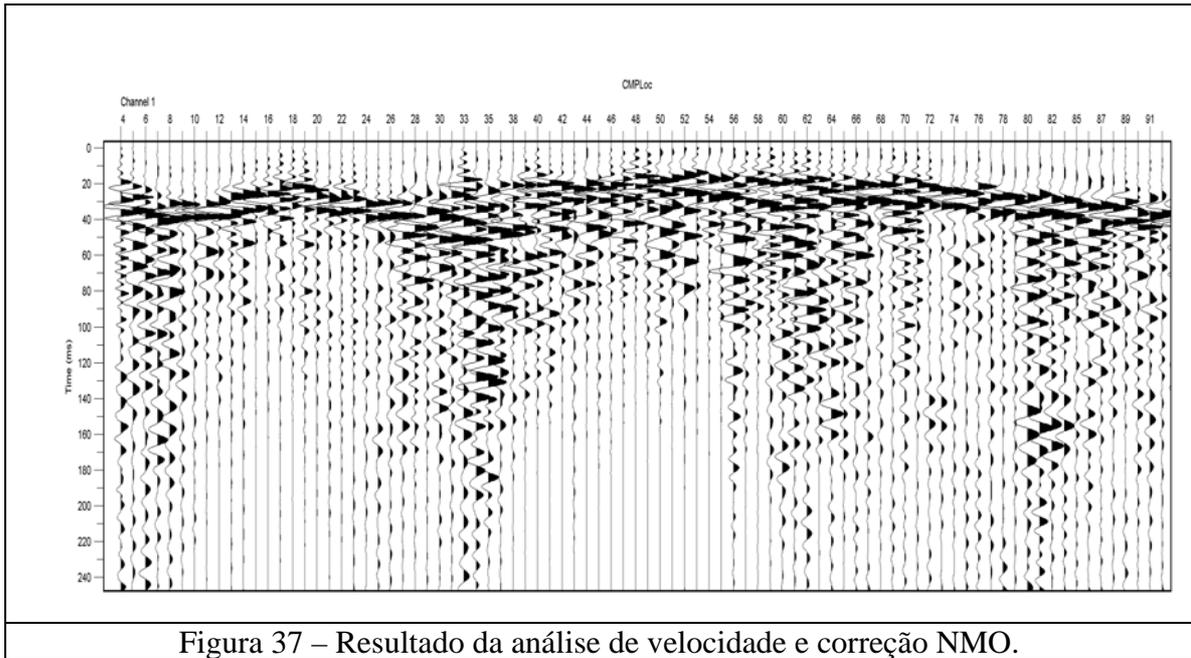
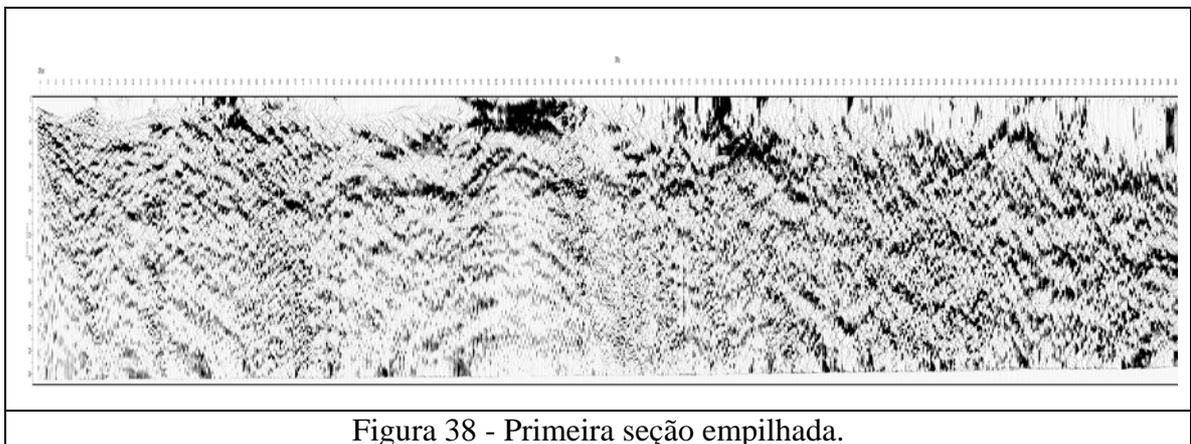


Figura 36 – Painel de velocidades onde são criados pontos para a correção NMO.

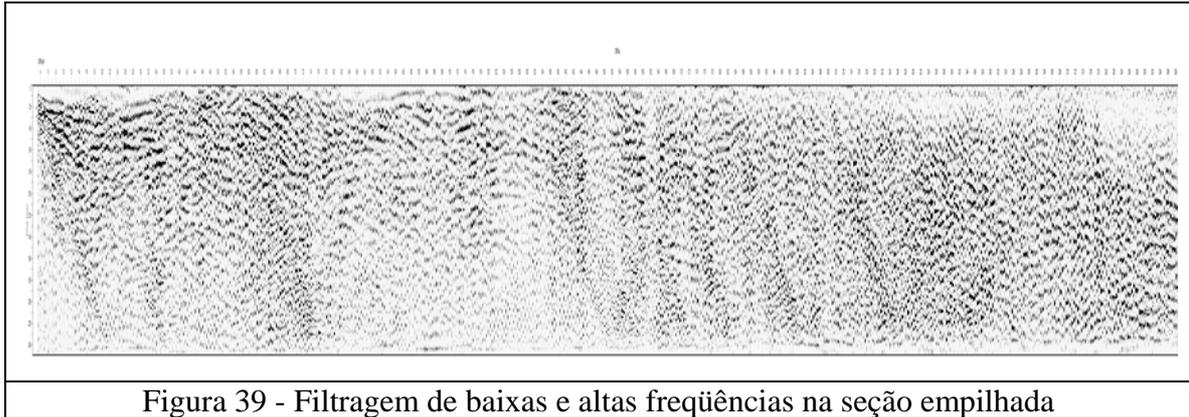
O resultado é uma seção em que os traços dos geofones afastados do tiro são hipoteticamente posicionados como se estivessem na posição da fonte. A principal característica observada na Figura 37 é uma homogeneização dos traços próximo ao tempo 0 ms.



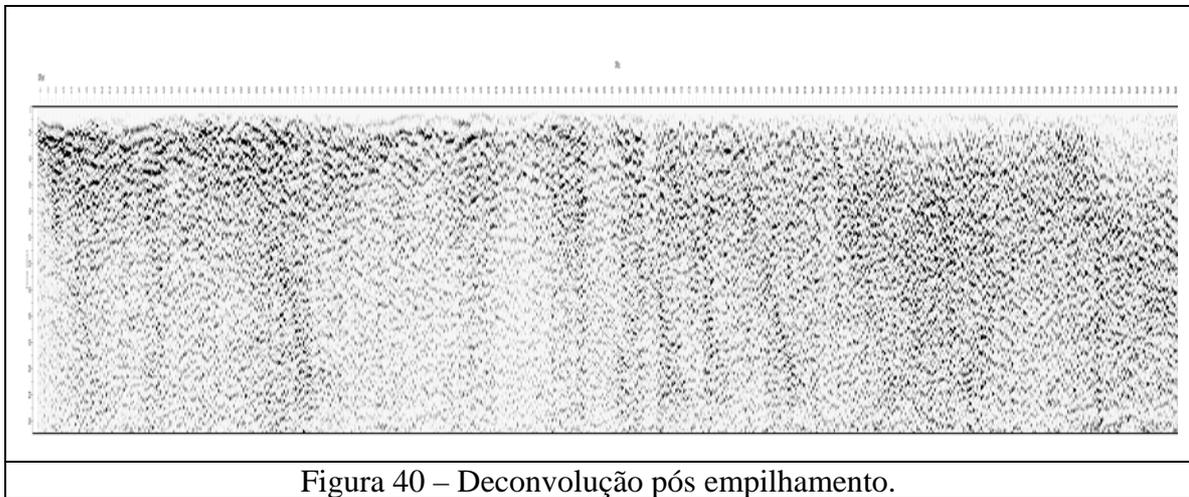
Com a correção anterior já é possível somar os traços referentes a cada posição com um ponto de reflexão comum. Esta etapa é chamada de *stack*. O resultado deste procedimento, apresentado na Figura 38, é uma primeira expectativa da seção sísmica final. Já contém o número final de traços, equivalente ao número de geofones utilizados no campo.



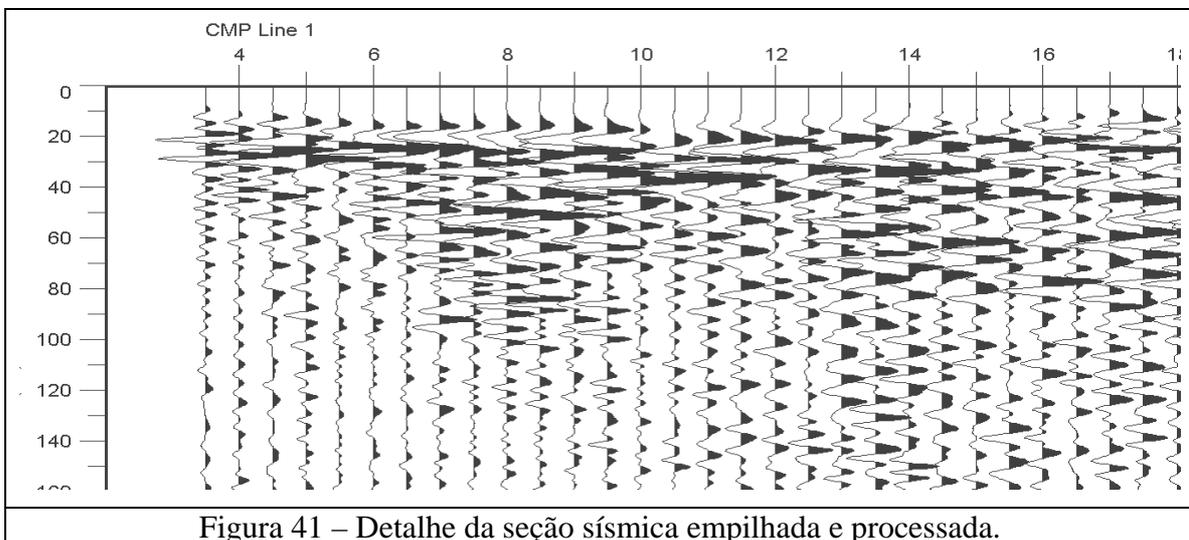
Devido a escala vertical exagerada, as reflexões com uma pequena inclinação são realçadas. As porções mais “borradas” da seção sísmica estão com frequências baixas que obliteram a visualização do sinal de interesse. Realizando uma nova filtragem de frequências, Figura 39, removendo valores menores que 50Hz e maiores que 300Hz a seção apresenta um aspecto mais limpo.



A Figura 40 demonstra o procedimento da segunda deconvolução, utilizado para a subtração de sinal indesejado.



Extraindo uma janela de detalhe do início da seção sísmica, Figura 41, torna-se mais clara a continuidade dos refletores sísmicos realçados pelo processamento.



À medida que o sinal é registrado, em tempos maiores que 100ms, percebe-se uma diminuição de refletores. Essa perda ocorre devido a atenuação do sinal. Caso seja utilizado um sinal muito forte para o imageamento mais profundo, as informações de tempos menores são perdidas devido as grandes amplitudes geradas pela fonte sísmica. No nosso caso, os alvos não são profundos e o resultado obtido satisfaz este requisito.

A dependência computacional do método geofísico utilizado é expressiva, com um programa para cada etapa, sendo necessário, além dos conhecimentos básicos dos conceitos físicos envolvidos no estudo, também o treinamento nos seus manuseios.

Desde o início do estudo, procurou-se adquirir os dados com precisão geográfica. Este cuidado na locação das linhas de aquisição no terreno resultou em um posicionamento métrico das seções sísmicas. Quando os dados sísmicos são inseridos no programa de interpretação, as coordenadas geográficas são automaticamente associadas aos produtos gerados.

Os resultados das interpretações sísmicas estão dimensionados em metros no eixo das ordenadas e em tempo duplo nas abscissas. A conversão de tempo para profundidade exige uma calibração precisa por meio de levantamentos em poços na área de aquisição. Foi realizada a perfilagem sônica de um poço que forneceu uma curva de tempo percorrido por uma onda sônica, entretanto este atingiu apenas 98 metros, em contra partida as seções sísmicas com 250ms, representam aproximadamente 350 metros de profundidade. Mesmo com as interpretações sendo realizadas no domínio do tempo, os modelos são válidos, porque a conversão para profundidade afeta pouco as geometrias observadas nas seções sísmicas.

V - MODELAGEM GEOMÉTRICA 3D

V.1 - A importância dos modelos volumétricos

Em geologia, a visualização e a modelagem tridimensional são muito comuns na exploração mineral de ponta, principalmente em grandes minas, que possuem muitos dados gerados em campanhas de sondagens. Também foram criados inúmeros programas computacionais, especialmente desenvolvidos para as informações obtidas pela mineração. Na exploração de petróleo não é diferente, muitos programas computacionais procuram armazenar e interagir todas as informações disponíveis para um melhor entendimento dos campos petrolíferos.

A possibilidade de representar características geológicas em modelos numéricos tridimensionais permite testar as propriedades intrínsecas com os mais variados métodos. Muito destes modelos 3D também podem ser complementados ou até modificados com o incremento de dados. Mas, a qualidade destes modelos é proporcional a quantidade de conhecimento utilizado na sua concepção. A complexidade da modelagem exige uma construção baseada em técnicas determinísticas (valores numéricos absolutos, por exemplo, com soluções matemáticas) e/ou uma combinação de técnicas probabilísticas (por exemplo características como porosidades altas, baixas ou médias, com soluções variadas, de acordo com os parâmetros utilizados) e determinísticas ao invés de somente técnicas probabilísticas. Estes avanços da modelagem tridimensional são consequência de dois fatores principais: a melhoria das técnicas de aquisição sísmica e o aumento da capacidade computacional. Tais aspectos possibilitaram a inserção de mais detalhes nas simulações dos modelos numéricos, resultando em observações mais minuciosas de características estruturais e deposicionais. A nova geração de modelos quantitativos é normalmente baseada em células, sendo que cada uma contém seus próprios atributos, derivadas do modelo geológico.

Modelagem computacional 3D em geociências envolve o uso de modelos sólidos para armazenamento e visualização (Pflug 1992, *appud* Marschallinger 1995). A construção de um modelo geológico tridimensional depende muito da quantidade e da qualidade dos dados disponíveis. Em campos de petróleo com produção há alguns anos, a quantidade de informação gera novos modelos para aumentar ou prolongar a

extração de hidrocarbonetos. Em novos campos, o principal dado é a sísmica de reflexão e alguns poços exploratórios. Nos modelos construídos, o espaço sem informação entre duas linhas sísmicas 2D, ou entre poços, é preenchido através da interpolação das informações ou mesmo pela geração de poços sintéticos. A criação destes modelos é essencial no planejamento de novos poços, na execução de simulações numéricas necessárias para uma nova avaliação do potencial petrolífero, além de servir para um melhor entendimento da arquitetura tridimensional de um reservatório.

Krum & Johnson (1993) discutem de forma simples e direta diversos aspectos da modelagem tridimensional de reservatórios complexos. Enfatizam, passo a passo, maneiras de aumentar a heterogeneidade dos dados através de poços sintéticos (*pseudowells*), além dos algoritmos e interpoladores mais utilizados. Discutem também formas de interação entre os modelos geológicos e suas transformações para uso nos simuladores.

Weber (1993) discute várias questões, como limites de detectabilidade de corpos arenosos em levantamentos sísmicos 2D e 3D e a potencialidade dos dados de impedância acústica na construção de modelos tridimensionais.

Deutsch (1999) discute a oportunidade de geração de modelos de reservatórios com programas computacionais de livre distribuição. O autor revisa as principais etapas de uma modelagem e discorre sobre as potencialidades dos programas analisados.

De Kemp (2000) descreve uma metodologia minuciosa para a modelagem tridimensional de dados estruturais de campo. O autor utiliza informações descritas em afloramentos arqueanos dobrados e atitudes estruturais para a construção de superfícies e extrapolação de dados em regiões encobertas. Também compara o uso e limitações de alguns algoritmos de construção e visualização 3D, além de formas de interagir dados obtidos em escalas de detalhe em um modelo regional.

Jessell (2001) discute a modelagem tridimensional da geologia crustal a partir de dados geofísicos regionais. O autor compara os principais tipos de modelagens tridimensionais com ênfase nos métodos de *voxels* (*volume elements*) e de superfícies.

Marschallinger (2001) discute uma metodologia para a construção e visualização 3D de materiais geológicos, a partir de imagens matriciais 2D, representando fatias do objeto a ser modelado. Estas imagens são classificadas e transformadas em uma matriz tridimensional formada por *voxels*.

Purvis *et al.* (2002) analisam um campo de petróleo já em produção, e a partir dos dados disponíveis propõem uma nova abordagem na construção de modelos tridimensionais. O autor enfatiza que, no caso de reservatórios com geometrias muito complexas, a abordagem puramente determinística, ou embasada em análogos pouco representativos, não é adequada para a simulação. A sugestão é um misto de modelagem determinística com simulações estocásticas enriquecidas com mais de um modelo análogo.

V.2 - Representação de Volumes

Conceitos sobre modelagem geométrica e formatos de representação 2D e 3D são discutidos por Requicha (1999). Segundo este autor, modelos geométricos computacionais capturam aspectos espaciais de um objeto de interesse para determinada aplicação. Seguindo este raciocínio, os nossos objetos de interesse são as rochas e a aplicação é a construção de um modelo matemático que possa ser utilizado tanto na visualização como na simulação numérica.

Stevenson (1996) discorre de maneira simplificada o conceito de *pixel* volumétrico e outras formas de representação tridimensional. O autor também compara as vantagens e desvantagens de algumas técnicas de renderização.

Utilizando uma das questões fundamentais propostas por Keller & Keller (1993), o objetivo da visualização tridimensional consiste em definir as geometrias esperadas. Estas formas geométricas, em geologia de áreas sedimentares, podem variar devido a processos deposicionais e estruturação tectônica. Sendo assim, duas áreas de estudo com as mesmas rochas, formadas pelos mesmos processos, mas uma muito fraturada, difere de uma área pouco fraturada em termos geométricos. O que pode definir os limites das formas geométricas são as camadas ou conjunto de camadas sedimentares, limitadas por erosão e/ou mudanças litológicas e, no caso estrutural, por falhas e/ou juntas.

Estudos teóricos sobre as dimensões e geometrias de corpos arenosos fluviais foram realizados por Bridge (1993). Este estudo é importante para geólogos de reservatórios avaliarem a espessura, geometria e conectividade entre os canais arenosos, baseados nos modelos de bacias sedimentares, e assim predizerem o potencial da bacia estudada e definir o alvo que a sísmica deve detectar.

Hirst *et al.* (1993) discutem a modelagem teórica de reservatórios arenosos, mas na escala de seqüências sedimentares. Estes autores consideram as geometrias em diversos planos de corte das rochas simuladas e ressaltam a importância de trabalhos realizados em rochas análogas aflorantes como fizeram Ravenne *et al.* (1987) e Dreyer *et al.* (1990). Para realizar a simulação, Hirst *et al.* (*op. cit.*), desenvolveram um *software* de modelagem estocástica gerador de formas geométricas (*shapes*). A forma mais simples seria o hexaedro (um cubo) e cada nova forma levaria em conta cinco informações: posição no espaço; dimensão de cada face; orientação; conectividade com outras formas e propriedades intrínsecas como porosidade, permeabilidade. A soma de diversos *shapes* formaria, por exemplo, um canal fluvial.

Goehan & Underwood (1993) abordam a utilização de afloramentos 2D na modelagem geológica e fazem considerações sobre como calcular as espessuras e continuidades das camadas pelíticas, em meio a arenitos, a partir de sua distribuição nos afloramentos rochosos e as conseqüências na permeabilidade geral do reservatório.

V.3 - Visualização tridimensional

O uso de técnicas de visualização tridimensional pode ser observado em vários campos do conhecimento científico como medicina, geologia, engenharias, arquitetura e outros que trabalham com formas geométricas. Esta multidisciplinaridade decorre da representação gráfica dos dados, e suas relações internas, para facilitar o entendimento das informações que são complexas para serem percebidas numericamente. Alguns autores denominam a visualização de dados científicos de visualização científica. Souza (2003) aborda este tema de forma mais aprofundada. Segundo Keller & Keller (1993), a visualização científica é uma disciplina emergente que estuda, desenvolve e classifica meios de visualmente comunicar os significados dos dados.

Keller & Keller (1993) propõem uma metodologia para selecionar a técnica de visualização a ser utilizada. O objetivo deste autor é obter uma ou mais imagens que revelem o significado dos dados. Esta abordagem leva em consideração o objetivo da visualização, o tipo de resultado esperado e a decisão entre visualizar o dado ou o dado relacionado ao fenômeno que o gerou.

Marshall *et al.* (1990) classificam as técnicas interativas de visualização em três categorias, dependendo do grau de interação entre a execução da simulação e a

visualização das imagens resultantes. O pós-processamento, no qual as gerações gráficas são realizadas após o cálculo ou coleta de dados; o *tracking* que permite a visualização de imagens à medida que o cálculo procede e o *steering* que possibilita o controle direto de uma simulação durante sua execução, com a modificação de seus parâmetros.

Souza (2003) ressalta que um dos aspectos mais importantes da visualização tridimensional é permitir que o volume, ocupado por uma classe de valores ou propriedades, seja construído para posterior visualização e interação, ou seja, a visualização volumétrica ou *volume rendering*. Lembrem que a técnica de volumes é muito mais completa que a utilização de superfícies 3D, e a mesclagem das duas abordagens o método ideal.

Os valores obtidos, por simulação ou por aquisição, devem estar armazenados sobre uma malha tridimensional com valores nos vértices ou no centro das células. A partir desta premissa pode-se utilizar algoritmos como *direct volume rendering* ou *surface fitting*. Elvins (1992) descreve os principais algoritmos disponíveis para a visualização volumétrica.

Gerhardt *et al.* (1998) discutem de forma aprofundada como diversos métodos de visualização volumétrica direta (*direct volume rendering*) podem ser aplicados em dados sísmicos tridimensionais. Os autores discutem os principais aspectos da natureza dos dados sísmicos e suas implicações na visualização volumétrica, já que grande parte do conhecimento do tema está na medicina, na qual as condições de aquisição dos dados são mais controladas, quando comparadas com a sísmica. Gerhardt *et al.* (*op. cit.*) descrevem as principais técnicas de visualização na área médica e suas aplicações. Também enfatizam o número restrito de publicações científicas abordando técnicas de visualização direta de volumes com dados sísmicos. Dentre as principais conclusões, os autores citam que as técnicas de *surface fitting* são inadequadas para os dados sísmicos.

V.4 - Adaptação dos dados sísmicos

Os programas computacionais disponíveis para a realização de interpolações 2D e 3D, exigem algumas transformações para carregar os dados sísmicos. A figura 63 mostra as etapas necessárias para a adaptação.

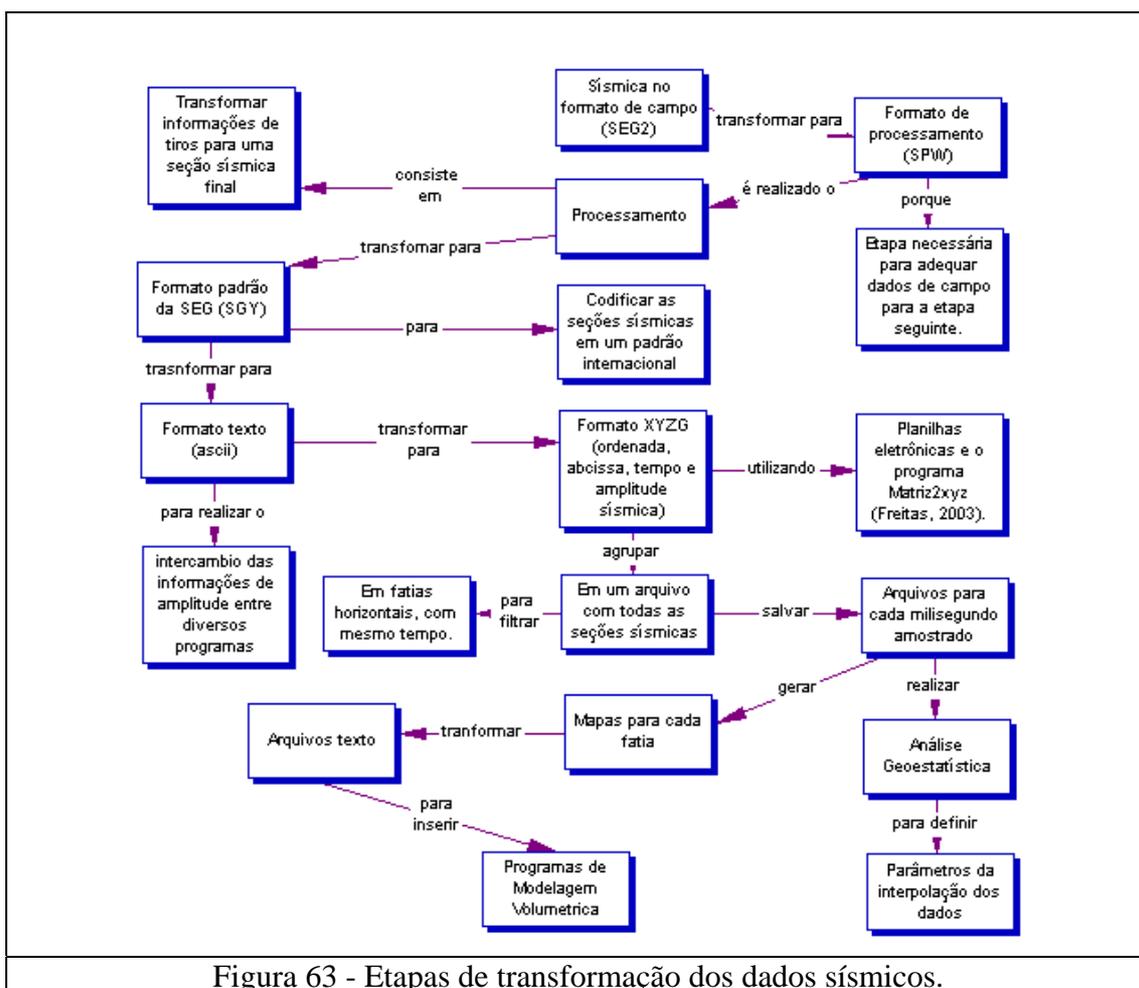


Figura 63 - Etapas de transformação dos dados sísmicos.

O formato mais utilizado para o armazenamento de seções e volumes sísmicos é o Segy, desenvolvido pela sociedade de geofísicos exploracionistas (SEG – www.seg.org), para padronizar vários parâmetros e ordená-los para o processamento. Este padrão é bem completo, mas pode ser adaptado de acordo com as necessidades. No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo (ANP - www.anp.gov.br), através do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP), sugere um formato adaptado do padrão SEG Y chamado ANP1-A. Todos os dados sísmicos coletados no Brasil são entregues para a agência seguindo este formato. Na sísmica rasa, a SEG elaborou uma adaptação, com características mais importantes, para esta profundidade, chamado de SEG2. Quando ocorre uma modificação no formato padrão da SEG, os programas computacionais, de modelagem ou interpretação, especificam esses arquivos como SEG2.

Os dados sísmicos adquiridos foram codificados no formato SEG2, posteriormente transformados para SPW, utilizado pelo programa de processamento.

A seção sísmica final foi salva com o padrão SEG-Y, que não permite a manipulação direta das amplitudes, porque o arquivo encontra-se no modo binário. A maneira mais prática encontrada para o uso das amplitudes foi a transformação para o formato “texto” ou *ascii* (para maiores detalhes sobre *ascii*: <http://www.asciitable.com/>). Assim, qualquer editor de texto pode acessar as informações contidas no arquivo sísmico. O grande problema gerado a partir desta transformação é o tamanho dos arquivos. Para cada linha sísmica existe um número de amostras por traço, por exemplo 1000 amostras, e uma cobertura no terreno, por exemplo, um sensor a cada dois metros. Como no arranjo utilizado cada tiro também ocorre a cada 2 metros, resulta uma seção sísmica final com um traço a cada metro. Ou seja, uma linha de 140 metros com uma amostragem de 0.25 milissegundos, gera um arquivo texto com 140 mil amostras, organizado em forma de uma matriz, com 140 colunas (140 metros) por mil linhas (1000 amostras). Todavia os programas computacionais utilizados para a interpolação dos dados requerem o formato XYZG, ou seja, ordenada, abscissa, profundidade e atributo, esta transformação foi realizada com o *software* *Matriz2xyz*, desenvolvido por Freitas (2003), resultando arquivos com 140 mil linhas e 3 atributos:

- 1 – coordenada relativa, em metros, referente à posição do traço sísmico na linha no terreno;
- 2 – profundidade, em milissegundos, referente ao tempo duplo, ou seja, o período necessário para a amplitude percorrer a distância fonte-refletor-receptor, e,
- 3 – o valor da amplitude medida em determinada amostra.

A associação destes atributos a um sistema de coordenadas geográficas é feito com a amarração no campo de todas as posições de interesse, auxiliado por estação total e GPS diferencial. Cada geofone e ponto de tiro da linha sísmica são relacionados a um par de valores do sistema UTM. Essa adequação foi realizada através de uma planilha eletrônica, na qual as amostras são ordenadas pelas coordenadas relativas e posteriormente inserido o par de coordenadas referentes.

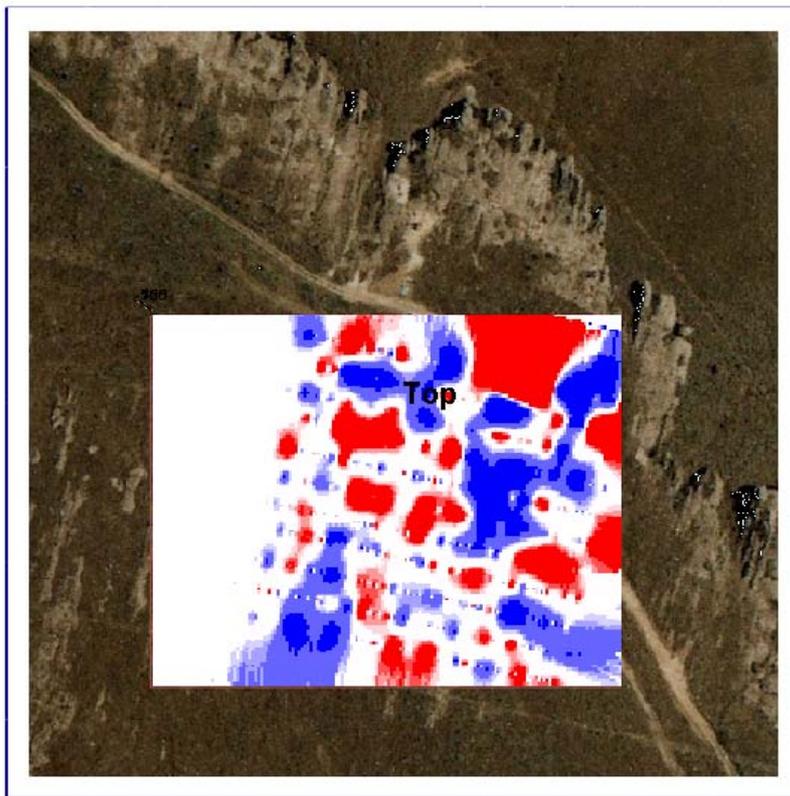
Desta forma, os resultados serão arquivos numericamente correspondentes às seções sísmicas utilizadas na interpretação. A partir destes dados foram agrupadas todas as seções sísmicas em um único arquivo, e realizadas interpolações 2D e 3D.

V.5 - Geração de mapas de fatias de tempo

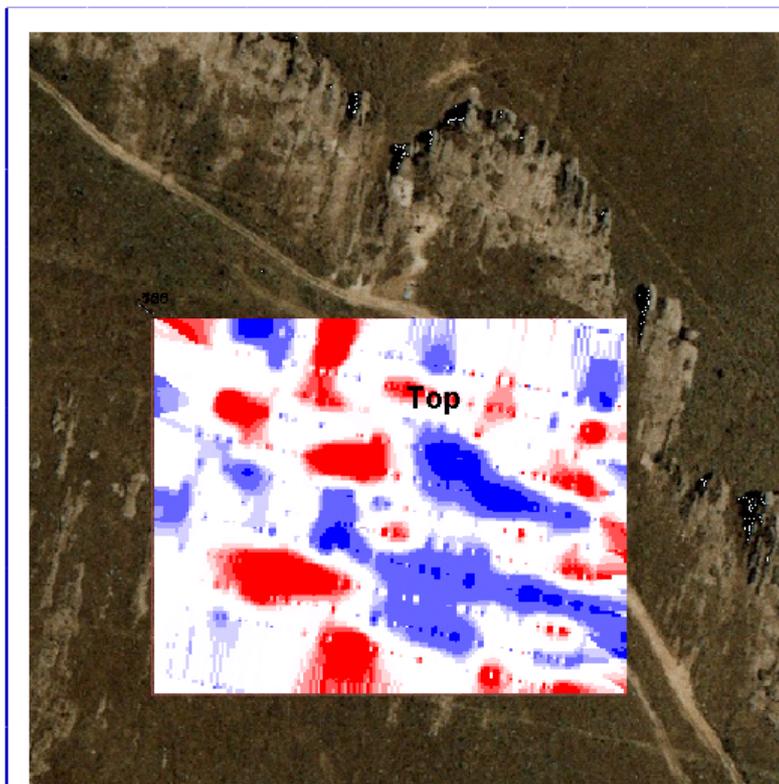
Essa forma de visualizar as amplitudes sísmicas é extremamente usual nos levantamentos 3D. A possibilidade de observar as fatias horizontais permite interpretar feições sedimentares e tectônicas, como um canal ou uma zona de falhas. No presente estudo, não foi realizado um levantamento sísmico tridimensional, mas, em contrapartida, foram realizadas várias linhas paralelas e com espaçamento reduzido (10 metros). Um levantamento verdadeiramente 3D possuiria uma linha a cada 2 metros para um arranjo com sensores também de 2 em 2 metros. Esse tipo de arranjo produz uma enorme quantidade de dados, o que exigiria muito mais tempo de aquisição e processamento.

A partir dos arquivos texto gerados anteriormente foi necessária a ordenação dos dados por tempo, permitindo selecionar em todas as seções sísmicas as amostras relativas a determinada fatia de tempo. Cada fatia, agrupada em um único arquivo, pode ser utilizada na extrapolação dos dados. Estes mapas são úteis para a interpretação e entendimento da variabilidade espacial das amplitudes sísmicas. Muitos estudos são direcionados para interpretar a variação das amplitudes com o deslocamento, também conhecido como análise de AVO (*Amplitude Versus Offset* ou *Amplitude Variation With Offset*, veja em: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/>), que contribui para a detecção de gás ou óleo em reservatórios de hidrocarbonetos.

Através das fatias em tempo foi possível visualizar a continuidade de fraturas, igualmente observadas em fotos aéreas e no campo (Figura 64). Outro fator que exigiu gerar mapas em tempo foi a necessidade de um maior controle das amostras interpoladas, entre as seções sísmicas, utilizando o algoritmo de krigagem ordinária. Estes mapas foram exportados como arquivos texto e empregados na geração de um cubo sísmico preliminar.



A



B

Figura 64 - Fatia de 46ms visualizada em planta junto com foto aérea. (A).
Fatia de 140 ms mesclada com a foto aérea (B).

Conhecendo as coordenadas xy e um valor z, é possível, através de uma função matemática, construir uma malha regular. Visando preencher o espaço entre as seções sísmicas, foram utilizadas funções matemáticas que produziram novos pontos e seus respectivos valores de amplitude. Os algoritmos 2D e 3D mais utilizados pelos programas computacionais deste tipo são:

- Inverso da distância elevado a uma potência;
- Krigagem (ordinária e universal);
- Mínima Curvatura;
- Vizinho Próximo;
- Regressão Polimomial;
- Função de Base Radial;
- Triangulação;
- Média Móvel.

A decisão de qual função matemática obterá um melhor resultado pode ser tomada através da comparação dos mapas ou imagens geradas. Conhecendo-se a geologia da área estudada existem mais critérios para excluir ou aceitar uma interpolação. Na geração das fatias foi testado apenas o algoritmo de krigagem ordinária, utilizando uma resolução espacial igual para todas as direções. Para a realização de testes foram extraídas as fatias de 50, 100, 150 e 200 milissegundos, a síntese de cada fatia está contida na tabela 4 e nos histogramas da figura 65.

Tabela 4 – Estatística univariadas das fatias em tempo analisadas.

| <i>Estatísticas Univariadas</i> | 50ms | 100ms | 150ms | 200ms |
|-----------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| População | 1588 | 1588 | 1588 | 1588 |
| Valor Mínimo | -180.84 | -152.35 | -92.27 | -106.06 |
| Valor Máximo | 271.17 | 167.34 | 95.62 | 87.14 |
| Intervalo | 452.02 | 319.69 | 187.90 | 193.20 |
| Média | 2.00 | -0.33 | 1.37 | -7.14 |
| Desvio Padrão | 50.00 | 43.82 | 29.82 | 26.14 |
| Variança | 2500.54 | 1920.84 | 889.75 | 683.43 |
| Mediana | -0.69 | -3.92 | 1.21 | 5.02 |
| Coefficiente de Curtose | 4.18 | 0.89 | 0.24 | 0.24 |
| Coefficiente de Assimetria | 0.811 | 0.47 | 0.18 | 0.24 |

Observa-se uma diminuição das amplitudes com o incremento do tempo de registro. Este efeito é explicado porque o subsolo funciona como um filtro da energia aplicada pela fonte sísmica. Para a confecção dos histogramas foram utilizadas todas as amostras, com classes equivalentes a um décimo do desvio padrão. Os valores contidos entre a média menos um desvio padrão (M-1SD) e a média mais um desvio padrão (M+1SD) podem ser considerados como valores de fundo. Já valores contidos entre a média mais ou menos duas vezes o desvio padrão (M+-2SD), foram considerados como anomalias fracas, e acima da média mais ou menos três desvios padrão (M+-3SD) foram tomados como anomalias.

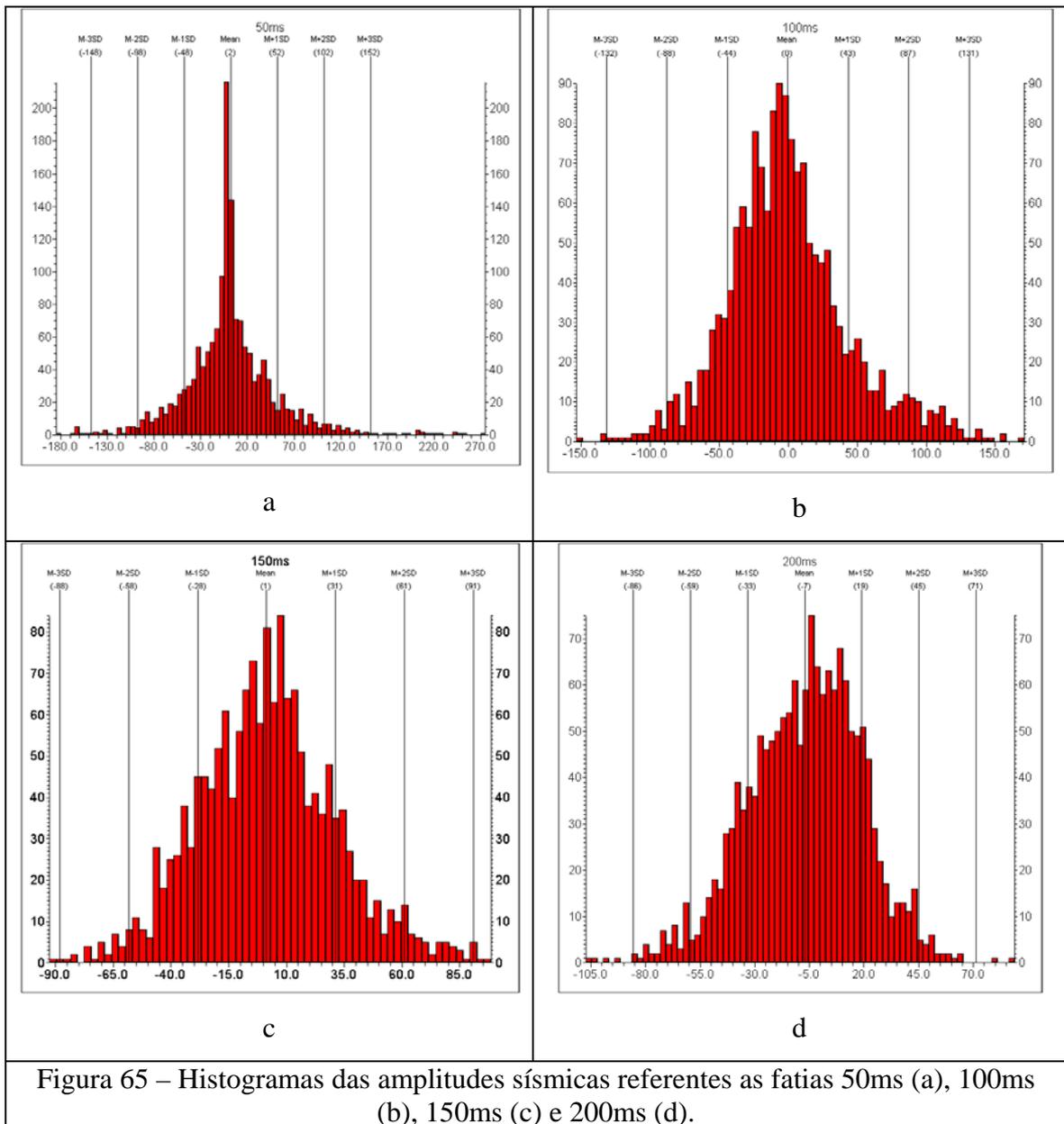


Figura 65 – Histogramas das amplitudes sísmicas referentes as fatias 50ms (a), 100ms (b), 150ms (c) e 200ms (d).

Observa-se que em todas as fatias analisadas a maior parte das amostras está contida no fundo dos dados, em outras palavras, entre o desvio padrão para mais ou menos ao redor da média. Também existe uma tendência da média ser próxima a zero. Estas estatísticas são puramente formas de demonstrar características de uma população de amostras, sem levar em conta seus posicionamentos. Quando é considerada a localização espacial de cada amostra, seja em duas ou três dimensões, pode-se analisar também a dependência espacial dos dados. Esse tipo de abordagem é conhecido como geoestatística.

V.6 – Ensaio geoestatístico

Nos últimos 30 anos, o desenvolvimento de técnicas geoestatísticas, combinadas com programas computacionais de modelagem geológica, aperfeiçoaram a utilização destas ferramentas de análise nas áreas geológicas, geofísicas e de engenharia de reservatórios (Dubrule, 2003). Neste estudo, um dos objetivos resume-se em analisar a variabilidade espacial das amplitudes sísmicas através de um ensaio geoestatístico preliminar. Usualmente as técnicas geoestatísticas, na indústria de petróleo, estão sendo utilizadas em dados sísmicos para conversões de tempo em profundidade, quantificação de incertezas dos modelos de velocidade, na geração de modelos heterogêneos com simulação condicional e na integração multidisciplinar, estes exemplos são bem discutidos por Dubrule (*op. cit.*).

Uma das formas mais usuais de representar a variabilidade espacial dos dados amostrados é o semivariograma (Figura 66), que analisa o grau de dependência espacial entre as amostras, além de definir os parâmetros utilizados na interpolação dos valores, através da krigagem, para locais não amostrados.

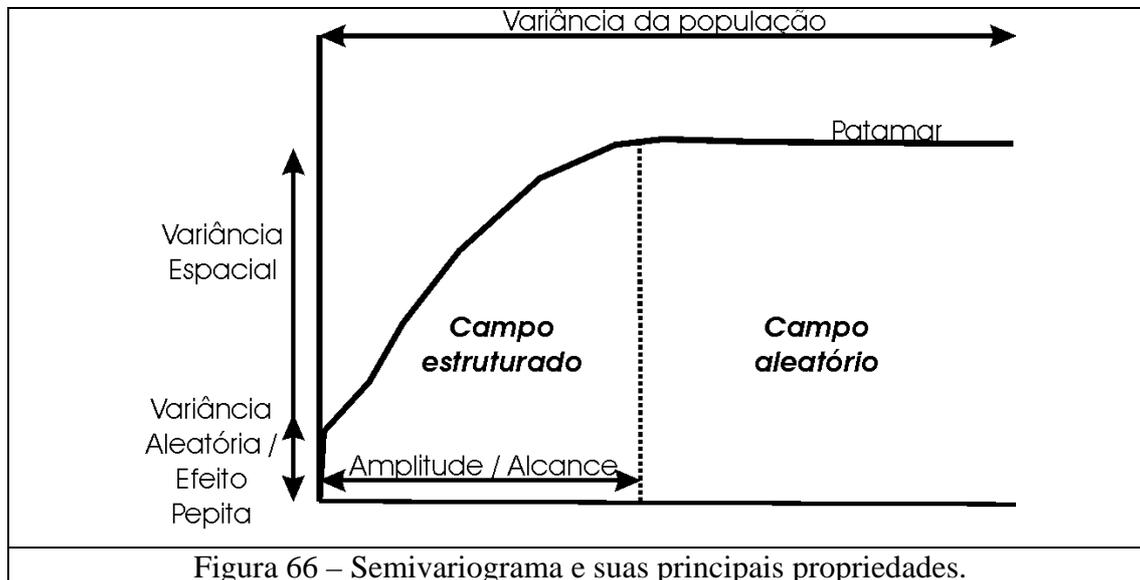


Figura 66 – Semivariograma e suas principais propriedades.

Os parâmetros de interesse no semivariograma estão contidos no campo estruturado. A amplitude ou alcance é a distância a partir da qual não existe dependência espacial entre as amostras, após esta inicia o campo aleatório. O alcance é determinado pela projeção no eixo das abscissas do início do patamar, ou seja, estabilização do valor de variância. O efeito pepita ou variância aleatória representa

um ruído de aquisição, erro na amostragem ou uma variabilidade de uma escala menor que aquela amostrada.

Os valores de amplitude, extraídos das seções sísmicas, mostram uma distribuição irregular, com amostras a cada metro no sentido da seção e a cada 10 metros entre seções. Nestes casos, devem-se avaliar os semivariogramas para várias direções em busca da anisotropia. A distância de busca do semivariograma foi definida em função da geometria dos arranjos sísmicos no campo. As direções de busca foram dispostas nos sentidos preferenciais do campo, como mostra a Figura 67. Observe que ao redor da direção escolhida existe no detalhe um cone de busca, este parâmetro em geoestatística é chamado de tolerância.

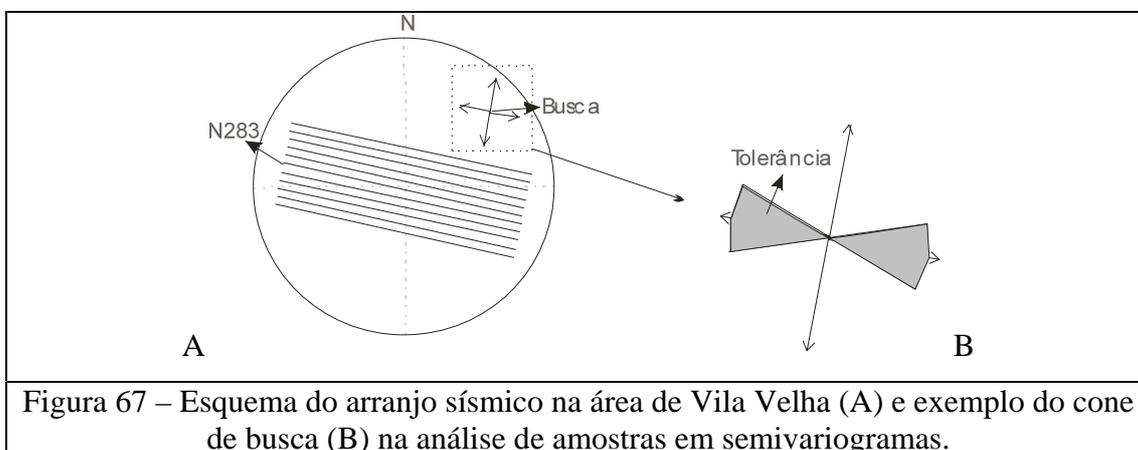


Figura 67 – Esquema do arranjo sísmico na área de Vila Velha (A) e exemplo do cone de busca (B) na análise de amostras em semivariogramas.

Os azimutes 103 e 13 são relativos às direções paralelas e perpendiculares respectivamente. Uma tolerância de 22.5 graus foi suficiente para uma cobertura considerável em torno das direções de levantamento sísmico. Nos semivariogramas a direção perpendicular às seções sísmicas, foi utilizada uma distância de busca (*lag width*) de 10 metros, devido ao espaçamento entre as linhas. Observe na Figura 68 que as diferenças entre os dois semivariogramas, gerados com a fatia de 50ms, para raios de busca de 10 metros (a) e 2 metros (b). Os valores anômalos, com baixa variância, são decorrentes da ausência de dados entre as seções.

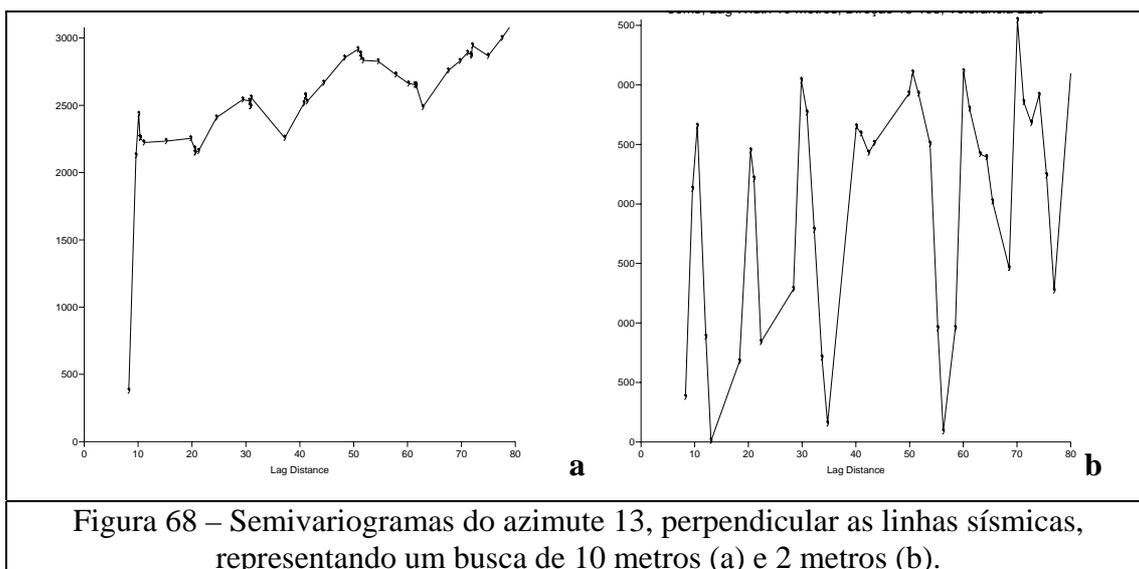


Figura 68 – Semivariogramas do azimuth 13, perpendicular as linhas sísmicas, representando um busca de 10 metros (a) e 2 metros (b).

Utilizando os mesmos parâmetros na direção das linhas sísmicas, os semivariogramas mostram-se muito mais homogêneos, com um campo estruturado mais definido. A amostragem ao longo das linhas ocorre a cada metro, uma distância de busca de dois metros, ainda não atinge resolução de campo. Pode-se observar na figura 69, também gerada com a fatia de 50ms, que utilizando *lag* de 10 metros (a) o aspecto é mais suave, e com um *lag* de 2 metros (b) a curva é mais errática, sofrendo mudanças bruscas.

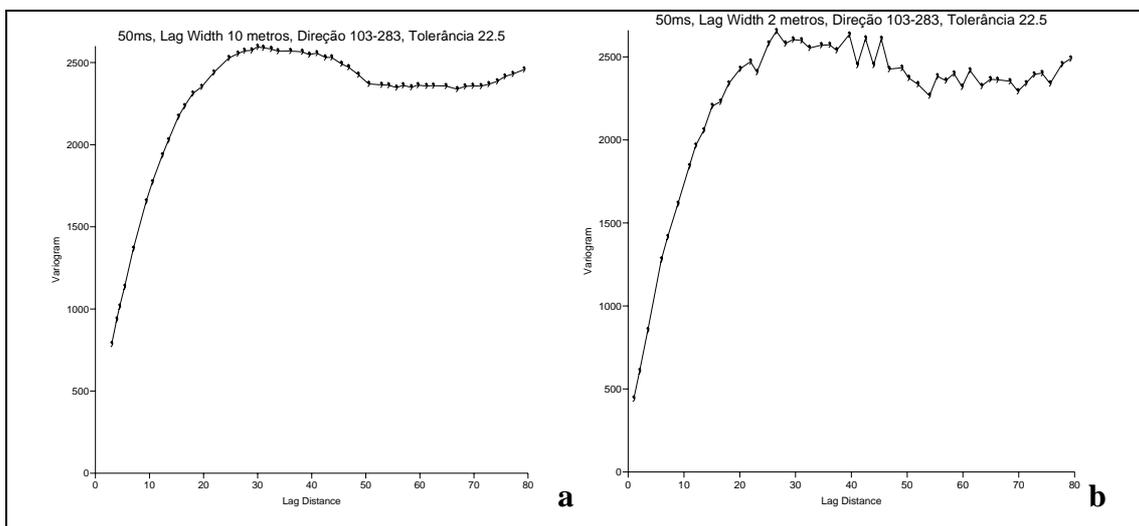


Figura 69 – Semivariogramas do azimuth 103, ao longo das linhas sísmicas representando um busca de 10 metros (a) e 2 metros (b).

Pode-se observar na Figura 68 que os semivariogramas perpendiculares às linhas sísmicas iniciam com uma variância elevada, com dificuldade na definição do

campo estruturado. Este fato pode ser explicado pela inexistência de uma dependência espacial entre as amostras, por um erro intrínseco ao processo ou porque não existe dependência espacial nesta escala. A terceira opção é entendida como a mais coerente, por que a análise variográfica paralela às seções sísmicas mostrou, Figura 69, uma dependência espacial.

Visando determinar o problema de correlação espacial entre as linhas foram selecionadas duas populações, uma com três amostras e a outra com a média por mesmo ponto em planta. Por exemplo, a amostra referente a fatia X ms foi somada com a amostra X-0.25 ms e com a X+0.25 ms. De nenhuma forma esta seqüência de passos substitui uma análise variográfica tridimensional, e sim representa uma primeira abordagem no reconhecimento das propriedades de dependência espacial dos dados. A partir desta amostragem, ou seja, as amostras 49.75, 50 e 50.25, obtém-se os semivariogramas paralelos às linhas sísmicas (Figura 70), sem realizar a média entre as fatias:

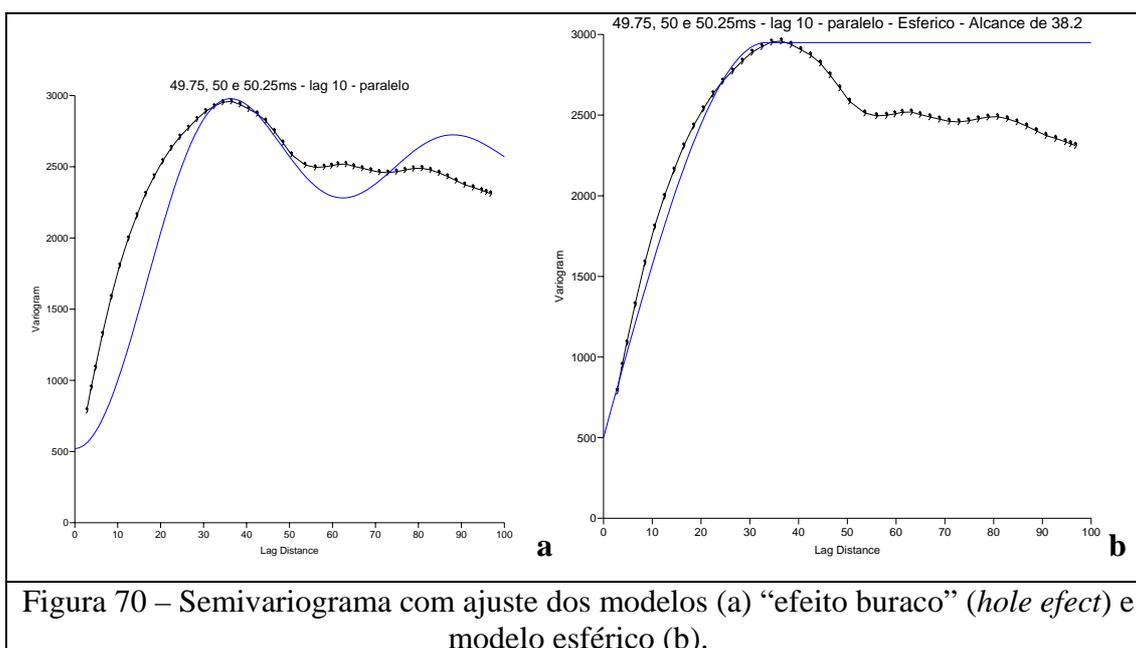


Figura 70 – Semivariograma com ajuste dos modelos (a) “efeito buraco” (*hole effect*) e modelo esférico (b).

A Figura 70 (a) resalta um efeito conhecido como efeito buraco, ou *hole effect*. Autores como Pycz & Deutsch (2000) já discutiram este efeito e suas origens. Devido à natureza do dado sísmico, é possível que exista uma ciclicidade na análise da dependência espacial, principalmente no eixo vertical (tempo). A distribuição das amplitudes sísmicas lembra muito um acamamento sedimentar, com inclinações e geometrias variadas. Esta geometria é classificada por Pycz & Deutsch (*op. cit.*)

como estratos irregulares (*irregular strata*). Os autores também concluem que é importante modelar o efeito buraco, principalmente quando ele atinge 20% ou mais da variância. Outra característica observada é que este efeito normalmente ocorre em apenas uma direção, por exemplo, a intercalação dos estrados em profundidade e em contrapartida sua continuidade lateral. Segundo estes autores, no caso de estratos regulares, à distância entre o primeiro e o segundo pico do semivariograma corresponde a espessura média das camadas, e quando a estratificação for irregular, a distância entre o primeiro e o segundo picos será maior que a distância entre o segundo e o terceiro picos. Este efeito provavelmente ocorreu porque foram agrupadas amostras de intervalos de tempo diferentes, caracterizando um semivariograma “pseudo 3D”.

A Figura 71 (a – três amostras e b – média de três amostras), com direção de busca perpendicular às seções sísmicas, utilizou os mesmos parâmetros das Figuras 69 e 70, e apresentou pouca definição da correlação espacial, com tendência a variância infinita sem a difinição de patamar.

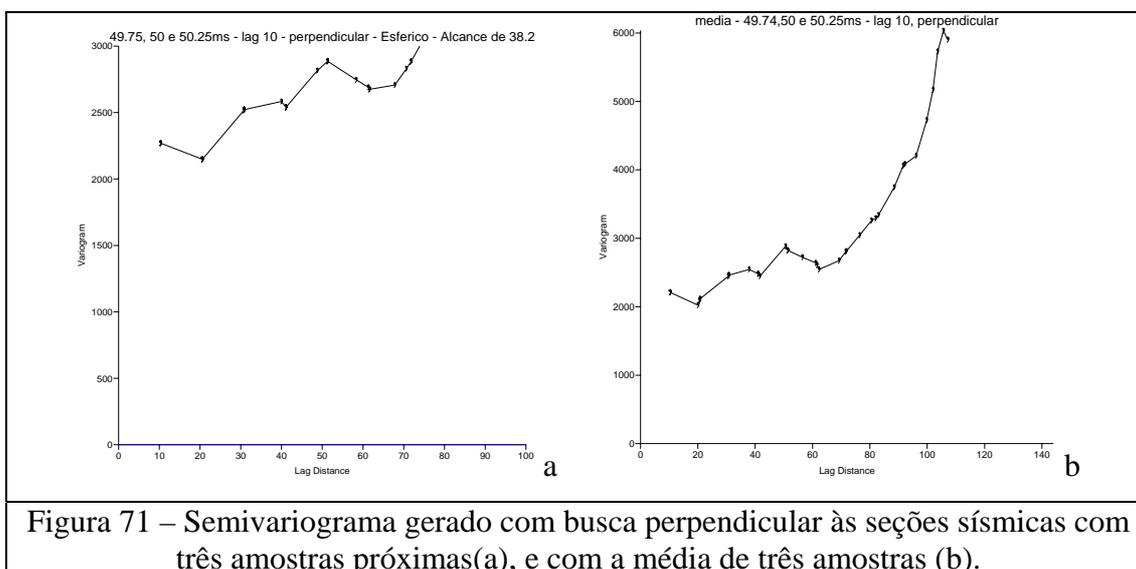


Figura 71 – Semivariograma gerado com busca perpendicular às seções sísmicas com três amostras próximas(a), e com a média de três amostras (b).

Outra alternativa foi de realizar o ensaio da variabilidade espacial com um programa computacional com capacidade para a terceira dimensão. O programa utilizado, denominado Sistema GeoVisual (Yamamoto 2002), contempla inúmeras possibilidades de análises geoestatísticas. Entretanto, como estamos trabalhando com número não usual de dados, a capacidade de gerenciar amostras do programa foi extrapolada. Assim, foram selecionados dois cubos menores para o ensaio (Figura

72). O primeiro contendo 50 x 50 metros x 10 ms, foi extraído diretamente dos arquivos texto gerados a partir das seções sísmicas, contabilizando um total de 10000 amostras. E o segundo contendo 144 x 30 metros X 30 ms, foi selecionado dos dados reamostrados, possuindo um total de 12960 amostras. Os cubos 1 e 2 utilizaram cinco e três seções sísmicas respectivamente.

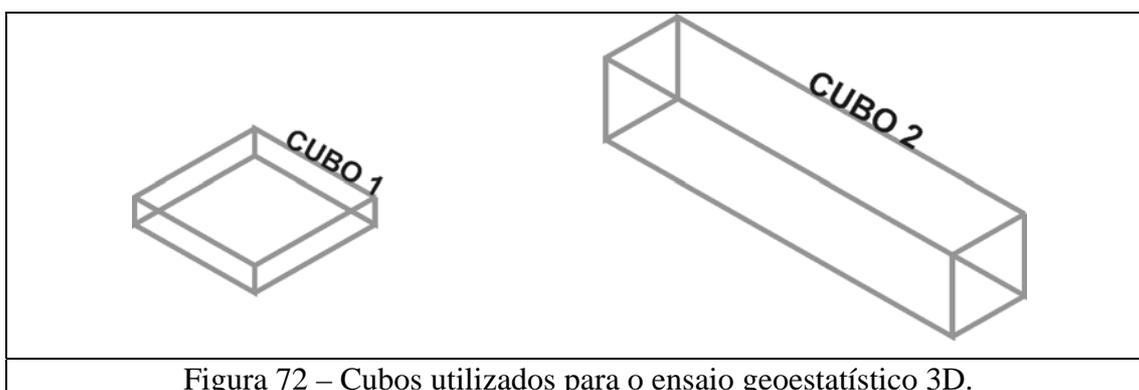


Figura 72 – Cubos utilizados para o ensaio geostatístico 3D.

A localização do cubo 1 foi determinada na maior amostragem disponível, também conhecida como *fold*, que neste caso inicia a partir do traço de número 24. Foram selecionados os traços 24 ao 74, totalizando 50 metros ao longo das seções sísmicas. Visando também desviar da influência das primeiras quebras do registro, que contém muito ruído, a extração iniciou em 10 ms até 20 ms. A partir de uma janela numa seção sísmica original pode-se observar, na Figura 73, a variação das amplitudes tanto em tempo como ao longo da seção.

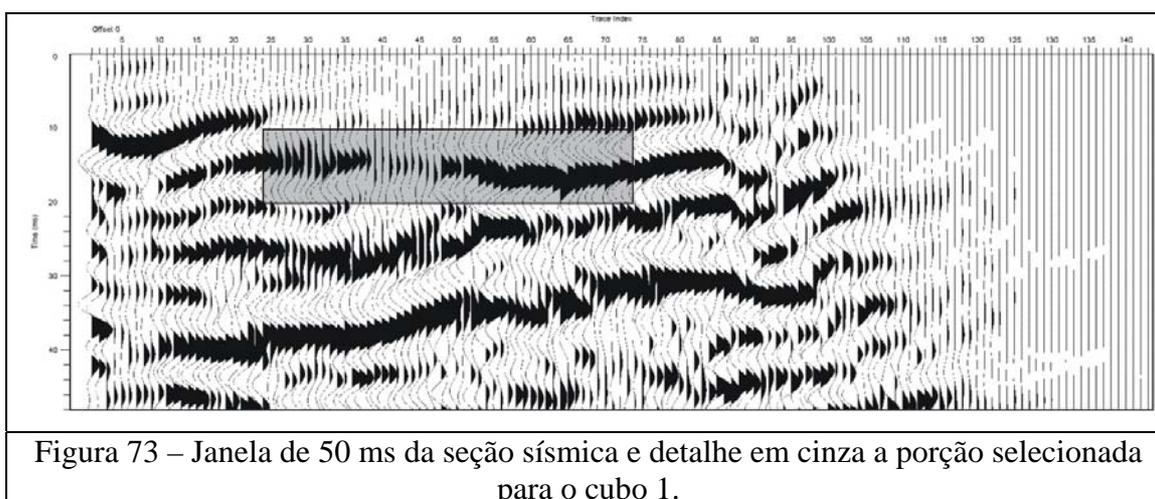


Figura 73 – Janela de 50 ms da seção sísmica e detalhe em cinza a porção selecionada para o cubo 1.

Nesta primeira abordagem de análise da variabilidade espacial em três dimensões foi utilizada toda a resolução disponível, 0.25 ms por amostra, sem

reamostragem. Em outras palavras, as 40 amostras presentes em 10 ms. A seção total adquirida em campo possui 250 ms e 1000 amostras por traço, retirando uma janela de 100 ms (Figura 74) é perceptível a forte variação das amplitudes, semelhante a forma de estratos irregulares.

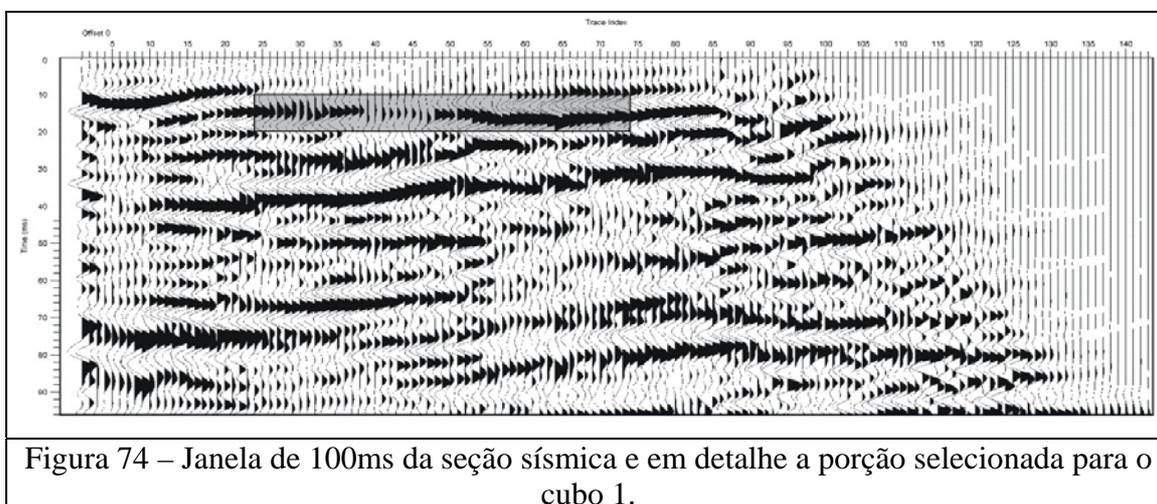


Figura 74 – Janela de 100ms da seção sísmica e em detalhe a porção selecionada para o cubo 1.

Na indústria petrolífera comumente utiliza-se uma visualização colorida, com as amplitudes positivas em cor azul ou preta e as negativas em cores vermelhas, com o branco no intermédio. A janela de seleção do cubo 1, em destaque na cor cinza (Figuras 73 e 74), contém muito pouco da característica espacial do dado devido ao seu pequeno tamanho. Uma opção, respeitando a capacidade dos programas computacionais utilizados, foi de gerar o cubo 2 com $\frac{1}{4}$ da resolução inicial, (mostrado na Figura 75, área pontilhada) abrangendo um total de 30 ms e comprimento completo da seção, em contrapartida aos 10 ms e 50 m da primeira abordagem. Os semivariogramas dos cubos 1 e 2 utilizaram quatro direções de busca em relação as linhas sísmicas, paralela, perpendicular e duas intermediárias com 45 graus de variação.

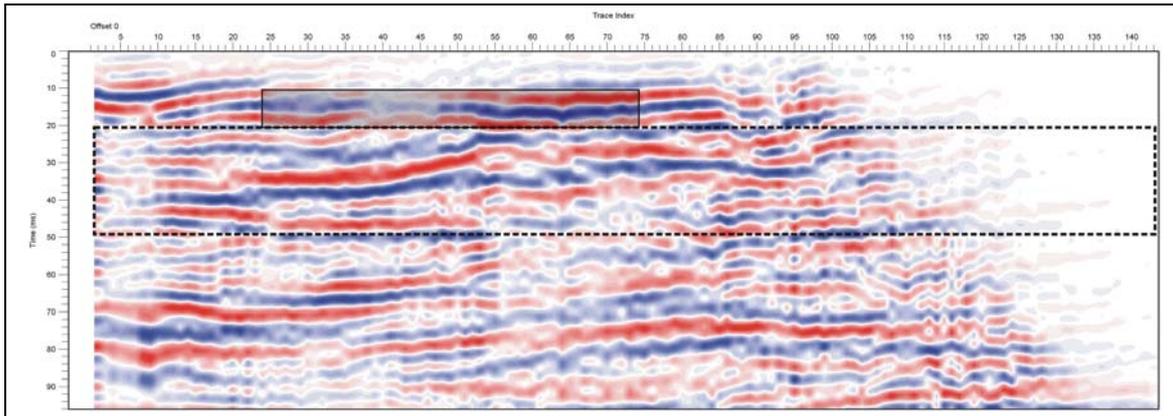


Figura 75 – Seção sísmica com o cubo 1 em cinza, representando uma análise com a resolução original, e o cubo 2, linha pontilhada, representando uma área com 25% da resolução original, mas abrangendo uma área maior ao longo da seção sísmica.

A reamostragem, transformando de 1000 para 250 amostras por traço sísmico, aparentemente não altera as principais formas observadas na seção sísmica. A Figura 76 mostra a correlação de uma seção sísmica (A) e o produto de reamostragem (B). Esta última figura pode gerar dúvidas se o procedimento matemático está funcionando, devido à extrema semelhança entre as duas seções. Para realmente obter a confiança no processo foram feitos diversos testes com diversas seções sísmicas, e o resultado da reamostragem só começa a diferenciar as seções a partir de 2.5 ms de resolução. A Figura 77 mostra a comparação entre a seção sísmica original (A) e a reamostrada com 10% da quantidade de amostras originais (B).

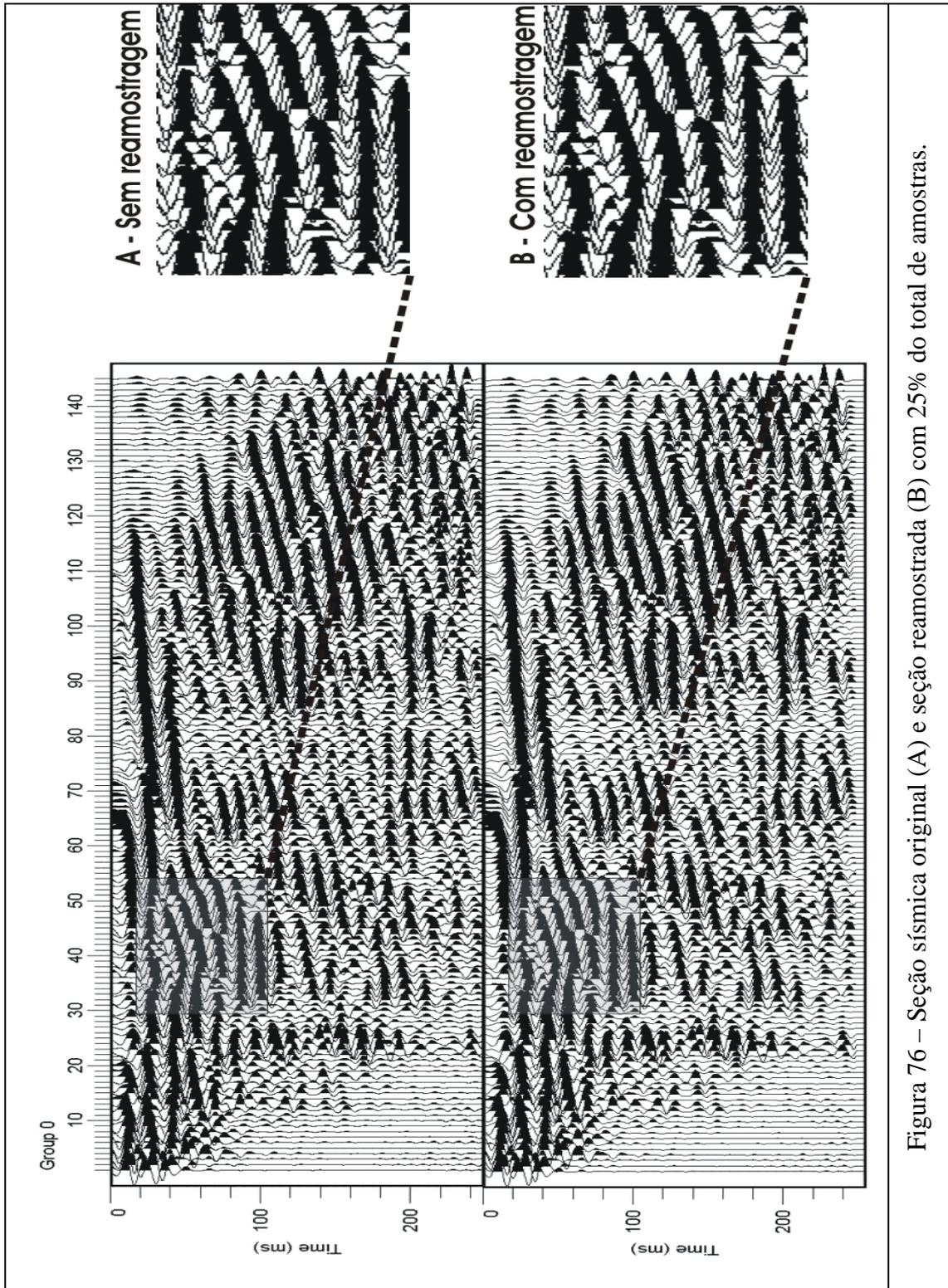


Figura 76 – Seção sísmica original (A) e seção reamostrada (B) com 25% do total de amostras.

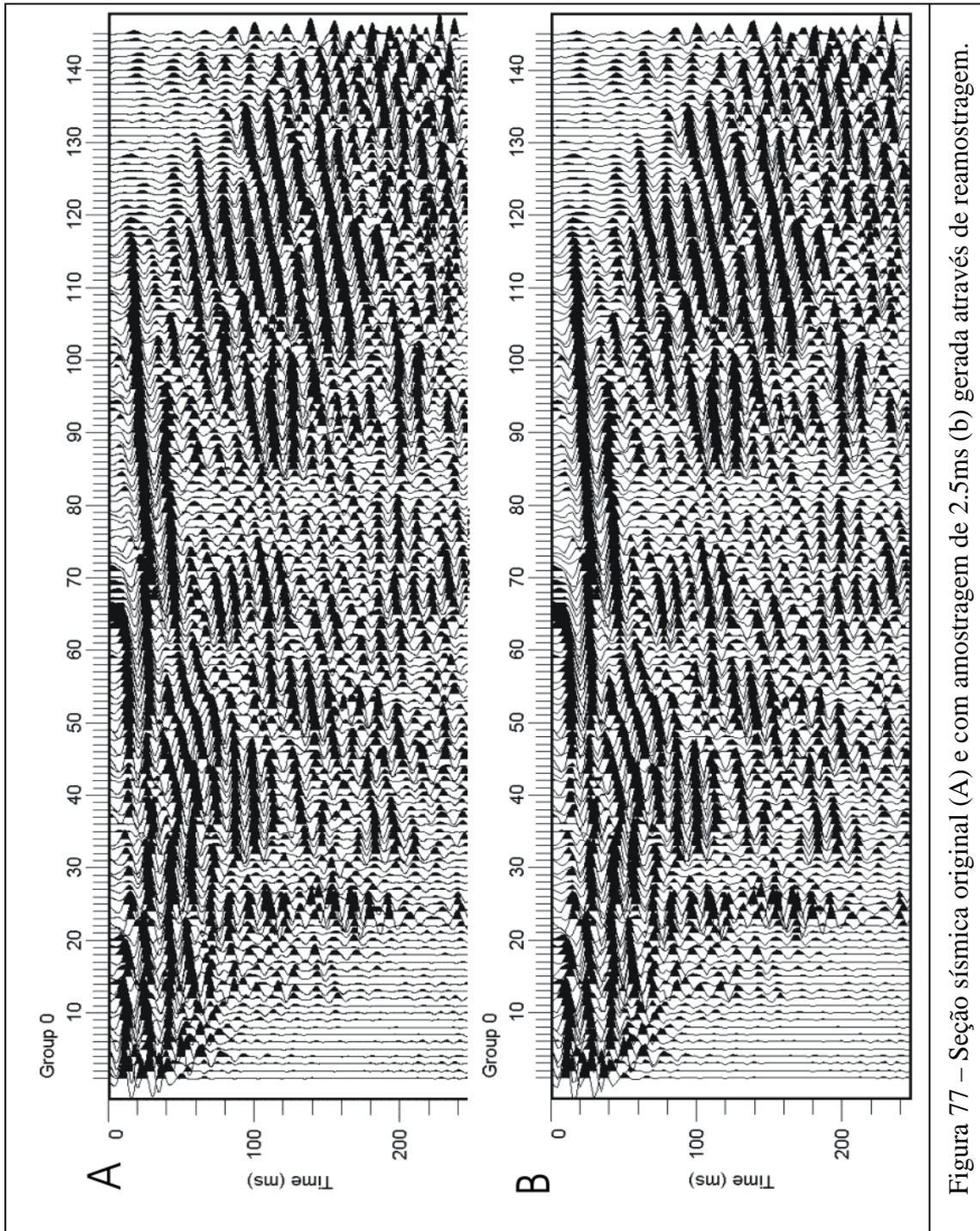


Figura 77 – Seção sísmica original (A) e com amostragem de 2.5ms (b) gerada através de reamostragem.

As amostras das porções selecionadas foram utilizadas na geração de quatro semivariogramas por cubo com 4 direções, modificando os parâmetros de passo e largura, e mantendo 22.5 graus como padrão de tolerância e mergulho. (Figura 78).

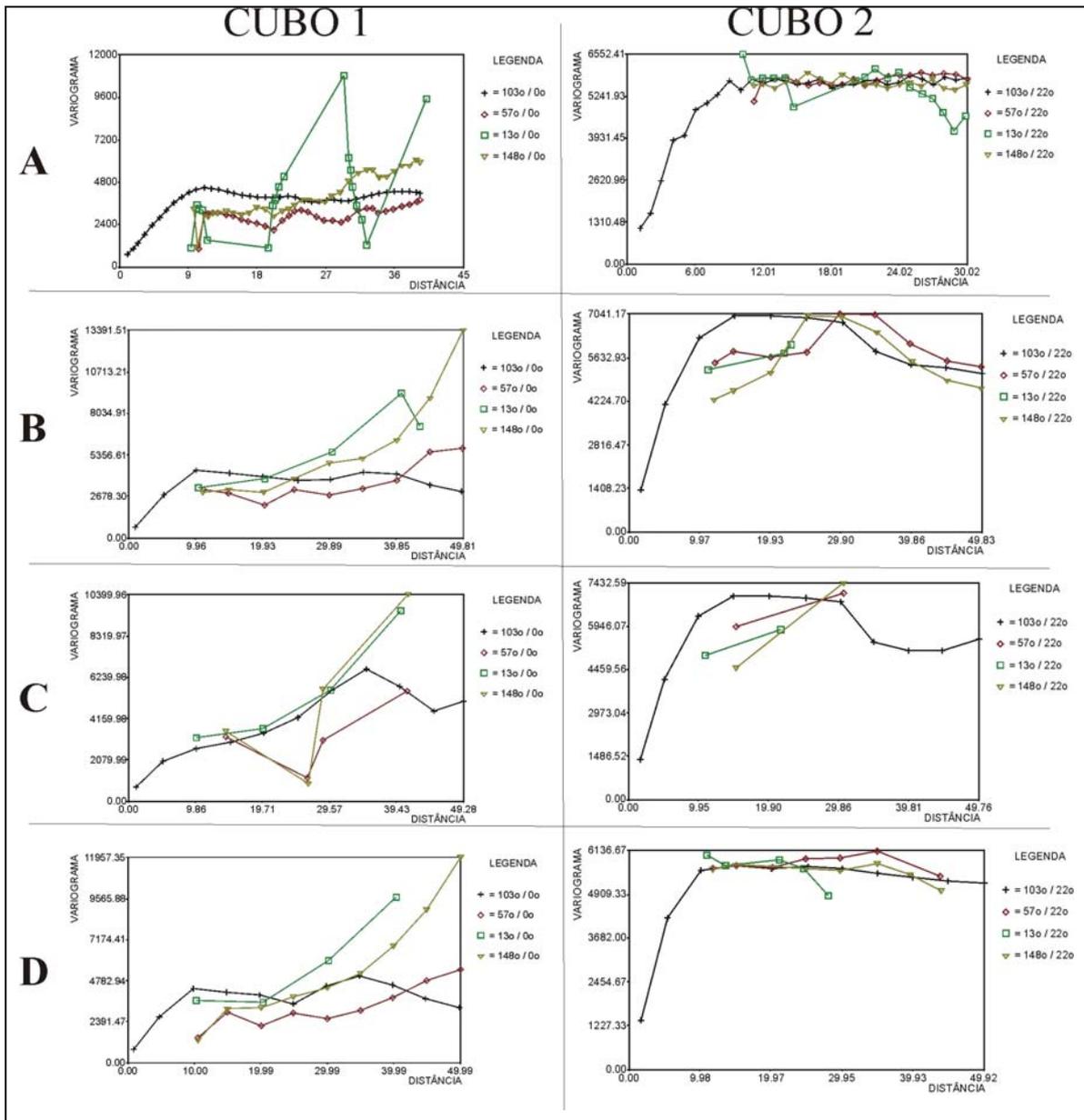


Figura 78 – Semivariogramas das áreas 1 e 2 selecionadas para o ensaio geoestatístico.

A – passo de 1 metro, tolerância e mergulhos de 22.5 graus e larguras (vertical e horizontal) de 22.5 metros; B – passo de 5 metros, tolerância e mergulhos de 22.5 graus, largura vertical de 17 metros e horizontal de 1 metro; C – passo de 5 metros, tolerância e mergulhos de 22.5 graus e larguras (vertical e horizontal) de 1 metro; D – passo de 5 metros, tolerância e mergulhos de 22.5 graus e larguras (vertical e horizontal) de 10 metros.

Em geral os semivariogramas do cubo 1 mostraram uma variabilidade brusca, com curvas bem discrepantes para cada direção, principalmente com passo de um metro (Figura 78 A1). Os patamares mais bem definidos (Figura 78 A1, B1 e D1) indicam uma distância de busca próxima a 10 metros, seguindo o azimuth de busca de 103 graus que é paralelo a direção das seções sísmicas. Os outros azimuthes do cubo 1

já iniciam com uma variabilidade espacial muito elevada, entretanto coincidem em alguns pontos com o patamar do azimute 103 graus, indicando uma provável anisotropia geométrica.

O resultado dos semivariogramas 3D do cubo 2 apresentaram aspectos semelhantes ao ensaio geoestatístico com os dados das fatias em tempo, aparecendo o efeito buraco bem definido (Figura 78 B2 e C2). Da mesma maneira que o cubo 1, os azimutes diferentes da direção 103 graus, mostraram uma variabilidade maior, com algumas coincidências no patamar da direção paralela as linhas sísmicas.

O resultado das duas seleções, em termos de distância de busca para uma interpolação foi muito semelhante em todos os semivariogramas, com algo próximo de 10 metros. A intersecção do patamar com o eixo da variância foi sempre menor no cubo 1, talvez porque sua abrangência é muito restrita, apesar do número de amostra ainda ser alto.

A anisotropia geométrica também foi marcante nos dois cubos, indicando que a área de influência das amostras é elipsoidal, alongada da direção com menor variância.

V.7 - Geração de um cubo sísmico preliminar

Com as informações sísmicas devidamente organizadas em arquivos texto, foi possível iniciar os testes de interpolação tridimensional. A primeira tentativa consistiu em transformar exatamente a mesma informação das seções sísmicas originais em um cubo de amplitudes. Esta alternativa mostrou-se pouco eficaz na extrapolação das amostras entre linhas, devido a amostragem ao longo das seções ocorrer a cada metro e a distância entre linhas a cada dez metros. Esta distribuição levou a considerar a geração primeiro dos mapas em tempo, e posteriormente de volumes com uma grade regular, ou seja, uma amostra a cada metro em ambos sentidos. A Figura 79 exhibe a primeira tentativa de extrapolar os dados das seções sísmicas, utilizando um algoritmo simples (vizinho mais próximo), com apenas $\frac{1}{4}$ da amostragem inicial.

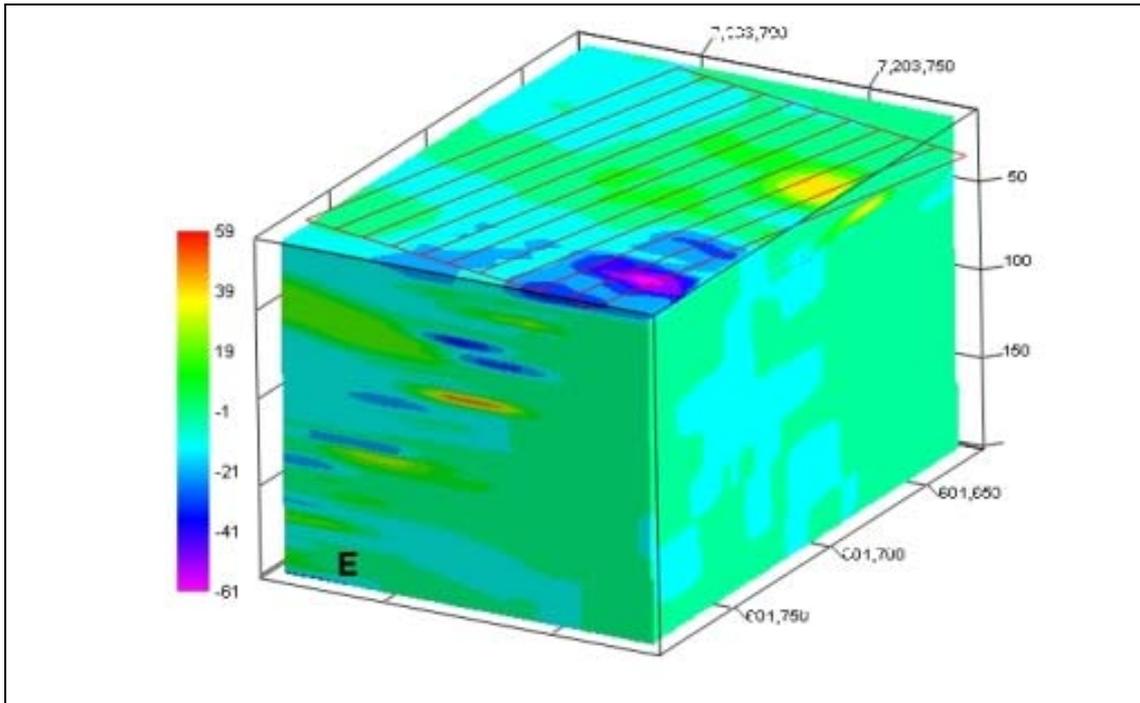


Figura 79 – Primeira modelagem volumétrica das amplitudes sísmicas, utilizando o interpolador vizinho mais próximo, a escala de cor representa os valores de amplitudes sísmicas.

Observa-se que a continuidade lateral dos refletores, positivos ou negativos, entre as seções sísmicas é bruscamente interrompida (no topo da Figura 79 observa-se a disposição das seções levantadas).

O grande enclave desta etapa do estudo foi a capacidade computacional. Durante o início da pesquisa projetou-se o uso de computadores pessoais (PCs) potentes, já prevendo que a modelagem necessitaria de grande velocidade no processamento, mesmo assim um computador com 2 *gigabytes* de memória *ram* (*Random Access Memory*) e mais de 2 *gigahertz* de velocidade de processamento precisou de mais de 30 horas para construir um modelo de 80 milissegundos de profundidade, com uma amostra a cada milissegundo (a amostragem original era de 4 amostras por milissegundo) e um metro de resolução em planta. Ainda não foi possível processar um modelo completo, ou seja, 250 milissegundo com 1000 amostras por metro em planta, porque as planilhas eletrônicas utilizadas suportavam apenas um milhão de amostras. Porém, este problema foi contornado através do processamento em etapas e posterior justaposição em um único volume de amplitudes. Durante os levantamentos geofísicos no campo, os parâmetros de aquisição foram planejados favorecendo a maior resolução possível, mas, nas etapas

finais de modelagem, a alta densidade de amostragem tornou-se um problema operacional.

A partir das informações sísmicas das fatias em tempo, foi construído um volume, contabilizando mais de cinco milhões de linhas com coordenadas X e Y planas, Z em tempo e G em amplitude. O processamento teve de ser compartimentado em fatias para cada milhão de amostras por razões de capacidade computacional. Em média, o processamento de cada fatia consome cerca de 20-30 horas. O modelo final resultou da soma dos modelos parciais e tem uma resolução de um metro em planta por um milissegundo. Cada *voxel* destes possui um valor de amplitude obtido pela reamostragem das seções sísmicas que continham quatro amostras por milissegundo. A Figura 80 é composta por todas amostras e seus valores de amplitude, sendo o azul positivo e o vermelho negativo. Infelizmente, os modelos do ensaio geoestatístico não puderam ser utilizados na geração do cubo sísmico por limitações de algoritmo no programa de modelagem volumétrica, que não permite a inserção dos parâmetros determinados na variografia, assim foi considerado o modelo isotrópico para a interpolação.

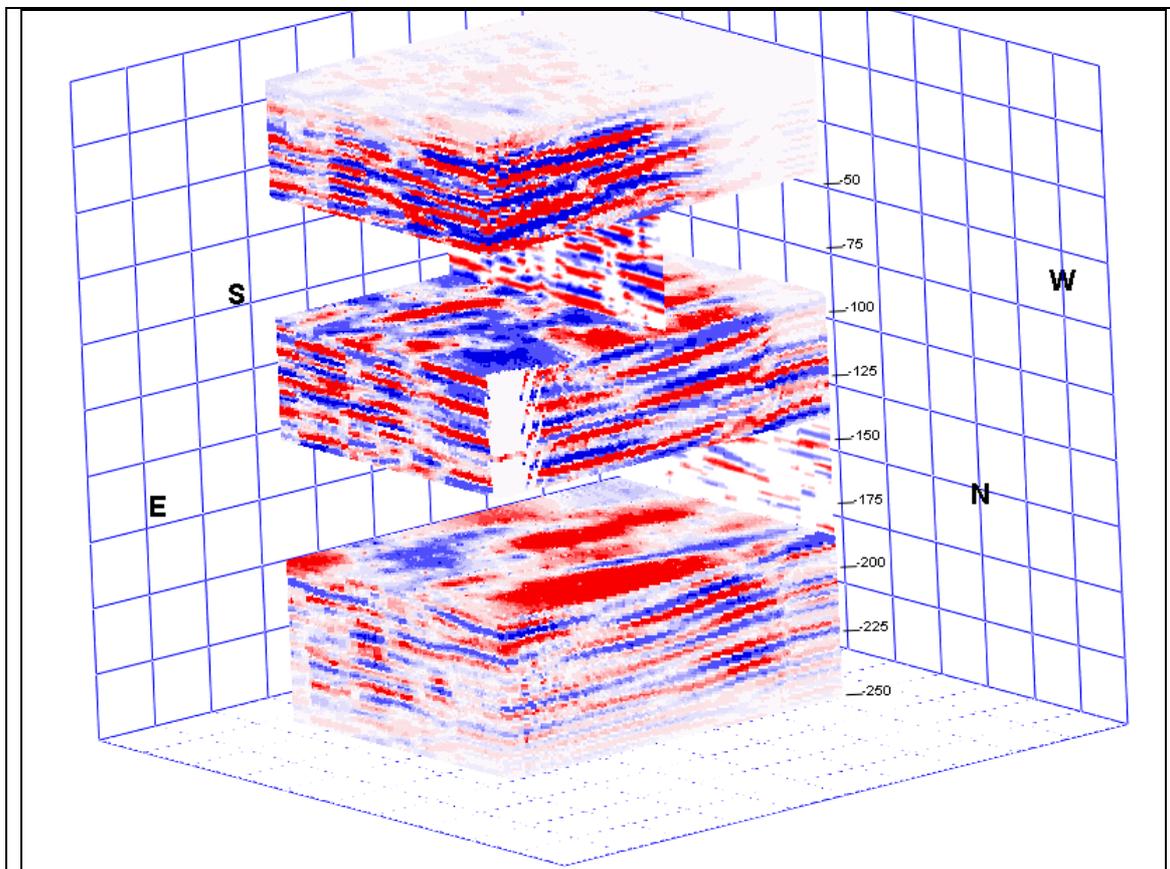
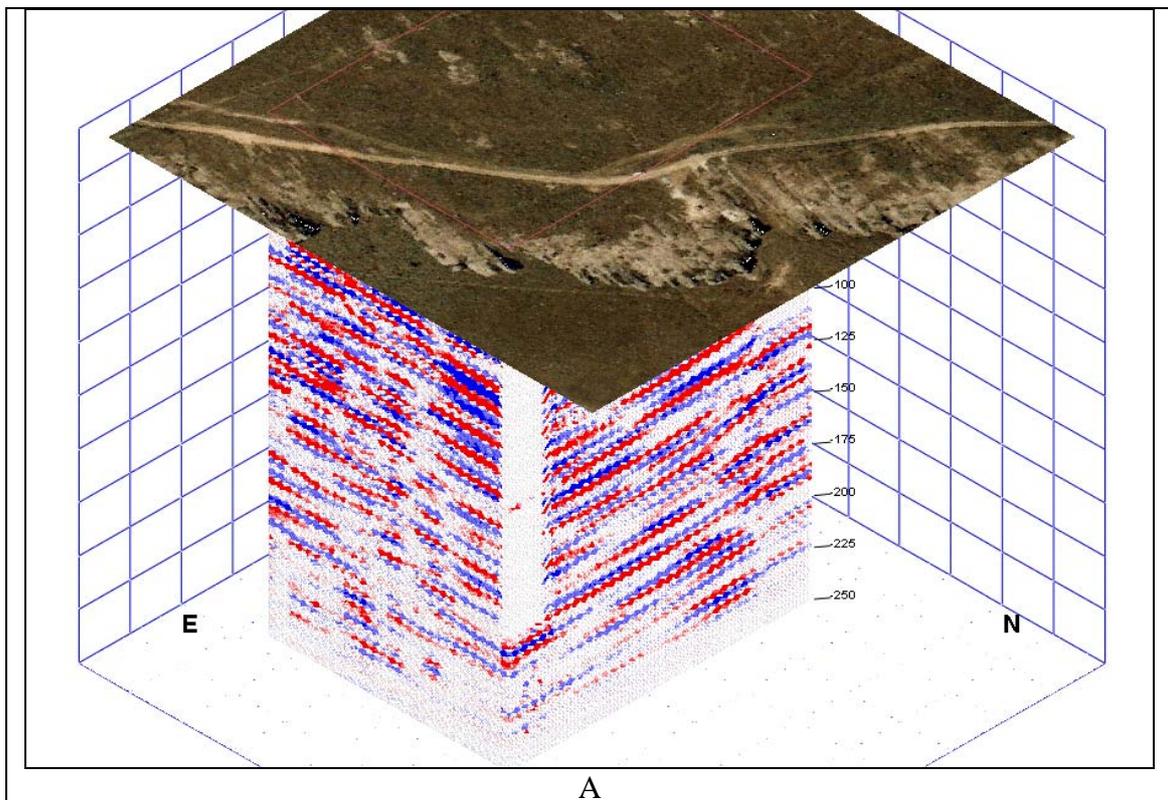


Figura 80 - Cubo sísmico fatiado em tempo e com seções N-S.

As feições estruturais observadas no campo e seus traçados na foto aérea podem ser mesclados com o cubo sísmico. Este artifício facilita a interpretação das fatias em tempo e o entendimento das seções sísmicas. A Figura 81 (A) mostra uma correlação de uma imagem da foto aérea e o cubo sísmico.

Uma vez inserida dentro de um volume, a foto posicionada em diferentes profundidades, possibilitou a comparação entre as estruturas em superfície e o registro sísmico. A Figura 81 (B) exemplifica este processo.



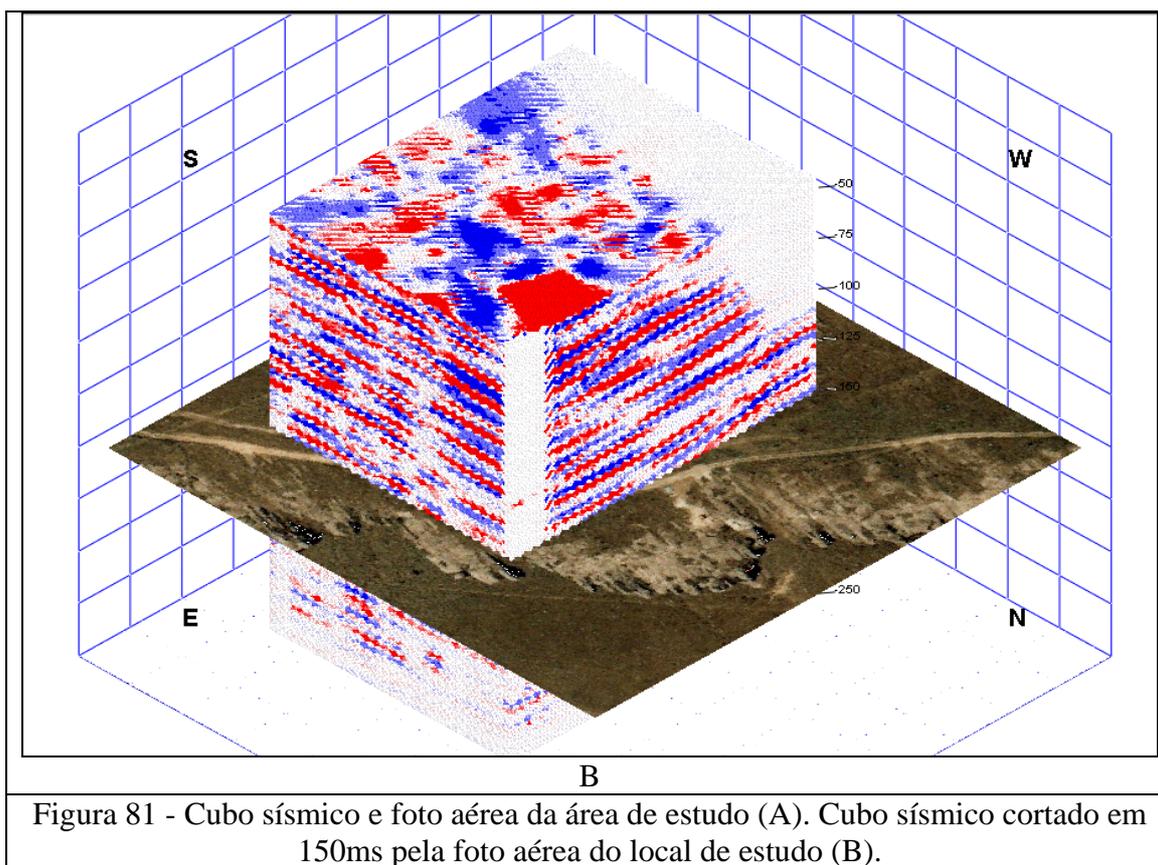


Figura 81 - Cubo sísmico e foto aérea da área de estudo (A). Cubo sísmico cortado em 150ms pela foto aérea do local de estudo (B).

Pode-se obter qualquer fatia, respeitando a resolução do modelo, para visualizar a continuidade dos lineamentos estruturais no cubo sísmico. Além da visualização 3D, pode-se observar todos os elementos provindos do cubo sísmico em planta, permitindo um traçado mais preciso e confirmando as interpretações realizadas em três dimensões.

Ocorre um condicionamento das amplitudes em planta muito semelhante a principal direção dos lineamentos estruturais observados na foto aérea. Pode-se correlacionar várias fatias, avançando em profundidade, e conferir o comportamento das feições estruturais e a correlação com o empilhamento estratigráfico suposto (Figuras 82).

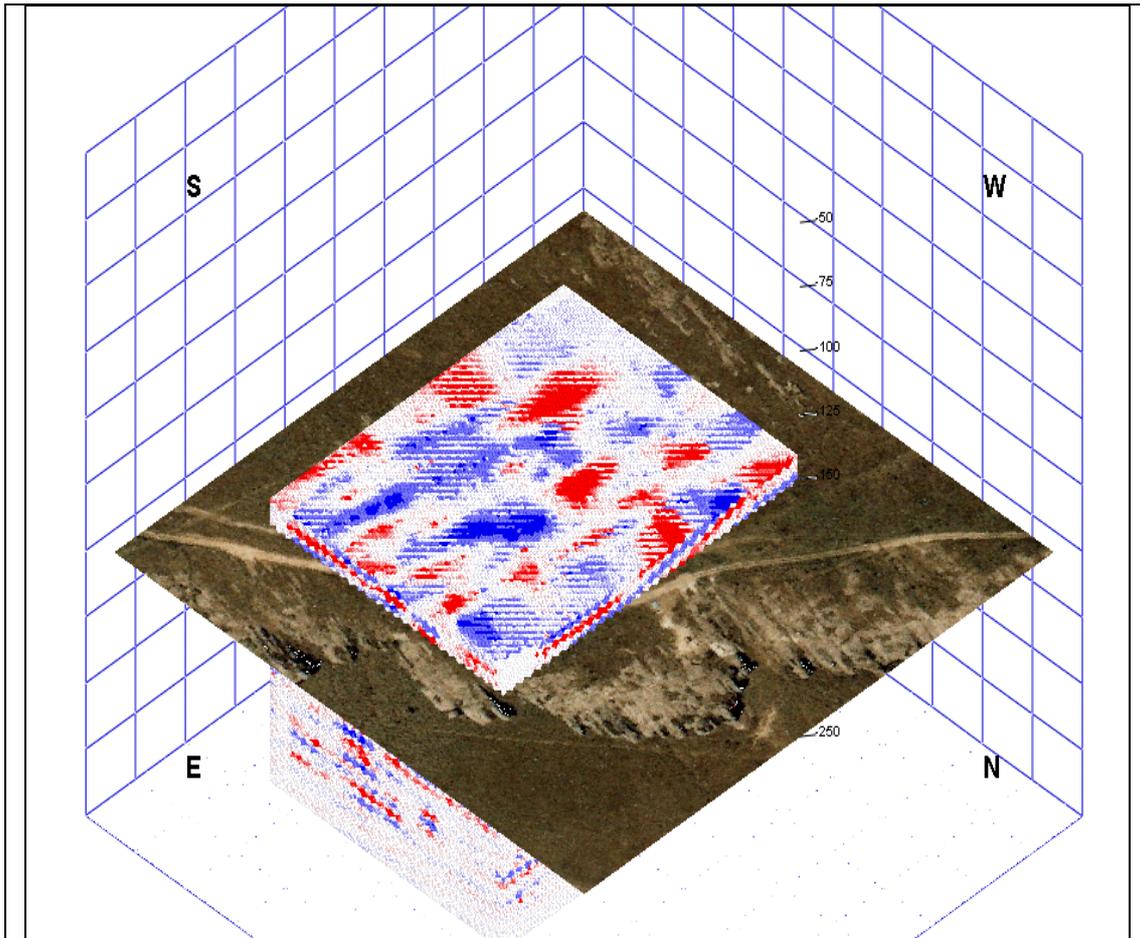


Figura 82 - Cubo sísmico mesclado pela foto aérea e fatia de 140ms em primeiro plano.

Considerando que as amostras obtidas na construção do cubo sísmico são resultantes de uma reamostragem das seções sísmicas originais, com restrição às fatias interpoladas, pode-se inserir uma seção sísmica original, de forma a comparar com os dados brutos não reamostrados (Figura 83). Este procedimento foi realizado inserindo as coordenadas de início e final de linha em uma imagem matricial.

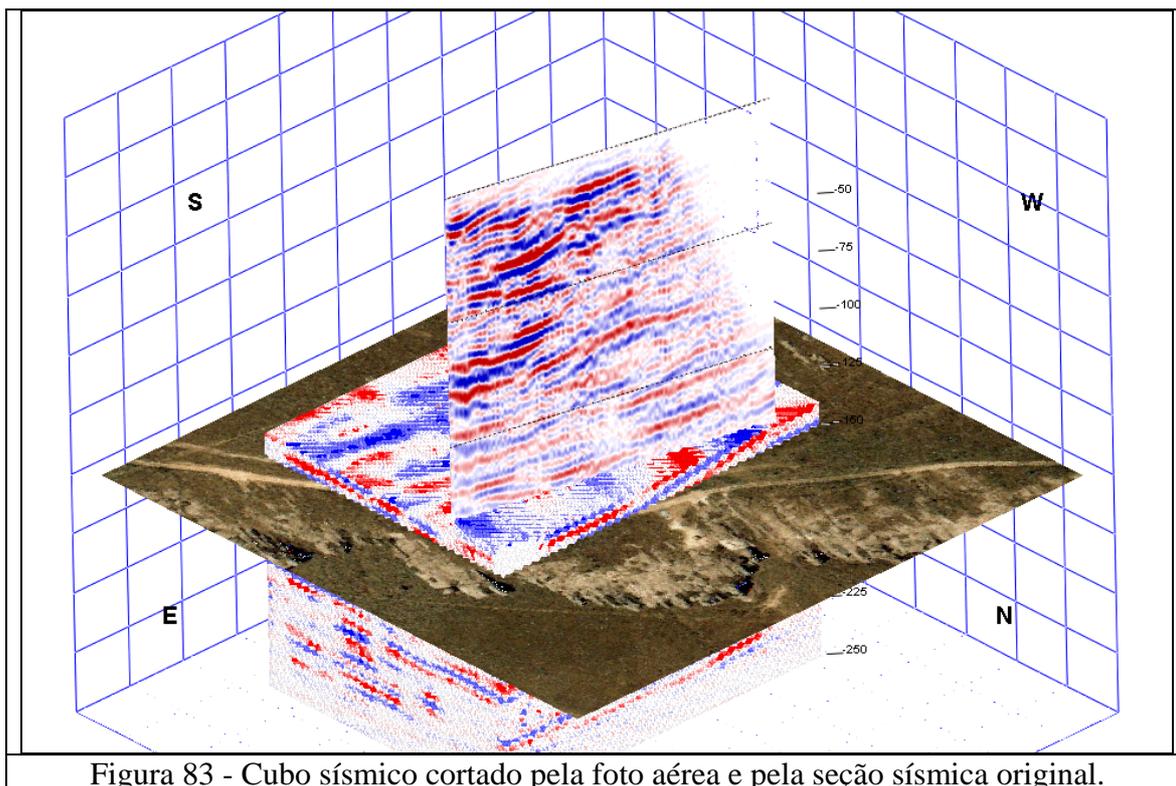


Figura 83 - Cubo sísmico cortado pela foto aérea e pela seção sísmica original.

A geração deste cubo sísmico preliminar, ainda que numa pequena porção da área total de Vila Velha, foi satisfatório, considerando que podem ser extraídas informações geológicas como continuidade de zonas de falhas e geometria dos estratos sedimentares. Entretanto, não foram realizadas interpretações neste dado, visto que sua construção foi deficitária, uma vez que os parâmetros do ensaio geoestatístico não puderam ser utilizados.

IV.5 - Interpretação e correlação

Os levantamentos de sísmica de alta resolução executados na área da Fazenda Rivadávia, próxima ao Parque de Vila Velha e na Lapa, onde afloram rochas do Grupo Itararé, foram realizados com a técnica de empilhamento de ondas P ou compressivas. A qualidade geral dos dados adquiridos é boa, principalmente na área de Vila Velha, mesmo com problemas inerentes a levantamentos sísmicos terrestres rasos, como ruídos externos perturbadores (vento, chuva, etc) e influência da reflexão do lençol freático.

Foram perfurados poços, próximos às seções sísmicas, para a calibração da estratigrafia e das velocidades de propagação das ondas elásticas, através da perfilagem sônica. O objetivo era realizar poços perfilados no mínimo englobando a totalidade da unidade geológica do Grupo Itararé. Entretanto, por razões técnicas, os furos foram soterrados ou desmoronados de forma rápida antes da perfilagem, não permitindo o completo uso do poço, restando a descrição de amostras de calha.

A Figura 42 apresenta uma seção localizada na Fazenda Rivadávia, podendo-se observar alguns eventos marcantes. Em aproximadamente 25ms ocorre um refletor, com aspecto contínuo, mas sinuoso. Em 60ms ocorre outro refletor, muito forte, mas descontínuo, seguido por dois outros eventos, paralelos e também descontínuos. A interpretação destas feições pode ser visualizada na Figura 43.

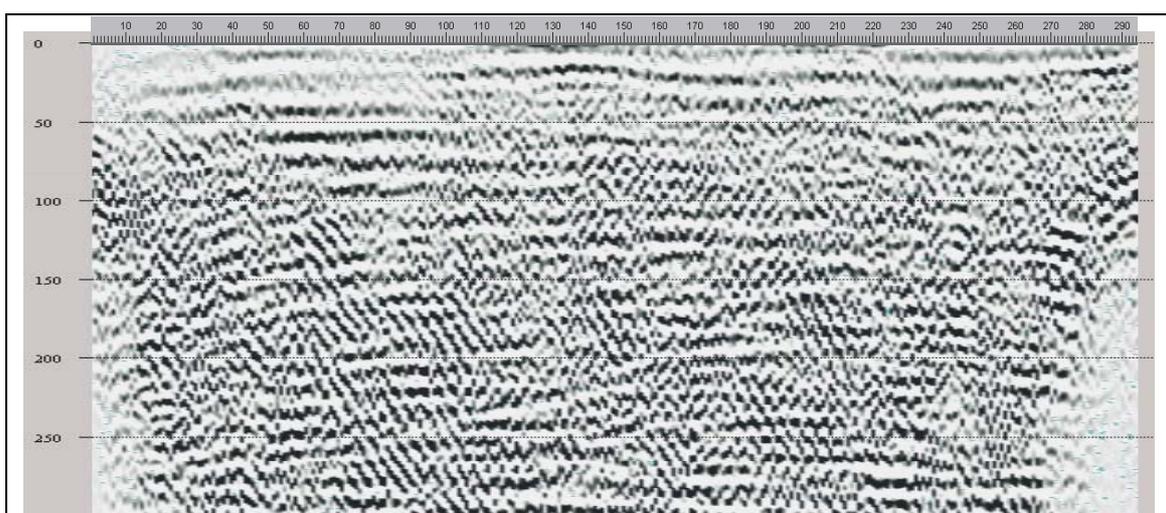


Figura 42 – Seção Sísmica localizada na Fazenda Rivadávia.

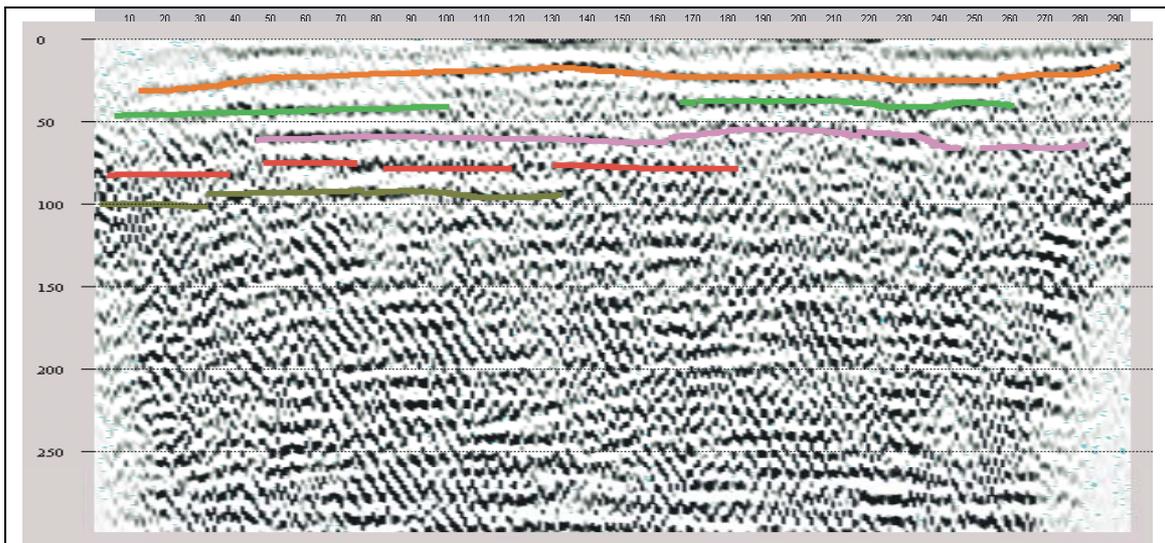


Figura 43 – Seção sísmica localizada na Fazenda Rivadávia, com interpretação dos eventos marcantes.

Segundo Lonardelli (2004), os ensaios sísmicos de refração denotaram uma velocidade média de 2000m/s para as rochas desta área, podendo ser utilizada, grosso modo, numa conversão de tempo duplo para profundidade. Os principais eventos interpretados estão até 100ms de profundidade, o que equivaleria a aproximadamente 100 a 140 metros.

No sentido de correlacionar as informações de perfis litológicos verticais, realizados por Vesely (2004), e dados de perfilagem geofísica de poços e descrição de amostra de calha, realizados por Kraft (2004), foram construídas as Figuras 44 e 45, contendo a correlação das unidades geológicas aflorantes na região da Fazenda Rivadávia com as curvas de perfilagem geofísica dos poços perfurados, todos transformados para tempo duplo, com uma velocidade média de 2000m/s. A Figura 46 mostra a localização, sobre a foto aérea, da seção entre os poços.

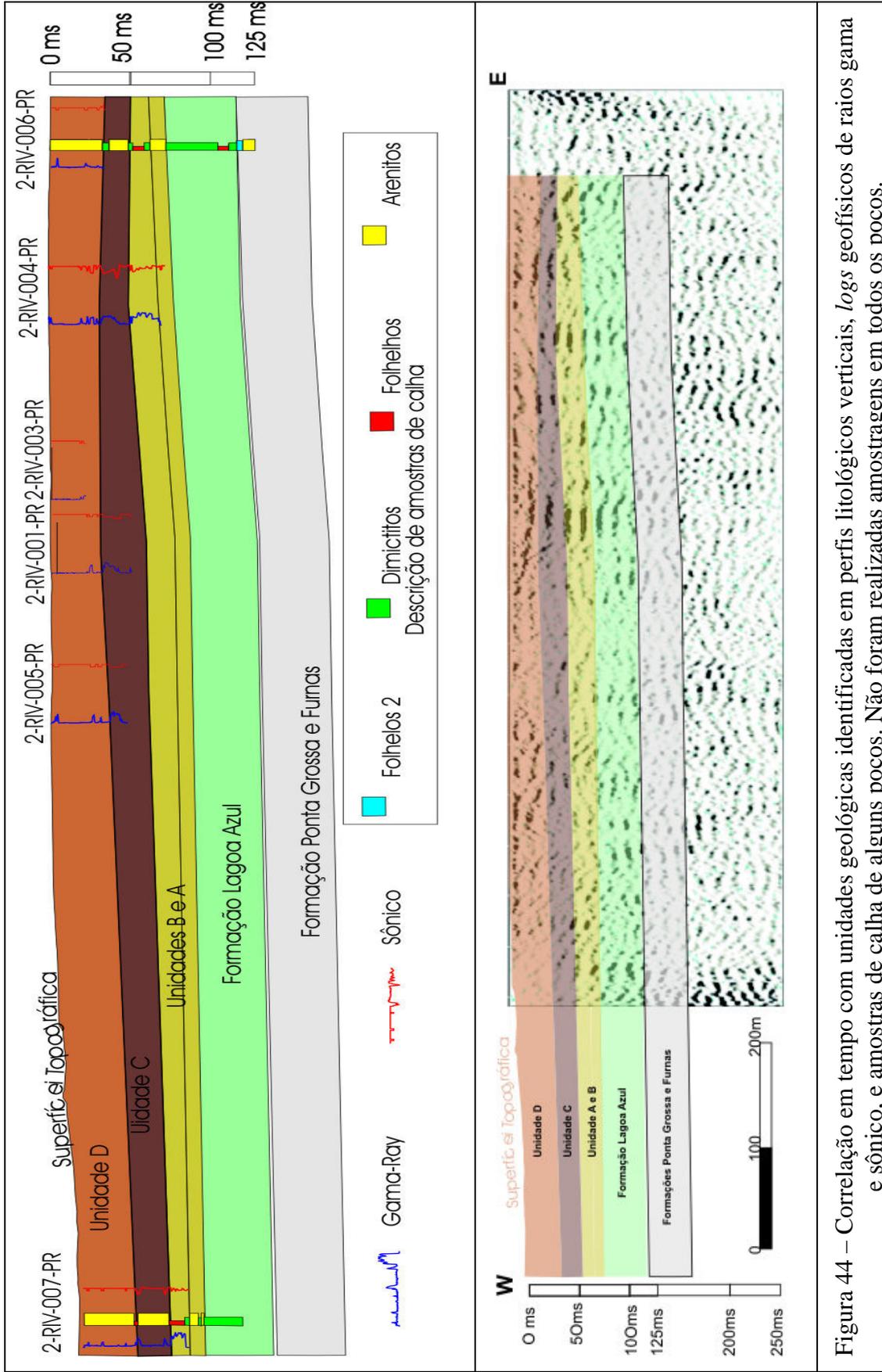


Figura 44 – Correlação em tempo com unidades geológicas identificadas em perfis litológicos verticais, logs geofísicos de raios gama e sônico, e amostras de calha de alguns poços. Não foram realizadas amostragens em todos os poços.

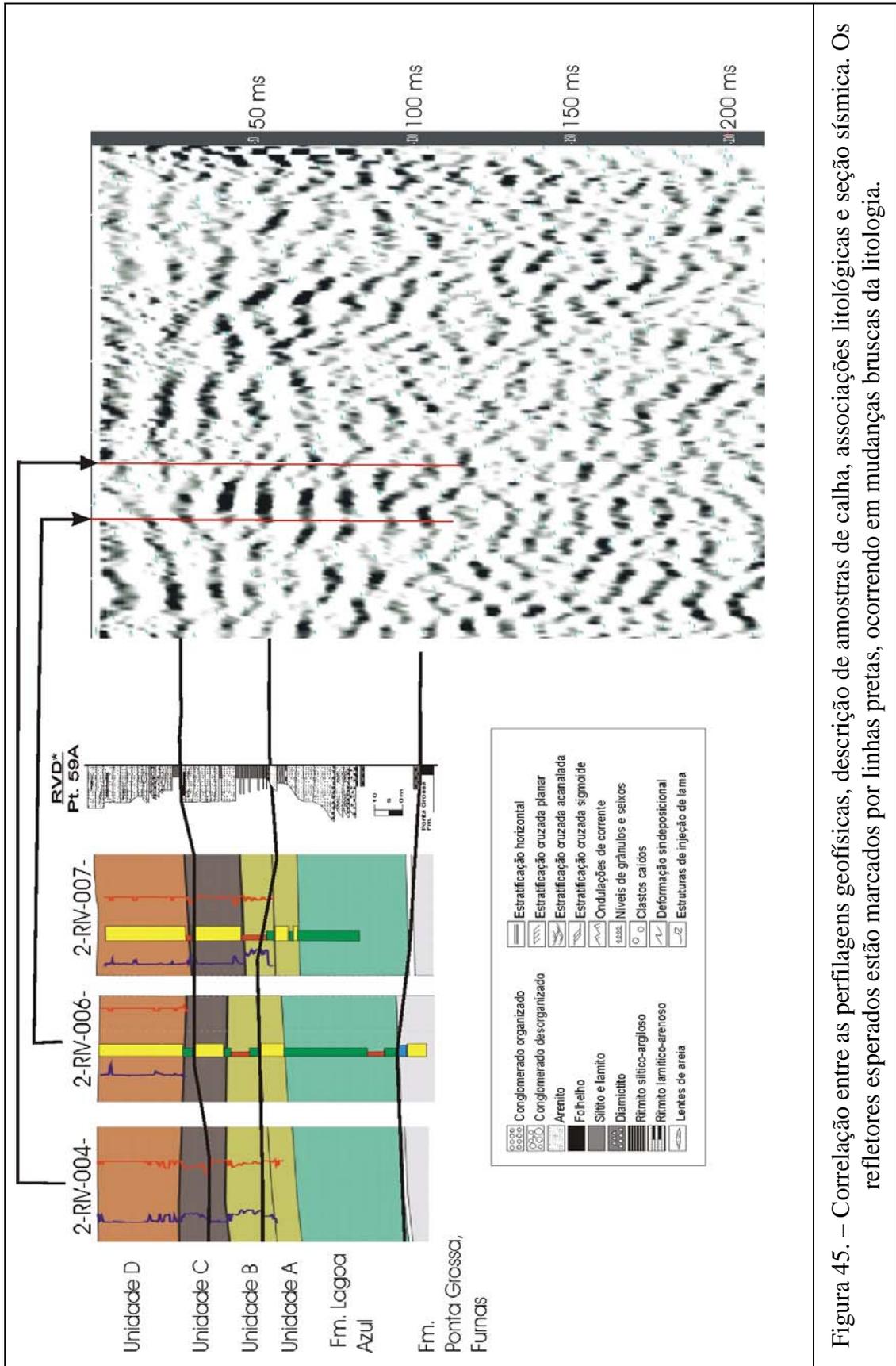


Figura 45. – Correlação entre as perfisagens geofísicas, descrição de amostras de calha, associações litológicas e seção sísmica. Os refletores esperados estão marcados por linhas pretas, ocorrendo em mudanças bruscas da litologia.

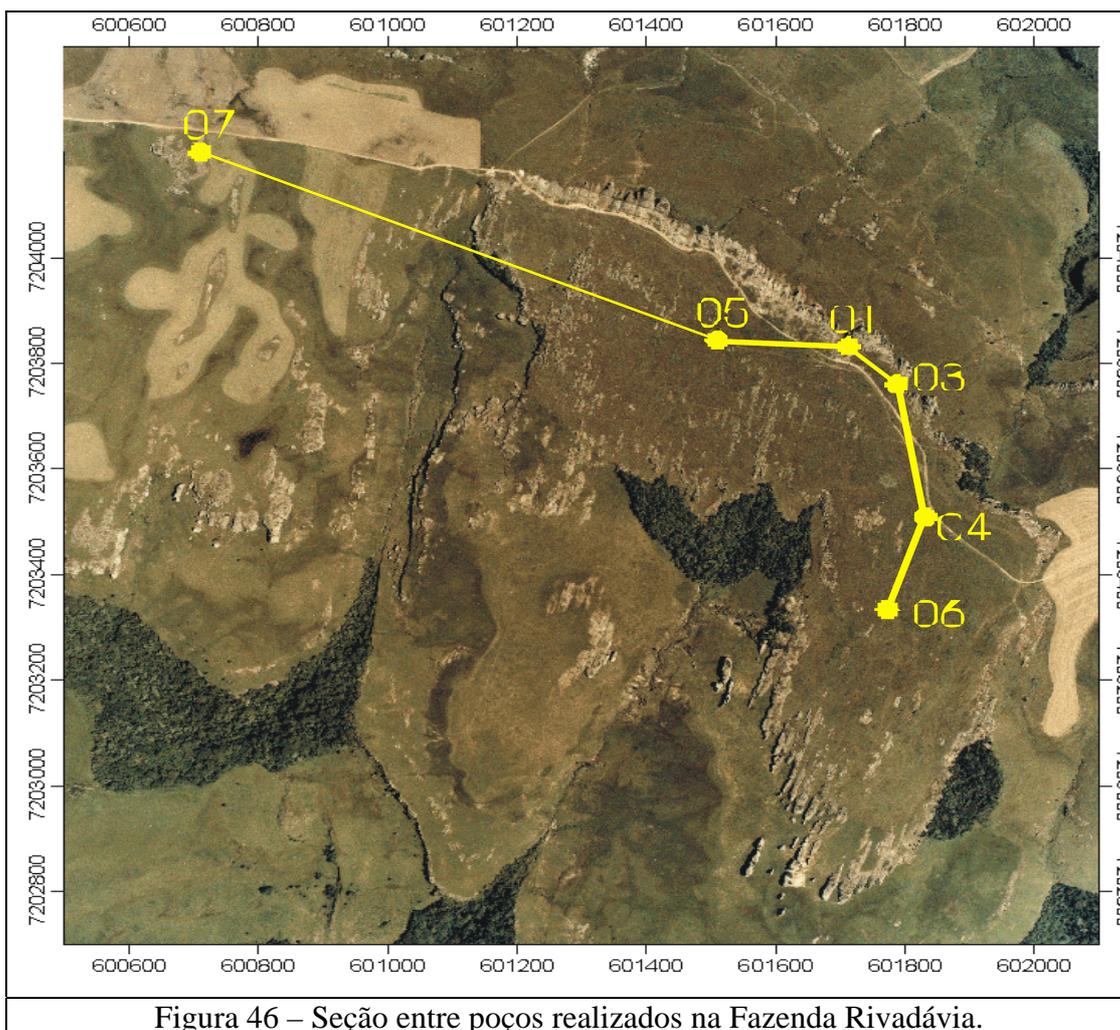


Figura 46 – Seção entre poços realizados na Fazenda Rivadávia.

Os horizontes sísmicos mais marcantes foram traçados, buscando sempre observar a coerência destes refletores em mais de uma linha. As falhas foram traçadas em zonas de perda de sinal e em deslocamentos ou inflexões de refletores. A Figura 47 contém um detalhe de uma seção sísmica e duas janelas de *zoom* com exemplos de critérios para traçado de falhas e horizontes.

As características intrínsecas de seções sísmicas rasas exigiram a definição de critérios para o mapeamento de falhas e horizontes estratigráficos. Como as falhas na Fazenda Rivadávia (Vila Velha) apresentam pequeno rejeito, da ordem de poucos metros, configurando falhas transcorrentes, seu reconhecimento em seções sísmicas baseou-se na descontinuidade lateral de refletores, além da existência de faixas com difração e zonas com perda de sinal.

Para o mapeamento dos horizontes estratigráficos, foram utilizados os refletores sísmicos mais contínuos lateralmente e, na ausência destes, as superfícies limitantes de zonas com diferentes padrões de reflexão. Neste caso, a premissa é que

associações litofaciológicas representam sismofácies características dos padrões deposicionais reconhecidos no campo.

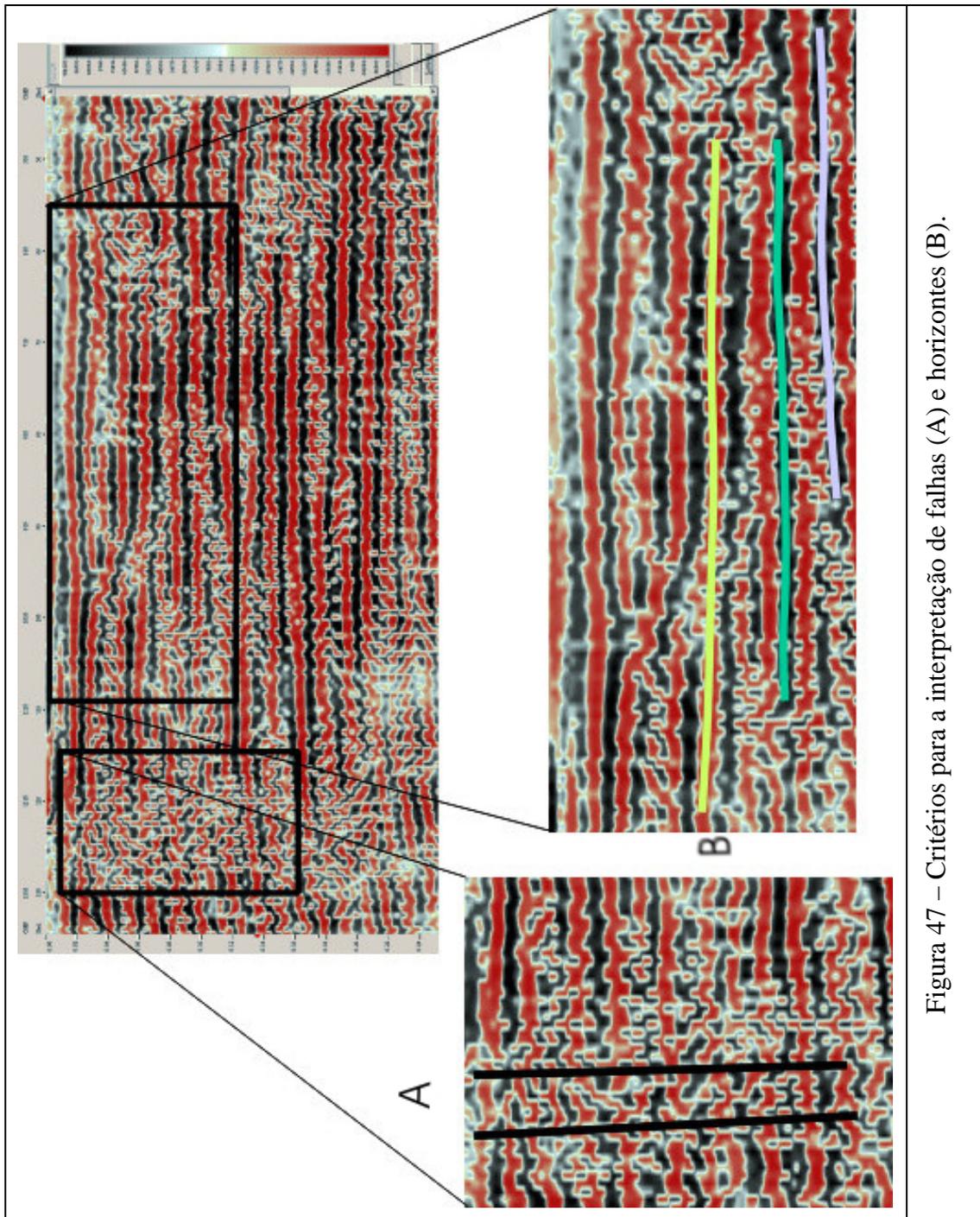


Figura 47 – Critérios para a interpretação de falhas (A) e horizontes (B).

No sentido de testar a efetividade dos critérios escolhidos, foi selecionada uma área de detalhe, ao sul da foto aérea (Figura 48), utilizando uma série de seções sísmicas paralelas e consecutivas. Esse tipo de arranjo sísmico favorece a

interpretação de um horizonte ou falha com rastreamento destas estruturas em vários planos do espaço tridimensional.

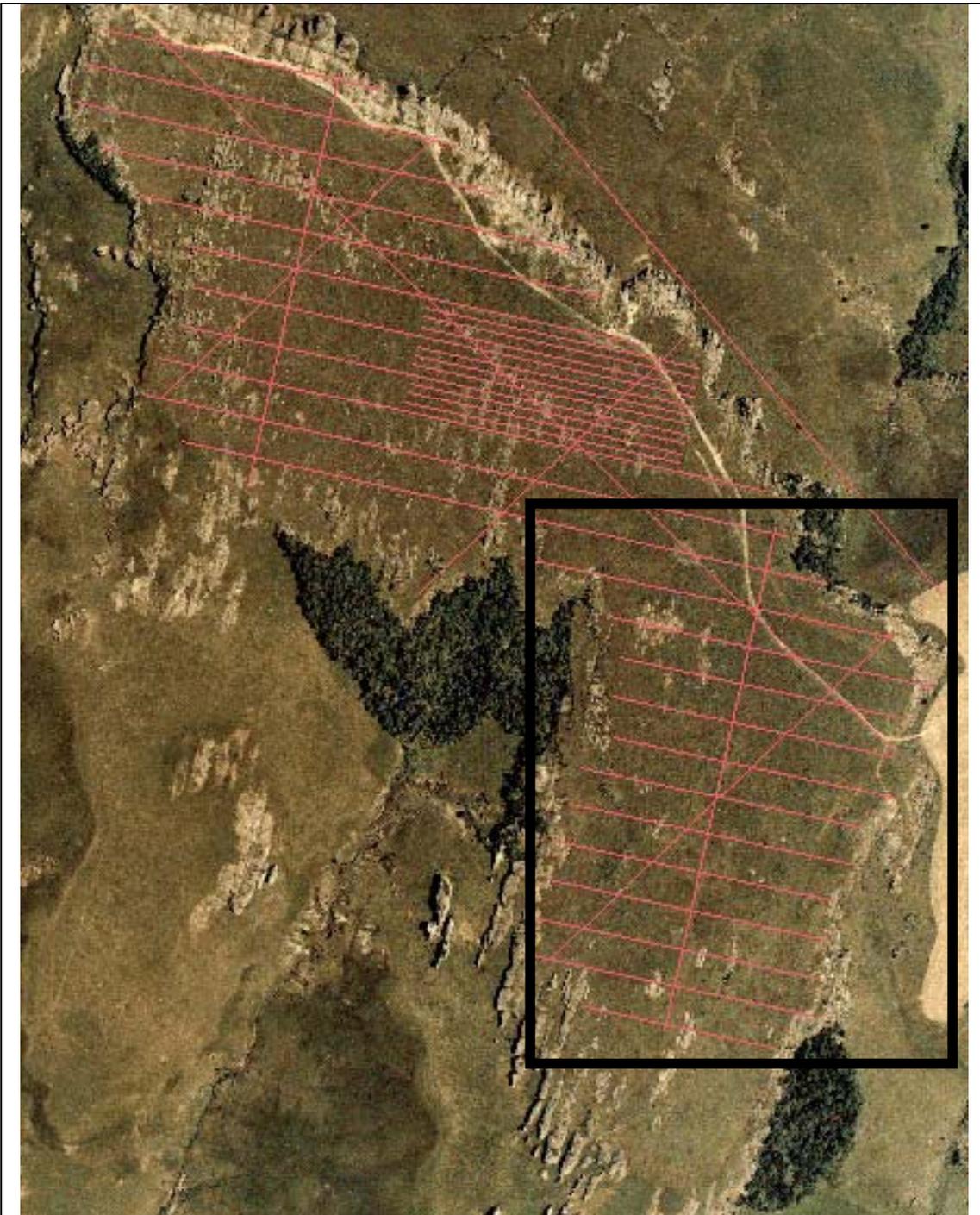


Figura 48 – Localização da área para teste de critérios para interpretação sísmica de horizontes e falhas.

Estas seções foram visualizadas em várias escalas, tanto na horizontal, referente as estações de campo, e na vertical, referente ao tempo duplo de propagação das ondas em subsuperfície. Também foram testadas várias paletas de cores para os valores de amplitudes, sendo que o padrão vermelho-branco-preto foi escolhido. A Figura 49 é um exemplo de uma seção sísmica em escala e padrão de cores selecionados como mais adequados neste estudo.

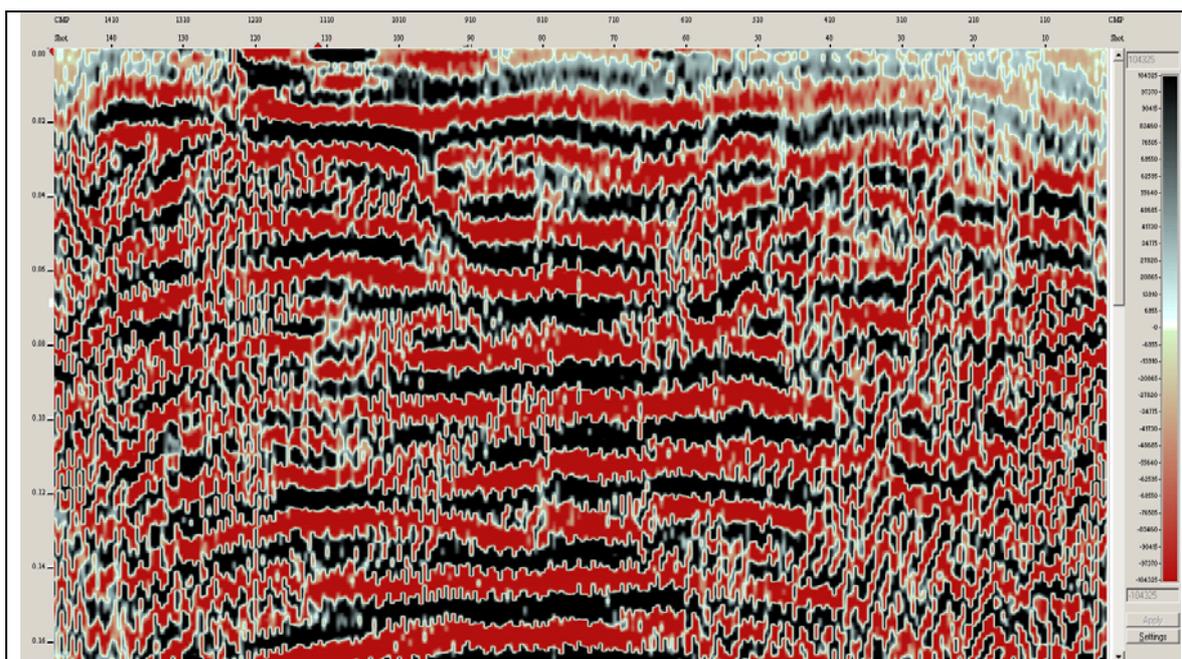


Figura 49 – Padrão de cores e escala, selecionados para a interpretação sísmica.

Devido à área de estudo estar muito fraturada, optou-se por traçar as falhas em todas as seções sísmicas, desenhadas de forma independente em cada seção. A figura 50 corresponde a interpretação de falhas de uma seção sísmica.

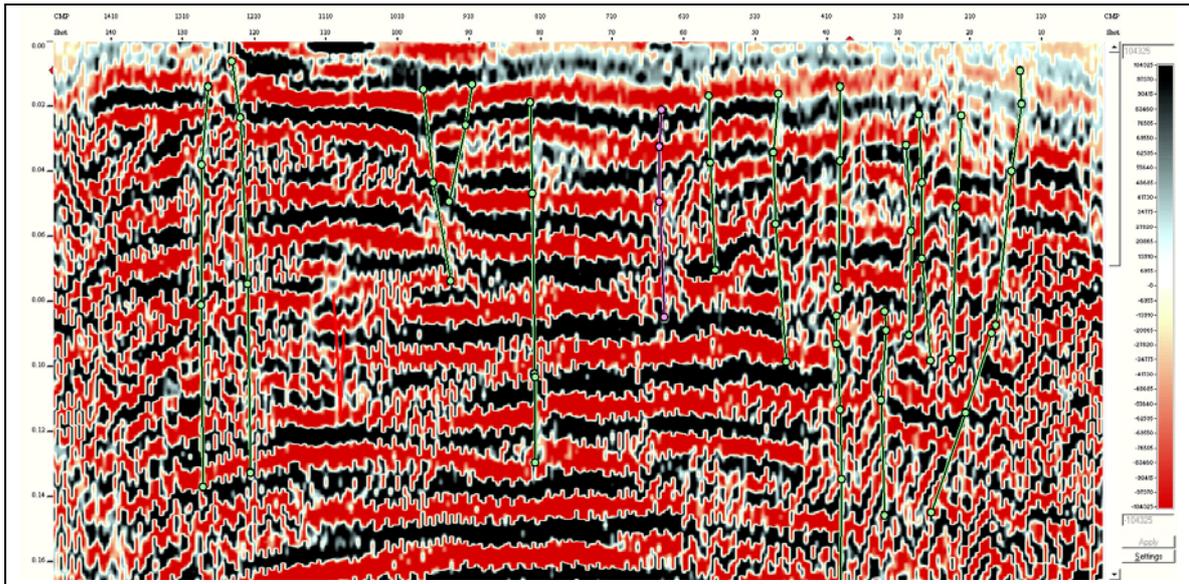


Figura 50 – Falhas interpretadas em uma seção sísmica.

Os horizontes marcantes observados nas seções sísmicas normalmente encontram-se deslocados ou modificados pelas falhas, justificando que o traçado destas é um pré-requisito para o traçado dos horizontes. A Figura 51 mostra a interação entre os traços referentes às falhas e aos horizontes.

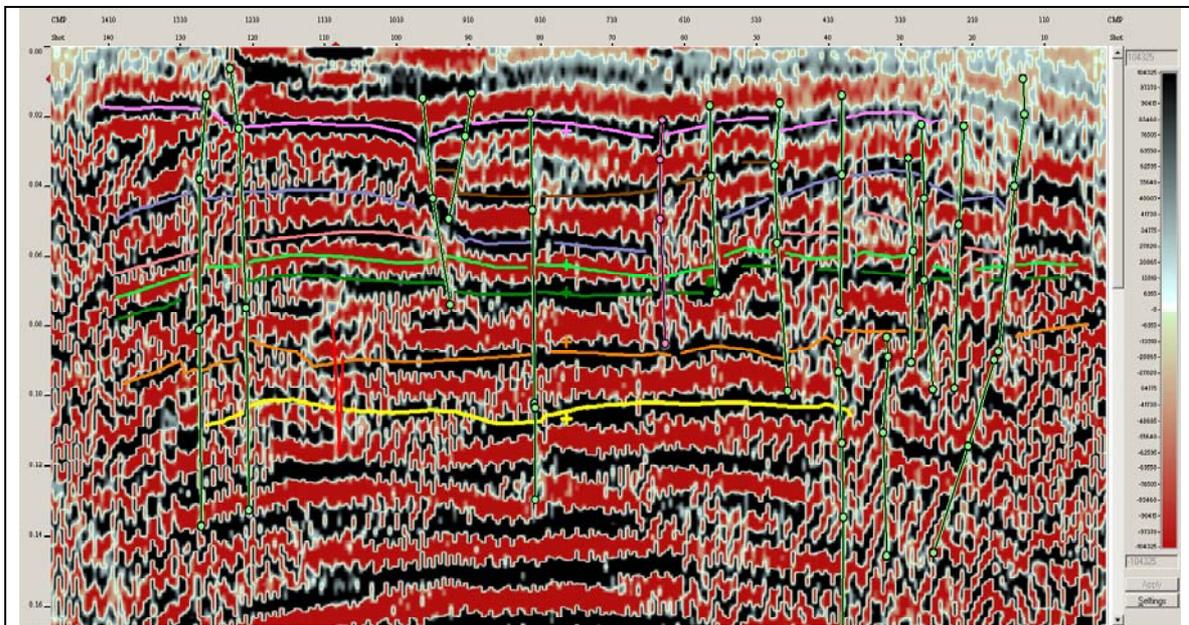


Figura 51 – Falhas, traços subverticais, e horizontes, traços subhorizontais, interpretados em uma seção sísmica.

Uma das maneiras de conferir os traçados dos horizontes e falhas foi com a visualização conjunta de duas ou mais seções sísmicas. Desta forma quando o cursor

do computador estava desenhando um horizonte em uma seção “x”, na mesma tela a projeção do cursor da seção anterior pode ser visto na seção “y” corroborando a existência de uma mesma feição em diferentes locais (Figura 52).

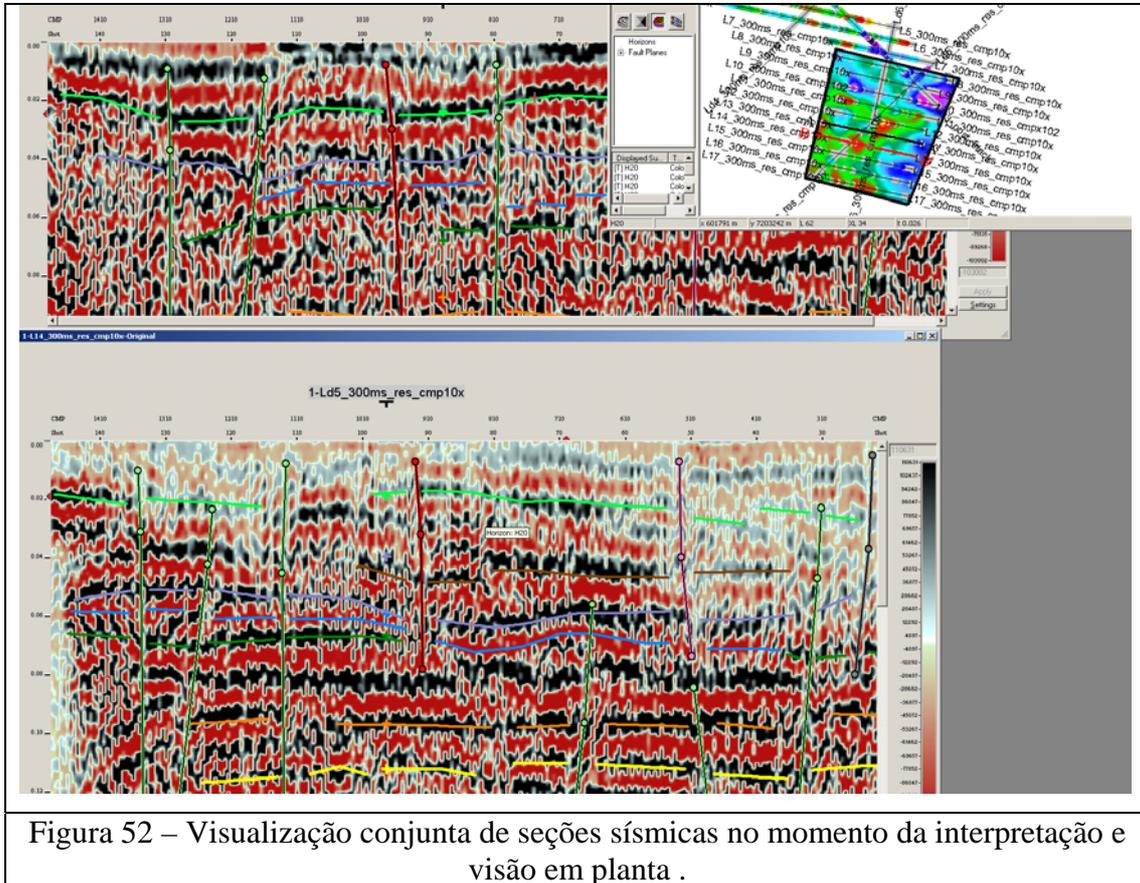


Figura 52 – Visualização conjunta de seções sísmicas no momento da interpretação e visão em planta .

Uma outra técnica usual para o rastreamento de refletores consiste na visualização 3D de várias seções sísmicas com direções transversais. Desta forma um horizonte marcante pode ser observado em sua continuidade na seção sísmica transversal, conferindo um grau de certeza maior a interpretação desta feição. Quando não existe uma continuidade de horizontes no cruzamento de seções sísmicas pode-se aventar a inexistência de correlação física com a geologia local, ou resultados de interferência de ruídos durante os levantamentos de campo ou artefatos numéricos gerados durante o processamento sísmico. A Figura 53 exemplifica a técnica de visualização 3D de seções sísmicas com direções diversas.

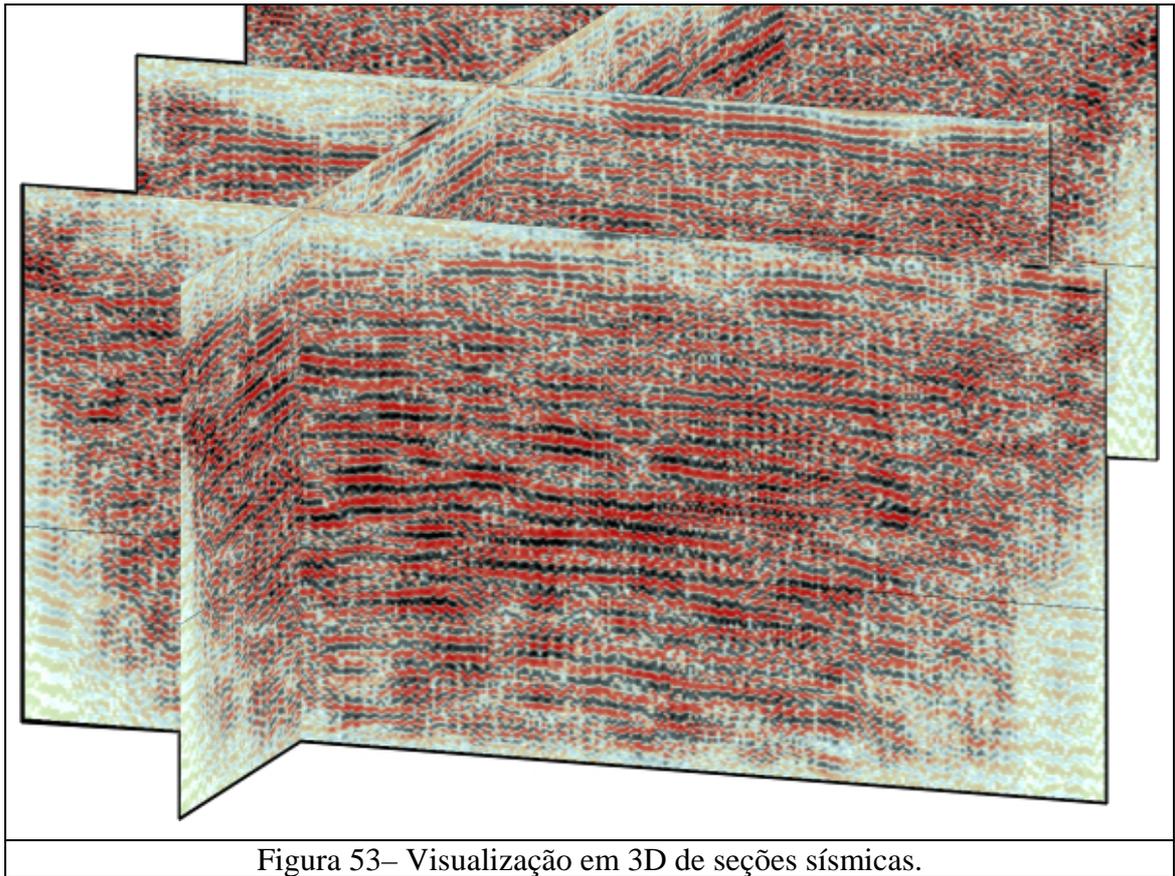
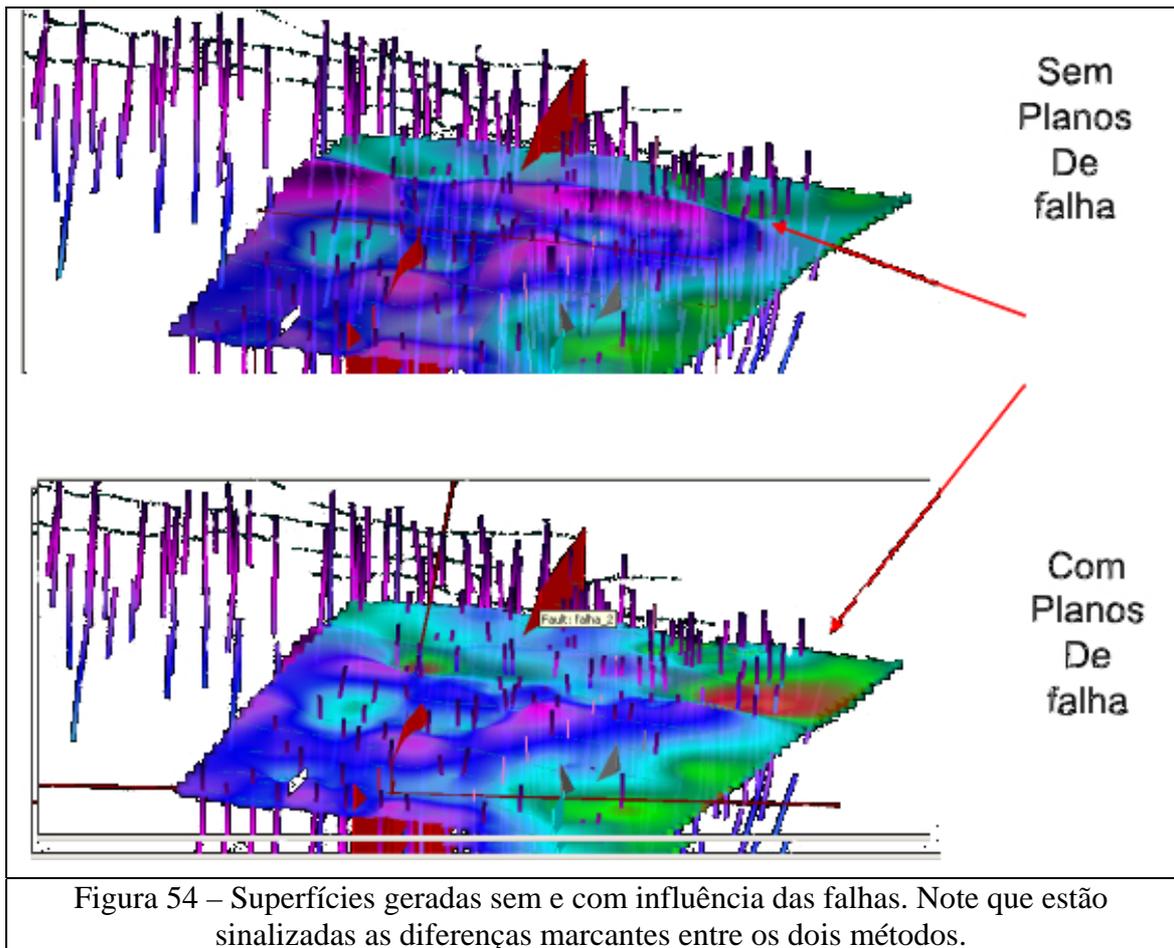


Figura 53– Visualização em 3D de seções sísmicas.

Os horizontes sísmicos traçados em diversas seções sísmicas foram transformados em superfícies 3D. O algoritmo utilizado foi a de mínima curvatura, sendo que seu efeito sobre superfícies é muito afetado pelo traçado dos planos de falha. A Figura 54 compara uma mesma superfície, gerada a partir das mesmas amostras de horizontes, mas uma levando em consideração as falhas e a outra não.



Os traços de falhas interpretados de forma independente são projetados no ambiente tridimensional com coordenadas planas (xy) e tempo (z), de forma que estejam geograficamente relacionados com qualquer informação, seja geofísica ou geológica. A Figura 55 mostra diversos traços de falha, sem associação, e sua relação com uma seção sísmica.

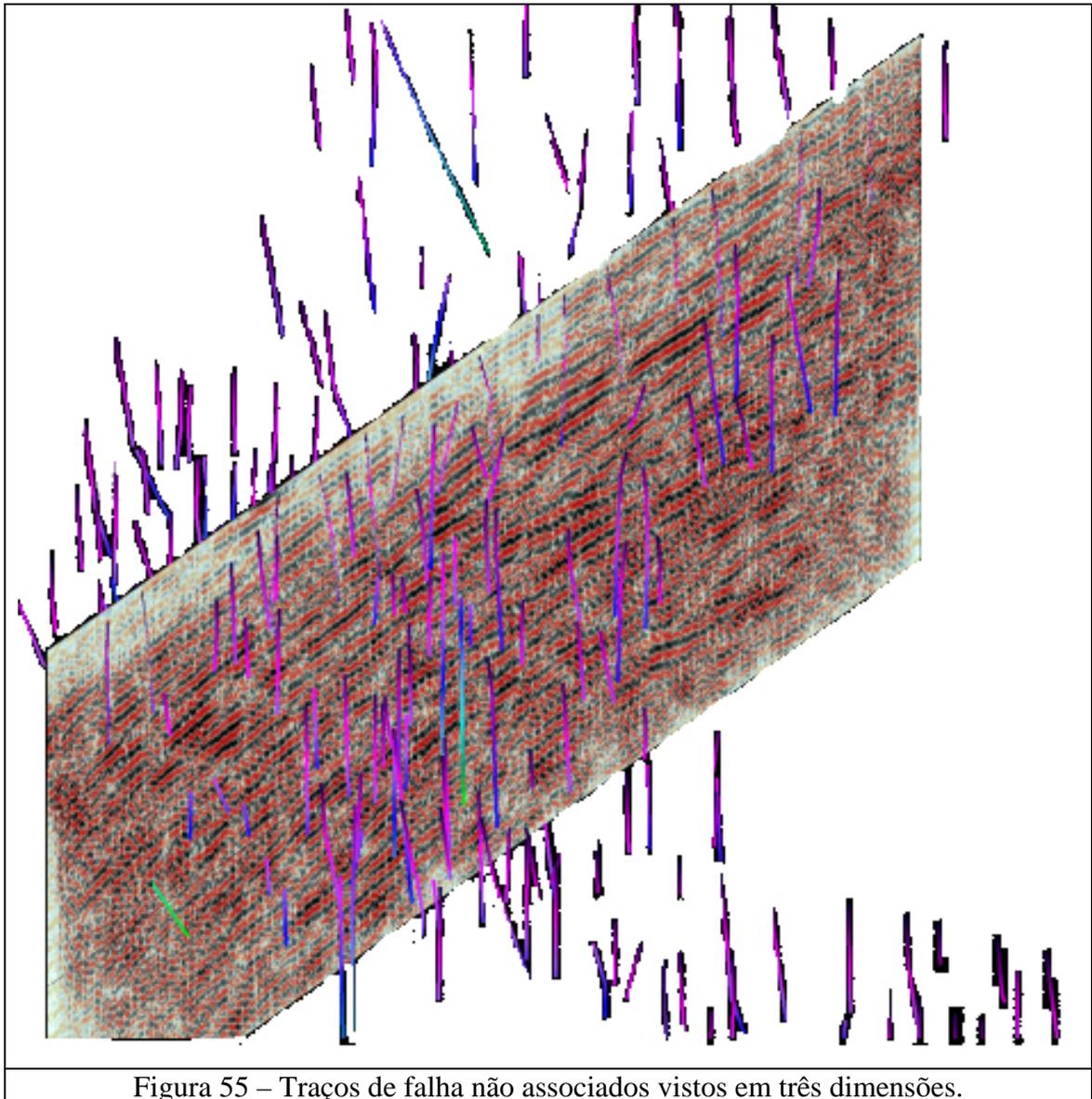


Figura 55 – Traços de falha não associados vistos em três dimensões.

Existindo correlação espacial entre os traços de falhas foi utilizada a técnica de associação entre as interpretações. O resultado consiste em planos de falhas diversos. Esta forma de organização permite que na geração de superfícies seja considerada a estruturação tectônica da área de estudo. A Figura 56 exemplifica a criação de planos de falha e sua relação com seções sísmicas.

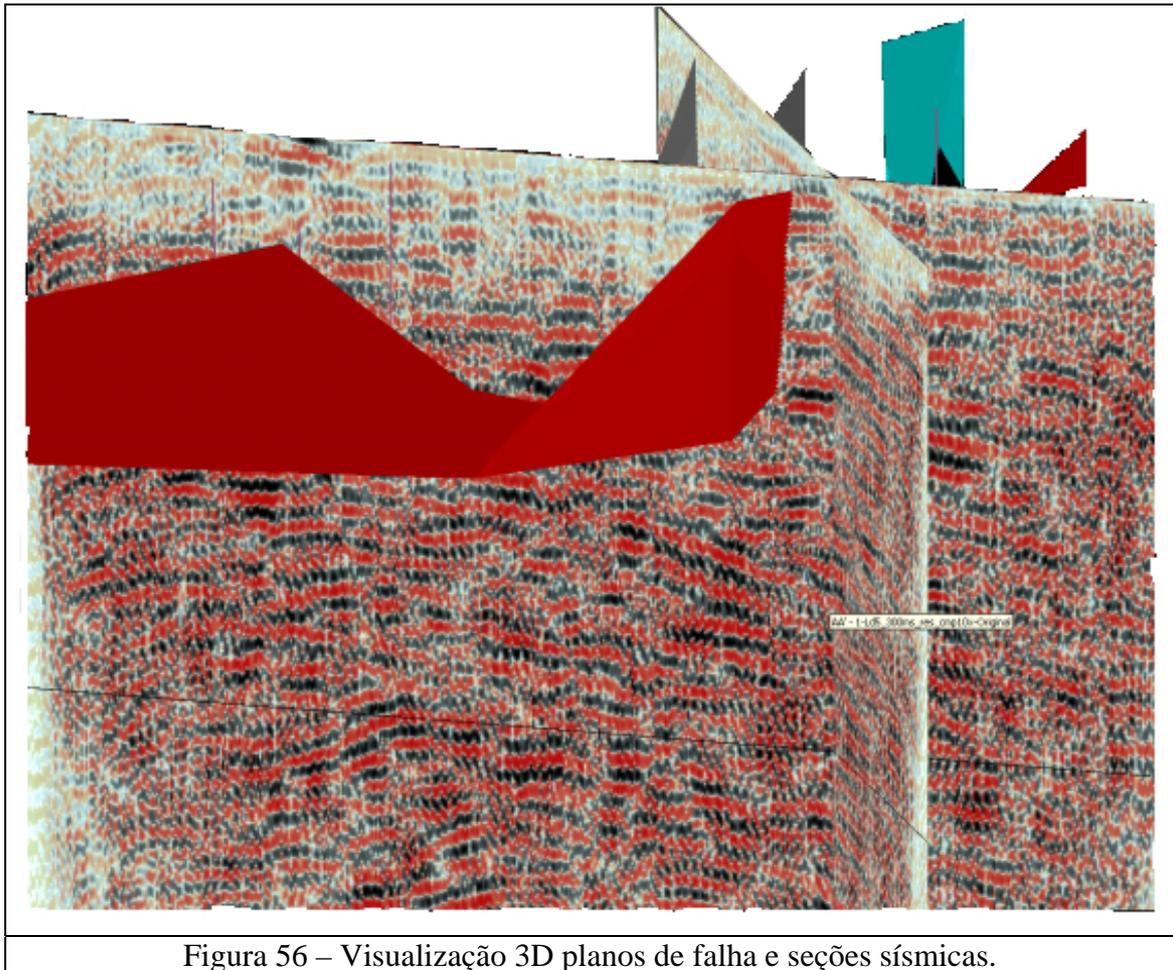


Figura 56 – Visualização 3D planos de falha e seções sísmicas.

Após a correlação de diversos traços e a transformação em planos de falha, ocorre a intersecção com diversas seções sísmicas. Cada plano de falha correlacionado é denominado, sendo atribuídos parâmetros como cor e tipo de falha. A Figura 57 mostra a relação espacial entre vários planos de falha e algumas seções sísmicas.

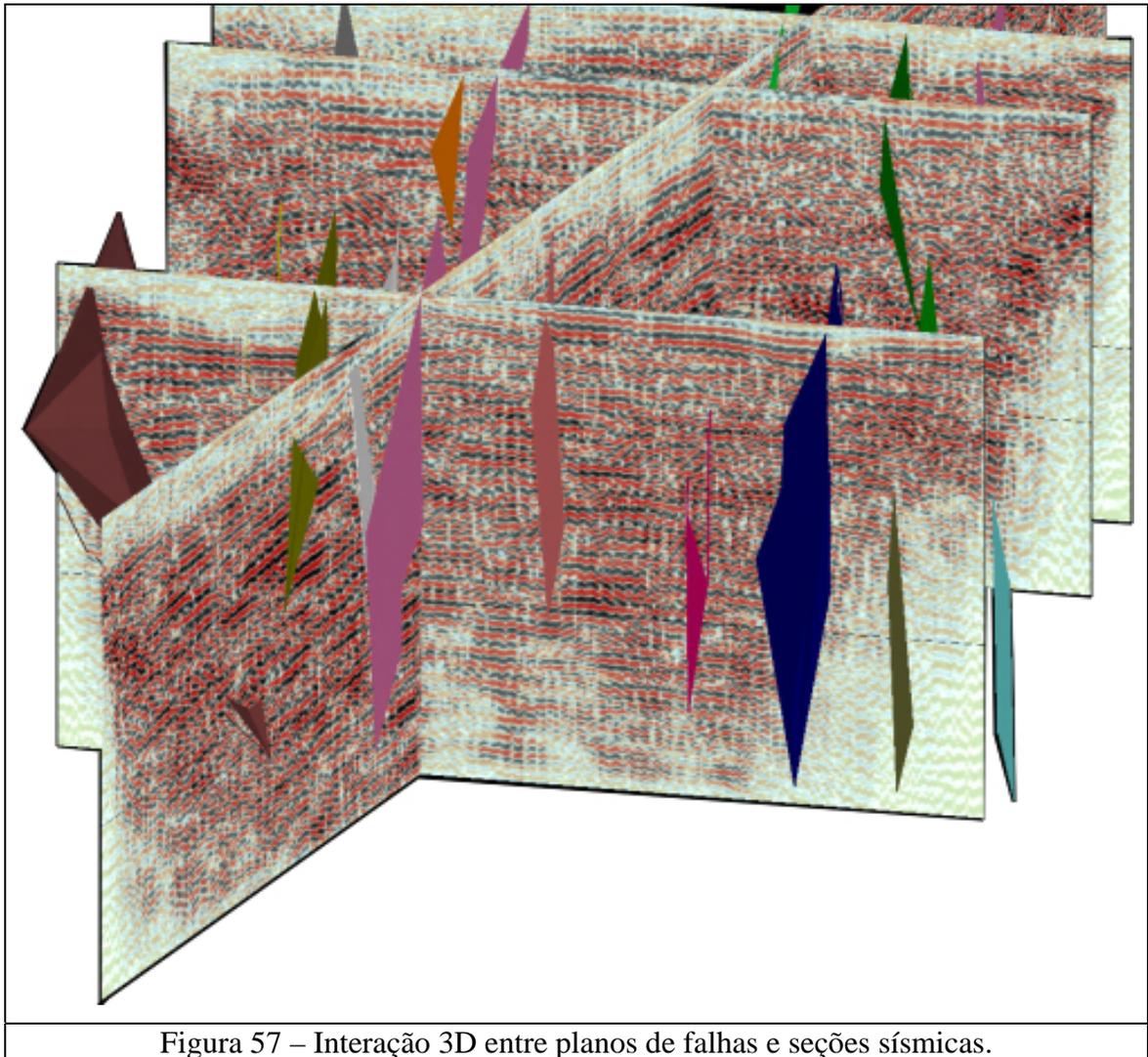


Figura 57 – Interação 3D entre planos de falhas e seções sísmicas.

Os planos de falha gerados podem ser visualizados em conjunto com seções sísmicas, superfícies e outros planos de falha. Simultaneamente, os traços em 2D foram checados com a visualização tridimensional. A Figura 58 mostra a interpretação conjunta com vários sistemas de visualização.

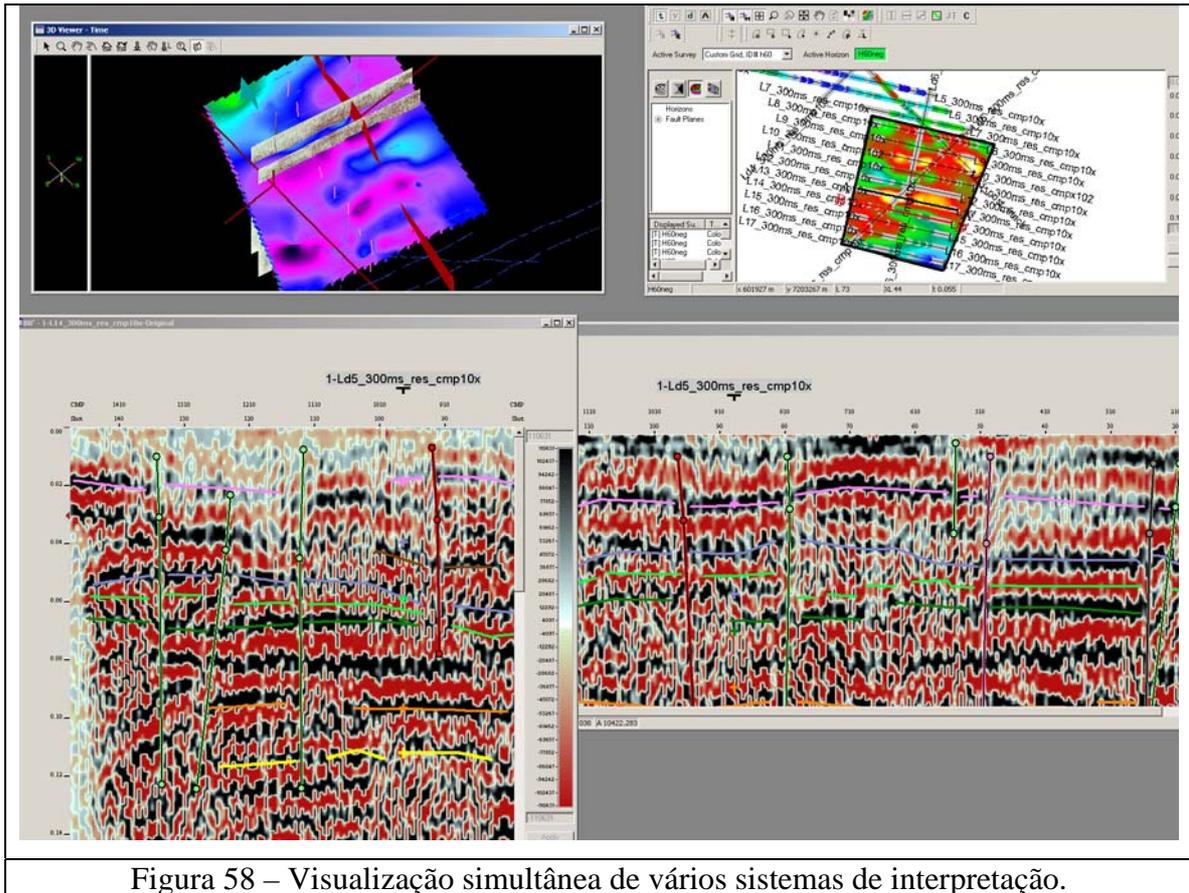


Figura 58 – Visualização simultânea de vários sistemas de interpretação.

Os principais planos de falhas interpretados podem ser visualizados em várias seções sísmicas. Um fator que ocorre no padrão dos refletores da área, próximo a zona de influência das falhas, é a inflexão ou interrupção dos mesmos. Na Figura 59 pode ser observados os refletores e suas inflexões.

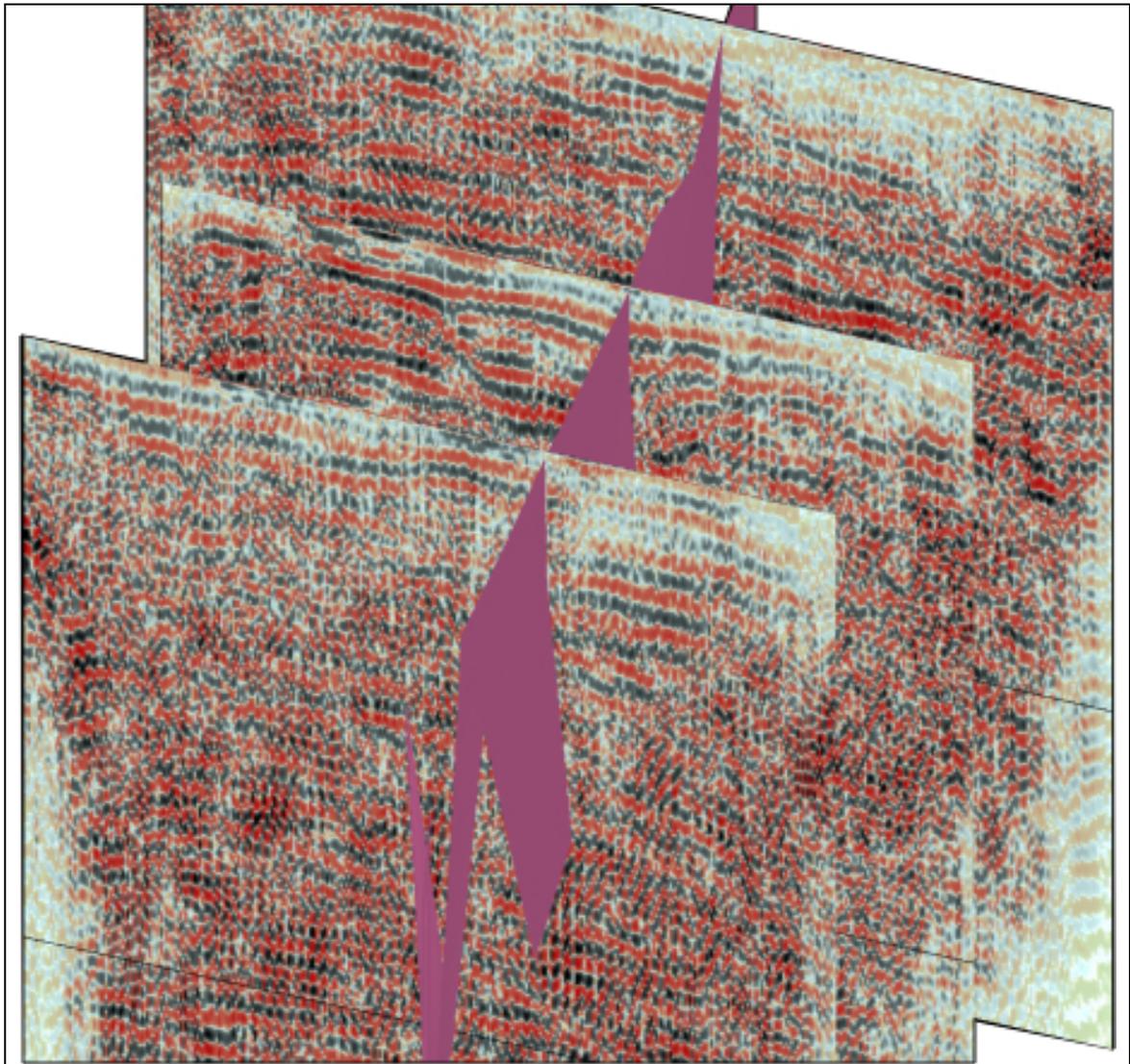
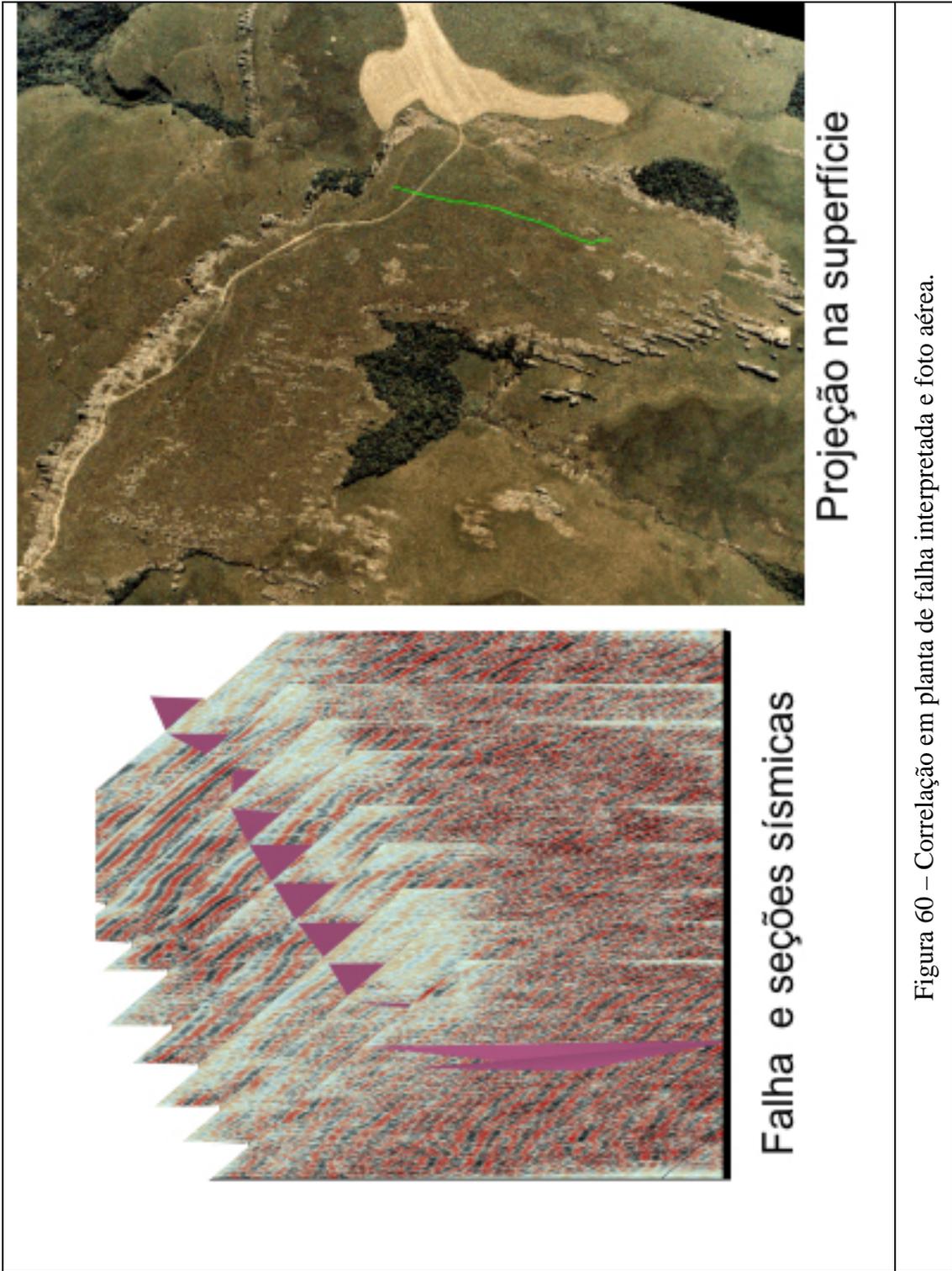


Figura 59 – Plano de falha que causa interrupção e inflexão de refletores.

Além de conferir a coerência das interpretações dos planos de falha de seção em seção, foi realizada uma comparação com a geologia de campo. O traço da falha mais visível nas seções sísmicas foi projetado para a superfície topográfica. Desta forma, com a sobreposição da foto aérea foi possível visualizar a falha interpretada na sísmica em uma informação geológica. A correlação obtida com feições do terreno foi muito boa, uma vez que as falhas interpretadas coincidiram com a direção de alinhamentos estruturais. A Figura 60 mostra este trabalho de correlação da interpretação sísmica e a foto aérea.



Foram correlacionadas com a foto aérea todas as falhas interpretadas na porção sul da área de Vila Velha. Um padrão geométrico do traçado das falhas comum no campo foi repetido na projeção das interpretações sísmicas em superfície. Este padrão consiste em diversos planos de falha, com comprimentos variados, direção

semelhante, mas descontínuos em sua maioria. A Figura 61 mostra a projeção em superfície de vários planos de falha interpretados nas seções sísmicas.

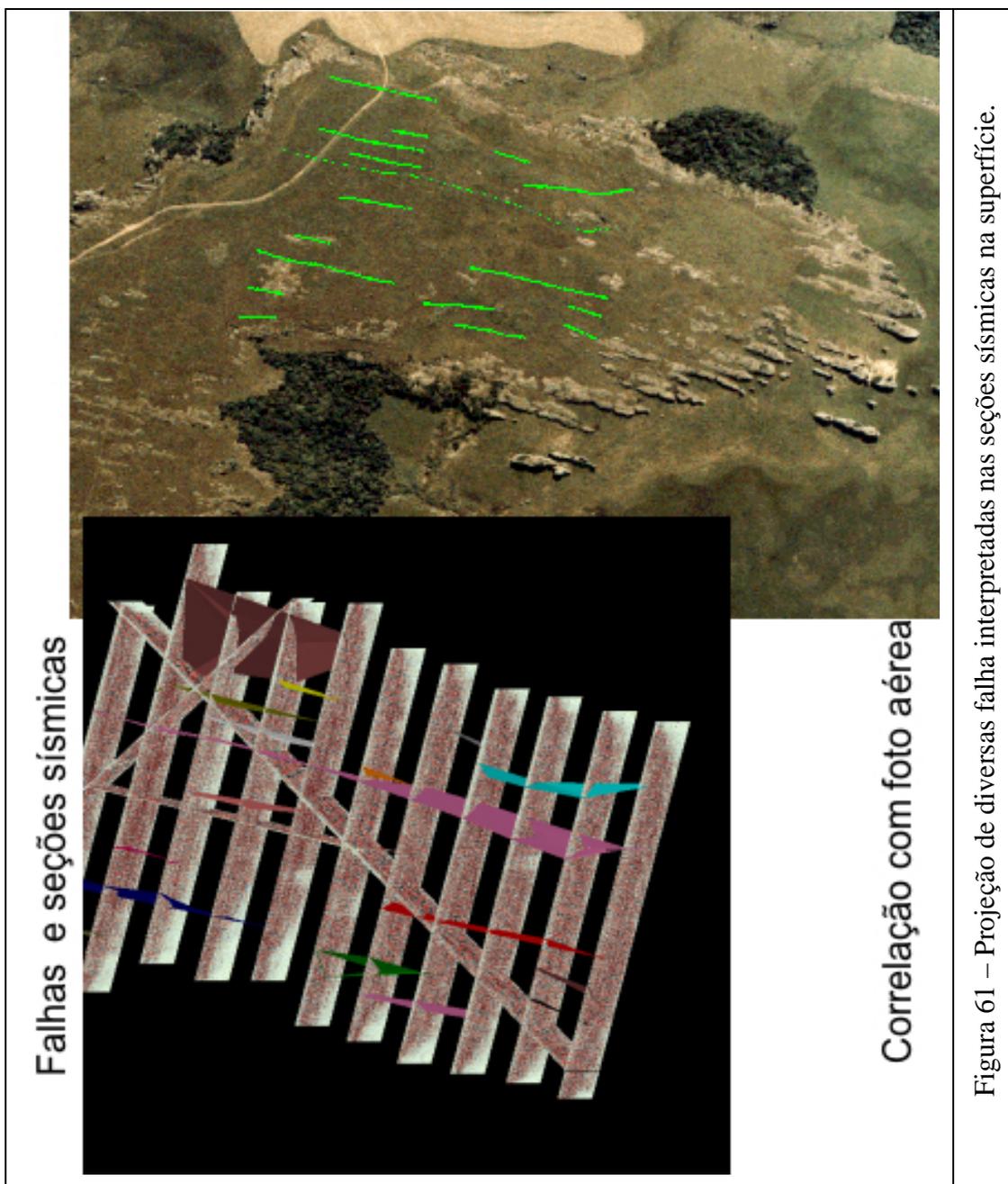
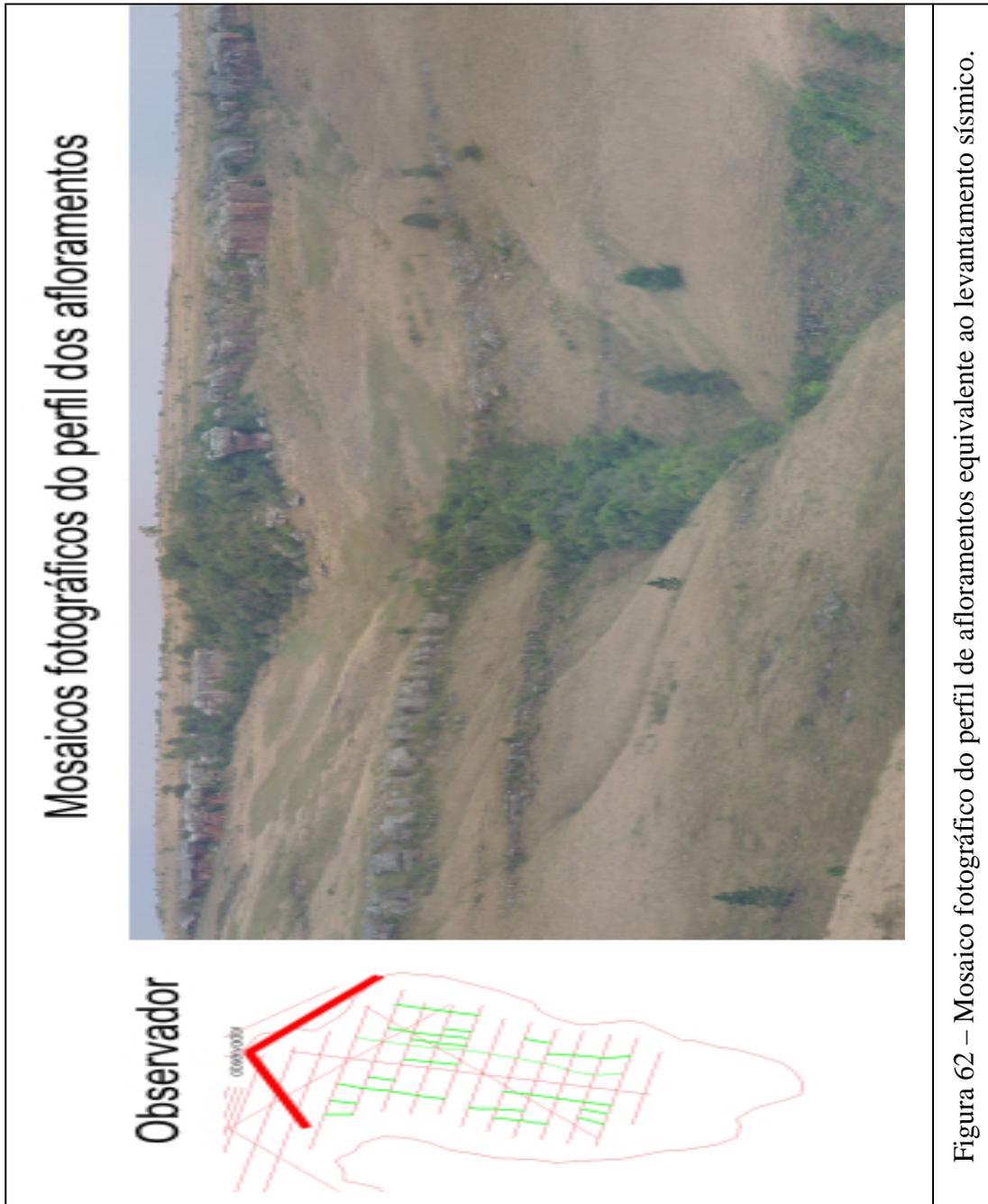


Figura 61 – Projeção de diversas falhas interpretadas nas seções sísmicas na superfície.

Estas falhas visualizadas em superfície são muito perceptíveis em um mosaico fotográfico do perfil de afloramentos equivalente a região dos levantamentos sísmicos. Os estratos sedimentares apresentam inflexão e deslocamentos claros, principalmente em direção ao vale. A Figura 62 mostra este mosaico fotográfico, equivalente a área do levantamento geofísico.



Os resultados obtidos na interpretação sísmica foram muito animadores. A partir de um refinamento no traçado das falhas e dos horizontes sísmicos pode-se chegar a um modelo tridimensional das geometrias mais adequado. De acordo com a correlação com a geologia, haverá uma certeza da qualidade do dado sísmico e do traçado das interpretações. Os algoritmos utilizados para a geração de falhas e de superfícies que considerem a influências das falhas foram testados com sucesso, mas devem ser analisadas outras possibilidades de interpolação e comparados os resultados.

VI. CONCLUSÕES

Durante a execução desta dissertação foram utilizados métodos de investigação geológica incluindo a descrição de afloramentos, interpretação de fotos aéreas e imagens de satélite, finalizando com a construção, a partir destas informações, de um mapa geológico para a área da Lapa. Durante a realização do treinamento sísmico nesta mesma área, a resposta demonstrou a necessidade de buscar outro local para completar toda as etapas propostas no projeto. Assim, os dados adquiridos na área de Vila Velha foram destinados a segunda etapa da análise de dados sísmicos, que incluiu a utilização do método de sísmica de reflexão, o processamento sísmico com técnica CMP, o carregamento de projeto sísmico em ambientes Geographix e Rockware Visual Seismic, a interpretação de horizontes e falhas nas seções sísmicas. Também serviram para completar a seqüência metodológica a modelagem numérica, um ensaio geoestatístico e a construção de um cubo sísmico preliminar com os dados de amplitude sísmica de uma pequena porção do levantamento de Vila Velha.

A investigação geológica na Lapa gerou um conhecimento das principais variações litológicas na Serra do Monge, assim como o mapeamento destas, mostradas no mapa geológico. Foram definidas cinco unidades litológicas (A até E) com base no litotipo predominante e posição estratigráfica. Foram identificados três lineamentos na área de detalhe de direções NW-SE (2 lineamentos) e NE-SW (1 lineamento) e um ao sul, entretanto fora dos limites de estudo, mais expressivo que os anteriores, de direção NE-SW. A correlação destes lineamentos com os definidos por Zalán *et al.* (1991) indicam que a direção NW-SE provavelmente está relacionada com o Lineamento do Rio Piquiri, enquanto a direção NE-SW é vinculada com a zona de falha Lancinha-Cubatão. A presença destes lineamentos e a interrupção dos platôs arenosos permitiu que área de estudo fosse dividida em três segmentos tectônicos: norte, central e sul.

Foi realizado um levantamento aerofotográfico na escala 1:10000, em ambas as áreas de estudo, porque as escalas existentes (1:25000 e 1:70000) não correspondiam ao detalhamento esperado. Este novo produto foi transformado em um modelo numérico de elevação, com o auxílio de GPS diferencial que colaborou muito com a precisão dos dados de elevação e com a digitalização das fotografias aéreas com alta resolução.

Os levantamentos sísmicos realizados em ambas áreas de estudo foram evoluindo ao longo do treinamento, com a solução de diversos problemas, como a fixação de geofones, desenho dos arranjos sísmicos e posicionamento da fonte.

No processamento dos dados sísmicos, após um treinamento inicial, foram executados exaustivos testes que resultaram em seções de boa qualidade na área de Vila Velha e ainda pouco refinadas na área da Lapa. O método sísmico demonstrou que possui limitações, principalmente quando as variações litológicas são sutis, como no caso da Lapa. Também é muito susceptível a ruídos externos que degradam o dado e prejudicam o processamento. Uma das primeiras etapas no processamento consistiu na deconvolução do sinal e no emudecimento das primeiras quebras.

Na interpretação das seções sísmicas os horizontes mais marcantes foram traçados, buscando sempre contemplar a coerência destes refletores em mais de uma linha. As falhas foram traçadas em zonas de perda de sinal ou em deslocamentos ou inflexões de refletores, sendo posteriormente correlacionadas com a foto aérea na área de Vila Velha. O padrão geométrico do traçado das falhas observado em campo foi repetido na projeção das interpretações sísmicas em superfície.

Através das fatias em tempo foi possível visualizar a continuidade de fraturas, igualmente observadas em fotos aéreas e no campo. Estes mapas foram exportados como arquivos texto e empregados na geração de um cubo sísmico preliminar.

O ensaio geoestatístico demonstrou que a técnica pode ser utilizada com dados sísmicos, mostrado pelo patamar bem definido em alguns semivariogramas, principalmente nas buscas realizadas em azimutes paralelos a direção de levantamento das linhas sísmicas. Foram gerados semivariogramas em duas e três dimensões, com dados das fatias de tempo. Os semivariogramas 2D foram realizados com 4 fatias selecionadas para abranger todo o tempo de registro sísmico. No caso dos semivariogramas 3D foram gerados dois cubos, com dados brutos e reamostrados.

A modelagem numérica foi muito menos abrangente que o desejado, devido a limitação dos programas computacionais na quantidade de amostras de entrada. Entretanto, a parte conceitual do ensaio geoestatístico mostrou a potencialidade dos programas, desde que sejam realizados ajustes na inserção dos dados. O cubo sísmico preliminar não pode ser interpretado devido a sua pequena abrangência em relação ao total da área e principalmente pela falta de um programa computacional para interpretação de volumes.

A seleção das áreas de estudo foi adequada, para o propósito da pesquisa, em termos geológicos e geofísicos. A variedade de afloramentos permitiu um entendimento considerável das geometrias estratigráficas e estruturais existentes. O método sísmico escolhido para o imageamento da anisotropia do substrato mostrou-se muito complexo, mas com excelente resolução. Os aspectos técnicos e logísticos dos levantamentos sísmicos foram assimilados ao longo do estudo. Os procedimentos práticos do processamento sísmico estão em um nível satisfatório de conhecimento. Um dos principais resultados deste trabalho consiste na possibilidade de executar, processar e interpretar dados sísmicos com bastante coerência. Os procedimentos de análise geoestatística e de modelagem computacional estão esbarrando principalmente na capacidade computacional. A correlação preliminar dos dados geológicos e geofísicos foi muito satisfatória, corroborando feições de campo com geometrias e falhas observadas em seções sísmicas.

A barreira de processamento computacional pode ser equacionada utilizando programas com capacidade adequada e com os procedimentos de computação paralela de alto desempenho seguindo os modelos de *cluster beowulf*. Estes procedimentos de processamento estão em desenvolvimento em diversas instituições de pesquisa que envolvem grande quantidades de dados e complexos procedimentos matemáticos. Desta forma, a inserção de propriedades físicas nos modelos geométricos refinados será possível, fornecendo condições para simulação de fluxo e modelagem de barreiras e condutos.

VII - REFERÊNCIAS

- Anderson, N. L. ; Hinds, R. C.; Baker, J. A. ; Rupert, G. B. 1997. Mapping of Complex Bedrock Structure Using the High-Resolution Reflection Seismic Technique. *Computer & Geosciences* Vol 23, No 10, pp 1101 – 1111.
- Baker, G. S. 1999. *Processing Near-Surface Seismic-Reflection Data: A Primer*. Society of Exploration Geophysicists. 76p.
- Bridge, J. S., 1993. Description and interpretation of fluvial deposits: a critical perspective: *Sedimentology*, v. 40, p. 801-810.
- Canuto, J.R.; Rocha-Campos, A.C.; Sato, P.E.S. 1997. The Late Paleozoic Lapa Sandstone (Itarare Subgroup): a possible tunnel-valley fill?. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*,69(2):275-276.
- d'Avila, R. S. F. 1999. *Análise de Fácies e Estratigrafia Física do Arenito Lapa, Grupo Itararé, Bacia do Paraná, Brasil*. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre.
- De Kemp, E. A. 2000. 3-D visualization of structural field data: examples from the Archean Caopatina Formation, Abitibi greenstone belt, Québec, Canada. *Computers & Geosciences*, Vol 26, No 5, pp 509-530
- Deutsch, C. V. 1999. Reservoir modeling with publicly available software. *Computer & Geosciences* volume 25, pp 355-363.
- Dourado, J. C. 1996. *Aplicação de Métodos sísmicos em Planícies aluviais - Área teste no Vale do Rio Paraíba do Sul*. Tese de Doutorado. Unesp, São Paulo.
- Dreyer, T; Scheie, A; Walderhaug, O. 1990. Minipermeameter-based study of permeability trends in channel sand bodies. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics* V74, N4, April, P359–374.
- Dubrulle, O. 2003. *Geostatistics for seismic data integration in earth models*. SEG distinguished sort courses. SEG, Tulsa, OK. 279pp.
- Elvins, T. T. 1992. A Survey of Algorithms for Volume Visualization. *Computer Graphics*, Volume 26, Number 3. pp 194-201.
- França, A. B., Potter, P. E. 1988. Estratigrafia, Ambiente Depositional e Análise de Reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). *Bol. Geoc. Petrobrás, Petrobrás*, 2(2/4):147-191

- França, A.B.; Winter, W.R.; Assine, M.L. 1996. Arenitos Lapa-Vila Velha: um modelo de trato de sistemas subaquosos canal-lobos sob influência glacial, Grupo Itararé (C-P), Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 26(1):43-56.
- Freitas, R. C. 2003. Matrix2xyz. Programa computacional de conversão de uma matriz para três colunas. Inédito.
- Geehan, G. ; Underwood, J. 1993. The use of length distributions in geological modeling. *Spec. Publs int. Ass. Sediment.* 15, pp 205-212.
- Gerhardt, A. ; Paiva, A. ; Schidt, A. E. ; Martha, L. F. ; Carvalho, P. C. ; Gattass, M. 1998. Aspects of 3-d seismic data volume rendering. *GOCAD ENSG conference*, Nancy, France, pp. 205-216.
- Gordon Jr. M. 1947. Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. *Boletim DNPM-DGM*, 1:374-385
- Hesthammer, J. ; Landro, M. ; Fossen, H. 2001. Use and abuse of seismic data in reservoir characterisation. *Marine and Petroleum Geology* 18, pp 635-655.
- Hirst, J.P.P., Blackstock, C. & Tyson, S. 1993. Stochastic modelling of fluvial sandstone bodies. *International Association of Sedimentologists special publication* 15, Blackwell, Oxford, 237-251.
- Jessell, M. 2001. Three-dimensional geological modeling of potential-field data. *Computer & Geosciences*, 27, pp 455-465.
- Kaufman, A. E. 2002. *Voxel as a Computational Representation of Geometry*. Computer Science Department, State University of New York. [Http://www.cs.sunysb.edu](http://www.cs.sunysb.edu).
- Keller, P. R. & Keller, M. M. 1993. *Visual Cues: Practical Data Visualization*. IEEE Press. ISBN 0-8186-3102-3.
- Kraft, R. P. 2004, - Dissertação de mestrado em andamento no curso de pós graduação em geologia - UFPR.
- Krum, G. L. ; Johnson, C. R. 1993. A 3-D modelling approach for providing a complex reservoir description for reservoir simulations. *Spec. Publs int Ass. Sediment* 15, pp 253-258.
- Lonardelli (2004) – Dissertação de mestrado em andamento no curso de pós graduação em geologia - UFPR.
- Maack, R. 1946. Geologia e geografia da região de Vila Velha e considerações sobre a glaciação carbonífera do Brasil. Curitiba, Arquivos do Museu Paranaense, v.5, 305p.

- Marschallinger R. 1995. A voxel visualization and analysis system based on autocad. *Computer & Geosciences* Vol 22, No 4, pp 379 – 386.
- Marschallinger R. 2001. Three-dimensional reconstruction and visualization of geological materials with IDL - examples and source code. *Computers & Geosciences*, Vol 27, No 4, pp 419-426.
- Marshall, R. Kempf, J. Dyer, S. Yen, C-C. 1990. Visualization Methods and Simulation Steering for a 3D Turbulence Model of Lake Erie. *Computer Graphics*, Volume 24, Number 2 pp 89-97.
- Milani, E.J.; Thomaz Filho, A. 2000. Sedimentary Basins of South America. In: U.G. Cordani; E.J. Milani; A. Thomaz Filho; D.A. Campos. *Tectonic Evolution of South America*, Edição Especial do 31st International Geological Congress, p. 389-449.
- Mineropar, 1997. Mapa Geológico do Estado do Paraná, escala 1:650.000.
- Oliveira, E.P.1927. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Paraná. *Monographia do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil*, Rio de Janeiro, 6, 172p.
- Paulipetro 1981. Relatório de Atividades 1979/1981, 59 pp.
- Prado, R. L.; Malagutti Filho, W. ; Dourado, J. C. 2002. The use of shallow seismic reflection technique in near surface exploration of urban sites: an evaluation in the city of São Paulo, Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 19(3). 293-302.
- Pyrzcz, M. J. & Deutsch, C. V. 2000. *The Whole Story on the Hole Effect*. Edmonton, Canada. Endereço eletrônico http://www.gaa.org.au/pdf/gaa_pyrzcz_deutsch.pdf
- Purvis, K.; Kao, J. ; Flanagan, K. ; Henderson, J. ; Duranti, D. 2002. Complex reservoir geometries in a deep water clastic sequence, Gryphon Field, UKCS: injection structures, geological modeling and reservoir simulation. *Marine and Petroleum Geology*, in press.
- Ravenne, C., R. Eschard, A. Galli, Y. Mathieu, L. Montadert, and J-L. Rudkiewicz, 1987, Heterogeneities and geometry of sedimentary bodies in a fluvio-deltaic reservoir: SPE 16752, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Proceedings, p. 115-124.
- Requicha, A. A. G. 1999. *Geometric Modeling: A first Course*. Unpublished. (<http://www-lmr.usc.edu/~requicha/>).
- Soares, P.C. 1992. *Tectônica Sinsedimentar Cíclica na Bacia do Paraná: Controles*. Tese Apresentada a UFPR, Departamento de Geologia, Curitiba/PR em Concurso para Professor Titular. 148 pp.

- Soares, P.C.; Barcellos, P.E.; Csordas, S.M. 1982. Análise, interpretação e integração de lineamentos a partir de imagens (Radar-Landsat) e suas relações com a tectônica da Bacia do Paraná. São Paulo: Relatório RT-342/82, Paulipetro. Consórcio CESP/IPT.
- Souza, C. A. S. 2003. Implementação de uma estrutura de dados para visualização científica. Dissertação de mestrado, USP, São Paulo.
- Stevenson, A. 1996. Voxel and Volumetric Representation. Unpublished. (<http://www3.telus.net/ah/voxels/voxels.htm>).
- Trzaskos-Lipski (inédito) Tese de doutorado em andamento no curso de pós graduação em geologia - UFPR.
- Vesely (inédito) – Tese de doutorado em andamento no curso de pós graduação em geologia - UFPR.
- Vesely, F. F., Assine, M. L. 2004. Sequências e tratos de sistemas deposicionais do Grupo Itararé, norte do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 34 (2): 219-230
- Weber, K. J. 1993. The use of 3-D seismic in reservoir geological modeling. *Spec. Publs int. Ass. Sediment.* 15, pp 181-188.
- Yamamoto, J. K. 2002. Sistema Geovisual. Programa computacional para análise geoestatística. USP, São Paulo.
- Yilmaz, O., 1988. *Seismic Data Processing*, 2nd Edition. S.E.G. 526 p
- Zalán, P.V.; Wolff, S.; Conceição, J.C.J.; Marques, A.; Astolfi, M.A.M.; Vieira, I.S.; Appi, V.T.; Zanotto, O.A. 1991. Bacia do Paraná. *In* Gabaglia, G.R. and Milani, E.J. (Eds.) *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, p.135-168.