

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

Edlene Pereira da Silva

INTERPRETAÇÃO SÍSMICA E MODELAMENTO
MAGNETOMÉTRICO E GRAVIMÉTRICO 2D E 3D DE CORPOS
VULCÂNICOS LOCALIZADOS NA SUB-BACIA DO PLATÔ DE
PERNAMBUCO - UMA CONTRIBUIÇÃO À SUA EVOLUÇÃO
TECTONO-ESTRATIGRÁFICA

Dissertação de Mestrado
2008

EDLENE PEREIRA DA SILVA

Geóloga, Universidade Federal de Pernambuco, 2006

INTERPRETAÇÃO SÍSMICA E MODELAMENTO MAGNETOMÉTRICO E
GRAVIMÉTRICO 2D E 3D DE CORPOS VULCÂNICOS LOCALIZADOS NA SUB-
BACIA DO PLATÔ DE PERNAMBUCO – UMA CONTRIBUIÇÃO À SUA EVOLUÇÃO
TECTONO-ESTRATIGRÁFICA

Dissertação que apresentou à Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, orientada pelos Professores Paulo de Barros Correia e Luís Otávio Aguiar Oliveira, como preenchimento parcial dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Geociências, área de concentração Geoquímica, Geofísica e Evolução Crustal, defendida e aprovada em 05/09/2008.

RECIFE, PE

2008

1. Silva, Edlene Pereira da

Interpretação sísmica e modelamento magnetométrico e gravimétrico 2D e 3D de corpos vulcânicos localizados na sub-bacia do Platô de Pernambuco : uma contribuição à sua evolução tectono-estratigráfica / Edlene Pereira da Silva . – Recife : O Autor, 2008.

100 folhas : il., fig., tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Geociências, 2008.

Inclui bibliografia

1. Sismologia – Corpos magmáticos. 2. Estratigrafia – Gravimetria – Sub-bacia Platô de Pernambuco, NE. I. Título.

**550.34
551**

**CDU (2.ed.)
CDD (22.ed.)**

**UFPE
3C - 2008 - 145**

"INTERPRETAÇÃO SÍSMICA E MODELAMENTO MAGNETOMÉTRICO E GRAVIMÉTRICO 2D E 3D DE CORPOS VULCÂNICOS LOCALIZADOS NA SUB-BACIA DO PLATÔ DE PERNAMBUCO: UMA CONTRIBUIÇÃO À SUA EVOLUÇÃO TECTONO-ESTRATIGRÁFICA".

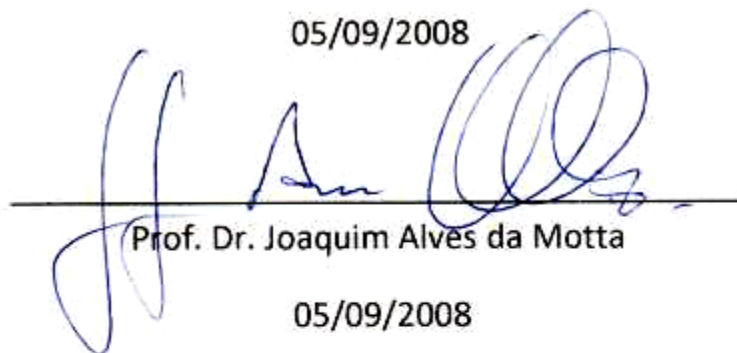
EDLENE PEREIRA DA SILVA

Aprovada:



Prof. Dr. Paulo de Barros Correia

05/09/2008



Prof. Dr. Joaquim Alves da Motta

05/09/2008



Prof. Dr. Helio Jorge Portugal Severiano Ribeiro

05/09/2008

"A vida não é fácil para ninguém. E qual é o problema? Devemos ter perseverança e confiança em nós mesmos; acreditar que possuímos um dom para algo e que esse algo deve ser realizado."

Marie Curie

A Laura, minha querida mãe
À memória de meu inesquecível pai, Evaristo

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, que sempre me deu forças e proporcionou todas as alegrias conquistadas ao lado de pessoas amigas, únicas e admiráveis, com as quais tive o privilégio de compartilhar diversos momentos de minha vida.

A minha família, em especial meus pais, grande orgulho da minha vida por serem pessoas que construíram uma família com embasamento sólido, num ambiente enriquecido de amor, trabalho e união que até hoje representa a principal fortuna que possuo. Particularmente a minha irmã Edleuza, minha tia Rosa e os demais irmãos e sobrinhos. A todos expresso minha enorme gratidão.

A Watson, meu grande companheiro pela afetuosa resignação, estímulo persistente e assistência na confecção deste relatório.

Ao grande amigo Prof. Joaquim Alves da Motta, pelos preciosos conselhos e pelo imenso e constante apoio que tornou possível a concretização deste trabalho.

Ao amigo e orientador Prof. Paulo de Barros Correia, pelas valiosas orientações e paciente auxílio no esclarecimento de dúvidas.

Ao meu co-orientador, Luís Otávio Aguiar Oliveira, pela importante contribuição com críticas e sugestões apresentadas.

Ao membro externo da Banca Examinadora, Prof. Hélio Jorge P. Severiano Ribeiro, pela satisfação do aceite ao convite e pela honra ao fazer parte da Banca.

Aos colegas Luciana e Lucas pelo companheirismo, por todo o apoio nos trabalhos, troca de informações e auxílio na montagem e impressão desta dissertação.

A todos os professores da Pós-Graduação em Geociências da UFPE, pela dedicação e transmissão de conhecimentos que contribuíram para minha formação.

Ao Prof. Antônio Jorge Garcia, da Universidade Federal de Sergipe, juntamente à sua equipe do projeto CAMURES por todo apoio e compreensão.

Ao programa de incentivo à pesquisa da CAPES, pelo subsídio financeiro que tornou possível a realização deste trabalho.

Ao programa de formação científica da UFPE pela viabilidade tecnológica, treinamentos e fornecimento dos dados para realização dos trabalhos desenvolvidos.

Ao Geólogo Edison Massato Nishimura (SE), e a todos os demais colegas e funcionários da UFPE que contribuíram de forma direta ou indireta para efetivar mais esta conquista.

Nossos sinceros agradecimentos...

APRESENTAÇÃO

Esta dissertação foi desenvolvida em cumprimento às normas estabelecidas pelo Curso de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, na área de concentração Geoquímica, Geofísica e Evolução Crustal, visando obtenção do grau de Mestre na especialidade Geofísica.

A pesquisa realizada versa sobre “Interpretação Sísmica e Modelamento Magnetométrico e Gravimétrico 2D e 3D de Corpos Vulcânicos Localizados na Sub-Bacia do Platô de Pernambuco – Uma Contribuição à sua Evolução Tectono-Estratigráfica” e os estudos foram efetuados a partir de um conjunto de dados disponibilizados pela UFPE, bem como treinamentos diversos ocorridos, dentro do âmbito científico de formação acadêmica, com interesse do Centro de Estudos Geofísicos (CEG), composto pelos Laboratórios de Geofísica Aplicada (LGA), Laboratório de Geofísica Professor Helmo Rand (LABORAND) e Laboratório de Geologia Sedimentar (LAGESE).

O trabalho consiste no estudo dirigido à prospecção de fronteiras exploratórias de hidrocarbonetos, utilizando os Métodos Geofísicos da Sísmica de Reflexão e os Métodos Potenciais Magnético e Gravimétrico, no intuito de identificar, localizar e caracterizar estruturas vulcânicas tectono-estratigraficamente relacionadas à geração e armazenamento de óleo/gás, na porção *offshore* da Bacia Pernambuco.

RESUMO

A Sub-bacia do Platô de Pernambuco é uma das últimas porções sedimentares percebidas e descritas na literatura, e certamente uma das últimas a ser formada durante a separação das placas Sul-Americana e Africana. Ela corresponde à sub-bacia *offshore* da Bacia de Pernambuco e é marcada por grande proporção de derrames vulcânicos ocasionados provavelmente por essa estar assentada sobre porção de crosta continental distendida, o que favorece a ascensão do material magmático em pulsos tectônicos relacionados à fase de abertura do Atlântico, quando se deu a formação da Bacia de Pernambuco.

Estudos Geofísicos envolvendo Magnetometria e Gravimetria posicionam estratigraficamente e estruturalmente os corpos magmáticos que ocorrem na área, sugerindo formas e proporções atingidas pelos mesmos, através de análise de mapas confeccionados e dos modelos gerados (2D e 3D).

Após criteriosa seleção das linhas sísmicas mais interessantes do ponto de vista dos corpos magmáticos, foco desta pesquisa, estas foram testadas também por modelos gravimétricos e magnéticos. Os métodos foram trabalhados separadamente, integrando-se inicialmente os resultados dos métodos potenciais e, depois, obteve-se a integração final dos três métodos estudados, a qual forneceu elementos elucidativos que conduziram a conclusões sobre o posicionamento tectono-estratigráfico desses corpos e suas caracterizações, como possível origem relacionada à pluma do manto e limites entre a crosta continental e oceânica mostrados em mapas (gravimétricos e magnéticos). Estes limites são atribuídos ao crescimento das ocorrências de injeções de intrusões magmáticas, o que é assinalado na literatura como ocorrências de SDRs (*Seaward Dipping Reflectors*).

O maior dos derrames de rochas vulcânicas observado corresponde à maior anomalia magnética da Sub-Bacia do Platô de Pernambuco, sendo também facilmente detectado pela sísmica e gravimetria. Trata-se de um corpo posicionado na região central desta sub-bacia que apresenta dimensões gigantescas e uma forte expressão batimétrica.

PALAVRAS-CHAVE: CORPOS VULCÂNICOS, MAGNETOMETRIA, GRAVIMETRIA, SÍSMICA, SUB-BACIA DO PLATÔ DE PERNAMBUCO.

ABSTRACT

The Pernambuco Plateau Sub-basin is one of the last sedimentary portions ever found and described in literature, and certainly one of the last formed when the South-American and South-African continental plates went adrift from each other. It correlates to the *offshore* sub-basin from Pernambuco Basin and is marked by vast volcanic flows probably caused by its standing over that tensioned continental crust portion, which in turn might favor magmatic material ascension in tectonic pulses, related to the opening of the Atlantic Ocean, when the Pernambuco Basin itself was formed.

Geophysical studies involving Magnetometry and Gravimetry methods pinpoint stratigraphically the magmatic bodies that occur in that area, suggesting shapes and proportions achieved by such bodies through map analysis and 2D – 3D correlation models.

After rigorous selection of the most interesting seismic lines from the viewpoint of magmatic bodies which are the target of this research, they were tested by means of gravimetric, seismic and magnetic models. The three methods were used separately, initially integrating the results of potential methods achieving their final integration afterwards, which gave elucidative elements that led to conclusions about tectonic-stratigraphic positioning and features of those bodies, such as their possible origin from a mantle plume and the limits between the continental crust and oceanic crust, shown in both gravimetric and magnetic maps. These limits are thought to come from a rise in seaward-dipping reflection occurrences.

The biggest volcanic rock flow among the ones we observed correlates to the biggest magnetic anomaly in the Pernambuco Plateau Sub-basin, also being easily detected by seismicity and gravimetry. This is a body positioned at the core region of the sub-basin, which shows huge dimensions and a strong bathymetric signature.

KEYWORDS: VOLCANIC BODIES, MAGNETOMETRY, GRAVIMETRY, SEISMICITY, PERNAMBUCO PLATEAU SUB-BASIN.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1. OBJETIVOS | 17 |
| 1.2. LOCALIZAÇÃO | 17 |
| 2. MATERIAL E MÉTODO | 19 |
| 3. ESTUDOS GEOFÍSICOS | 21 |
| 3.1. MÉTODO MAGNÉTICO OU MAGNETOMETRIA | 22 |
| 3.1.1. Levantamento Magnético e Instrumental | 27 |
| 3.2. ESTUDOS GRAVIMÉTRICOS: | 28 |
| 3.2.1. Instrumental do Método Gravimétrico | 30 |
| 3.3. MÉTODO SÍSMICO OU SÍSMICA | 33 |
| 3.3.1. Método Sísmico de Refração | 36 |
| 3.3.2. Método Sísmico de Reflexão | 37 |
| 3.3.3. Correções de Tempo | 44 |
| 3.3.4. Correções de Amplitude | 45 |
| 3.3.5. Desenvolvimento da Interpretação Sísmica..... | 47 |
| 3.3.5.1. Fácies sísmica | 47 |
| 4. CONTEXTO GEOLÓGICO | 49 |
| 5. DESENVOLVIMENTO DOS TRABALHOS | 56 |
| 5.1. MÉTODOS POTENCIAIS - PROCESSAMENTO DOS DADOS | 56 |
| 5.1.1. Gravimetria | 57 |
| 5.1.2. Magnetometria | 57 |
| 5.1.3 Confecção dos Mapas Transformados: Análise Qualitativa Gravimétrica..... | 59 |
| 5.1.4 Confecção dos Mapas Transformados – Análise Qualitativa Magnética..... | 65 |
| 5.1.5 Obtenção dos Mapas Gravimétricos para geração dos modelos | 73 |
| 5.1.6 Modelagem Gravimétrica 3D | 76 |
| 5.1.7 Modelagem Gravimétrica e Magnetométrica 2D sobre Linhas..... | 77 |

| | | |
|---------|--|----|
| 5.1.7.1 | Modelo Linha A-A' | 79 |
| 5.1.7.2 | Modelo Linha E-E' | 81 |
| 5.1.8 | Integração dos Métodos Potenciais | 82 |
| 5.2. | MÉTODO SÍSMICO | 83 |
| 5.2.1. | Rochas Vulcânicas da Sub-Bacia do Platô de Pernambuco | 84 |
| 5.2.2. | Corpos Vulcânicos <i>versus</i> Evaporitos na Sub-Bacia do Platô de Pernambuco | 88 |
| 5.2.3. | Integração dos métodos sísmico e potencial | 93 |
| 6. | CONCLUSÕES | 97 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 98 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1 – Localização geográfica da área estudada | 18 |
| Fig. 3.1 – Campo Magnético Terrestre..... | 22 |
| Fig. 3.2 – Elementos do Campo Magnético Terrestre..... | 23 |
| Fig. 3.3 – Indução magnética: Comportamento dos diferentes materiais diante de um campo externo | 24 |
| Fig. 3.4 – Materiais Ferromagnéticos..... | 25 |
| Fig. 3.5 – Materiais Antiferromagnéticos | 25 |
| Fig. 3.6 – Magnetômetro de saturação (FLUX-GATE) | 27 |
| Fig. 3.7 – Magnetômetro de precessão nuclear ou precessão de prótons..... | 27 |
| Fig. 3.8 – Magnetômetro de bombeamento óptico..... | 28 |
| Fig. 3.9 – Magnetômetro de supercondutividade..... | 28 |
| Fig. 3.10 – Força de atração e centrífuga sobre a Terra esférica | 29 |
| Fig. 3.11 Variação da gravidade com a latitude em uma Terra simplificada..... | 29 |
| Fig. 3.12 – Forma da Terra, segundo King-Hele,1974..... | 30 |
| Fig. 3.13 – Gravímetro LaCoste & Römberg modelo G | 31 |
| Fig. 3.14 – Gravímetro LaCoste & Römberg modelo H | 31 |
| Fig. 3.15 – Gravímetro Shipboard Sistema KSS31M com receptor GPS | 31 |
| Fig. 3.16 – Gravímetro Shipboard usado em medidas de superfície..... | 31 |
| Fig. 3.17 – Principais tipos de propagação de vibrações sísmicas | 34 |
| Fig. 3.18 – Representação esquemática do Período (T) e da Amplitude (A) de uma onda..... | 35 |
| Fig. 3.19 – Refração sísmica, quando o meio abaixo da interface possui maior velocidade. ... | 36 |
| Fig. 3.20 – Ilustração dos prováveis locais onde se encontram hidrocarbonetos..... | 38 |
| Fig. 3.21 – Representação esquemática da Lei de Snell aplicada à Refração e Reflexão de ondas P e S, em dois meios elásticos distintos (A e B), homogêneos e isotrópicos..... | 39 |
| Fig. 3.22 – Disposição da fonte e dos grupos de receptores para o levantamento de uma linha terrestre utilizando-se a técnica do Ponto de Reflexão Comum em Profundidade (CDP) | 40 |
| Fig. 3.23 – Modelo básico para o registro de reflexão sísmica | 41 |
| Fig. 3.24 – Técnica de Registro CDP | 42 |

| | |
|--|----|
| Fig. 3.25 – Trajetória dos raios sísmicos de traços CDP, para o caso de refletores não horizontais | 43 |
| Fig. 3.26 – Variações na topografia que mostram a necessidade das correções estáticas | 44 |
| Fig. 3.27 – Distorções do sinal no tempo mostrando a necessidade das correções dinâmicas. | 45 |
| Fig. 3.28 – Anticlinal propício ao aparecimento de uma anomalia bright spot..... | 46 |
| Fig. 3.29 – Bright spot sintético, correspondente a uma estrutura hipotética contendo gás e óleo | 46 |
| Fig. 4.1a – Mapa mostrando o Arcabouço Estrutural do nordeste do Brasil..... | 51 |
| Fig. 4.1b – Detalhe da figura anterior destacando a Sub-Bacia do Platô de Pernambuco | 51 |
| Fig. 4.2 – Interpretação sísmica e modelagem gravimétrica de uma porção do Platô de Pernambuco. | 52 |
| Fig. 4.3– Coluna Estratigráfica proposta para a região do Platô de Pernambuco. | 53 |
| Fig. 4.4 – Esquema interpretativo da sismo-estratigrafia do Platô de Pernambuco na seção sísmica AB..... | 55 |
| Fig. 5.1 – Mapas de Anomalias Aeromagnéticas: A - parte superior, B - parte inferior e C – Junção de A e B. | 58 |
| Fig. 5.2 – Mapa de Anomalias Bouguer - Mapas “Base” das análises Gravimétricas..... | 59 |
| Fig. 5.3 – Mapa Gravimétrico Regional obtido a partir do Mapa Bouguer | 61 |
| Fig. 5.4 - Mapa Gravimétrico Residual obtidos a partir do mapa de Campo Bouguer..... | 62 |
| Fig. 5.5 - Mapa Gravimétrico de Sinal Analítico | 63 |
| Fig. 5.6 - Mapa Gravimétrico de Continuação para Cima..... | 64 |
| Fig. 5.7 – Mapa de Campo Magnético Anômalo - CMA | 65 |
| Fig. 5.8 – Mapa de Campo Magnético Anômalo Reduzido ao Pólo..... | 66 |
| Fig. 5.9 – Mapa Regional Magnético com as feições mais regionais. | 67 |
| Fig. 5.10 – Mapa Magnético Residual..... | 68 |
| Fig. 5.11 – Mapa Magnético de Primeira Derivada Vertical destacando as vulcânicas observadas. | 69 |
| Fig. 5.12 – Mapa de Sinal Analítico mostrando as estruturas observadas. | 71 |
| Fig. 5.13 – Mapa Magnético de Primeira Derivada Vertical destacando todas as feições observadas. | 72 |
| Fig. 5.14 – Mapa de profundidade da Raiz..... | 74 |
| Fig. 5.15 – Mapa Gravimétrico Regional com compensação isostática..... | 75 |
| Fig. 5.16 – Mapa Gravimétrico Residual Isostático. | 76 |
| Fig. 5.17 – Modelo 3D do embasamento. | 77 |

| | |
|--|----|
| Fig. 5.18 – Mapa Bouguer utilizado para a modelagem 2D..... | 78 |
| Fig. 5.19 – Mapa de Campo Magnético Anômalo utilizado para a modelagem 2D, mostrando a localização dos perfis A-A' e E-E' modelados..... | 78 |
| Fig. 5.20 – Modelos Gravimétrico e Magnético gerados para a linha A-A'..... | 80 |
| Fig. 5.21 – Modelo gravimétrico e magnetométrico da linha E-E'..... | 81 |
| Fig. 5.22 – Mapa de Campo Magnético Anômalo com a posição das linhas descritas..... | 83 |
| Fig. 5.23 – Mapa de Primeira Derivada, destacando as rochas vulcânicas observadas. | 84 |
| Fig. 5.24 – Linha sísmica dip A-A', depois e antes de ser interpretada. | 85 |
| Fig. 5.25 – Detalhe da linha sísmica A-A' modelada mostrando o registro do maior corpo de rochas vulcânicas encontrado sobre a região do Platô de Pernambuco..... | 86 |
| Fig. 5.26 - Mapa Magnético do Sinal Analítico indicando a possível migração de uma pluma que ocorreu na bacia, com os principais centros de vulcanismo numerados desde a região do Cabo de Santo Agostinho. | 87 |
| Fig. 5.27 – Linha B-B', destacando a presença de um grande corpo vulcânico e de diápiros de sal..... | 89 |
| Fig. 5.28 – Linha strike C-C' que cruza a região norte da Bacia de Pernambuco..... | 90 |
| Fig. 5.29 – Detalhe da parte mediana da linha C-C' mostrando ao centro uma grande estrutura isolada, com forma de diápiro alongado, acima da camada de sal. | 91 |
| Fig. 5.30 – Detalhe ao norte da Linha C-C' mostrando a ocorrência de rochas intrusivas entre camadas sedimentares, chegando a um vulcão emergente do assoalho oceânico, a partir da intrusão. | 92 |
| Fig. 5.31 – Linha D-D' exibindo em detalhe um possível derrame/intrusão de rochas magmáticas na região norte do Platô..... | 93 |
| Fig. 5.32 – Modelos gravimétrico, magnético e sísmico gerados para a linha A-A', mostrando ajustes obtidos. | 94 |
| Fig. 5.33 – Modelo gravimétrico, magnetométrico com a interpretação sísmica da linha E-E'. | 95 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 - Valores de susceptibilidade magnética adotados. | 26 |
|---|----|

2. INTRODUÇÃO

A Bacia de Pernambuco abrange uma fração da margem continental do nordeste do Brasil posicionada no estado de Pernambuco. Caracteristicamente, ela é uma das três bacias marginais brasileiras que possui uma região de platô, que é uma espécie de prolongamento da região de talude, cuja formação ocorreu durante a fase de rifte de formação da bacia.

O conhecimento estratigráfico da Bacia de Pernambuco provém praticamente de estudos de superfície realizados em sua porção *onshore*, com poucos trabalhos publicados em relação às demais Bacias Marginais Brasileiras. As informações são ainda mais escassas em sua porção *offshore*, onde temos a Sub-Bacia do Platô de Pernambuco, área foco de estudo, que se encontra numa fase embrionária de conhecimento com registro de poucos trabalhos de cunho geofísico fornecendo todo o conhecimento geológico-geofísico da área.

As poucas informações de subsuperfície foram obtidas pela PETROBRÁS através da perfuração de dois poços (Feijó, 1994): o primeiro (Poço 2-I-1-PE) perfurado em 1960, na Ilha de Itamaracá o qual atingiu o embasamento a apenas 400m de profundidade, desestimulando o interesse exploratório da região e o segundo (Poço 2-CPE-1-PE) na praia do Cupe que penetrou 2.980m de seção sedimentar sem atingir ao embasamento, motivando assim estudos voltados a admissível possibilidade de ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Pernambuco.

Através de estudos geofísicos serão aqui analisadas as ocorrências de corpos vulcânicos formados ao longo da evolução tectono-sedimentar da bacia, com ênfase àqueles desenvolvidos em meio ao registro sedimentar ocorrido na Sub-bacia do Platô de Pernambuco, avaliando suas relações com outros corpos também presentes na Bacia de Pernambuco além de apresentar sua contribuição como estruturas desencadeadoras de possíveis trapas estruturais acumuladoras de óleo e gás.

2.1. OBJETIVOS

Objetivo geral: Identificar e isolar o efeito causado pela presença de corpos magmáticos básicos que ocorrem disseminados em toda a Sub-bacia do Platô de Pernambuco, ocasionando sinais sísmicos mascarados, relacionados a esses corpos. Assim, os métodos potenciais, que não sofrem esse tipo de influência no seu sinal de resposta foram utilizados na solução deste problema.

Objetivo específico: Posicionar estratigraficamente e estruturalmente corpos magmáticos na Sub-Bacia do Platô de Pernambuco, através de estudos interativos envolvendo a interpretação de dados aeromagnetométricos, gravimétricos e de sísmica de reflexão.

2.2. LOCALIZAÇÃO

A área de estudo encontra-se posicionada na Sub-Bacia do Platô de Pernambuco, a qual está localizada na porção *offshore* da Bacia de Pernambuco, geograficamente situada no Nordeste do Brasil e limitada entre os paralelos 9106300 mN e 8970000 mN (Datum ARATU, projeção UTM, zona 25S), conforme apresentada na Fig. 1.1 a seguir.

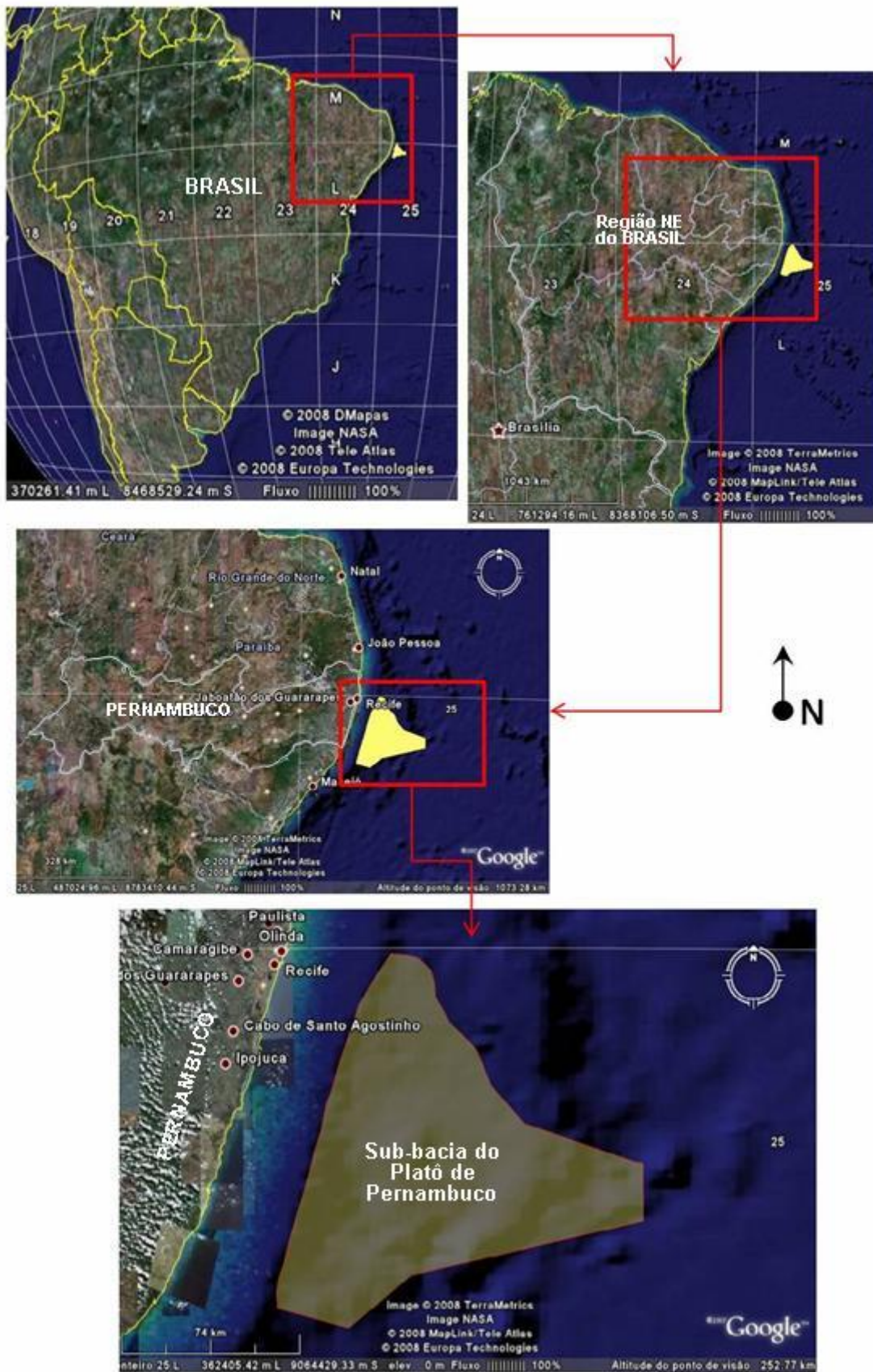


Fig. 1.1 - Localização geográfica da área estudada (em amarelo), mostrada em zoom gradativo (Fonte: Google Earth).

3. MATERIAL E MÉTODO

O trabalho desenvolvido até a conclusão desta dissertação envolveu basicamente etapas de treinamento em programas utilizados atualmente na indústria do petróleo, voltados a interpretações magnéticas e gravimétricas (escala regional) e sísmicas (escala de detalhe), seguidas de análise-interpretativa na área alvo em estudo nesta dissertação, a qual se encontra incluída no projeto científico desenvolvido pela UFPE.

No que se refere aos Métodos Potenciais, a equipe, composta por professores e alunos da UFPE, realizou parte do processamento e toda interpretação dos dados recebidos da área compreendida entre a plataforma sul da Bacia da Paraíba e a plataforma norte da Bacia de Alagoas. Esses dados já estavam no formato adequado para utilização e processamento no programa *OASIS MONTAJ* e, a partir dos mesmos, foram gerados mapas e modelos da área, os quais possibilitam interpretações do comportamento desta porção da Bacia de Pernambuco.

Inserida neste contexto foi, especificamente neste trabalho, realizada a interpretação (qualitativa e quantitativa) do método gravimétrico e magnético dos dados da Sub-bacia do Platô de Pernambuco resultando no mapeamento e modelamento de rochas vulcânicas da área.

Em relação ao Método Sísmico de Reflexão coube à equipe formada por alunos da UFPE, a tarefa de desenvolver as interpretações sismo-estratigráficas das linhas sísmicas recebidas. Foram fornecidas 251 linhas sísmicas, obtidas em 11 levantamentos realizados por diferentes equipes distribuídas ao longo do trecho compreendido entre a plataforma sul da Bacia da Paraíba, até a plataforma norte da Bacia de Alagoas, mesma área de abrangência dos Métodos Potenciais. As linhas foram, uma a uma, interpretadas pelos membros da equipe de sismo-estratigrafia, de forma a direcionar ao foco de interesse para formação acadêmica de cada membro da equipe. Foram, também, carregados onze poços para auxílio nos estudos sísmicos. Para interpretação das linhas sísmicas foi utilizado o programa *Seiswork* da LANDMARK, possibilitando identificação de refletores de vulcânicas presentes na região.

Inicialmente foi realizada a adequação de um local para o desenvolvimento dos trabalhos em uma sala locada no Departamento de Geologia (Centro de Tecnologia e Geociências - CTG) da UFPE. Paralelamente e/ou seguidamente a essa montagem, foram realizados cursos, alguns deles em forma de disciplina do mestrado, a fim de possibilitar

treinamentos (teóricos) nas interpretações sísmica, magnética e gravimétrica e finalmente prosseguir-se a geração dos mapas e modelos, que permitiram a interpretação dos dados em cada método, e posterior integração dos resultados, fornecendo assim resultados de um estudo geofísico mais completo e possibilitando a elaboração desta dissertação.

Resumidamente, os estudos dos Métodos Potenciais foram desenvolvidos da seguinte forma: Inicialmente foi realizado um pré-processamento para análise da qualidade dos dados, houve uma seleção de arquivos de mar e terra, os quais foram posteriormente modificados, aplicando o nivelamento dos mesmos através da técnica de Sutura, o que resultou na geração dos Mapas Gravimétrico Bouguer e Magnético de Campo Total.

Posteriormente, foram realizadas as filtragens dos Mapas Gravimétrico Bouguer e Magnético de Campo Total que geraram diversos mapas, nos quais foram realizadas análises qualitativas, com interpretações das principais feições e estruturas encontrada não só na Sub-Bacia do Platô, mas em toda a área de estudo.

A seguir, os trabalhos foram direcionados para a elaboração dos modelos; Através da modelagem gravimétrica 3D foi obtido o modelo da superfície do embasamento. A partir deste modelo, foram extraídas seções gravimétricas 2D que foram modeladas integradamente com seções magnéticas extraídas nos mesmos locais. Ao final, realizou-se a integração entre os métodos potenciais.

Já no Método Sísmico foram desenvolvidos estudos interpretativos de horizontes vulcânicos em linhas sísmicas, rastreando apenas refletores correspondentes aos corpos ígneos ocorrentes na área estudada, como já comentado. Essa interpretação teve por base a observação de geometrias características dos corpos ígneos, onde foram interpretados em seções sísmicas, elementos estruturais internos a estes corpos e também aqueles presentes nas rochas circundantes e/ou nas encaixantes. A interpretação sísmica foi testada através de modelagens 2D e 3D nas anomalias gravimétricas e magnéticas dos respectivos corpos vulcânicos.

Finalmente, foi realizada uma interpretação conjunta dos métodos estudados, onde houve uma integração das análises dos dados magnetométricos, gravimétricos e sísmicos possibilitando uma caracterização dos corpos ígneos estudados, quanto às suas formas, posicionamentos tectono-estratigráfico e importância, negativa ou positiva, na geração de estruturas acumuladoras de petróleo e/ou gás, na Sub-Bacia do Platô de Pernambuco.

4. ESTUDOS GEOFÍSICOS

A prospecção geofísica baseia-se na investigação de feições da subsuperfície, de dimensões variadas, a partir da observação de seus efeitos nos campos físicos e na propagação de ondas (Luiz & Silva, 1995). Este trabalho foi desenvolvido utilizando os Métodos Potenciais Magnético e Gravimétrico (correção, processamento, modelagem e interpretação) e o Método Sísmico de Reflexão (interpretação), os quais estão respectivamente associados às propriedades de susceptibilidade magnética, densidade e elasticidade da matéria.

Na prospecção de petróleo e gás torna-se importante cartografar o contorno estrutural do embasamento de bacias sedimentares, o qual pode influenciar na sedimentação que o recobre por proporcionar a formação de armadilhas estruturais, facilmente detectáveis por métodos geofísicos, como os aqui escolhidos para investigação da área de estudo.

Os Métodos Geofísicos Magnetométrico e Gravimétrico apresentam-se como boas ferramentas, por indicarem alterações ocorridas no topo do embasamento relacionadas a estruturas (dobras e falhas) que deslocam os sedimentos depositados pós-deformação, podendo ocasionar a presença de armadilhas favoráveis à presença de petróleo e gás. Isto se torna possível devido às rochas sedimentares apresentarem, em geral, densidade e susceptibilidade muito menores que as rochas do embasamento cristalino. Na identificação de camadas arqueadas por presença de domos de sal, esses métodos também se mostram bastante eficiente; na Gravimetria verifica-se um contraste de densidade devido à baixa densidade dessa litologia e na magnetometria esses corpos apresentam, em geral, susceptibilidade menor que a da rocha encaixante.

O Método Sísmico é uma técnica de estudo em detalhe especialmente útil na determinação da espessura de pacotes sedimentares, devido às velocidades das ondas elásticas serem maiores no embasamento cristalino e contrastarem consideravelmente entre alguns tipos de sedimento. Neste método os refletores são mapeados inclusive dentro do próprio sedimento que forma a bacia, bastando isso que haja impedância acústica no meio.

4.1. MÉTODO MAGNÉTICO OU MAGNETOMETRIA

É um dos métodos geofísicos mais antigos e de mais baixo custo empregado na busca de bens minerais. Consiste basicamente no estudo do campo magnético da Terra, onde se analisa o registro de processos e fenômenos antigos ocorridos com o campo magnético terrestre, na época em que as rochas se formaram.

Várias teorias foram descritas para tentar explicar a origem e o comportamento do campo magnético observado na superfície da Terra ou nas suas proximidades e, em geral, os estudos apontam que o campo tem fontes predominantemente internas. É sugerido que ele pode ser aproximado pelo campo produzido por um momento de dipolo simples, localizado no centro da Terra (Fig. 3.1), fazendo um ângulo de cerca de $11,5^\circ$ com o eixo de rotação da Terra (Teixeira et al., 2001). A Fig. 3.1 abaixo, ilustra as variações de F (campo total), Z (campo vertical), H (campo horizontal) e i (inclinação magnética) com a latitude magnética.

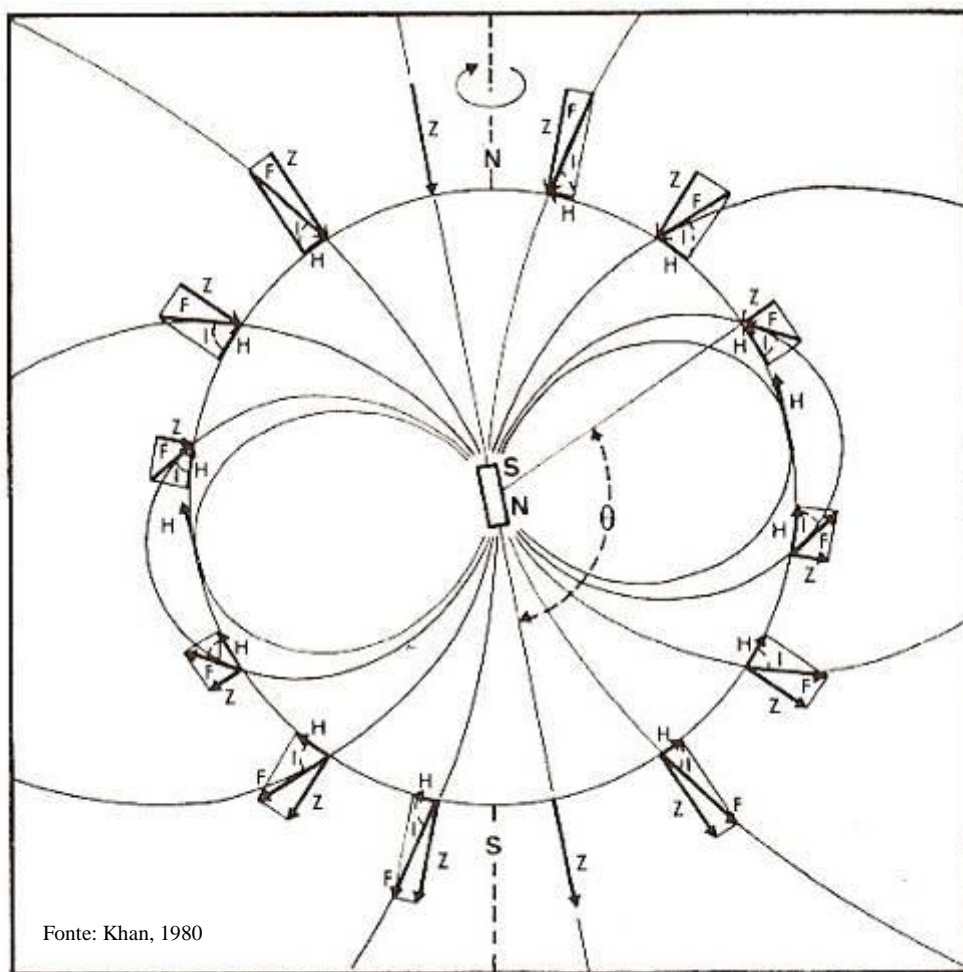
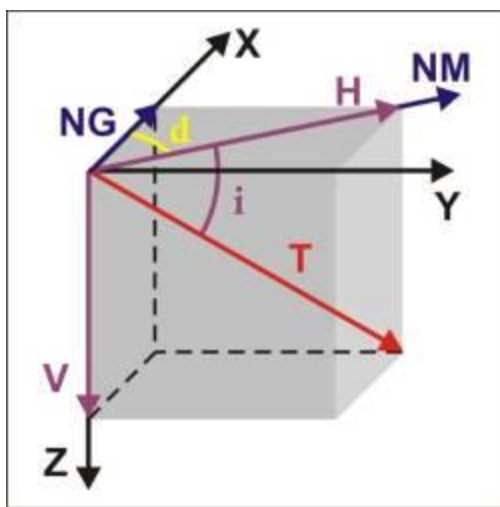


Fig. 3.1 - Campo Magnético Terrestre, como consequência do modelo de um dipolo simples.

A direção e intensidade do campo magnético variam consideravelmente de um ponto a outro da superfície terrestre e, para um ponto qualquer numa latitude magnética intermediária no hemisfério norte, ele é caracterizado pelos elementos mostrados abaixo, na Fig. 3.2.

A unidade utilizada para o campo magnético terrestre na prospecção é o gama (γ), devido às anomalias magnéticas apresentarem pequenas amplitudes, quando comparadas com valores de campo magnético obtidos em laboratório ou nas indústrias. Esta comparação faz com que o campo magnético terrestre seja considerado de intensidade fraca. O gama está relacionado com outras unidades obedecendo a seguinte equivalência: $1\gamma = 1 \text{ nanoTesla (nT)} = 10^{-5} \text{ Oersted (Oe)}$.



Onde:

| | |
|-----------|---|
| NG | Norte Geográfico |
| NM | Norte Magnético |
| T | Intensidade Total do Campo magnético |
| H | Componente Horizontal do Campo magnético |
| V | Componente Vertical do Campo magnético |
| d | Declinação magnética = ângulo formado entre o NG e o NM |
| i | Inclinação da Componente Total do Campo Magnético - é o ângulo de inclinação formado entre T e H. |

Fig. 3.2 - Elementos do Campo Magnético Terrestre.

Algumas importantes observações podem ser feitas, relativamente ao campo magnético terrestre. Primeiramente, o campo está sofrendo uma migração para oeste, com a evolução do tempo, conforme constatado em alguns estudos de anomalias, como por exemplo, as anomalias do AMAS (Anomalia Magnética do Atlântico Sul).

Outra importante observação está relacionada às variações sofridas pelo campo magnético terrestre, pois seus elementos variam de forma lenta a rápida e irregular. Essas mudanças, de causas variáveis, são decompostas em: variações seculares, variações diurnas (solar e lunar), e tempestades magnéticas.

As variações seculares, também chamadas de lentas, são atribuídas a movimentos internos da Terra e supostamente estariam associadas à distribuição interna de tensões mecânicas, às correntes de convecção e à distribuição interna do gradiente térmico (Dobrin, 1976). Já as variações diurnas, comumente denominadas variações rápidas, podem ser

decompostas em componentes que apresentam periodicidade solar e lunar, relacionadas a fontes externas à Terra, provocadas respectivamente por perturbações solares e pela interação gravitacional da Lua com a ionosfera (Dobrin, 1976). Essas variações ocorrem em função da latitude do local e do tempo, com um dia magneticamente calmo apresentando variações de intensidade média na ordem de 30nT, e um dia conturbado, acima de 100nT.

Finalmente, podem ser observáveis ao longo de levantamentos magnéticos as tempestades magnéticas, que são perturbações bruscas e de grandes proporções no campo magnético, as quais durante as tormentas podem produzir variações superiores a 1000 nT, com duração aleatória, variando de segundos a dias. Estas estão correlacionadas a atividades de manchas solares, e em regiões polares, são freqüentemente associadas a auroras (boreais e austrais).

A Magnetometria pode fornecer informações sobre a subsuperfície a partir de anomalias que revelam a presença e/ou concentração de rochas contendo minerais com forte susceptibilidade magnética, como magnetita, ilmenita e pirrotita, os quais produzem distorções locais no campo magnético terrestre.

As rochas são magnetizadas em função da quantidade, do tamanho e do arranjo dos materiais (minerais magnéticos) presentes, resultando numa susceptibilidade magnética (K) característica. De acordo com o comportamento magnético as substâncias, quando colocadas sobre a influência de um campo magnético externo, podem ser classificadas em (Fig. 3.3): materiais não magnéticos (quando apresentam $K=0$), materiais paramagnéticos (cujo $K>0$) e materiais diamagnéticos (apresentam $K<0$).

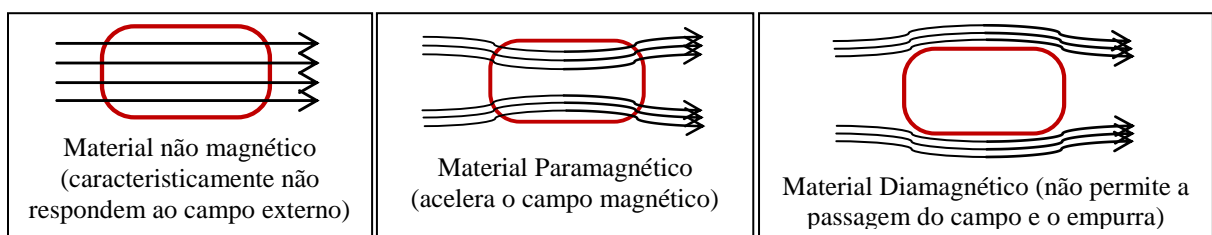


Fig. 3.3 :Indução magnética: Comportamento dos diferentes materiais diante de um campo externo.

Os materiais paramagnéticos são substâncias que apresentam em sua estrutura atômica um desbalanceamento elétrico, devido a apresentarem elétrons desemparelhados (spins) que, quando submetidos a um campo magnético, se alinham na mesma direção do campo aplicado sofrendo pouca indução magnética (ex. de minerais: biotita, hornblenda, diopsídio, afrisita). Já os materiais diamagnéticos apresentam níveis eletrônicos preenchidos por elétrons (spins)

emparelhados, não permitindo, portanto, a passagem do campo magnético, ocorrendo então repulsão (ex. de minerais: calcita, feldspato, quartzo).

Os materiais magnéticos são substâncias cuja propriedade é fator determinante do magnetismo das rochas, por ser um tipo de material que possui células ou domínios magnéticos que geram seu próprio campo. Podem ser classificados em Ferromagnéticos, materiais mais ativos magneticamente (ex.: minerais de magnetita e pirrotita) que, a nível atômico, apresentam elétrons com orientação espontânea em uma única direção, resultando num campo externo muito forte (Fig. 3.4), e Antiferromagnéticos, materiais que se comportam como células neutralizadas do ponto de vista magnético, por apresentarem spins com orientação opostas, resultando em campos paralelos nulos (Fig. 3.5), como por exemplo, o mineral hematita.

Os materiais magnéticos são substâncias cuja propriedade é fator determinante do magnetismo das rochas, por ser um tipo de material que possui células ou domínios magnéticos que geram seu próprio campo. Podem ser classificados em Ferromagnéticos, materiais magneticamente mais ativos ou e Antiferromagnéticos que se comportam como células neutralizadas do ponto de vista magnético (Figs. 3.4 e 3.5).

Ao nível atômico, observamos que os materiais ferromagnéticos apresentam elétrons com orientação espontânea em uma única direção (Fig. 3.4), resultando num campo externo muito forte, a exemplo dos minerais de magnetita e pirrotita. Já os materiais antiferromagnéticos apresentam spins com orientações opostas, resultando em campos paralelos nulos (Fig. 3.5), tendo como exemplo o mineral hematita.

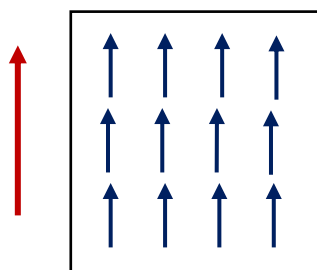


Fig. 4.4 - Materiais Ferromagnéticos - alinhamento dos elétrons resulta em campo magnético forte (seta vermelha)

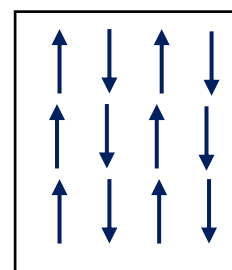


Fig. 4.5- Materiais Antiferromagnéticos - alinhamento dos elétrons resulta em campos paralelos nulos.

Nos trabalhos de prospecção as anomalias magnéticas são atribuídas, basicamente, à presença de variadas espécies de óxidos de ferro, isoladas ou em conjunto, destacando-se a magnetita, titanomagnetita, ilmenita e pirrotita; sendo a magnetita, todavia, a mais importante

devido à sua abundância e elevada suscetibilidade, contribuindo positivamente para o magnetismo das rochas.

Em relação ao magnetismo dos minerais formadores de rochas, os silicatos, de uma forma geral, são paramagnéticos ou diamagnéticos, enquanto os óxidos e sulfetos (minerais dispersos e componentes de muito pouca proporção de rocha) são ferromagnéticos e respondem praticamente “sozinhos” pelas características magnéticas da rocha.

Em consequência dessa capacidade que um material tem de se magnetizar (valor de susceptibilidade), os diferentes tipos de rochas apresentam valores de susceptibilidade variáveis discriminados na Tabela 3.1 abaixo (Luiz & Silva, 1995), os quais são considerados nas análises da Magnetometria.

| TIPO DE ROCHA | VALOR DE SUSCEPTIBILIDADE (cgs) |
|---------------------|--|
| Rochas Sedimentares | Inferiores a 50×10^{-6} |
| Rochas Metamórficas | Entre 10×10^{-6} e 500×10^{-6} |
| Rochas Vulcânicas | Entre 100×10^{-6} e 10.000×10^{-6} |
| Rochas Plutônicas | Entre 100×10^{-6} e 5.000×10^{-6} |

Tabela 3.1 - Valores de susceptibilidade magnética adotados. (Fonte: Luiz & Silva, 1995).

Quanto ao tipo de magnetização as rochas, basicamente, podem apresentar dois deles: a magnetização induzida e a magnetização remanescente. A primeira é provocada pelo campo atual da Terra, pois ao serem colocados em um campo magnético, os materiais magnéticos adquirem uma magnetização induzida cuja intensidade é diretamente proporcional à força do campo atuante e, quando essa força cessa, a magnetização induzida desaparece. Ao contrário, a magnetização remanescente é permanente, pois é adquirida ao longo da história geológica da Terra, segundo a direção do campo existente quando a rocha esfria, através de seu Ponto Curie (temperatura acima da qual os materiais perdem seu poder de magnetização e abaixo da qual adquirem e registram a direção de magnetização paleomagnética). A magnetização total de uma rocha é um vetor soma desses dois tipos de magnetização.

Citam-se como principais utilidades do Método Magnético, a partir das análises de mapas e perfis magnéticos: sua grande contribuição para delimitação de corpos que possuem concentrações importantes de minerais magnéticos; localização e determinação dos limites de intrusão ígnea; delimitação de contatos entre unidades com diferentes intensidades de magnetização, falhas e alinhamentos estruturais.

Na prospecção de petróleo, esse método é dirigido comumente para determinação da topografia do embasamento (formado por rochas ígneas e metamórficas e recoberto por rochas sedimentares) possibilitando também a determinação de estruturas diretamente ligadas à acumulação de petróleo, como falhas, fraturas, antifomes e domos salinos.

4.1.1. Levantamento Magnético e Instrumental

O levantamento magnético de uma área delimitada consiste na obtenção de medidas de intensidade do campo magnético (campo total) ou de suas componentes em pontos ou estações distribuídas na área, utilizando-se instrumentos que podem ser de um ou mais tipos, conforme a necessidade do ambiente de estudo: terrestre, marinho ou aéreo.

Como instrumental de medição, são atualmente utilizados magnetômetros – equipamentos de medição que permitem o registro do valor de intensidade do campo magnético (campo total), ou de suas componentes. Os principais tipos, de acordo com seu princípio de funcionamento, são: magnetômetro de saturação (FLUX-GATE) (Fig. 3), cuja precisão é de 1nT e o intervalo de medidas é de aproximadamente 100.000 nT; magnetômetro de precessão nuclear ou precessão de prótons (Fig. 3), que apresenta precisão de 1nT, dentro da faixa de medidas de 20.000 a 100.000nT; Magnetômetro de bombeamento ótico (Fig. 3.) que pode medir o campo na presença de elevados gradientes magnéticos, de cerca de 50.000 nT/m, ou ainda o magnetômetro de supercondutividade (Fig. 3.), cuja ordem de grandeza de sensibilidade é de 10^{-5} nT, com precisão de 0,01nT. Dentre os tipos de magnetômetros acima citados, os magnetômetros de precessão nuclear e de bombeamento ótico são os mais comumente utilizados em levantamentos aéreos.



Fig. 4.6 - Magnetômetro de saturação (FLUX-GATE): tem precisão de 1nT e o intervalo de medidas é de aproximadamente 100.000 nT. É comumente utilizado em levantamentos terrestres. Fonte: Luiz & Silva, 1995.



Fig. 4.7 Magnetômetro de precessão nuclear ou precessão de prótons: apresenta precisão de 1nT, dentro da faixa de medidas de 20.000 a 100.000 nT. É muito comum seu uso em levantamentos aéreos e também em levantamentos terrestres. Fonte: Luiz & Silva, 1995.



Fig. 4.8 - Magnetômetro de bombeamento óptico: pode medir o campo na presença de elevados gradientes magnéticos, de cerca de 50.000 nT. Devido sua maior sensibilidade é bastante utilizado em levantamentos aéreos. Fonte: Luiz & Silva, 1995.

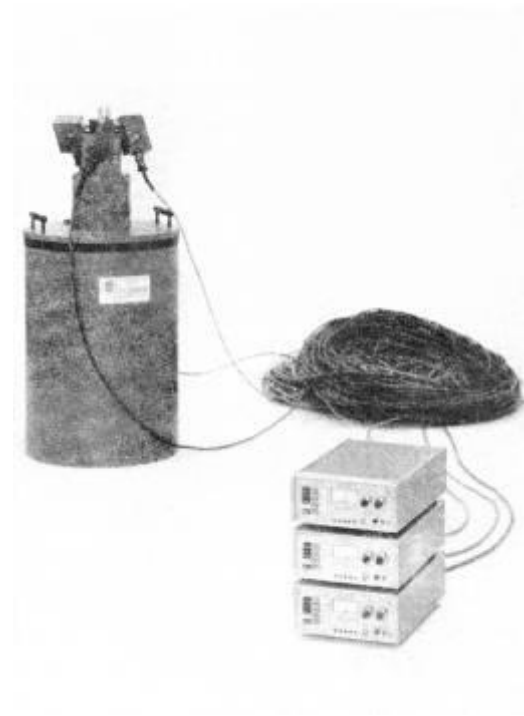


Fig. 4.9 - Magnetômetro de supercondutividade: apresenta ordem de grandeza da sensibilidade de 10^{-5} nT, detectando flutuações muito pequenas no campo magnético terrestre. Fonte: Luiz & Silva, 1995.

4.2. ESTUDOS GRAVIMÉTRICOS:

Através do estudo global do campo gravitacional, obtêm-se informações acerca das dimensões, forma e massa da Terra, bem como do modo como a massa se distribui no interior do planeta.

O método gravimétrico é fundamentado basicamente na Lei da Gravitação Universal de Isaac Newton, publicada em 1687, a qual foi deduzida a partir das leis empíricas de Kepler, relacionadas aos movimentos planetários. Segundo essa Lei, existe uma força que atua nos corpos próximos à superfície e também em todo o espaço intergaláctico, denomina de “Força Gravitacional” ou Força de Atração Mútua entre duas massas, que é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas:

Equação que expressa a Lei da Gravitação de Newton:

(G = Constante Gravitacional = $6,67 \cdot 10^{-11}$ N.m²/kg²).

$$F = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{R^2}$$

A força gravitacional depende da separação entre as duas partículas, mas não se altera pela presença de outros corpos. Ela também muda em função da massa associada à variação de densidade do corpo.

A primeira pessoa a medir a Gravidade da Terra foi Galileu e em sua homenagem, uma unidade gravitacional, o *Gal*, foi nomeada: $1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (Fowler, 1990).

Considerando a Terra *perfeitamente esférica* e girando ao redor de seu eixo, a força de gravidade (g) num ponto sobre a superfície terrestre é a resultante vetorial da força centrífuga (f) e da força de atração da Terra (F), conforme ilustrado na Fig. 3.10, e seu valor muda com a latitude, como mostra a curva da Fig. 3.11 (Tsuboi, 1983).

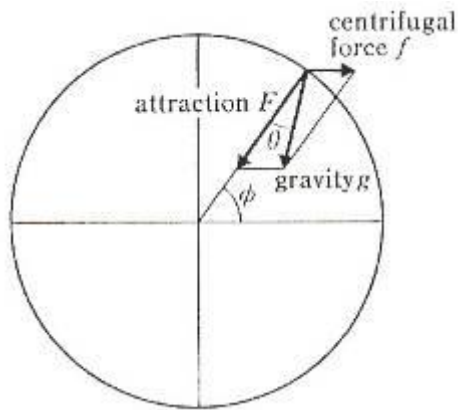


Fig. 4.10 - Força de atração e centrífuga sobre a Terra esférica. Fonte: Tsuboi, 1983.

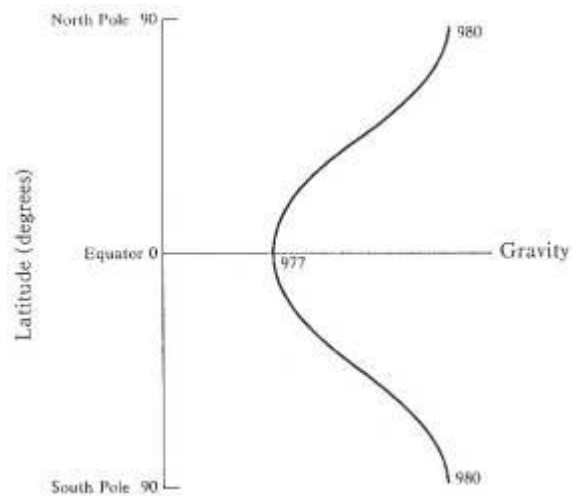


Fig. 4.11 - Variação da gravidade com a latitude em uma Terra simplificada. Fonte: Tsuboi, 1983.

O fato de o núcleo, o manto e a crosta terrestre encontrarem-se distribuídos aproximadamente em posições concêntricas (Motta, 1986) torna possível a aplicação da 2ª Lei de Newton, onde a aceleração da gravidade constitui a componente principal do campo gravitacional e os efeitos resultantes da forma da Terra e da aceleração centrífuga são bastante relevantes na composição da força de gravidade normal.

De acordo com essa Lei, a força e aceleração da gravidade estão relacionadas por:

$$F_r = m \cdot a_g; \quad F_r = \frac{G \cdot M \cdot m}{r^2} \Rightarrow m \cdot a_g = \frac{G \cdot M \cdot m}{r^2} \therefore a_g = \frac{G \cdot M}{r^2}$$

Podemos perceber a força gravitacional quando soltamos uma partícula próxima à superfície da Terra e esta puxa a partícula, devido à atração da força gravitacional que provocará a aceleração gravitacional a_g . É importante salientar que g (aceleração de queda

livre) não é exatamente igual à a_g (aceleração gravitacional), devido a Terra não ser uma esfera uniforme e estar girando (Silva, 2006).

A aceleração gravitacional teria o mesmo valor em qualquer ponto da superfície, se a Terra fosse perfeitamente esférica e não rotacionasse (Fowler, 1990); entretanto isso não acontece, pois ela se apresenta dilatada no equador e achatada nos pólos, com forma geométrica aproximada à exposta na Fig. 3.12 abaixo, dada à distribuição irregular de massas nos hemisférios norte e sul, com maior presença de água no segundo.

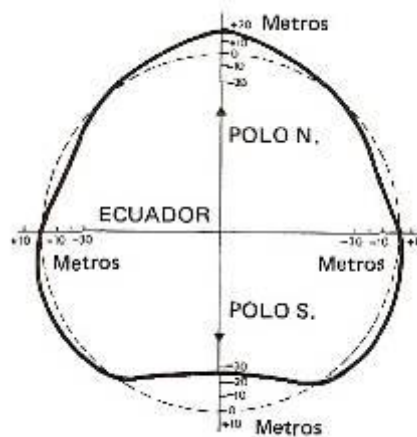


Fig. 3.12 – Forma da Terra, segundo King-Hele, 1974 (in Khan, 1980).

4.2.1. Instrumental do Método Gravimétrico

O levantamento gravimétrico de uma área delimitada consiste na obtenção de valores relativos de gravidade em estações distribuídas na área e corrigidas com relação a uma base de referência. Como requisito, nesta base devem ser conhecidos os valores de posição nas três dimensões (x , y , z) e ela deve pertencer à Rede Fundamental Brasileira.

Para realização de levantamentos gravimétricos são utilizados instrumentos de alta precisão (gravímetros) que podem ser de um ou mais tipos, conforme a necessidade do ambiente de estudo (terrestre, marinho raso, marinho profundo e aéreo). Abaixo se encontram citados e ilustrados os principais tipos de gravímetros:

- ❖ Gravímetros tipo G (*ground*), comumente utilizados em levantamentos terrestres (Fig. 3.13) apresentam precisão em torno de 0,01mGal;

- ❖ Gravímetros utilizados em levantamentos aquáticos podem ser de dois subtipos: gravímetros submersíveis, tipo H (*hybrid* – Fig. 3.14), cuja precisão das medidas sob boas condições é de cerca de 0,1 mGal, e os Gravímetros *shipboard* para medidas de gravidade na superfície d'água (Fig. 3.15 e Fig. 3.16), onde a precisão diminui bastante pela dependência do grau de agitação das águas, e no qual a margem de erro é dificilmente inferior a 1mGal.
- ❖ Para levantamentos aéreos, o gravímetro *airborne* é apropriado, mas apresenta a mais alta margem de erro (10mGal), dado o fato de depender de correção de variações extremas na velocidade, curso e altura de navegação, as quais podem acabar não sendo registradas.



Fig. 3.13 – Gravímetro LaCoste & Römerberg modelo G, de uso comum em levantamentos terrestre. Precisão: 0,01 mgal. (Fonte: <http://www.lacosteromberg.com>)



Fig. 3.14 – Gravímetro LaCoste & Römerberg modelo H, submersível, usado em levantamentos aquáticos de fundo. Precisão: 0,01 mgal. (Fonte: Luiz & Silva, 1995)



Fig. 3.15 – Gravímetro Shipboard - Sistema KSS31M com receptor GPS, usado em medidas de gravidade na superfície d'água. (Fonte: BGR)



Fig. 3.16 – Gravímetro Shipboard, usado em medidas de gravidade na superfície d'água. (Fonte: <http://www.lacosteromberg.com>)

As medidas obtidas com o(s) gravímetro(s) corresponderão às diferenças pontuais de gravidade, ou seja, entre as estações da área, e são valores relativos que serão corrigidas em relação a uma estação gravimétrica de referência (estação base).

Segundo Khan (1980), a aceleração da gravidade varia na superfície da Terra como consequência de fatores como a latitude, as diferenças de elevações entre estações, as irregularidades da topografia e as marés (variação regular do campo gravitacional da Terra, produzida pela atração gravitacional do Sol e da Lua). Torna-se necessário corrigir os dados obtidos (valores lidos) em um levantamento gravimétrico durante o processamento, para compensação desses efeitos, evidenciando as procuradas variações laterais e verticais de densidade e, a partir daí, gerar os mapas gravimétricos e perfis que possibilitem a interpretação da área estudada.

O método gravimétrico tem como finalidade principal detectar pequenas e grandes estruturas geológicas, bem como concentrações minerais em subsuperfície, através de distorções que estes produzem no campo gravitacional normal que envolve a Terra. Essas distorções (anomalias) estão diretamente relacionadas a diferentes distribuições laterais na densidade dos materiais da subsuperfície. Assim, ressalta-se que é condição fundamental a existência de contraste de densidade para o emprego deste método.

Dependendo de como seja adquirido o valor de gravidade, determinadas correções deverão ser realizadas para que se possa posicionar o ponto na superfície geoidal da estação medida; assim, sobre os valores medidos nas estações gravimétricas terrestres deverão ser realizadas as seguintes correções gravimétricas (Correia, 1989 e Motta, 1986):

- Correção de Latitude – Corrige os efeitos resultantes da forma e rotação da Terra; Variação de g devido à variação da força centrífuga, que é máxima no equador e mínima nos pólos.
- Correção de Ar Livre – é aplicada para eliminar o efeito causado pela diferença de altitude (distância ortométrica) entre o ponto de observação e o nível do mar (superfície do geóide – Teixeira, 2001) no valor da gravidade. Corrige os efeitos decorrentes da diferença de altitude entre as estações e o nível de referência (estação-base) ou nível do mar. Ela apresentará valores positivos se a estação estiver acima do nível de referência.
- Correção de Bouguer – Aplica-se a correção Bouguer para eliminar o efeito gravitacional da porção de massa crustal entre o ponto de medida e o nível do mar, sendo conveniente conhecer sua densidade com a melhor exatidão possível (Teixeira, 2001).

- Correção de terreno ou topográfica – É aplicada a levantamentos de detalhe, realizados em regiões muito acidentadas, onde se tornam relevantes as feições da área, corrigindo a influência das elevações e depressões do terreno considerado com relação ao ponto medido.

Para levantamentos em estações gravimétricas aquáticas observa-se que os diferentes equipamentos e formas de obtenção do valor de gravidade impõem metodologias diferenciadas. Assim, para levantamento com gravímetros *shipboard* (Fig. 3.15 e Fig. 3.16) será necessário efetuar correções de *pitch*, *roll*, adernamento, velocidade e direção do vento, ‘*Eotvos*’, correntes marinhas, dentre outras. Para levantamentos no assoalho oceânico, o qual utiliza o gravímetro submersível tipo H (*hybrid* – Fig. 3.14), torna-se necessário o conhecimento de seu contorno no ponto de locação do gravímetro, velocidade e direção das correntes, profundidade, etc.

Como o valor de gravidade depende da posição (x,y,z) , torna-se necessária a utilização de equipamentos auxiliares que forneçam estes valores, como GPS (diferencial ou/e absoluto), altímetros, níveis e outros que deveram ser utilizados durante as aquisições.

4.3. MÉTODO SÍSMICO OU SÍSMICA

É um método de investigação geofísico que, utilizando a propriedade de elasticidade das rochas, obtém informações sobre a sub-superfície a partir do fenômeno de propagação de ondas elásticas nas rochas, também conhecidas como ondas sísmicas ou elastodinâmicas (Severiano Ribeiro, 2001). Essas ondas nada mais são que vibrações de origem natural (terremotos) ou artificial (explosões induzidas) que se propagam em todas as direções, transmitindo energia.

De acordo com sua natureza (características físicas), elas podem ser classificadas em ondas mecânicas (deformações que se propagam em meios elásticos) ou eletromagnéticas (formadas por dois campos, um elétrico e outro magnético, que se propagam no vácuo ou em outros meios materiais) (Villas Boas et al., 2001).

As ondas sísmicas transmitem vibrações de partículas do meio e também de deformações elásticas. Podem ser classificadas, quanto à forma de vibração sísmica, em ondas primárias (ou ondas P), secundárias (ou ondas S), Love e Rayleigh (Fig. 3.17). As ondas P são mais rápidas que as ondas S ao atravessarem um meio (daí o seu nome) e provocam deformação de dilatação/compressão (ondas longitudinais). Já as ondas S (também chamadas

de cisalhamento) são ondas transversais, isto é, vibram perpendicularmente à direção de propagação, e promovem deformações tangenciais, se propagando apenas em meios sólidos. Ambas são ondas internas que partem de uma perturbação originada no meio e se propagam em todas as direções. As ondas superficiais Love e Rayleigh correspondem a combinações das ondas P e S, onde na primeira observa-se oscilação horizontal transversal e na segunda cada partícula oscila perfazendo um trajeto elíptico (Teixeira, 2001).

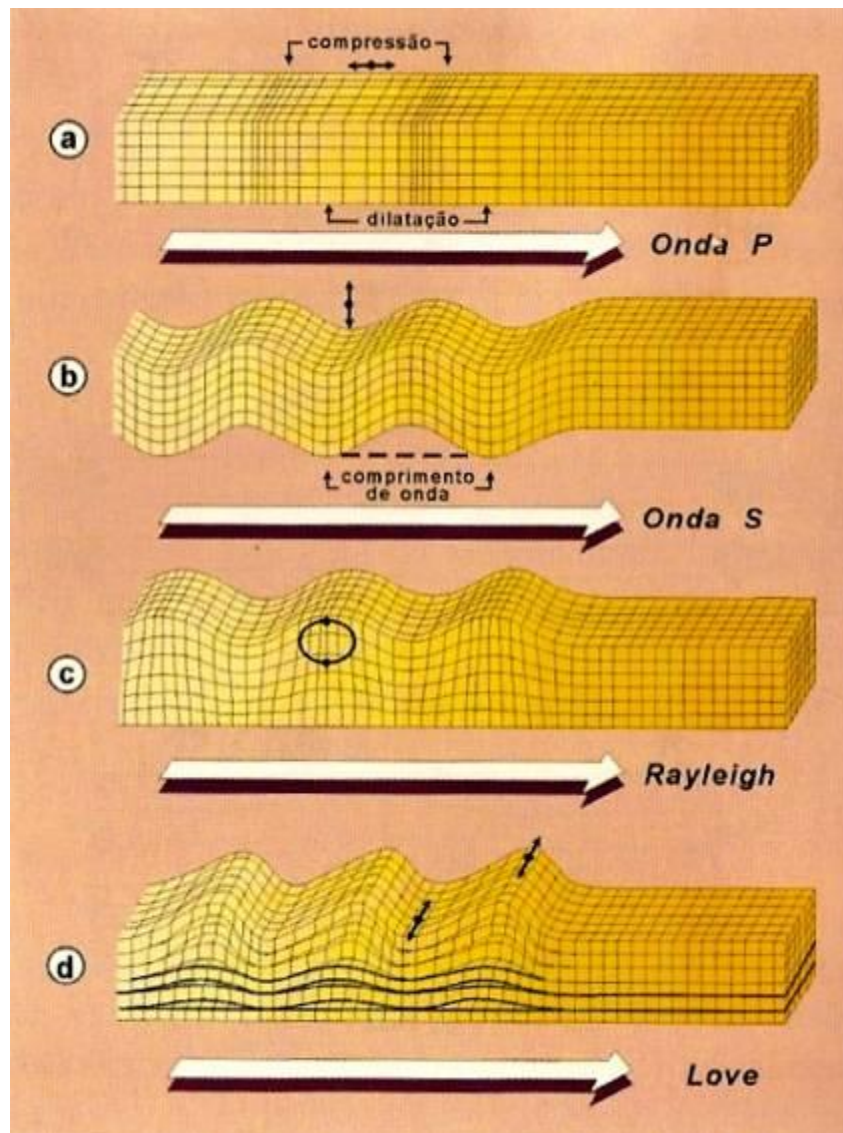


Fig. 3.17 – Principais tipos de propagação de vibrações sísmicas - Ondas P ou Primárias (a), longitudinais; Ondas S ou Secundárias (b), transversais; e as Ondas superficiais Rayleigh (c) e Love (Fonte: Teixeira et al., 2001).

Os principais elementos (ou grandezas físicas) a serem identificados no estudo das ondas são (Fig. 3.18): o comprimento de onda (λ), a amplitude (A), o período (T), a frequência (f) e a velocidade da onda (V).

- O período (T): é o intervalo de tempo necessário para que ocorra um ciclo completo, ou uma oscilação, voltando a se repetir o movimento.
- A frequência (f) é o número de oscilações executadas na unidade de tempo. A unidade de frequência no SI é o Hertz (Hz) e ela é dada pela relação: $f=1/T$.
- A velocidade da onda (V): Num meio homogêneo, a velocidade de propagação v de uma onda é constante e dada pela relação: $v = \lambda \cdot f$.

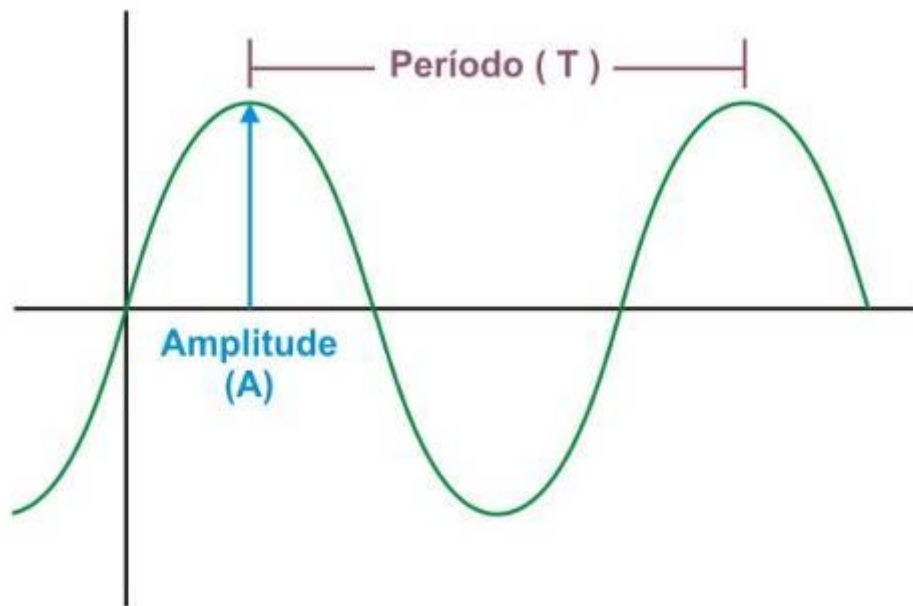


Fig.3.18 – Representação esquemática do Período (T) e da Amplitude (A) de uma onda.

No contexto dos métodos sísmicos, ondas sísmicas artificiais são produzidas em sub-superfície ou no mar – geradas através de explosivos, ar comprimido, queda de pesos ou vibradores – e após percorrerem determinada distância no interior da crosta terrestre, são refletidas e refratadas nas suas discontinuidades e então retornam à superfície, onde são capturadas por sofisticados equipamentos de registro.

Para tentar deduzir como é o interior da Terra, a Sísmica estuda as mudanças de velocidade com que essas ondas atravessaram a Terra e as variações detectadas são interpretadas como indicativas da existência de materiais com propriedades diferentes distribuídos de formas bastante diversificadas.

São basicamente duas as técnicas bem conhecidas e amplamente usadas no método sísmico: a refração e a reflexão.

4.3.1. Método Sísmico de Refração

É um método que emprega os princípios da refração de ondas sísmicas incidentes numa superfície ou interface entre dois meios, cujas velocidades de propagação de ondas mecânicas e densidades características são distintas. Neste método, as ondas sísmicas geradas viajam em sub-superfície a grandes distâncias, sendo captadas por sensores (geofones) e posteriormente registradas. Na exploração de petróleo, ele fornece informações de áreas em grande escala, trazendo pouco detalhe das regiões abaixo da superfície, situadas entre o ponto de detonação e o ponto de captação.

Segundo Dobrin (1976), o método permite identificar ou especificar a litologia, através do fornecimento de dados sobre a velocidade nas camadas onde houve a refração, cobrindo uma determinada área em menos tempo do que o método de reflexão.

O princípio do Método sísmico de Refração é ilustrado na Fig. 3.19, numa situação geológica simples: duas formações, uma superior com velocidade de ondas P uniforme, V_1 e profundidade Z_1 , e outra inferior de maior velocidade V_2 são separadas por uma interface horizontal.

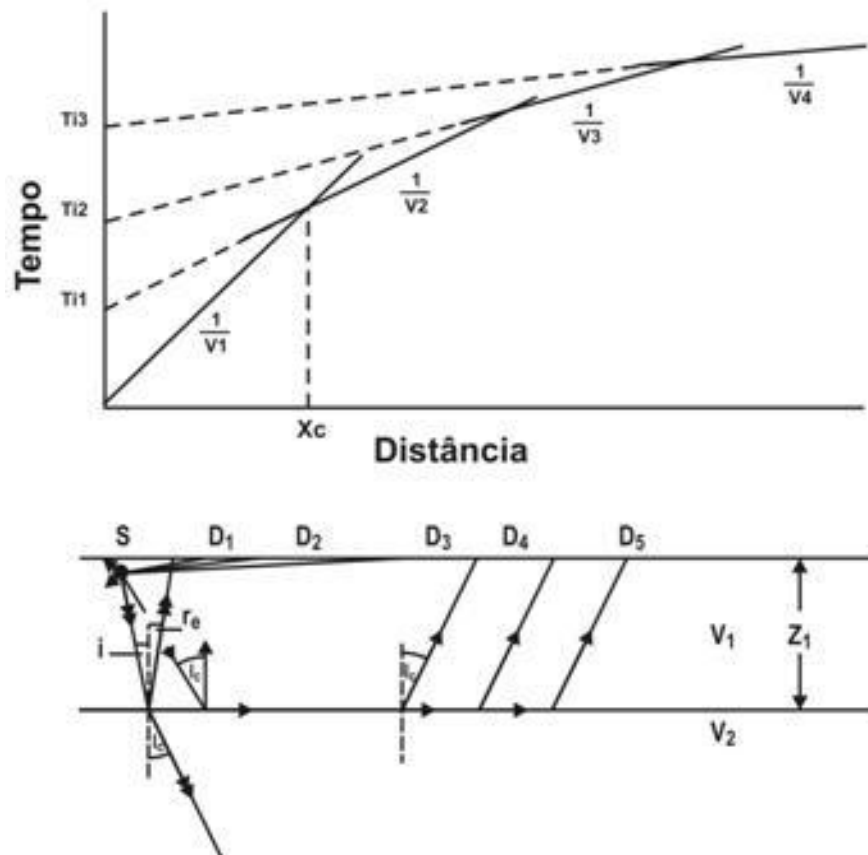


Fig. 3.19 – Refração sísmica, quando o meio abaixo da interface possui maior velocidade (Fonte: Khan, 1980).

São consideradas apenas as ondas P, que são as primeiras a chegar e mais fáceis de identificar nos registros, uma vez que a geometria das ondas S é idêntica. Logo, os raios sísmicos provenientes de uma fonte S propagam-se em todas as direções até alcançarem a interface, de onde parte deles será refletida e a outra parte refratada, viajando na interface até chegar aos geofones, onde são capturados e registrados. A relação existente entre os ângulos de incidência e de refração obedece à Segunda Lei de Snell, conforme anteriormente descrita. Observa-se que, no exemplo da Fig. 3.19, o meio abaixo da interface apresenta uma velocidade V_2 maior que a velocidade V_1 do meio acima.

É aplicado em reconhecimento exploratório de petróleo, Geologia de Engenharia e estudos de Geologia Regional. Os fundamentos do método de refração sísmica foram elaborados para o estudo dos terremotos, muito antes de se pensar na prospecção sísmica. Aplicando estes conhecimentos, foi permitido aos sismólogos determinar a estrutura interna da Terra. Foi bastante utilizado pela indústria do petróleo na década de 50, como apoio ao refinamento das pesquisas.

4.3.2. Método Sísmico de Reflexão

A sísmica de reflexão é uma técnica de mapeamento e monitoramento capaz de gerar imagens de grande fidelidade e correlação com a estratigrafia da área.

A resolução obtida com a reflexão sísmica faz deste o principal método utilizado por companhias de exploração de óleo para mapear estruturas sedimentares de sub-superfície. O método também tem sido crescentemente utilizado para obter novas informações refinadas sobre estruturas entre a crosta e a camada manto-crosta (Fowler, 1990).

As principais aplicabilidades do método sísmico de reflexão estão no mapeamento das estruturas geológicas em sub-superfície, na detecção de acumulações de hidrocarbonetos e na avaliação da reserva total de uma área. Este método é um dos mais utilizados na pesquisa de hidrocarbonetos, principalmente por ter alta resolução, permitir mapear estruturas de pequeno relevo, permitir reconstituir a história deposicional de uma área ou bacia, investigar grandes profundidades, mapear vários horizontes ao mesmo tempo e em situações particulares.

Caracteristicamente os reservatórios de hidrocarbonetos encontram-se, em sua maioria, associados a formações geológicas que se apresentam como estruturas convexas para cima (anticlinais) e deslocamentos lineares (falhas), conforme ilustrado na Fig. 3.20. Muitos depósitos estão relacionados com variações laterais de litologia (armadilhas estratigráficas).

Através da observação dos tempos em que ocorrem as reflexões sísmicas, podem-se mapear as estruturas geológicas, enquanto que as variações de amplitude frequentemente fornecem informações associadas às mudanças litológicas, podendo mesmo indicar a presença de hidrocarbonetos.

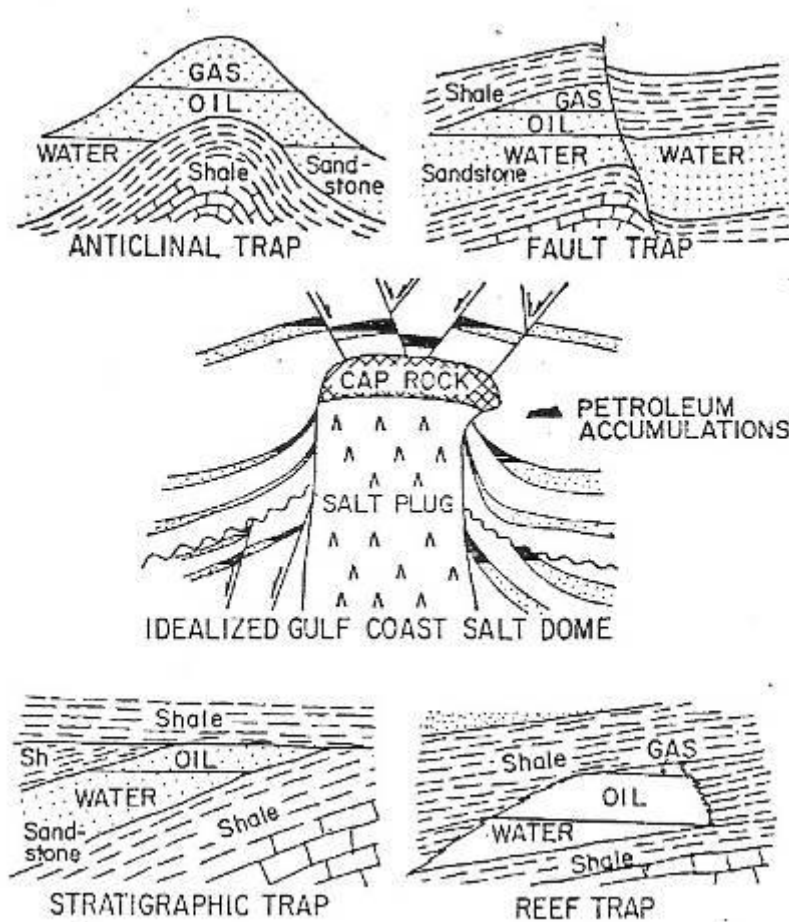


Fig. 3.20 – Ilustração dos prováveis locais onde se encontram hidrocarbonetos (Fonte: Duarte, 1985).

O Método sísmico de reflexão e refração tem como base as propriedades físicas das ondas, onde: a frente de onda, a trajetória do raio, o Princípio de Huygens, a lei da reflexão e na Lei de Snell são os principais elementos, as quais se encontram resumidamente descritas abaixo, segundo Villas Boas et al. (2001):

- Frente de onda – É a fronteira entre a região já atingida pela onda e a região ainda não atingida.
- Trajetória do raio – Indicam a direção e o sentido de propagação das ondas num meio.
- Princípio de Huygens – Cada ponto de uma frente de onda comporta-se como uma fonte secundária que se propaga produzindo uma nova frente de onda esférica e com a mesma frequência da onda original.

- Leis da reflexão – São duas as Leis da reflexão:

1ª Lei: O raio incidente, o raio refletido e a reta normal à superfície refletora no ponto de incidência são coplanares.

2ª Lei: O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (representado na Fig. 3.21 por θ_1).

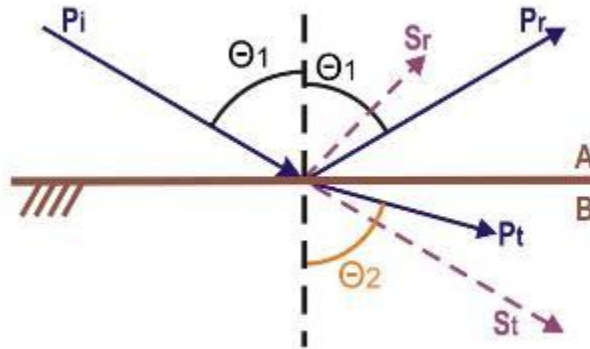


Fig. 3.21– Representação esquemática da Lei de Snell aplicada à Refração e Reflexão de ondas P e S, em dois meios elásticos distintos (A e B), homogêneos e isotrópicos.

- Lei de Snell – Expressa a relação existente entre os ângulos de incidência e de refração, (Fig. 3.21): $\frac{\text{sen } \theta_1}{V_A} = \frac{\text{sen } \theta_2}{V_B}$.

O método sísmico de reflexão é dividido em três etapas: aquisição de dados, processamento e interpretação de linhas sísmicas geradas. A aquisição de dados, a primeira delas, atua com três elementos principais:

1. A Fonte de Energia (explosivos ou vibradores em terra e canhão de ar ou *air-gun* no mar) – deve ter potência suficiente para gerar um sinal que, depois de percorrer alguns quilômetros em sub-superfície, sofrendo perdas de energia, possa ser registrado com amplitude superior à dos ruídos.
2. O Registro de Sinais – É feito pelos geofones, cuja disposição é calculada para uma melhor cobertura e eliminação de ruídos naturais.
3. A cobertura – É o número de vezes que um ponto é amostrado em sub-superfície, de acordo com a técnica CDP (*common depth point*).

Inicialmente, as ondas elásticas criadas pela fonte sísmica propagam-se através da Terra, refletem-se nas interfaces acústicas do meio e são captadas por receptores especiais

(geofones) colocados na superfície, como ilustrado na Fig. 3.22. Esses receptores são conectados a instrumentos de registro acomodados em um caminhão, onde as informações recebem um tratamento inicial e são gravadas digitalmente.

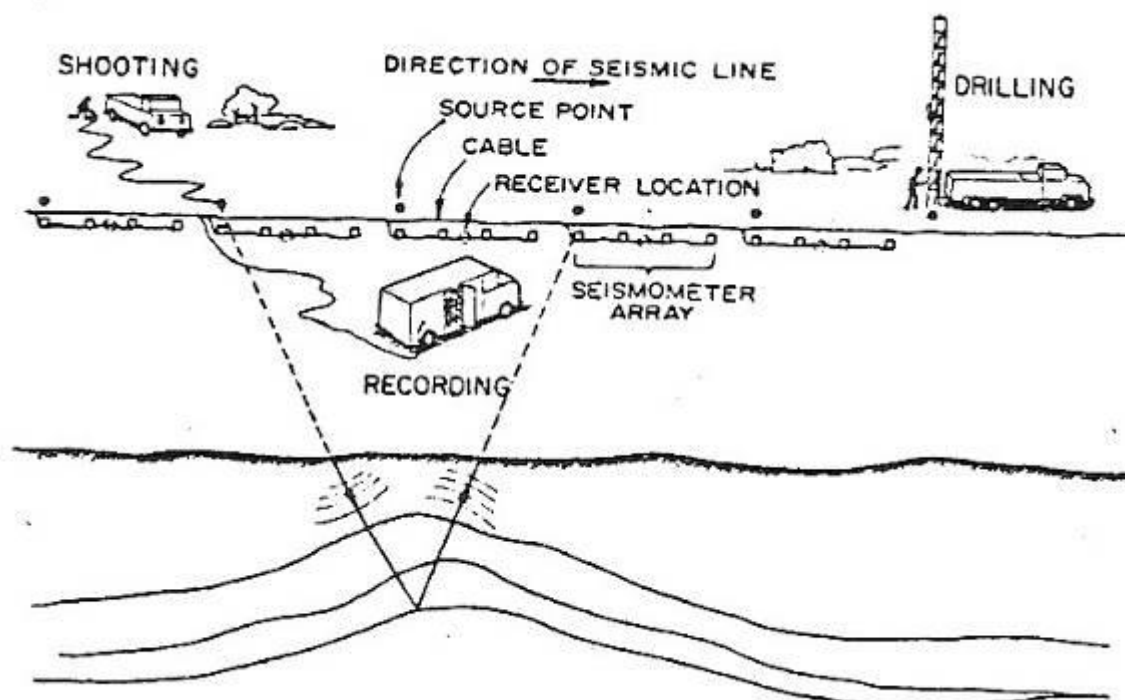


Fig. 3.22 – Disposição da fonte e dos grupos de receptores para o levantamento de uma linha terrestre utilizando-se a técnica do Ponto de Reflexão Comum em Profundidade (CDP). Fonte: Leal, 1998.

Um modelo básico para o registro de reflexão sísmica é apresentado na Fig. 3.23; cada vez que um pulso é produzido pela fonte, registra-se simultaneamente certo número de canais ou traços (24, 48 ou 96), sendo que cada canal corresponde a um grupo de geofones. Durante o registro, os sinais sísmicos captados pelos geofones são digitalizados e gravados em meios digitais.

A profundidade do refletor é determinada com base no tempo decorrido entre a emissão e o registro do pulso sísmico e o registro de uma determinada reflexão, conhecendo-se a velocidade média do meio.

Convém lembrar que uma interface entre duas camadas normalmente delimita diferentes constantes elásticas e a amplitude das reflexões está diretamente relacionada ao contraste entre as impedâncias acústicas das camadas; o valor da impedância é dado pelo produto velocidade x densidade no meio onde são gerados os sinais, e estes colhidos para posterior armazenamento e processamento.

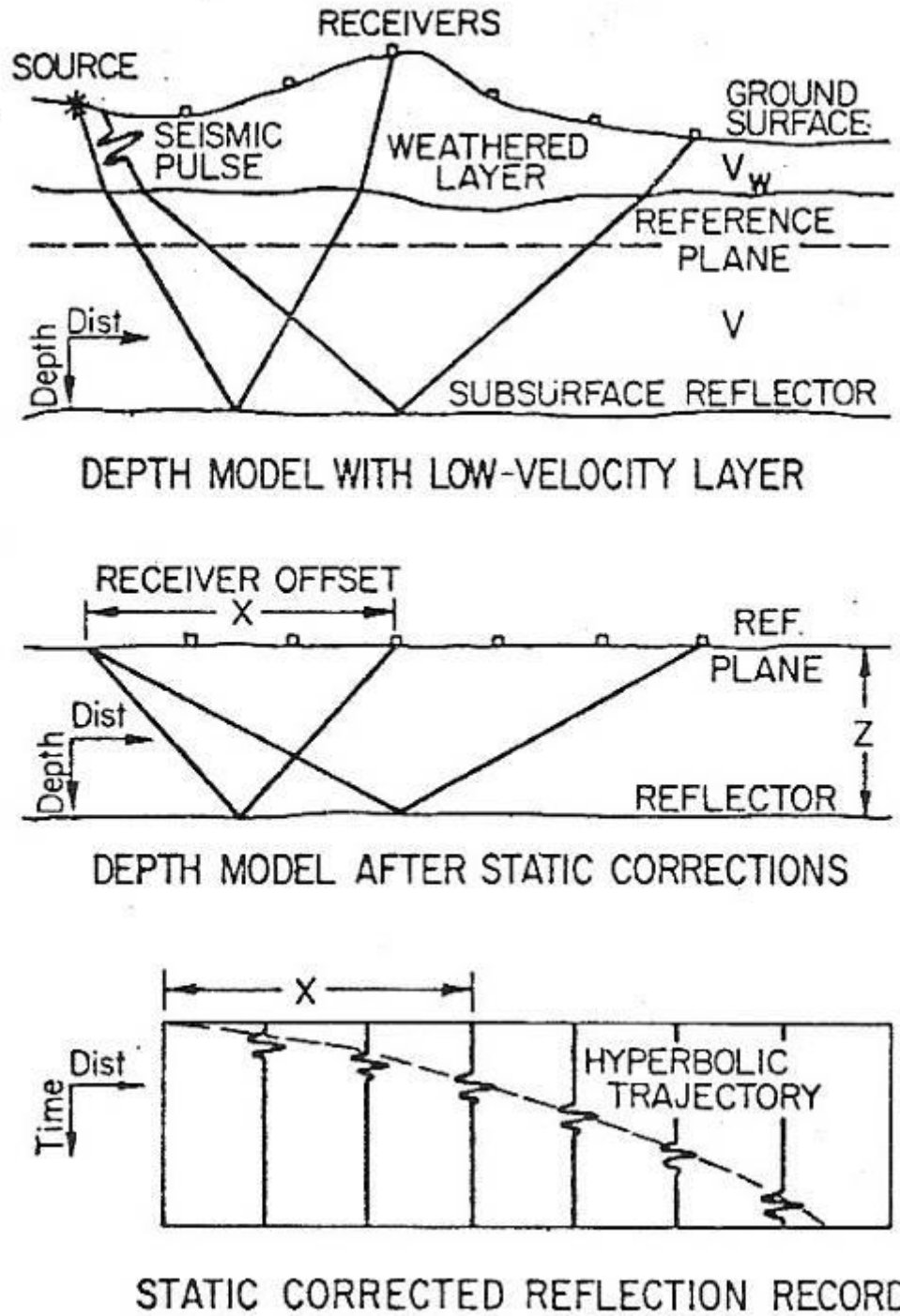


Fig. 3.23 – Modelo básico para o registro de reflexão sísmica (Fonte: Leal, 1998).

Para a cobertura dos sinais é usada a Técnica de Registro CDP (Common Depth Point), também conhecida como técnica de múltipla cobertura (Fig. 3.24). É um tipo de registro de dados em que se obtêm várias amostras de um mesmo ponto em sub-superfície, a partir da progressividade das posições dos pontos de tiro.

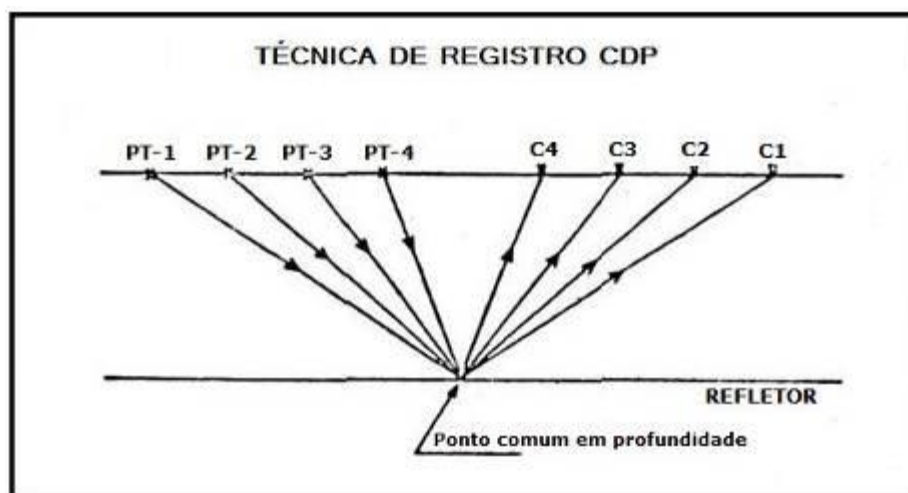


Fig. 3.24 – Técnica de Registro CDP (FONTE: Duarte, 1985).

Esse conjunto de traços que tem o ponto de reflexão comum em profundidade (família de traços de CDP) será de fundamental importância para a etapa de processamento de dados de reflexão e a inferência da velocidade média de propagação das ondas sísmicas nas camadas de sub-superfície.

O processamento, segunda parte do método sísmico de reflexão, é a etapa de tratamento dos dados obtidos durante a aquisição. Consiste numa sofisticada análise dos dados realizada por parte da equipe atuante, que fará uma série de observações dos sinais na busca de restaurar diversas perdas de amplitude da propagação, retirar o efeito das camadas superficiais, corrigirem diferentes trajetórias de uma família CDP, somar os traços de CDP e assim obter a verdadeira posição espacial dos eventos. Podem ser realizados processos de filtragem em várias fases, verificando se algum registro deve ser excluído do processamento, além de eliminar traços mortos ou ruidosos, assinalar traços com polaridade invertida, a fim de aumentar a razão sinal/ruído e incrementar a resolução vertical. Finda essa etapa, é verificada a qualidade do sismograma gerado.

Uma das primeiras etapas do processamento consiste em reagrupar os dados originalmente ordenados como família de traços CDP, facilitando sobremaneira o trabalho sobre o conjunto subsequente.

Os traços correspondentes de uma família CDP representam o mesmo ponto de reflexão em superfície, se os refletores forem planos. Neste caso, os pontos de reflexão situam-se na vertical correspondente ao ponto médio da distância entre a fonte e o receptor, mas se os refletores apresentarem mergulho, eles serão deslocados lateralmente, conforme ilustrado na Fig. 3.25.

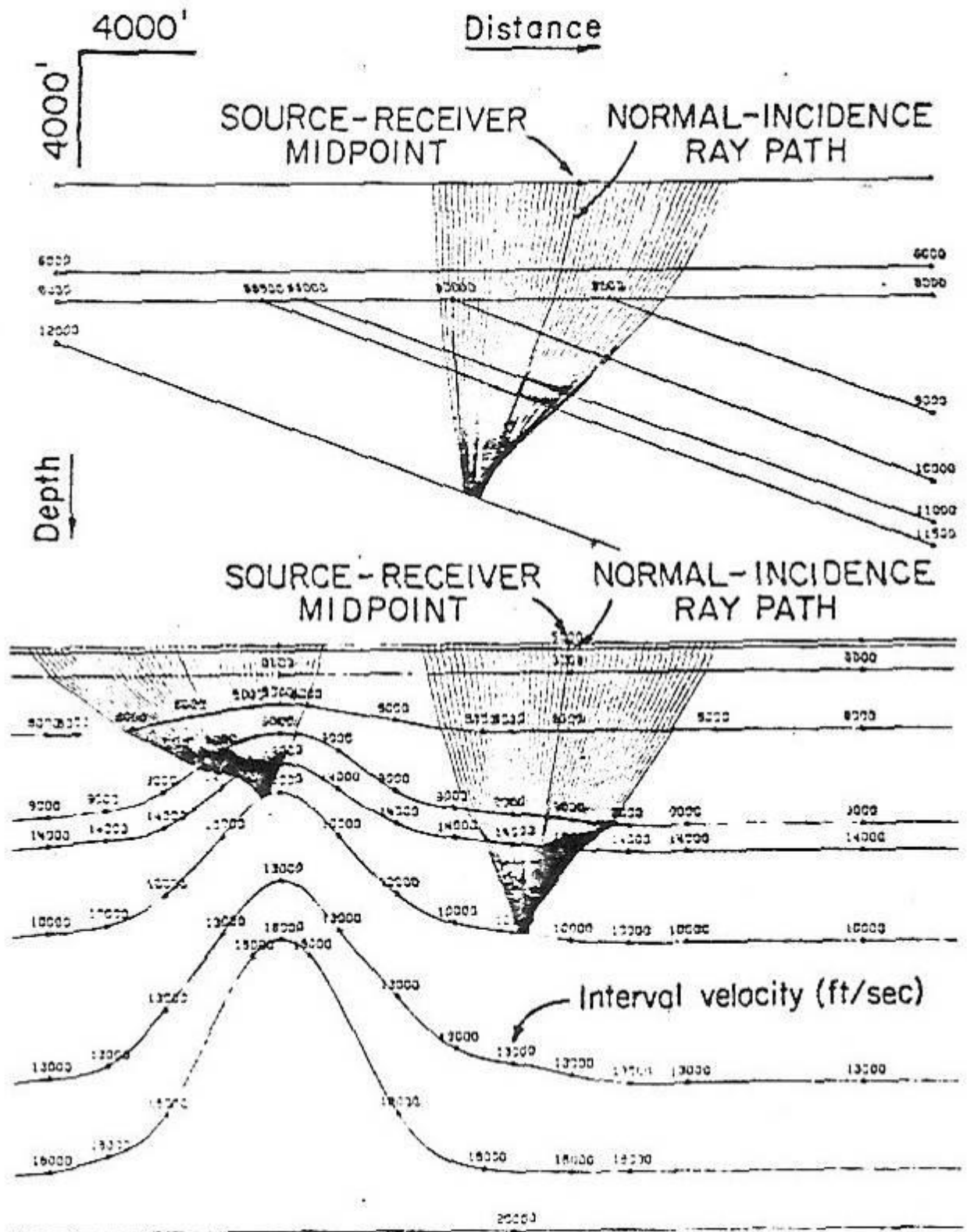


Fig. 3.25 – Trajetória dos raios sísmicos de traços CDP, para o caso de refletores não horizontais (Fonte: Duarte, 1985).

Fatores como variações na elevação topográfica e falta de homogeneidade na velocidade das camadas próximas da superfície perturbam severamente a continuidade das

reflexões em traços adjacentes. A camada de intemperismo próxima à superfície funciona como um filtro e pode causar alteração de amplitude e fase do pulso sísmico emitido e das reflexões registradas. Após a etapa inicial de reagrupamento dos dados segue, devido a fatores como os acima mencionados, uma série de correções de tempo e da amplitude de cada amostra.

4.3.3. Correções de Tempo:

Podem ser de dois tipos: estáticas (aplicação de um deslocamento constante a todo o traço) ou dinâmicas (variam como tempo de reflexão).

As correções preliminares estáticas são necessárias devido ao fato dos traços sísmicos poderem sofrer um deslocamento estático, para mais ou para menos, em seu tempo de registro devido a alguns fatores como variação na topografia, a presença da camada de baixa velocidade e profundidade da carga (Fig. 3.26).

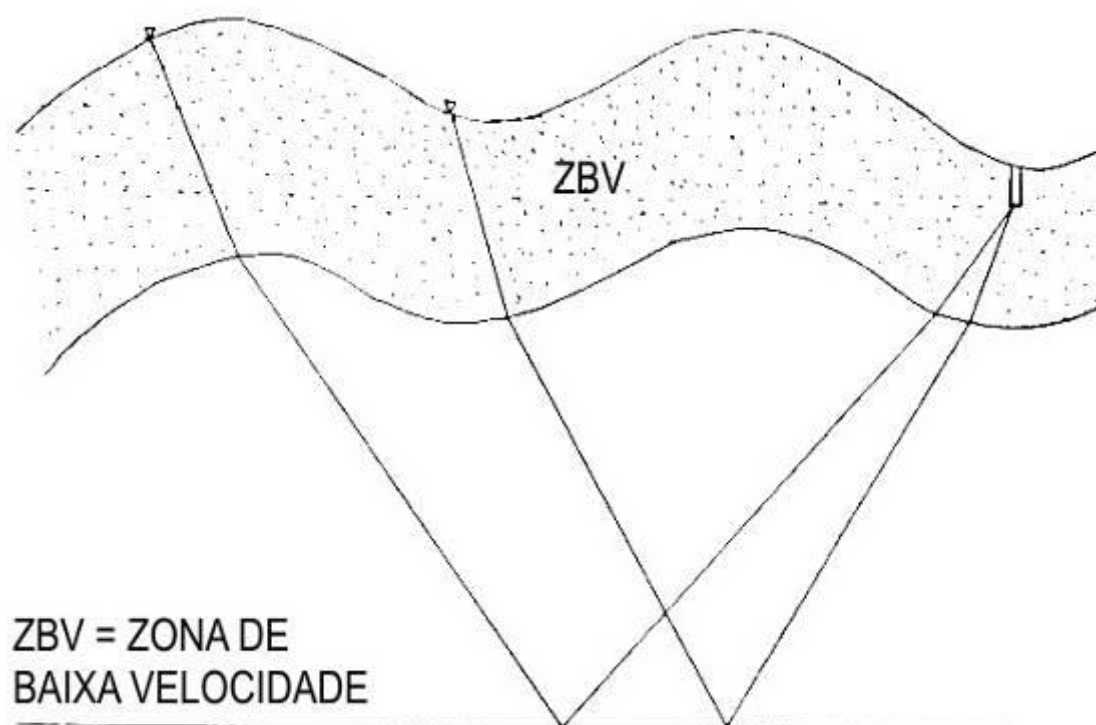


Fig. 3.26 – Variações na topografia que mostram a necessidade das correções estáticas. (Fonte: Leal, 1998).

Existem distorções que provocam um deslocamento variável com o tempo dos dados de um traço sísmico. A correção dinâmica consiste em se aplicar um deslocamento igualmente variável com o tempo, porém, em sentido contrário do efeito que se deseja eliminar (Fig. 3.27).

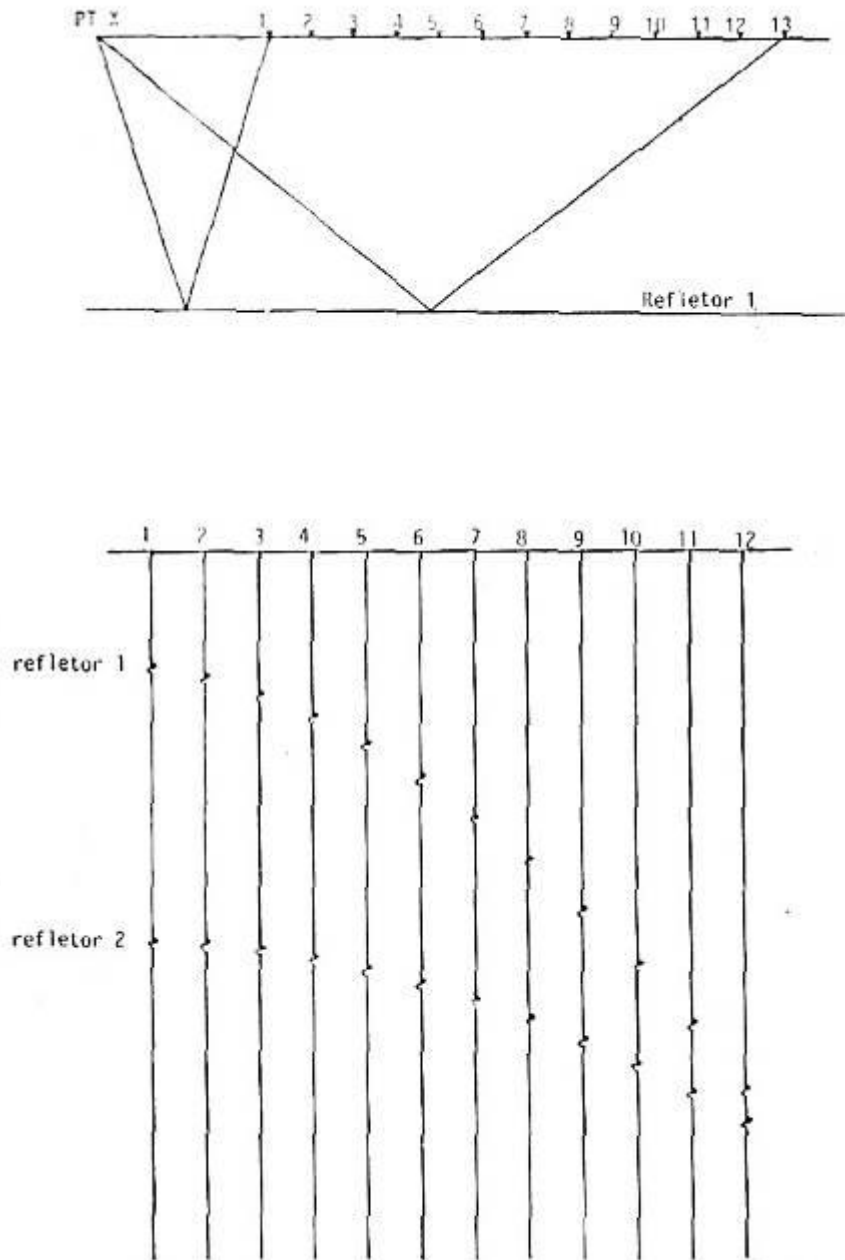


Fig. 3.27 – Distorções do sinal no tempo mostrando a necessidade das correções dinâmicas. (Fonte: Leal, 1998).

4.3.4. Correções de Amplitude:

Rochas que contêm gás possuem velocidade baixa; deste modo, apresentam condições favoráveis a grandes contrastes de impedância acústica (Fig. 3.28). Um tipo de anomalia de amplitude comum é ilustrado na Fig. 3.29, onde há ocorrência de um “*bright spot*” – anomalia de amplitude utilizada na sísmica como indicadora de localização de depósitos de gás, dado que estes causam grandes variações na amplitude das reflexões.

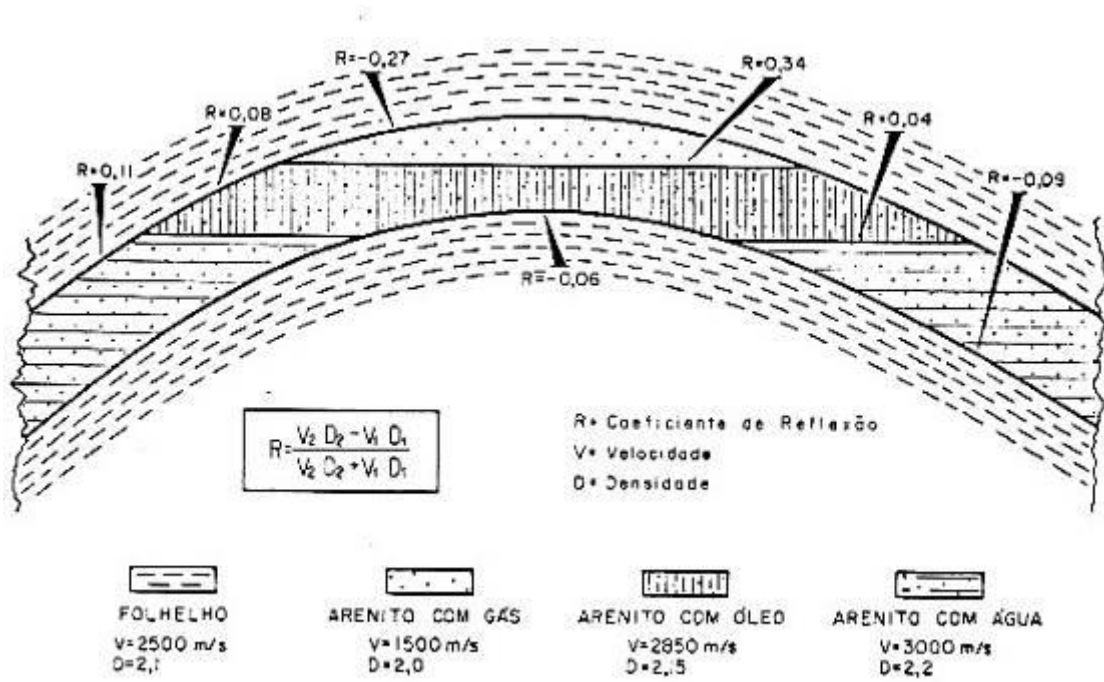


Fig. 3.28 – Anticlinal propício ao aparecimento de uma anomalia *bright spot*, apresentando altos coeficientes de reflexão (R) nas interfaces água-gás e gás-óleo (Fonte: Duarte, 1985).

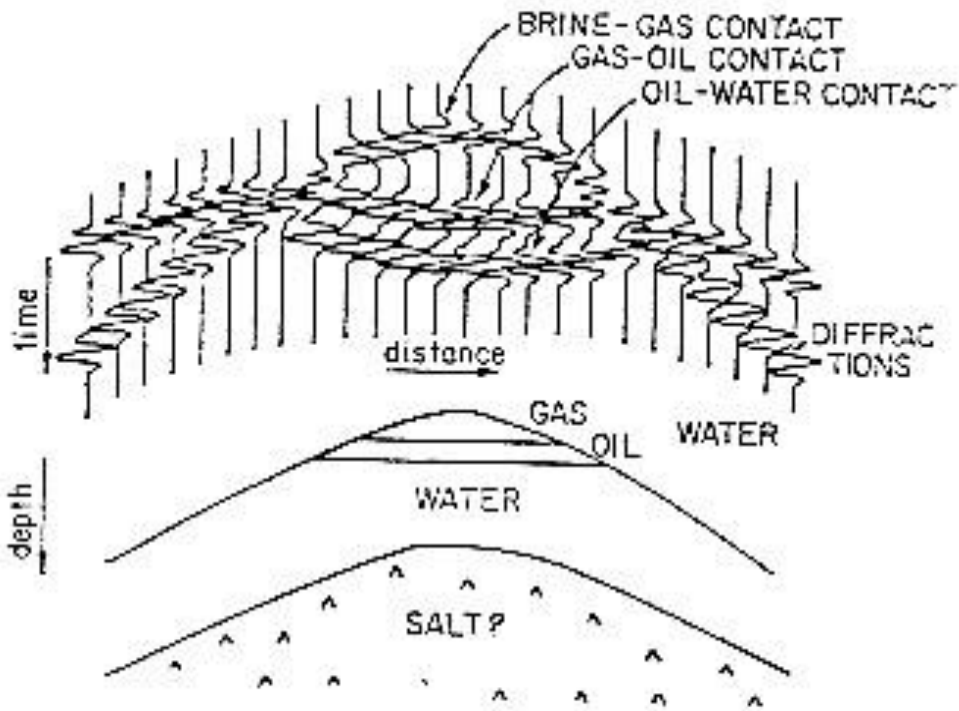


Fig. 3.29 – *Bright spot* sintético (acima), correspondente a uma estrutura hipotética (abaixo) contendo gás e óleo (Fonte: Duarte, 1985).

As séries de correções supracitadas se fazem necessárias para corrigir ruídos, falsos sinais (que não traduzem ou geram falsas feições litoestratigráficas) quando forem

transformados em perfis ou linhas sísmicas, que representam a direção na qual são realizados trabalhos de registros sísmicos sucessivos, em posições pré-determinadas.

A interpretação sísmica é a terceira e última fase atribuída ao método sísmico. É atualmente realizada na própria tela do computador através de uso de programas específicos, desenvolvidos para essa finalidade. Ela é atribuída à equipe de interpretação sísmica, onde os produtos finais (linhas sísmicas ou perfis sísmicos) gerados pela equipe de processamento dos dados sísmicos serão avaliados por intérpretes os quais irão definir estruturas, possíveis litologias e profundidades que caracterizem uma área em estudo, a fim de determinar locais propícios à ocorrência de hidrocarbonetos. A seguir são detalhados os principais passos seguidos para o desenvolvimento da interpretação sísmica realizada na área estudada.

4.3.5. Desenvolvimento da Interpretação Sísmica

A interpretação sísmica desenvolvida neste trabalho foi direcionada para identificação e posicionamento dos corpos vulcânicos da área de estudo e envolveu basicamente a identificação de horizontes característicos dessa litologia. As análises foram baseadas nos conceitos de fácies sísmicas, na geometria apresentada pelos corpos, e na expressão sísmica dos estilos estruturais observados nas encaixantes, peculiaridades estas que permitiram o reconhecimento e diferenciação dos corpos durante as análises das seções. A seguir, é brevemente apresentado um embasamento teórico resumido a qual serviu de guia para as interpretações realizadas.

4.3.5.1. Fácies sísmica

É definida como uma unidade tridimensional, cuja área é determinada e constituída de reflexões sísmicas com parâmetros próprios, que a diferem das fácies sísmicas adjacentes (Brown Jr. & Fisher (1980) *in* Severiano Ribeiro, 2001). Elas refletem o registro de fatores geológicos, como, litologia, feições deposicionais, estratificação e etc., que as possam ter gerado. São caracterizadas por vários parâmetros, como, configuração interna, geometria, velocidade intervalar, continuidade, amplitude e frequência das reflexões, dentre outros, pois, através da visualização de detalhes das feições deposicionais e estratigráficas possibilitam a interpretação geológica do local onde o método sísmico for aplicado.

Dos arranjos ou configuração interna observáveis em interpretações sísmicas, as configurações do tipo transparente ou caóticas são as que apresentam maior probabilidade de

caracterizar corpos vulcânicos, particularmente aqui estudados, embora não seja de caráter distinguível exclusivo, caracterizando também corpos evaporíticos, por exemplo.

A configuração interna transparente ou *reflexion-free* é entendida como intervalos com ausência de reflexão, indicando litologia homogênea ou simplesmente não estratificada, enquanto a configuração do tipo caótica consiste em reflexões discordantes e descontínuas, sugerindo um arranjo desordenado das superfícies de reflexão (Ojeda (1988) e Mitchum Jr. et al (1977a) in Severiano Ribeiro, 2001). Nos corpos magmáticos identificados observou-se predominantemente a ocorrência dos arranjos ou configuração interna do tipo caótico.

Associados a estes, outro parâmetro diagnóstico que se mostra útil no estudo de ocorrência de rochas ígneas em ambientes de bacias sedimentares são as deformações associadas a estas. Nas classificações e mecanismos de intrusão propostos por Conceição et al. (1993) são observados um conjunto de elementos estruturais relacionados às deformações, que se fundamentam basicamente na geometria dos corpos ígneos e nos elementos estruturais presentes na encaixante.

Dentre os possíveis conjuntos de elementos estruturais descritos por Conceição et al. (1993) destacam-se, como caracterizando as deformações observadas na área estudada: a ocorrência de estruturas dômicas envolvendo lacólitos e soleiras, estrutura sinclinal periférica em flancos de diques e anticlinal sobreposto associado a estes.

As estruturas dômicas são formadas pelo arqueamento das camadas sedimentares sobrepostas, moldando-se conforme a forma geral do corpo ígneo. Seu padrão sísmico característico é expresso pela forma dômica dos refletores, amoldado pela geometria do lacólito, podendo atingir alguns quilômetros de extensão e poucas centenas de metros de fechamento vertical.

Os sinclinais periféricos são feições estruturais originadas por dobramento ou arqueamento de camadas sedimentares, formando sinclinais nos flancos dos diques. Podem se apresentar em dimensões variadas e com mergulho dos estratos variado, de poucos graus ou mesmo atingir os 90°, o que provoca sensível adelgaçamento das camadas, devido à compressão lateral. São classificados em seções de reflexões sísmicas por refletores em forma de sinclinal, truncados por uma zona cega central, que indica a presença do dique.

A estrutura anticlinal sobreposta é um tipo de deformação provocada pelo arqueamento das camadas subjacentes a terminação superior da intrusão do dique na forma de um anticlinal. É também conhecido como “estrutura-cogumelo” e é identificada em linhas sísmicas pela presença de um anticlinal sobrepondo-se a uma zona cega, indicativa do corpo intrusivo.

5. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Sub-Bacia do Platô de Pernambuco compõe a porção *offshore* da Bacia de Pernambuco que se encontra num contexto geológico bastante interessante e pouco conhecido, com um registro bibliográfico bastante escasso. Salienta-se que todo o conhecimento alcançado nesta região, até o presente trabalho, foi obtido através por fontes indiretas (dados geofísicos).

O panorama estratigráfico da Bacia de Pernambuco e de seu arcabouço estrutural tem sido alvo de especulações diversas, embasadas num grau de conhecimento geológico-geofísico bastante incipiente, em relação às demais bacias marginais. Os primeiros trabalhos de conhecimento estratigráfico da Bacia de Pernambuco-Paraíba surgiram nas décadas de 50 e 60, provenientes essencialmente de geologia de superfície.

Em 1960, a PETROBRAS perfurou o primeiro poço (2-I-1-PE) na costa pernambucana (Ilha de Itamaracá), onde o embasamento foi encontrado a apenas 400m de profundidade (Feijó, 1994). Este único poço desestimulou estudiosos da época na busca de ocorrências de hidrocarbonetos devido à pouca espessura de sedimentos. Em trabalhos geofísicos subsequentes, os resultados obtidos apresentavam divergências significativas, dentre elas, o bloco negativo do Cupe onde a profundidade dos sedimentos foi calculada em pelo menos 3.000 m (Rand, 1976, 1978 e 1986).

Em 1982, foi perfurado pela PETROBRAS o segundo poço (2-CPE-1-PE) na praia do Cupe, o qual atingiu 3000m sem atingir ao embasamento (Feijó, op. cit.). Esse fato levantou hipóteses sobre a existência de profundidades do embasamento bem maiores do que as anteriormente consideradas e remeteu à futura subdivisão da Bacia de Pernambuco-Paraíba.

A Bacia de Pernambuco carece de integração dos dados geológico-geofísicos existentes em terra com aqueles do BDEP (Banco de Dados de Exploração e Produção) criado pela Agência Nacional do *Petróleo* (ANP), relativos às áreas imersas (sísmica, poços, gravimetria e magnetometria). Assim, o tema desta dissertação acha-se centrado na integração geológica e geofísica dos dados acima mencionados. É possível que estudos

integrados, à luz de modelos e/ou abordagens alternativas, possibilitem estabelecer um novo cenário para o futuro exploratório da Bacia de Pernambuco e, em especial, do Platô de Pernambuco.

Até bem pouco tempo, ela apresentava-se como desinteressante, do ponto de vista exploratório, tendo esse conceito mudado a partir da compilação de vários estudos Rand (1967, 1977, 1982, 1985 e 1990), Brito Neves (1982), Alheiros (1987 e 1989), Lima Filho et al (1998 e 2005) dentre outros. Estudos desses autores conduziram à separação das Bacias Pernambuco e Paraíba e, a partir de então, transformou-se a visão desses locais como distintos e atrativos de estudos, face à possibilidade de geração e acumulação de hidrocarbonetos, principalmente nas sub-bacias *onshore* e *offshore* da faixa sul (Bacia de Pernambuco), sendo posicionado nessa última a área de interesse deste trabalho.

A Sub-Bacia do Platô de Pernambuco encontra-se totalmente inserida na porção *offshore* da Bacia de Pernambuco e foi pela primeira vez descrita por Liandrat et al. (1989), em estudos usando levantamentos aeromagnetométrico “*Off-shore*” na porção do litoral brasileiro compreendida entre Salvador e João Pessoa. Ele aponta para a existência desta sub-bacia a partir da observação de um baixo magnético com um formato triangular, quando visto em planta, indicativo de se tratar de uma área passível de abrigar petróleo.

Segundo o contexto estrutural apresentado para esta sub-bacia (Figs. 4.1a e 4.1b), a mesma encontra-se alinhada com o eixo do Graben da Foz do São Francisco, apresentando estrutura semelhante a este. Ela é limitada a SW pelo alto de Maragogi; a NE por um alto externo pouco profundo que apresenta o mesmo padrão magnético do maciço Pernambuco-Alagoas; e a SE por outro alto externo que representa a continuação para NE do alto externo Sergipe-Alagoas, supostamente pertencente ao Cinturão Atlântico (Liandrat et al., op. cit.).

Outros autores descreveram a região do Platô de Pernambuco representando uma faixa de crosta continental distendida.

Dentre eles, Gomes et al. (1997) e Gomes (2005), que através de interpretações de perfis geofísicos (sísmico e gravimétrico) apontam o Platô de Pernambuco como uma província geofísica associada à Bacia de Pernambuco-Paraíba (antiga denominação). Segundo suas interpretações sísmicas, o Platô apresenta uma “estruturação típica de crosta continental distendida, com a presença de uma seqüência contínua de blocos rotacionados sintéticos” e é levantada a hipótese de que a geometria estrutural do Platô pode ser tentativamente representadas por falhas do tipo “*detachment*”, semelhante às utilizadas em modelos que envolvem distensão crustal ao longo de zonas de cisalhamento sub-horizontais (Fig. 4.2).

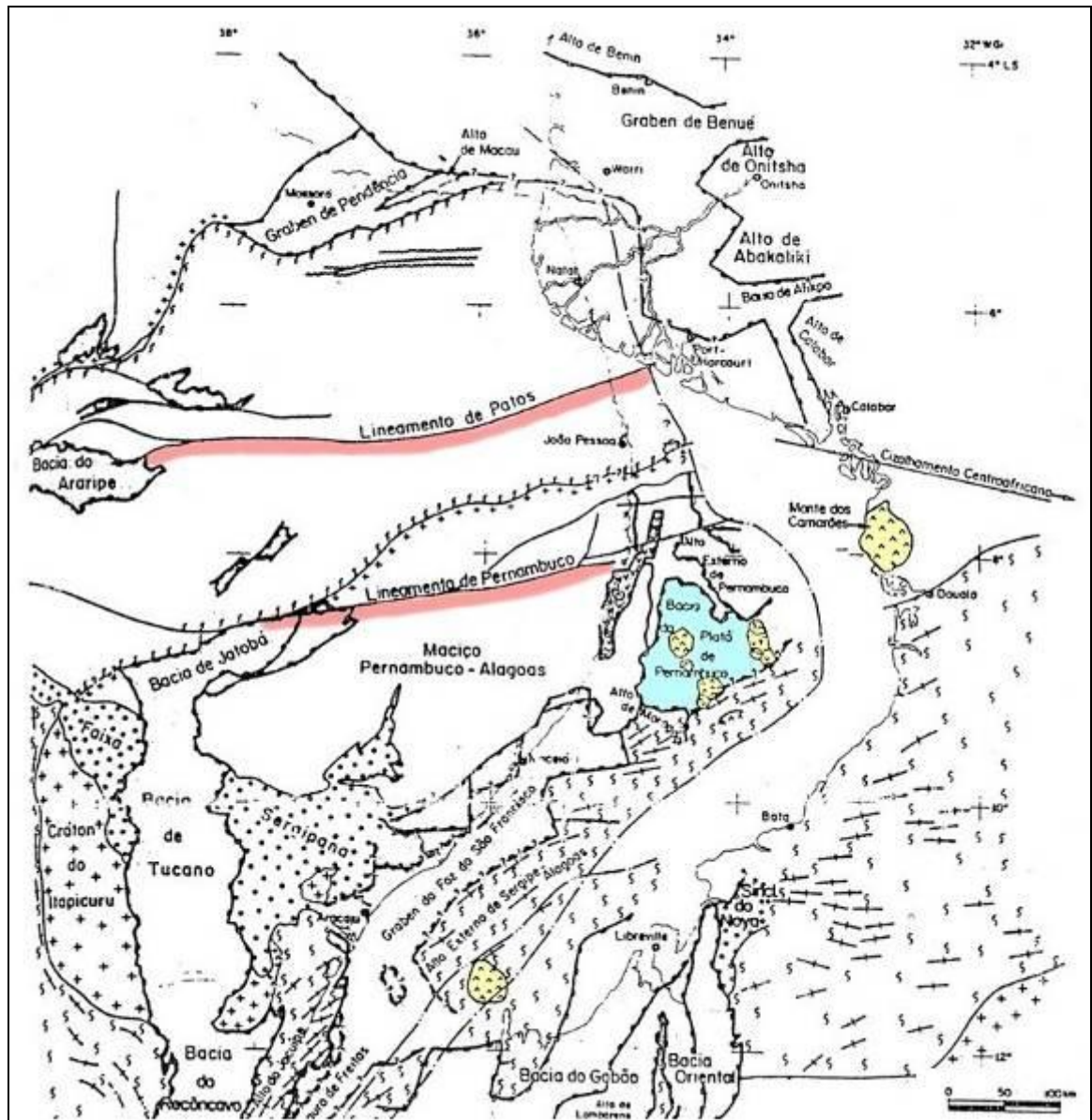


Fig. 4.1a – Mapa mostrando o Arcabouço Estrutural do nordeste do Brasil, no qual está inserida a Sub-Bacia do Platô de Pernambuco (modificado de Liandrat et al., 1989).



Fig. 4.1b – Detalhe da figura anterior destacando a Sub-Bacia do Platô de Pernambuco (modificado de Liandrat et al., 1989).

Eles apontam ainda para a espessura sedimentar máxima da ordem de 4600 m, no bloco proximal, baseado na conversão de dado sísmico (tempo-profundidade) e em cálculos das isópacas totais de sedimento e são tentativamente apontados os prováveis limites entre crosta continental (distendida) e crosta oceânica além de apontar alinhamentos visíveis NW-SE na porção central, corroborando os resultados obtidos nos trabalhos de Liandrat et al. (1989) (Fig. 4.2).

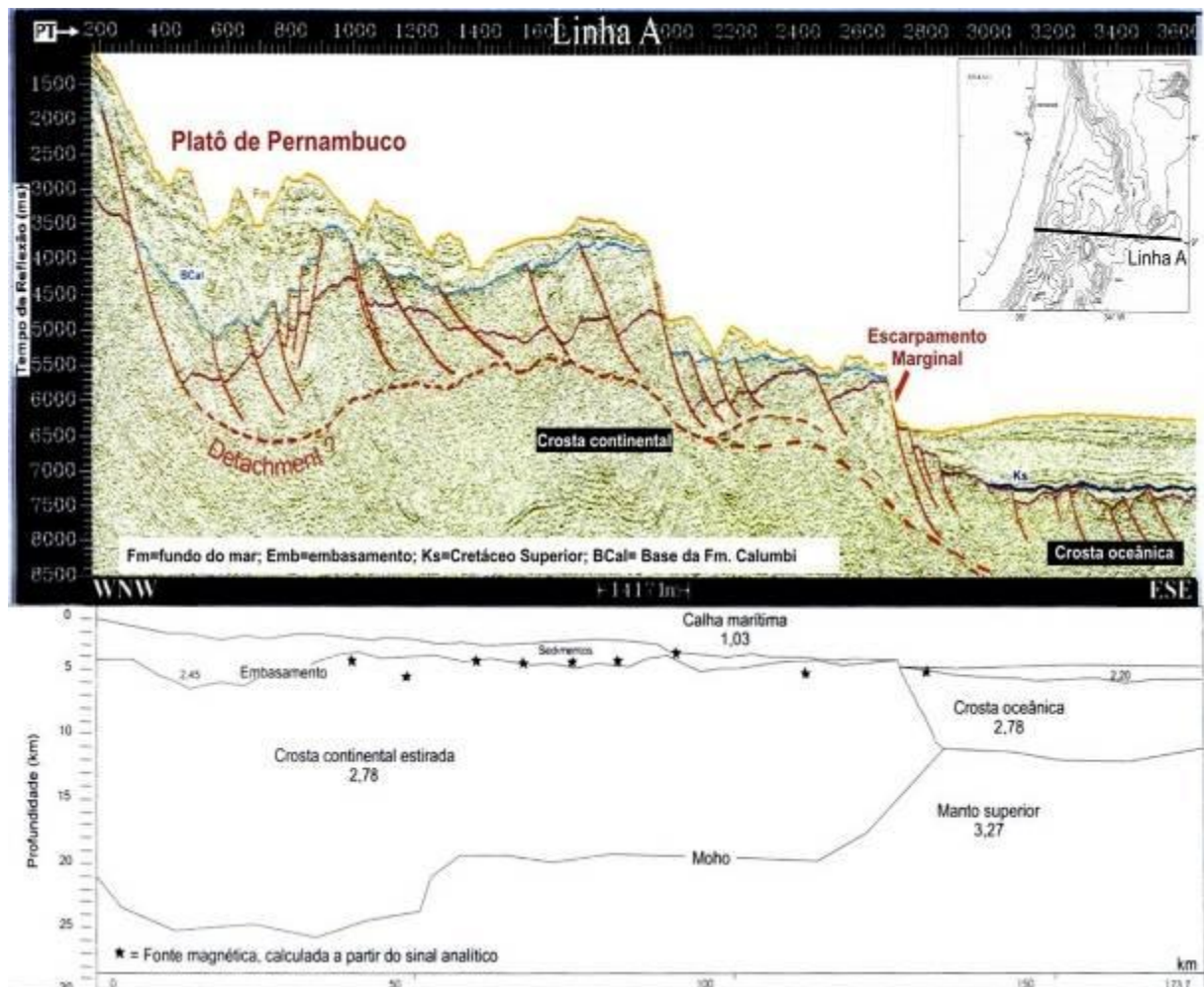


Fig. 4.2 – Interpretação sísmica e modelagem gravimétrica de uma porção do Platô de Pernambuco, com a interpretação da estruturação no platô e a localização possível da transição crosta continental - crosta oceânica (Gomes et al., 2005).

Em 1986 Alves & Costa propuseram uma coluna estratigráfica para a região do platô de Pernambuco (Fig. 4.3) baseados em estudos sismo-estratigráficos, envolvendo correlação entre as fases deposicionais e erosionais da porção norte do Platô e da região *onshore* da Bacia de Pernambuco. Segundo esses autores, a seqüência sedimentar seria composta por quatro unidades deposicionais (I, II, III e IV), separadas por eventos erosivos representados na Fig. 4.3 pelas discordâncias regionais D0, D1, e D2.



Fig. 4.3- Coluna Estratigráfica proposta para a região do Platô de Pernambuco, segundo Alves & Costa (1986) in de Moraes (2008), com modificações.

Para esses autores, durante a fase de rifteamento dos continentes, supostamente desenvolveram-se grabens que teriam sido preenchidos por arenitos terrígenos intercalados com folhelhos, siltitos e ocasionalmente conglomerados (Unidade I) aparentemente erodidas no final do ciclo sedimentar. Esta unidade teria sido depositada entre o Neocomiano e o Aptiano, em meio a manifestações magmáticas básicas e/ou alcalina e seria correlacionável à Formação Cabo da porção *onshore* da Bacia Pernambuco.

Sobreposta a esta, foi depositada uma segunda seqüência (Unidade II) transgressiva possivelmente de calcarenitos e calcilitos de idade Albiana-Paleocênica, correspondente à fase carbonática das bacias marginais brasileiras. A correlação adotada para a sedimentação desta unidade se dá entre os calcários Albianos de águas rasas do Platô e a Formação Estivas da região *onshore* e entre os carbonatos de águas mais profundas representando as porções distais de sedimentos as Formações Beberibe (terrígenos + carbonáticos), Gramame (Carbonática) e Maria Farinha (Carbonática).

A unidade II sofreu duas fases erosivas principais: uma de provável idade Eo-Paleocênica e outra no final do Oligoceno. A primeira fase erosiva é evidenciada por um profundo canal preenchido por sedimentos regressivos de características turbidíticas (Unidade III) e recorta as seqüência anteriores. A outra (Unidade IV) parece ter erodido e nivelado toda

a superfície do Platô, servindo de substrato para a quarta seqüência deposicional, supostamente, pelágica pós-Oligocênica.

Durante a fase de deposição dos fluxos turbidíticos da Unidade III a porção costeira experimentou um extenso hiato deposicional e a correspondência da seqüência pelágica da Unidade na IV é atribuída aos clásticos continentais da Formação Barreiras, da porção *onshore* da Bacia Pernambuco.

A Fig. 4.4 apresenta a seção AB trazendo o esquema interpretativo sismo-estratigráfico sugerido no trabalho de Alves & Costa (op. cit.), em uma seção sísmica multicanal da PETROBRAS (idealizado por D. L. Bisol, *in* Alves & Costa, 1986), mostrando os principais eventos erosivos e sedimentares ocorridos no platô.

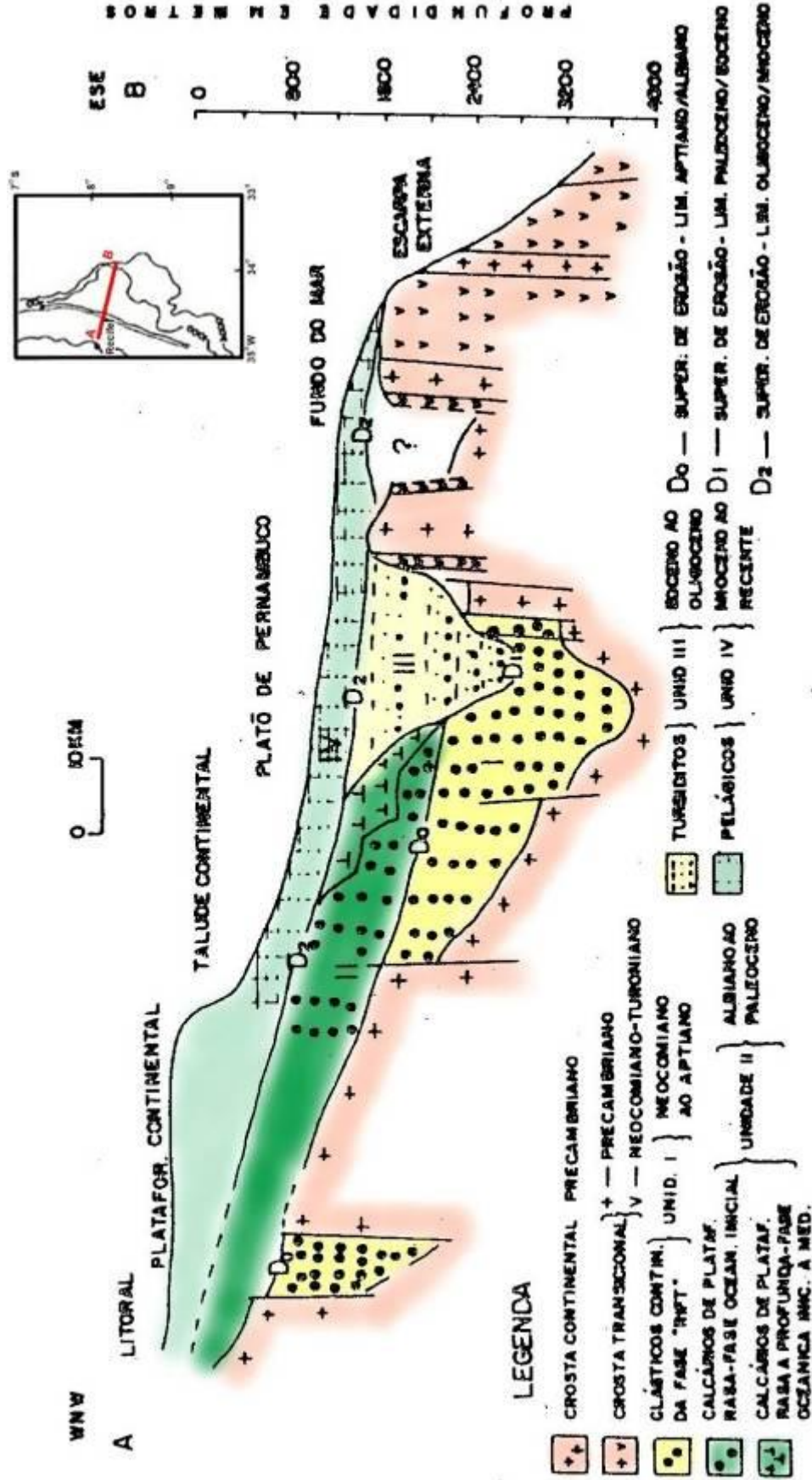


Fig. 4.4 - Esquema interpretativo da sismo-estratigrafia do Platô de Pernambuco na seção sísmica AB idealizado por D. L. Bisol, in Alves & Costa (1986), com modificações. Localização (à direita) adaptada de Costa & Maia (1986).

6. DESENVOLVIMENTO DOS TRABALHOS

O estudo de seções sísmicas, associado ao modelamento magnetométrico e gravimétrico 2D e 3D, foi realizado com o propósito de obter uma melhor compreensão geral da área em estudo, direcionando para uma visão focalizada na concepção do papel e do comportamento dos corpos ígneos no contexto da Sub-Bacia do Platô de Pernambuco. A seguir são descritas as etapas de processamento de dados dos Métodos Potenciais; a interpretação aplicada a cada um dos métodos isolados; a integração dos dados de Métodos Potenciais; e, por fim, a integração analítica dos três métodos estudados, apresentando os modelos resultantes e a integração mais relevante obtida. Dessa forma, busca-se a caracterização dos corpos ígneos estudados quanto às suas formas, posicionamentos tectono-estratigráficos e importância, negativa ou positiva, na geração de estruturas acumuladoras de petróleo e/ou gás, na Sub-Bacia do Platô de Pernambuco.

6.1. MÉTODOS POTENCIAIS - PROCESSAMENTO DOS DADOS

Como anteriormente mencionado, a área de interesse em estudo nesta dissertação é a Sub-bacia do Platô de Pernambuco. Entretanto, para fins das análises de mapas e perfis, tanto para Métodos Potenciais como Sísmicos, salienta-se que será considerada neste trabalho o trecho localizado entre as latitudes 08°00' (Recife) e 09°12' (Maragogi) e as longitudes 34° 59'46'' e 33° 32'40'', que engloba toda a área da Bacia de Pernambuco e parte das suas vizinhas Bacias de Alagoas e da Paraíba.

O trabalho desenvolvido, no que diz respeito aos métodos potenciais, voltou-se inicialmente ao ajuste dos dados recebidos, por estes fazerem parte de áreas contíguas e/ou superpostas. Os arquivos gravimétricos e magnetométricos obtidos foram recebidos em formato de arquivos *.gdb*. Estes foram analisados, integrados e pré-processados, resultando em mapas de anomalia Bouguer e de anomalia magnética. A integração ou ajuste desses mapas foi indispensável, dada a observação acima. Dos métodos testados no programa Oasis Montaj (GEOSOFT), o “Método da Sutura” (*Suture*) foi o que apresentou melhor resposta.

Realizou-se um estudo analítico dos possíveis procedimentos de nivelamento a serem adotados a fim de evitar erros de junção, por se tratar de áreas contendo vários arquivos obtidos em equipamentos, épocas e técnicas de aquisição diferentes, além de apresentar grandes amplitudes e problemas como deficiência de volume e má qualidade na distribuição geográfica dos pontos.

Antes da interpolação (dados brutos) foi realizada a análise comparativa dos arquivos a serem nivelados para possibilitar um controle de qualidade através do acompanhamento do comportamento dos dados em todas as fases do nivelamento.

Resumidamente, abaixo se encontra descritas as análises seguidas nos dois Métodos Potenciais aqui estudados.

6.1.1. Gravimetria

Na Gravimetria foi realizado o nivelamento de cinco arquivos estudados, os quais foram obtidos por diferentes tipos de aquisições, dentre elas, medidas de terra, de mar (superfície), de fundo e as de levantamentos aéreos, resultando na obtenção do Mapa de Campo Total (Bouguer) preliminar.

Para a escolha do Métodos de Junção dos Grids a ser utilizado na gravimetria foram inicialmente testados no programa Oasis Montaj (GEOSOFT) os métodos *Suture*, *Blend* e *Suture-Old*. O “Método da Sutura” (Suture) foi o que apresentou melhor ajuste em resposta ao nivelamento de dados. Foi também ajustado o valor da célula dos arquivos a serem nivelados, sendo o valor médio definido como o valor padrão.

6.1.2. Magnetometria

Na magnetometria foi realizado o nivelamento de apenas dois arquivos estudados, os quais foram obtidos por levantamentos aéreos, resultando na obtenção dos Mapas de Anomalias Aeromagnéticas (Figs. 5.1A, B e C).

Inicialmente foi analisada a planilha do primeiro arquivo, correspondente aos dados da porção mais ao norte (ou parte superior) e que originou o Mapa de Anomalia Aeromagnética da parte superior (Fig. 5.1A). Em seguida, foi analisada a planilha o segundo arquivo, correspondente aos dados da porção mais a sul (ou parte inferior), que de forma análoga originou o Mapa de Anomalia Aeromagnética da parte inferior (Fig. 5.1B).

Depois de aplicado o “Método de Sutura” do programa da GEOSOFT “Oasis Montaj”, para os ajustes dos mapas magnéticos (das partes superior e inferior), obteve-se como produto o Mapa de Anomalia Aeromagnética, como mostrado na figura Fig. 5.1C.

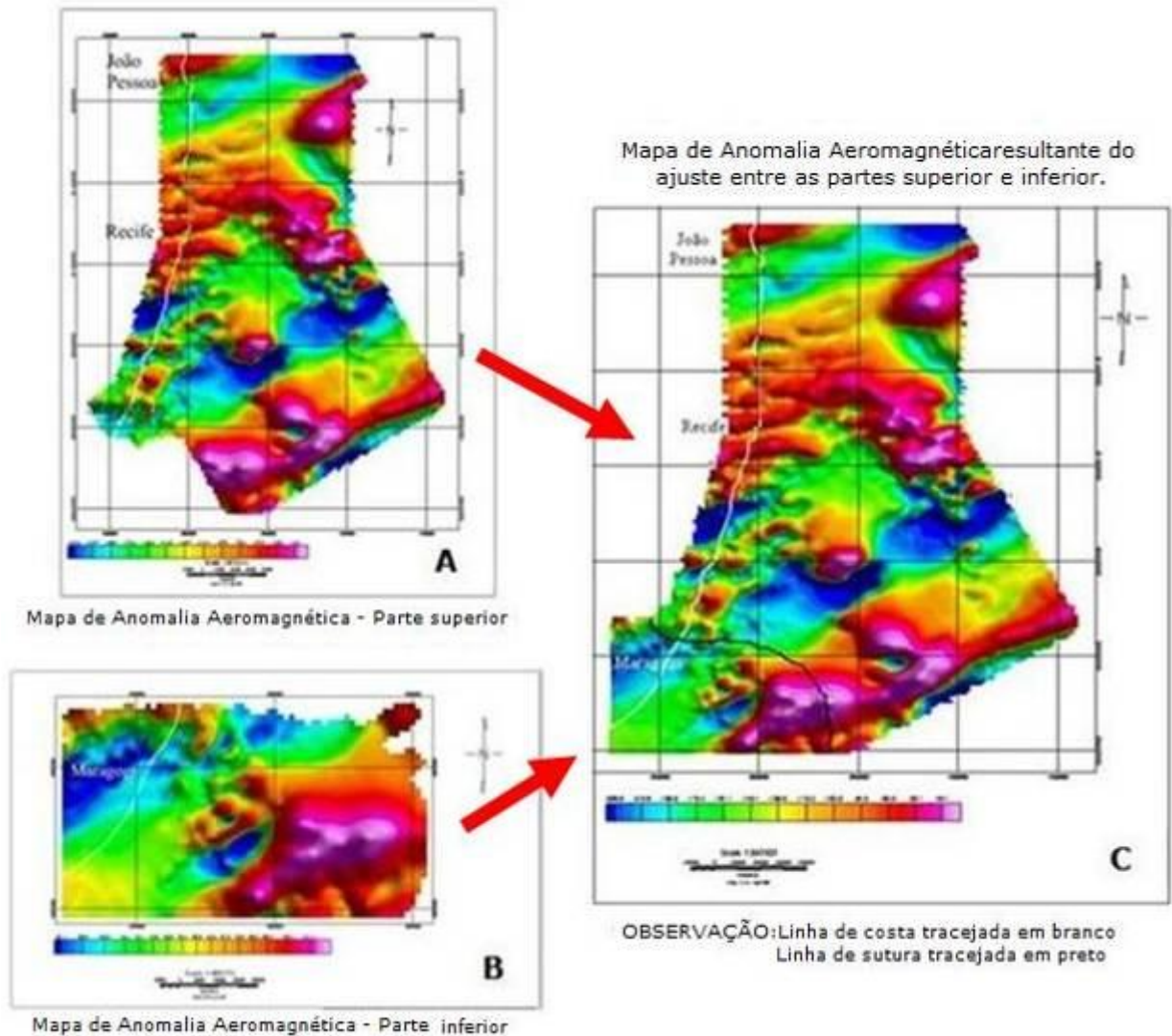


Fig. 5.1 – Mapas de Anomalias Aeromagnéticas: A - parte superior, B - parte inferior e C – Junção de A e B

Nestes mapas (Figs. 5.1A, 5.1B e 5.1C) as linhas em branco nos representam a linha de costa e a linha em preto é a linha de “sutura” entre os mapas das partes superior e inferior. O ajuste observado é satisfatório, pois são notórias as continuidades das anomalias próximas das bordas “saturadas” de cada um dos mapas isoladamente e também a anomalia positiva (rósea) a sudeste, no contato entre os dois mapas que mostra uma boa aproximação. Nas proximidades de Maragogi (Fig. 5.1C), a anomalia negativa (azul), referente ao “alto de Maragogi” é bem visível e contínua.

Nesta fase foram confeccionados os diversos mapas gravimétricos e magnéticos transformados, após a aplicação “gridagens” e filtros. Foram posteriormente realizadas análises qualitativas dos mesmos, onde foram identificados os compartimentos estruturais das áreas em estudo. A interpretação qualitativa destes produtos resultou na síntese da integração dos dados de Métodos Potenciais.

6.1.3. Confecção dos Mapas Transformados: Análise Qualitativa Gravimétrica.

O Mapa de Anomalia Bouguer (Fig. 5.2) foi o mapa base a partir dos quais todos os demais mapas gravimétricos foram transformados no domínio do tempo, da frequência, fornecendo informações sobre a área de estudo. Para isso, foram utilizadas técnicas de filtragem com a finalidade de evidenciar melhor as anomalias.

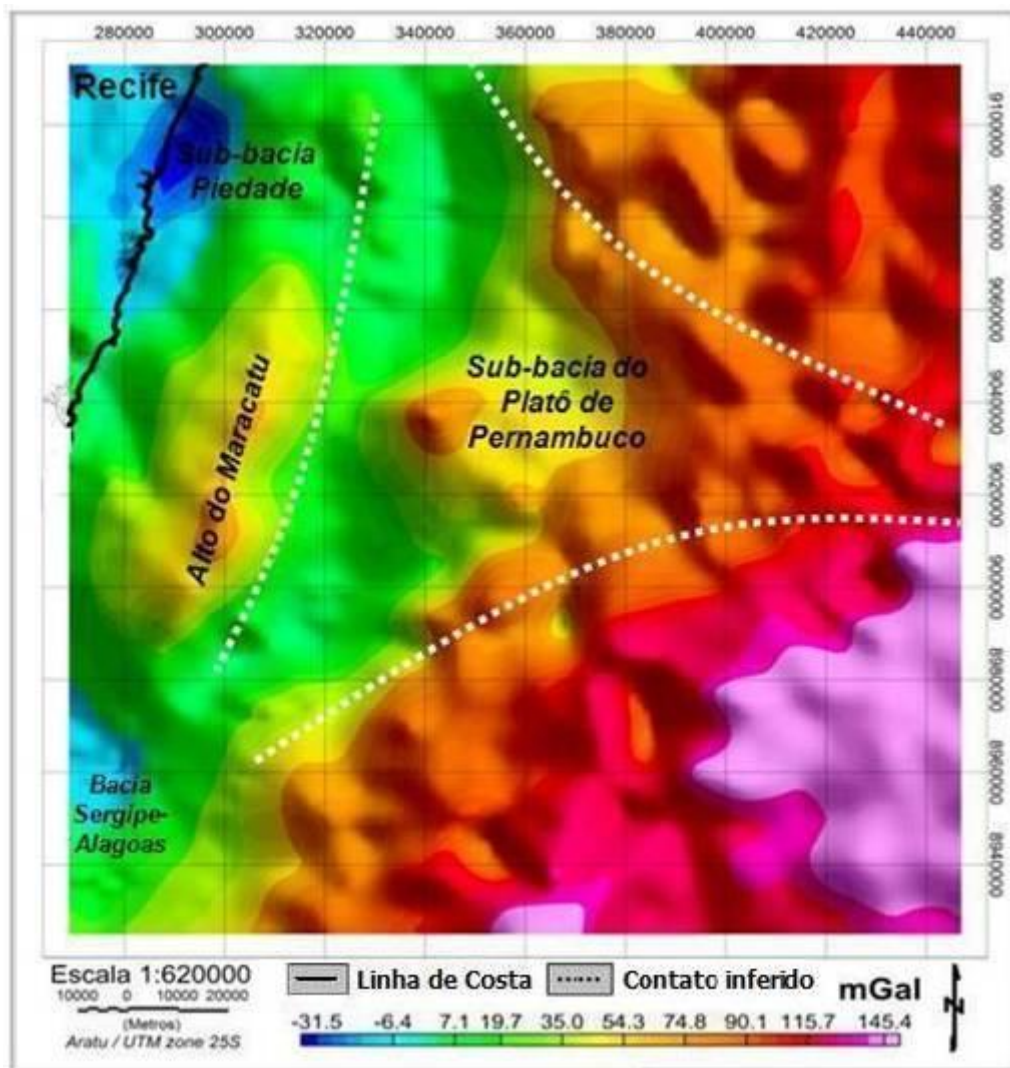


Fig. 6.2 - Mapa de Anomalia Bouguer - Mapas “Base” das análises gravimétricas

A partir da análise do Mapa de Anomalia Bouguer (Fig. 5.2) observou-se inicialmente que, em relação aos valores de gravidade, as linhas isogals apresentam-se com valores mais baixos nas porções continentais e notadamente crescem em direção ao assoalho oceânico, devido ao afinamento crustal e conseqüente subida da Descontinuidade de Mohorovicic. Estes variam entre -31.5 mGal e 145.4 mGal, representados por diferentes cores, conforme mostra a legenda do mapa.

No Mapa de Anomalia Bouguer foi possível identificar e individualizar as seguintes feições gravimétricas da área de estudo (Fig. 5.2):

- A noroeste encontra-se a Sub-bacia de Piedade – um graben posicionado a sul de Recife que compõe a porção norte da Bacia de Pernambuco e é caracterizado por um baixo gravimétrico expressivo.
- Na porção centro-oeste o Alto do Maracatu, caracterizado por um alto gravimétrico – é uma estrutura que apresenta orientação geral NNE-SSW (Almeida et. al., 2005b), sendo limitada a leste e a oeste por duas falhas de gravidade (visualizadas adiante).
- Ao sudoeste a Bacia Sergipe-Alagoas caracteriza por um baixo gravimétrico, limitada a nordeste pelo Alto de Maragogi, estrutura essa melhor visualizada em mapas a seguir.
- Na região central do mapa é perceptível uma concentração de valores gravimétricos baixos atribuídos a um embasamento mais profundo, o qual se encontra preenchido por camadas sedimentares mais espessas que caracterizam uma bacia sedimentar: a Sub-Bacia do Platô de Pernambuco (Liandrat, 1989). Observa-se nesta sub-bacia, a presença de estruturas vulcânicas, foco de maior interesse nesta dissertação, com destaque para um grande derrame vulcânico no seu centro.

A partir do Mapa de Anomalia Bouguer apresentado (Fig. 5.2) foram integradas todas as informações das componentes regional (Fig. 5.3) e residual (Fig. 5.4) da área em estudo, obtidas utilizando-se o filtro Gaussiano como padrão para a separação.

O Mapa Gravimétrico Regional gerado (Fig. 5.3) marca bem as divisões das zonas com anomalias de caráter profundo e regional, de grande comprimento de onda.

Analisando-se este mapa observa-se que, de forma semelhante ao Mapa de Anomalia Bouguer (Fig. 5.2) anteriormente analisado, há uma continuidade da tendência de crescimento das linhas isogals do continente para o oceano, sobretudo em direção ao sudeste, confirmando a origem da estrutura profunda atribuída à subida da Descontinuidade de Mohorovicic.

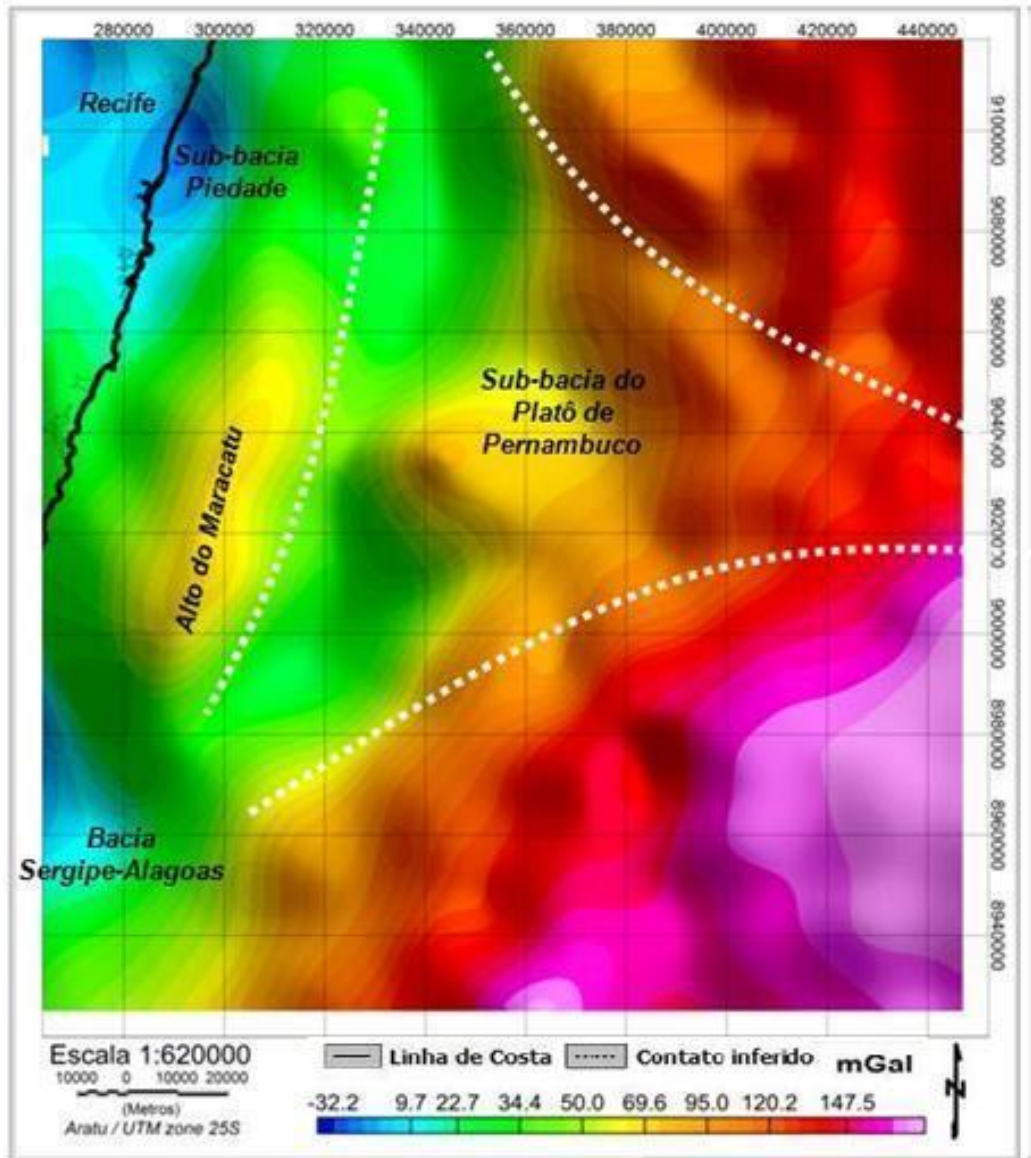


Fig. 6.3 - Mapa Gravimétrico Regional obtido a partir do Mapa de Campo Bouguer.

Nele também se destacam as feições da Sub-bacia do Platô de Pernambuco, Sub-bacia de Piedade, Alto do Maracatu e Bacia Sergipe-Alagoas já apontadas no Mapa de Anomalia Bouguer.

O Mapa Gravimétrico Residual (Fig. 5.4) é caracterizado pelas anomalias de pequeno comprimento de onda cuja origem é mais rasa, podendo destacar alguns detalhes que os mapas regionais não conseguem.

Dentre as feições notáveis mais importantes que puderam ser identificadas no Mapa Gravimétrico Residual (Fig. 5.4) estão diversos alinhamentos de anomalias apontados que atestam esforços sofridos pela Bacia de Pernambuco, durante a separação entre os continentes Sul-americanos e Africanos (Lima Filho, et al., 2005 e Almeida, et al., 2005a).

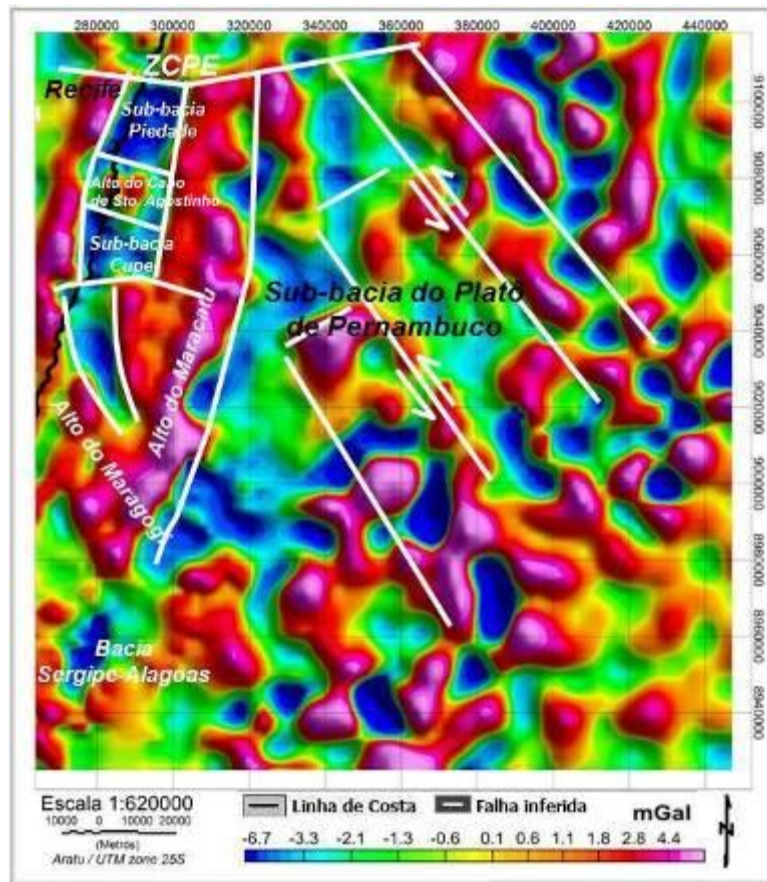


Fig. 6.4 - Mapa Gravimétrico Residual obtidos a partir do mapa de Campo Bouguer.

Esses alinhamentos são provenientes da existência de contrastes de gravidade provocados pela existência de falhas, predominantemente, de direção NE-SW (falhas de gravidade) e também NW-SE e N-S (falhas de transferência), relacionadas ao movimento de distensão da crosta continental, ocorrido na fase rifte (Almeida et. al., 2005b). Estas falhas estão destacadas principalmente na porção centro-norte do mapa, em um escalonamento de falhas (arranjo em dominó).

A noroeste do Mapa Gravimétrico Residual (Fig. 5.4) podem ser observados os compartimentos da Bacia de Pernambuco composta pelos Grabens de Piedade, ao norte e Cupe, ao sul, ambos identificados por baixos gravimétricos, e separados pelo Alto do Cabo de Santo Agostinho, onde é possível notar anomalias positivas causadas pelas vulcânicas presentes na área.

Na porção oeste deste mapa (Fig. 5.4) podem ser observadas estruturas caracterizadas por anomalias gravimétricas positivas, como o Alto de Maragogi com orientação NW-SE que separa atualmente, as Bacias de Sergipe-Alagoas e Pernambuco. O Alto de Maragogi se prolonga para nordeste formando um alto interno alongado denominado Alto do Maracatu

(Almeida, op. cit.), cujo prolongamento é orientado para NE-SW. Observa-se a existência de um alinhamento gravimétrico com direção aproximada E-W seccionando a parte central do Alto do Maracatu e também da Sub-Bacia Cupe, cujo padrão de deslocamento dos blocos associados apresenta caráter dextral.

O Mapa Gravimétrico de Sinal Analítico (Fig. 5.5) também obtido a partir do Mapa Gravimétrico Bouguer é comumente utilizado para se definir os limites da borda dos corpos causadores das anomalias, por destacar melhor as bases das estruturas. Ele realça as anomalias mais fortes e mostra seus limites ressaltados, dando uma idéia da amplitude do corpo responsável pela anomalia.

Neste mapa (Fig. 5.5) diversas estruturas se destacam como, os alinhamentos já apontados no Mapa de Campo Residual (Fig. 5.4), que representam as falhas de transferência (NW-SE) em arranjo dominó (na porção central-leste do mapa) e também as falhas de gravidade (NE-SW) geradas na fase rifte por distensão da crosta continental (Almeida et. al., op. cit.). Além destes é percebida a presença da Zona de Cisalhamento Pernambuco (ZCPE), estrutura importante que limita a Bacia de Pernambuco a norte (Neves et al., 2006 e Lima Filho, 1998).

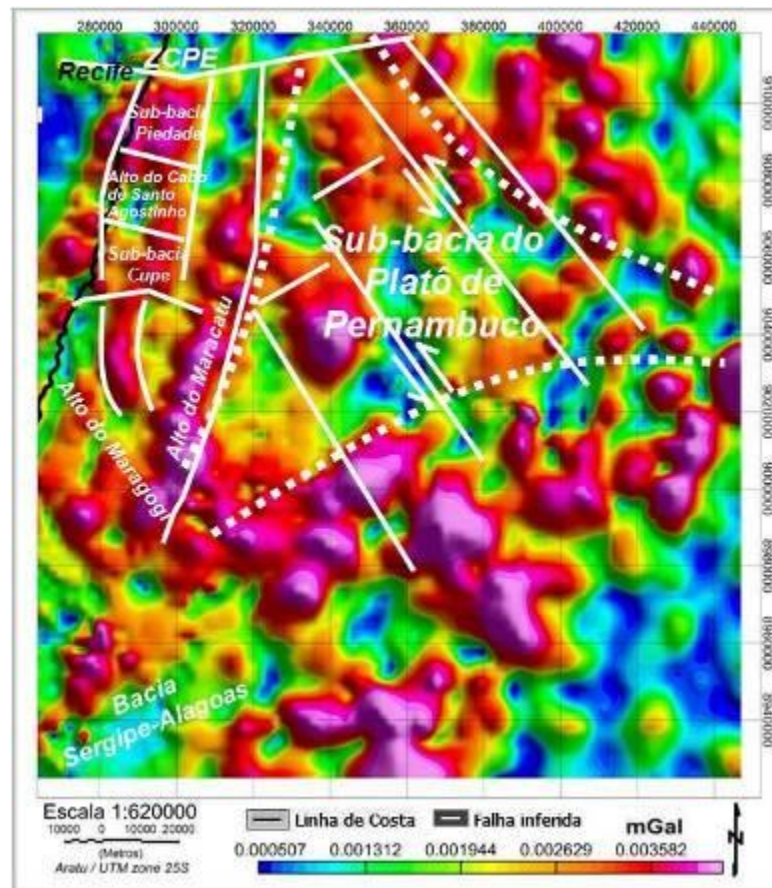


Fig. 6.5 - Mapa Gravimétrico de Sinal Analítico, filtro que mostra melhor a base das estruturas.

No Mapa Gravimétrico de Sinal Analítico (Fig. 5.5) podem ser vistos como uma estrutura única as estruturas do Alto de Maragogi, Alto do Maracatu e a borda do Maciço Pernambuco - Alagoas que descreve o limite oeste da Bacia de Pernambuco evidenciando a região basal dos altos citados onde se sobressaem com mais intensidade.

Além disso, várias estruturas vulcânicas podem ser destacadas neste mapa (Fig. 5.5), representados em geral pelas anomalias em rosa, principalmente a nordeste e ao sul da Sub-bacia do Platô de Pernambuco, por ser uma região injetada por diques devido ao afinamento crustal e início da crosta oceânica. Na parte central desta sub-bacia também se observa a presença de um grande centro vulcânico isolado.

O mapa continuação para cima (Fig. 5.6) advém de uma filtragem realizada através da elevação do plano de observação onde são ressaltados os maiores comprimentos de onda, suavizando as anomalias.

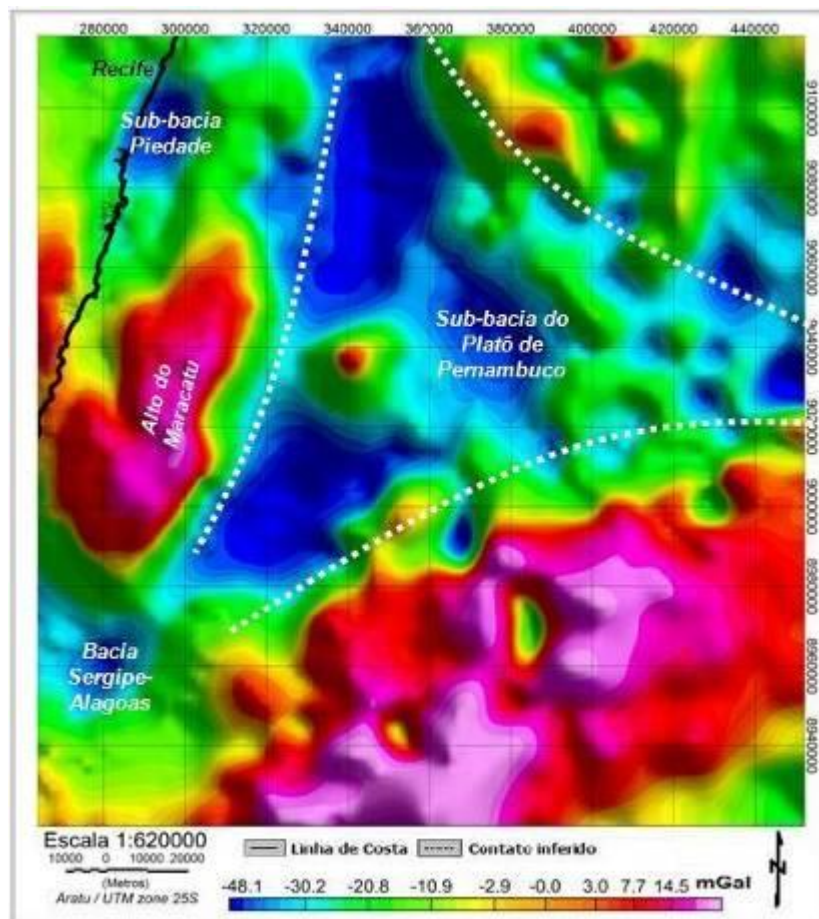


Fig. 5.6 - Mapa Gravimétrico de Continuação para Cima

As áreas anômalas deste mapa (Fig. 5.6) permite facilmente identificar das seguintes feições gravimétricas: A Sub-bacia do Platô de Pernambuco, onde está destacado seu formato

triangular; a Bacia Sergipe - Alagoas; O Alto do Maracatu; a Sub-Bacia de Piedade e o provável corredor de ligação existente em *off-shore* entre as Bacias de Pernambuco com a vizinha Bacia de Alagoas, ocorrendo ao sudoeste da Sub-bacia do Platô de Pernambuco, conforme podemos visualizar em azul.

6.1.4. Confecção dos Mapas Transformados – Análise Qualitativa Magnética

Os mapas magnéticos que serão apresentados foram confeccionados a partir dos arquivos disponibilizados, conforme mencionado na 1ª fase dos trabalhos. O Mapa de Campo Magnético Anômalo – CMA (Fig. 5.7) foi considerado o mapa de partida de onde todos os demais mapas foram transformados, possibilitando extrair informações da área em estudo através de uma análise qualitativa dos mesmos.

Os valores de intensidade de campo magnético observados no Mapa de Campo Magnético Anômalo – CMA (Fig. 5.7) variam de 361nT a – 698nT, estando representados por diferentes cores, conforme mostrado na legenda do mesmo.

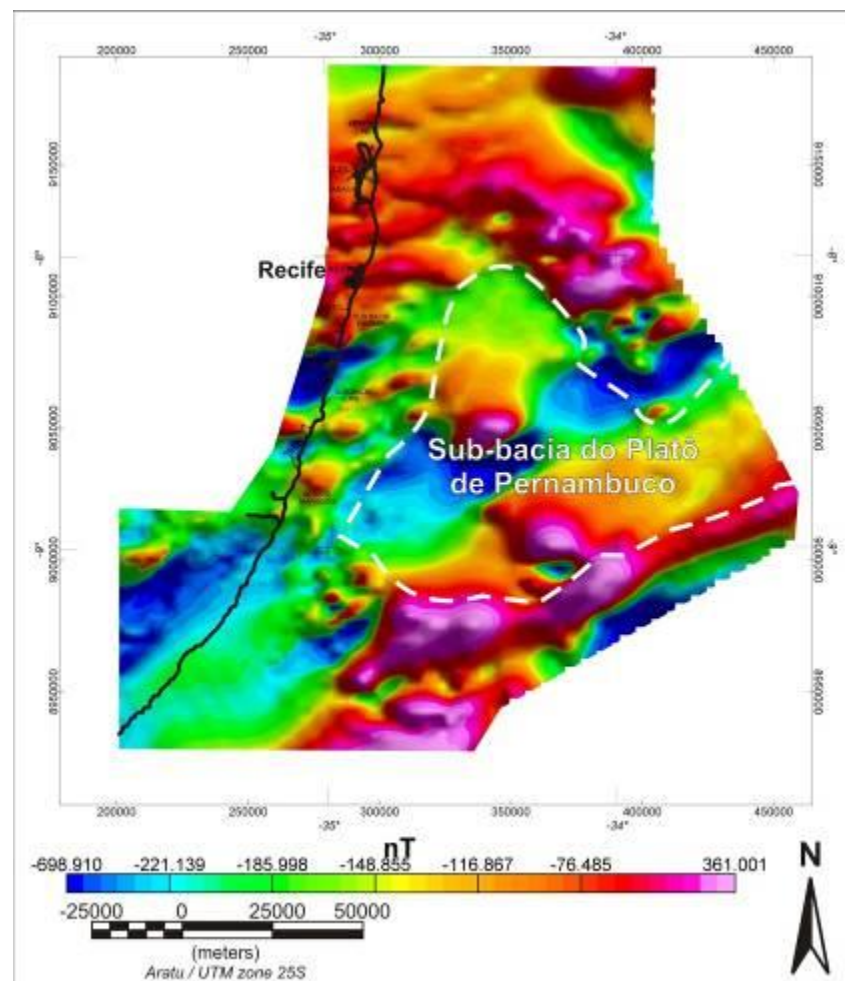


Fig. 6.7 – Mapa de Campo Magnético Anômalo - CMA

A principal feição que pôde ser notada no mapa CMA acima (Fig. 5.7) foi a Sub-bacia do Platô do Pernambuco (Liandrat et al. 1989), na porção central do mapa. Aqui são confirmados os valores do campo magnético relativamente suave, apontados por Costa e Barros (1988), que sugeriram um embasamento pouco magnético ou de grande profundidade caracterizando esta região.

Observa-se neste mapa (Fig. 5.7) que valores positivos e negativos se alternam, constituindo amplitude dos pares de anomalias (negativo e positivo), originadas da mesma fonte que por não estar posicionada nos pólos apresenta, portanto, anomalias bi-polares. Com a finalidade de suprimir esses efeitos, o CMA (Fig. 5.7) foi reduzido ao pólo resultando no Mapa de Campo Magnético Anômalo Reduzido ao Pólo (Fig. 5.8) e os outros mapas foram obtidos, a partir dessa redução.

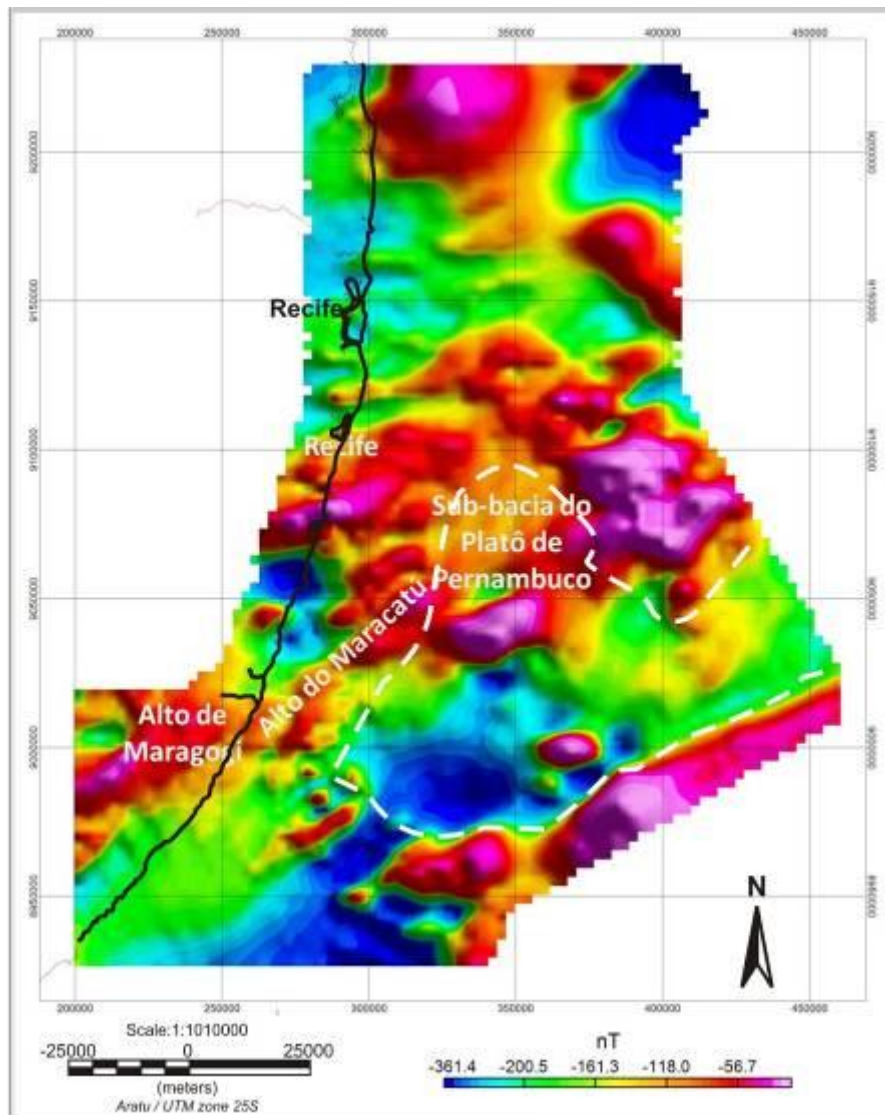


Fig. 6.8 – Mapa de Campo Magnético Anômalo Reduzido ao Pólo

Analisando-se o Mapa de Campo Magnético Anômalo Reduzido ao Pólo (Fig. 5.8), percebemos a presença de duas estruturas importantes assinaladas a oeste da Sub-Bacia do Platô de Pernambuco: O Alto do Maragogi, que marca a separação das Bacias Pernambuco e Sergipe-Alagoas, e seu prolongamento para NE nomeado Alto do Maracatu (Almeida, 2005).

Dentre os mapas magnéticos transformados procurou-se inicialmente obter informações em geral da área, através da análise do Mapa Magnético Regional (Fig. 5.9). Este mapa é caracterizado por anomalias de grande comprimento de onda, ressaltando bem as divisões das zonas anômalas de caráter profundo e regional.

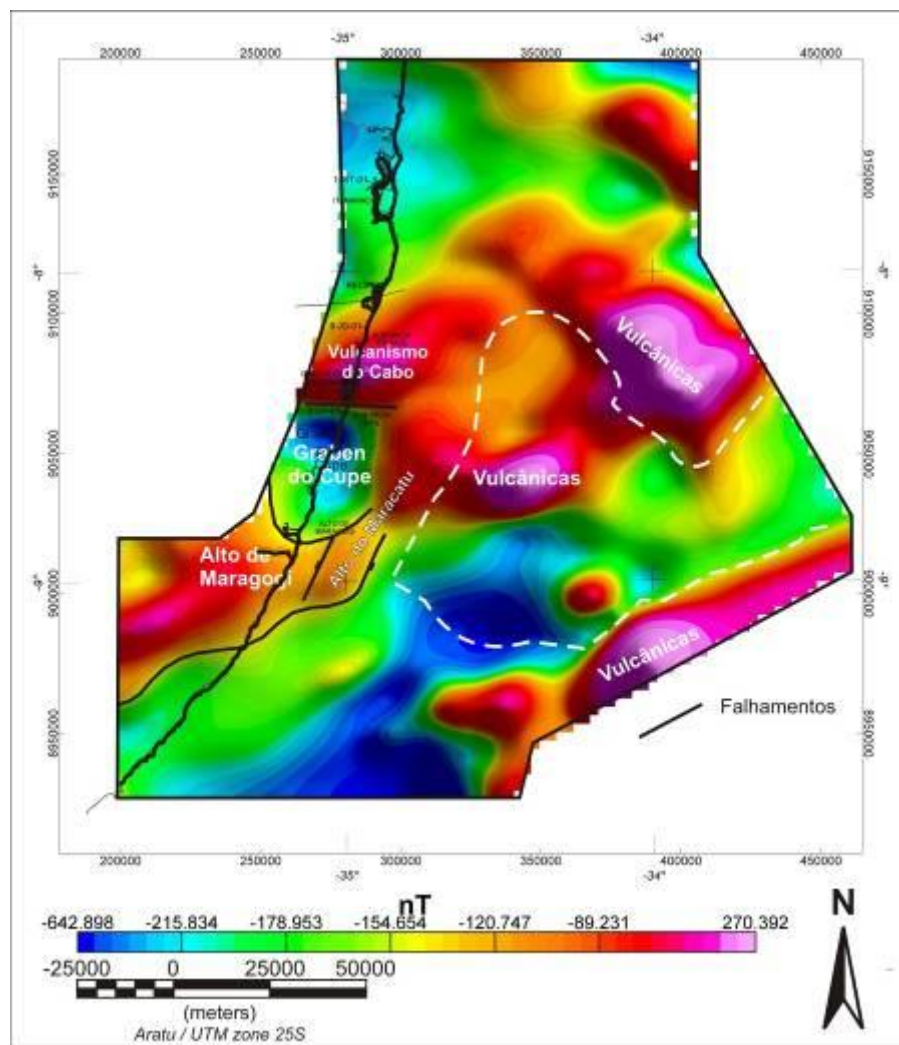


Fig. 6.9 – Mapa Magnético Regional, mostrando as feições mais regionais.

No Mapa Magnético Regional (Fig. 5.9) são destacáveis algumas estruturas importantes: na região *onshore* da Bacia de Pernambuco, percorrendo-se a linha de costa de Pernambuco no sentido sul, observam-se os domínios das rochas vulcânicas do Cabo (Nascimento et al., 2004), caracterizado por uma anomalia magnetométrica positiva e logo

abaixo desse o graben correspondente a Sub-bacia do Cupe (Lima Filho et. al., 2005) caracterizado por um baixo magnético limitado a sudeste pelo Alto do Maracatu anteriormente descrito. Seguindo-se ainda no sentido sul, imediatamente após o Graben do Cupe, o Alto de Maragogi aparece prolongando-se na direção NE-SW.

Neste mapa (Fig. 5.9), além do vulcanismo da região costeira, outros pontos de vulcanismos importantes são também assinalados por anomalias magnéticas positivas, como, os derrames ocorridos no interior da Sub-bacia do Platô de Pernambuco e circundando a mesma.

Partindo-se para uma observação de detalhe foram analisados outros mapas magnéticos transformados, como o Mapa Magnético Residual (Fig. 5.10) e o Mapa de Primeira Derivada Vertical (Fig. 5.11), que apresentam anomalias identificadoras de estruturas interessantes.

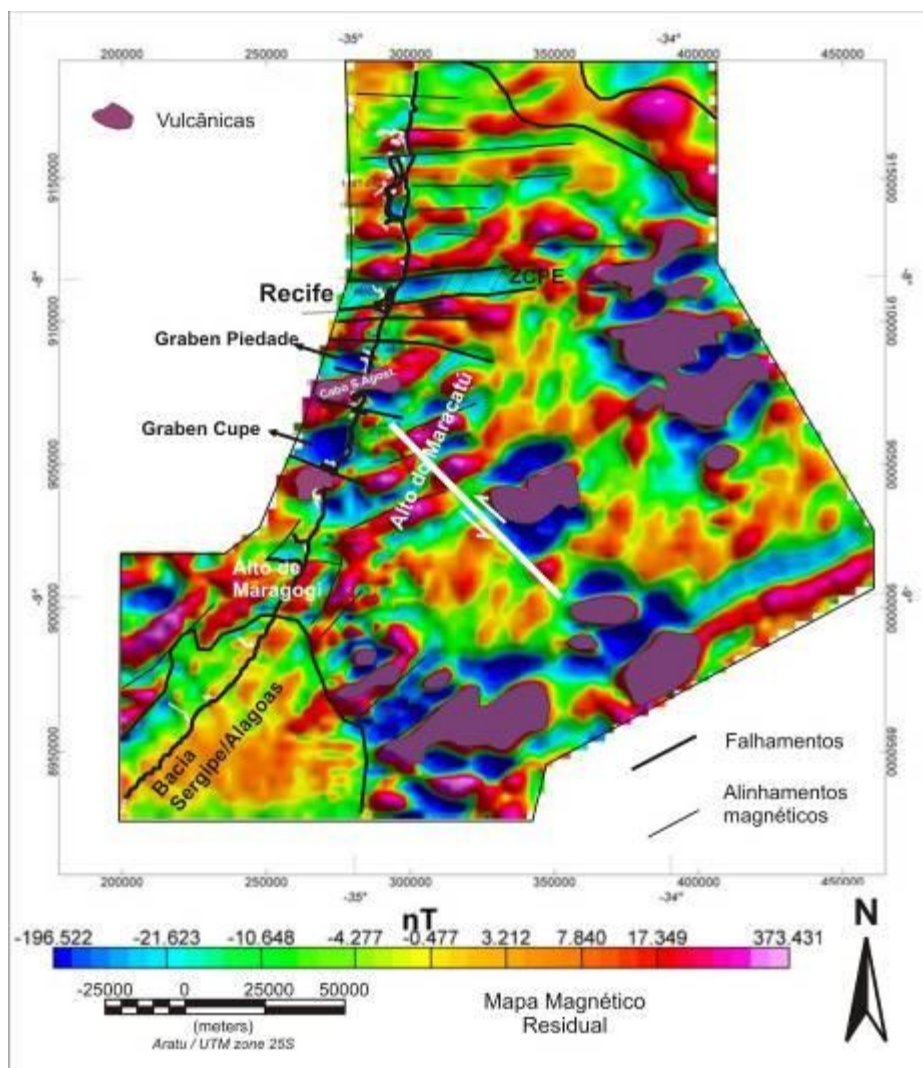


Fig. 6.10 – Mapa Magnético Residual.

Estes mapas (Fig. 5.10 e 5.11) evidenciam anomalias de origem mais rasa, devido a ambos serem formados pelas filtragens que preservam apenas dados de pequeno comprimento de onda. Essa característica permite destacar alguns detalhes não perceptíveis nos mapas regionais. Dentre as feições diferenciadas nestes mapas podemos citar o surgimento a sul do Recife do graben Piedade que caracteriza a Sub-bacia de mesmo nome, o qual não havia sido revelado nos mapas até aqui apresentados, devido ao fato de ser mascarado por anomalias magnéticas relacionadas à presença das vulcânicas do Cabo de Santo Agostinho. Observa-se ainda que esta sub-bacia é limitada a norte e a sul por duas falhas de direção aproximada WNW-ESSE.

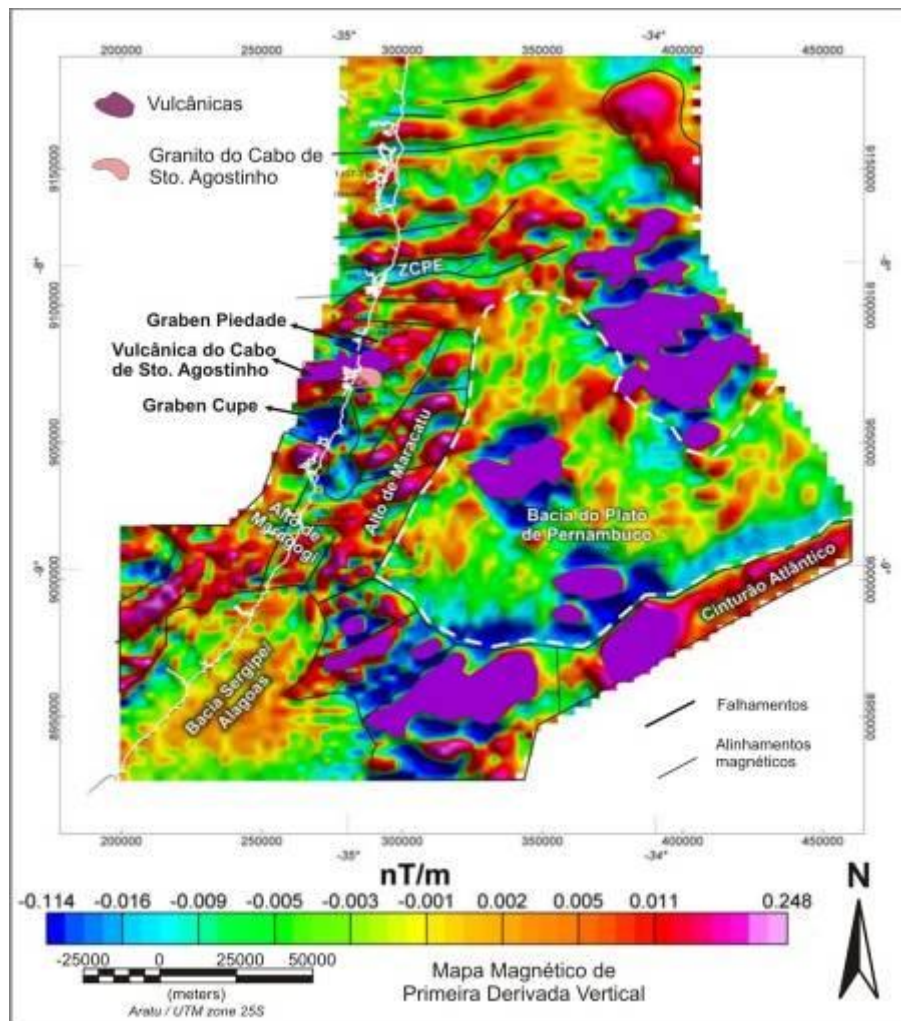


Fig. 6.11 – Mapa Magnético de Primeira Derivada Vertical destacando as rochas vulcânicas observadas.

Nestes mapas (Fig. 5.10 e 5.11) também pode ser notada uma das estruturas mais importantes na Formação da Bacia de Pernambuco: a Zona de Cisalhamento Pernambuco – ZCPE (Neves et al., 2006), que correspondente ao limite norte da Bacia de Pernambuco (Lima

Filho, 1998) e que teve um papel importante na separação final dos Continentes Sul-Americano e Africano estando registrada em ambos os continentes.

Podemos notar ainda no Mapa Magnético Residual (Fig. 5.10) a presença de diversos alinhamentos magnéticos com direções preferenciais NE-SW e NW-SE. Esses alinhamentos são atribuídos a esforço distensivo NW-SE, ocorrido na fase rifte, por ocasião da abertura do Atlântico Sul (Lima Filho, et al., 2005 e Almeida, et al., 2005b), que geraram falhas de transferência (NW-SE), destacada em branco, e falhas normais (NE). Essas estruturas são visíveis também no Mapa Residual Gravimétrico (Fig. 5.4).

No Mapa de Primeira Derivada Vertical (Fig. 5.11), destaca-se ainda a presença do Granito do Cabo de Santo Agostinho, indicado em rosa, em meio às vizinhanças das vulcânicas da linha de costa pernambucana. Neste mapa encontram-se também destacadas feições como, a região abrangida pela Sub-Bacia do Platô de Pernambuco, a ZCPE e a porção NE da Bacia Sergipe-Alagoas, todas anteriormente observadas.

Corpos responsáveis por anomalias podem ter os limites de borda melhor definidos em visualizações do Mapa de Sinal Analítico (Fig. 5.12), pois este mapa realça as anomalias mais fortes que se fazem presentes.

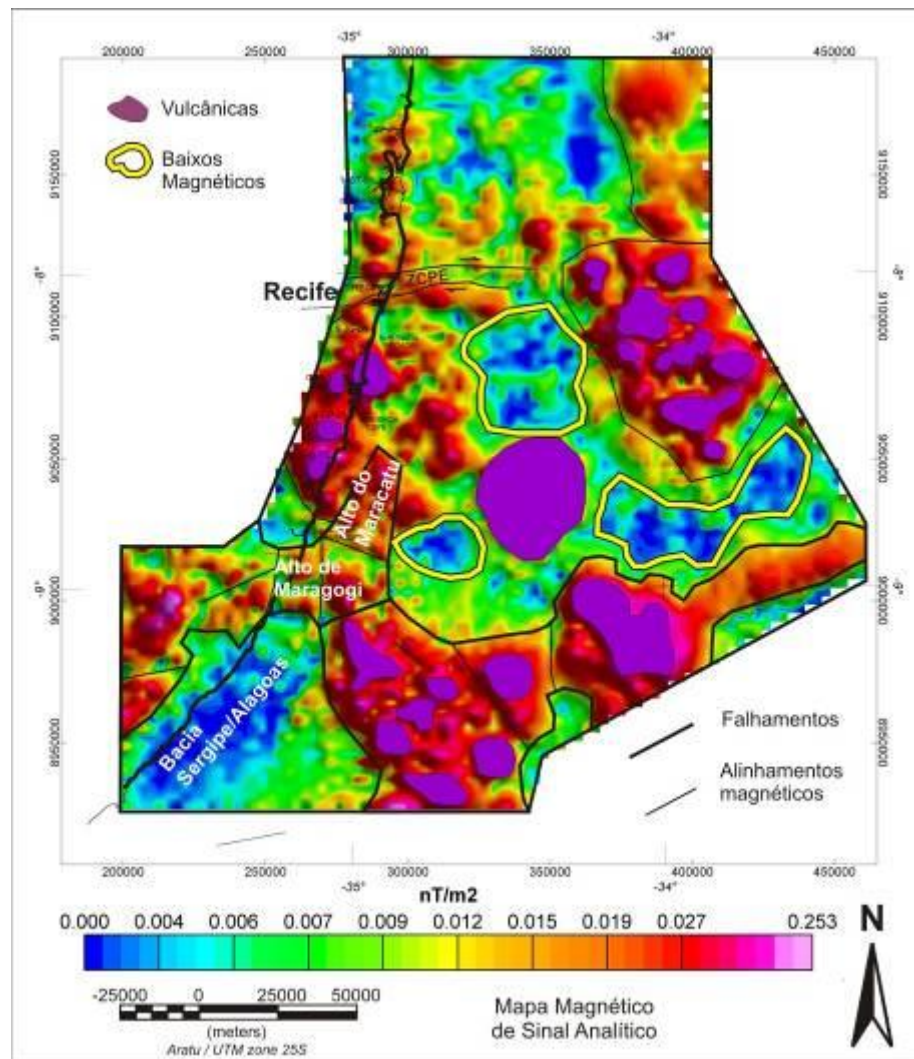


Fig. 6.12 – Mapa de Sinal Analítico mostrando as estruturas observadas.

Caracteristicamente no Mapa de Sinal Analítico (Fig. 5.12) da área em estudo, algumas anomalias não puderam ser destacadas devido à influência de sobreposição de outras mais fortes. Como exemplo, cita-se a ausência grabens de Piedade e do Cupe devido a esses serem mascarados pelas anomalias relacionadas à presença das vulcânicas do Cabo de Santo Agostinho. Os vulcões se apresentam como um agrupamento de vulcões menores compondo uma estrutura maior, o que reforça a idéia de diversas intrusões ou vulcões ocorrentes na mesma área, como nas áreas a nordeste e sudoeste do mapa. Na região da Sub-Bacia do Platô de Pernambuco são destacadas três regiões de baixo magnético, que podem ser reais ou representar apenas um exagero de contraste magnético entre o vulcão central muito magnético e as rochas circundantes.

É notável também a junção das vulcânicas do limite sul do platô com a região do Alto de Maragogi inicialmente restrito as proximidades da linha do costa e a região de baixo

magnético na porção sudoeste do Mapa de Sinal Analítico (Fig. 5.12), que correspondem aos domínios da Bacia Sergipe-Alagoas.

O mapa de primeira derivada vertical abaixo (Fig. 5.13) apresenta uma síntese das principais feições litológicas e estruturais identificadas na área, através de anomalias magnetométricas presentes nos mapas estudados.

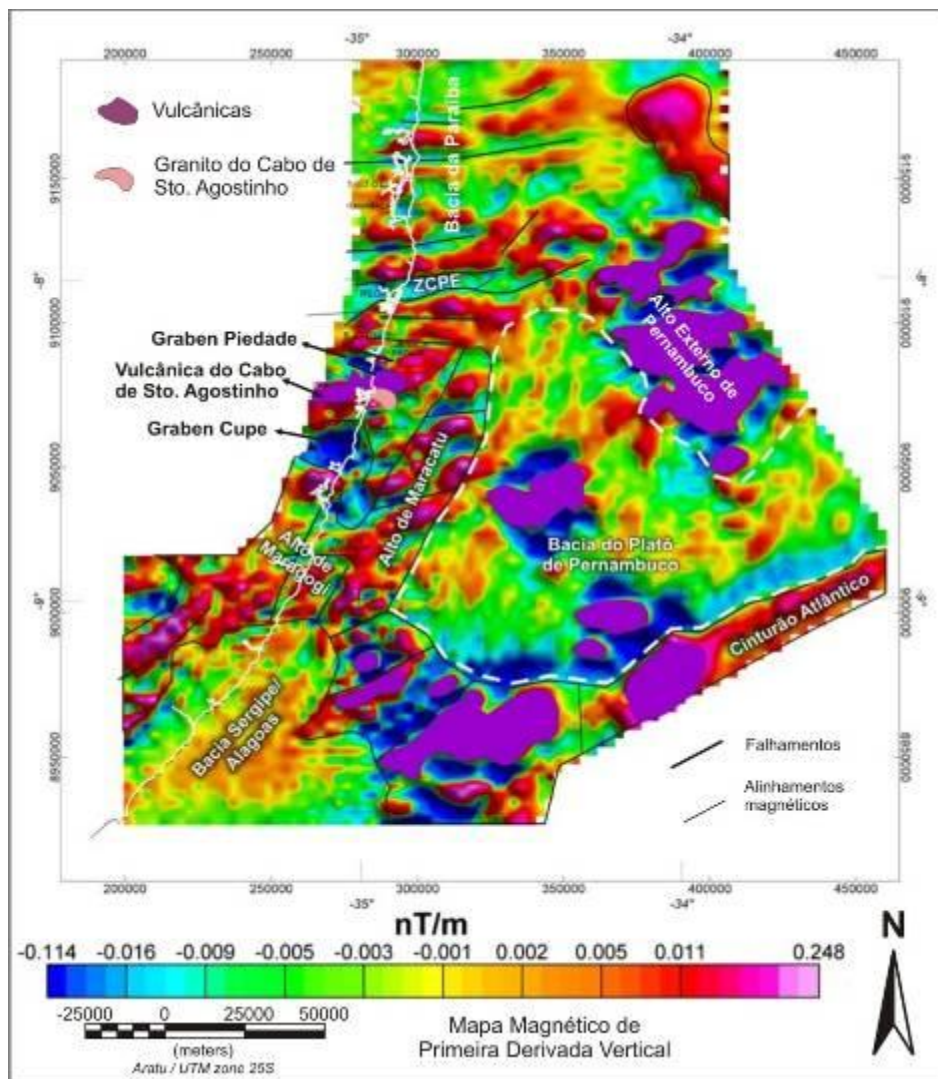


Fig. 6.13 – Mapa Magnético de Primeira Derivada Vertical destacando todas as feições observadas.

Dentre essas feições destacam-se:

- 1) A Sub-Bacia do Platô de Pernambuco, tracejada em branco e com formato aproximadamente triangular, é caracterizada por um baixo magnético na porção central do Platô de Pernambuco (Liandrat et al., op. cit.).
- 2) Os limites da Sub-Bacia do Platô de Pernambuco: a norte pela ZCPE (Neves et al., op. cit.); a oeste pelo Alto do Maracatu (Almeida, op. cit.), que é a extensão NE do Alto de

Maragogi; a sul-sudeste pelo Cinturão Atlântico e a nordeste pelo Alto Externo de Pernambuco (Liandrat et al., op. cit.). Nota-se ainda que esta sub-bacia se estende para leste, em forma de um estreito aberto, onde alcança os limites da área de estudo.

3) Diversas ocorrências de vulcanismo: no interior da Sub-Bacia do Platô de Pernambuco (no seu centro e a SE); a sul-sudeste na região do Cinturão Atlântico e também no alto posicionado a NE da mesma, denominado por Liandrat et al., (op. cit.) Alto Externo de Pernambuco. Esta região, segundo Costa & Barros (op. cit.), corresponderia a uma possível zona de transição entre a crosta continental-oceânica, parecendo representar um domínio de crosta continental, injetada por inúmeras intrusões básicas.

4) Alinhamentos magnéticos NE-SW, indicativos de falhas (normais) originadas na fase rifte da Bacia Pernambuco, a Zona de Cisalhamento Pernambuco (ZCPE), com indicador cinemático dextral apontado pelo deslocamento anômalo de blocos em seus domínios;

5) A delimitação de um baixo magnético a sudoeste que corresponde aos domínios da Bacia Sergipe-Alagoas, sendo esta bordejada a oeste e nordeste pelo Alto de Maragogi e a leste pelo Cinturão Atlântico que, segundo Liandrat et al. (op. Cit.), seria uma continuação para nordeste do Alto Externo de Sergipe/Alagoas;

6) Na porção norte, acima da ZCPE os domínios da Bacia da Paraíba apresentando um comportamento geológico completamente diferente da região abaixo da ZCPE (Lima Filho, 1998 e Lima Filho et al., 1994) e não sendo, entretanto, objeto de estudo desta dissertação.

6.1.5. Obtenção dos Mapas Gravimétricos para geração dos modelos

A partir do Mapa Gravimétrico Isostático Residual, Topográfico-Batimétricos e o Mapa Bouguer foram obtidos os modelos gravimétrico 3D o qual será apresentado adiante, focando os principais registros de vulcanismo ocorrido na Sub-bacia do Platô de Pernambuco.

Para a geração dos Mapas Gravimétricos de Profundidade da Raiz e Isostáticos Regional e Residual e aplicação nos modelos 2D e 3D dois fatores foram considerados importantes:

- O efeito da flexura crustal devido à grande extensão dos modelos a serem analisados (maior que 100 km de extensão) evitando-se, desta forma, erro nos cálculos de mergulhos de camadas ou estruturas de grande extensão que prejudicassem os resultados obtidos.

- A correção do efeito de compensação de massas atuando em grandes estruturas, a fim de evitar geração de anomalias inexistentes.

A partir de então, iniciou-se a geração dos Mapas Gravimétricos de Profundidade da Raiz, Isostático Regional e Isostático Residual com detalhamento da influência das diferentes variações da descontinuidade de Mohorovicic nas anomalias gravimétricas.

Para obtenção dos Modelos Gravimétricos Isostáticos utilizou-se basicamente dois tipos de dados: os topo-batimétricos e o Mapa Bouguer. A partir dos dados de topografia e batimetria foi gerado Mapa de Profundidade da Raiz, que caracteriza a Descontinuidade de Mohorovicic (Fig. 5.14).

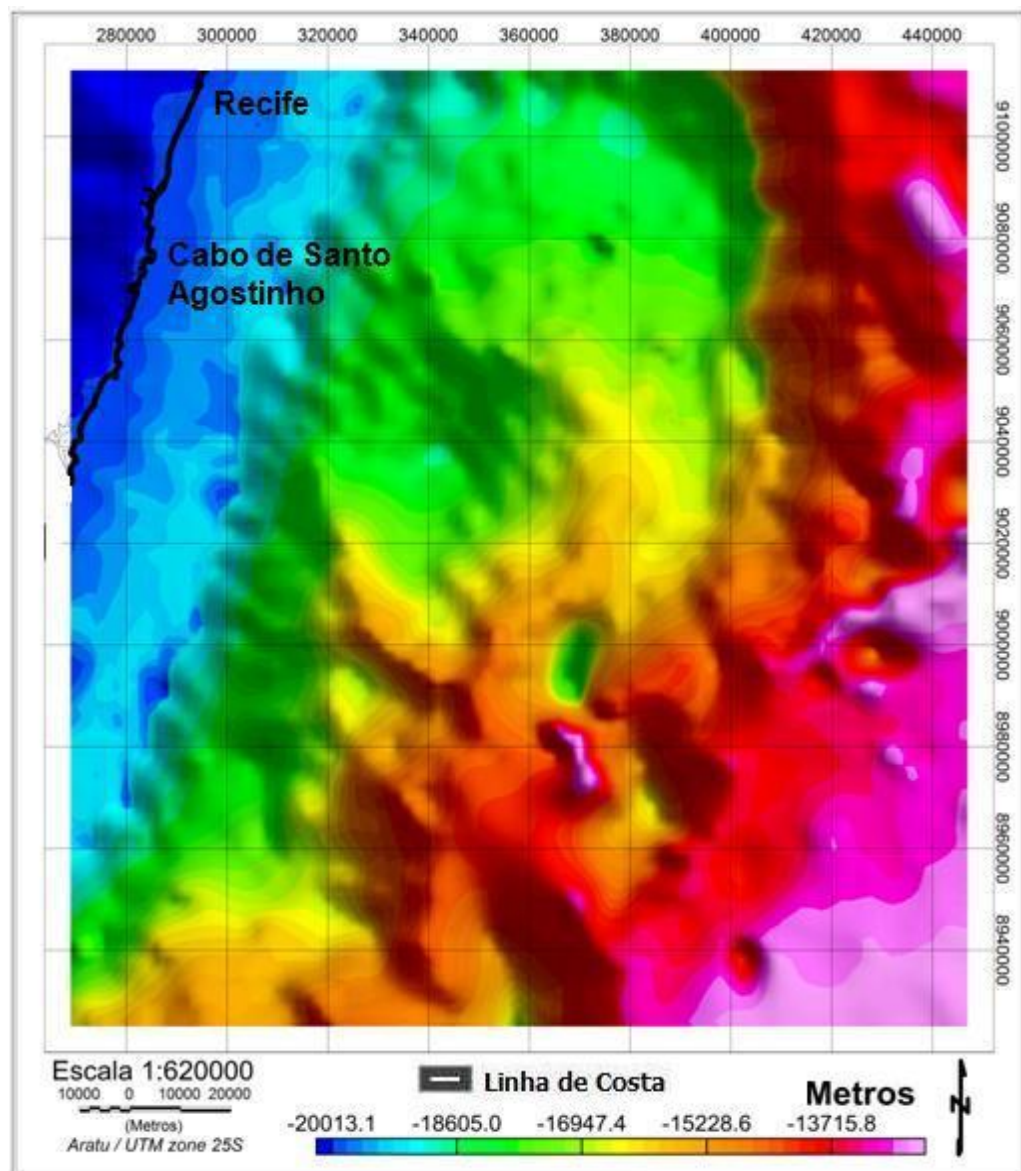


Fig. 6. 14 – Mapa de profundidade da Raiz, assinalando a Descontinuidade de Mohorovicic na Bacia de Pernambuco.

Em seguida foi obtido o Mapa Gravimétrico Isostático Regional (Fig. 5.15), apresentando níveis regionais de compensação isostática e finalmente, subtraindo-se este do Mapa Gravimétrico Bouguer, foi originado o Mapa Gravimétrico Isostático Residual (Fig. 5.16), do qual foram gerados os modelos adiante apresentados.

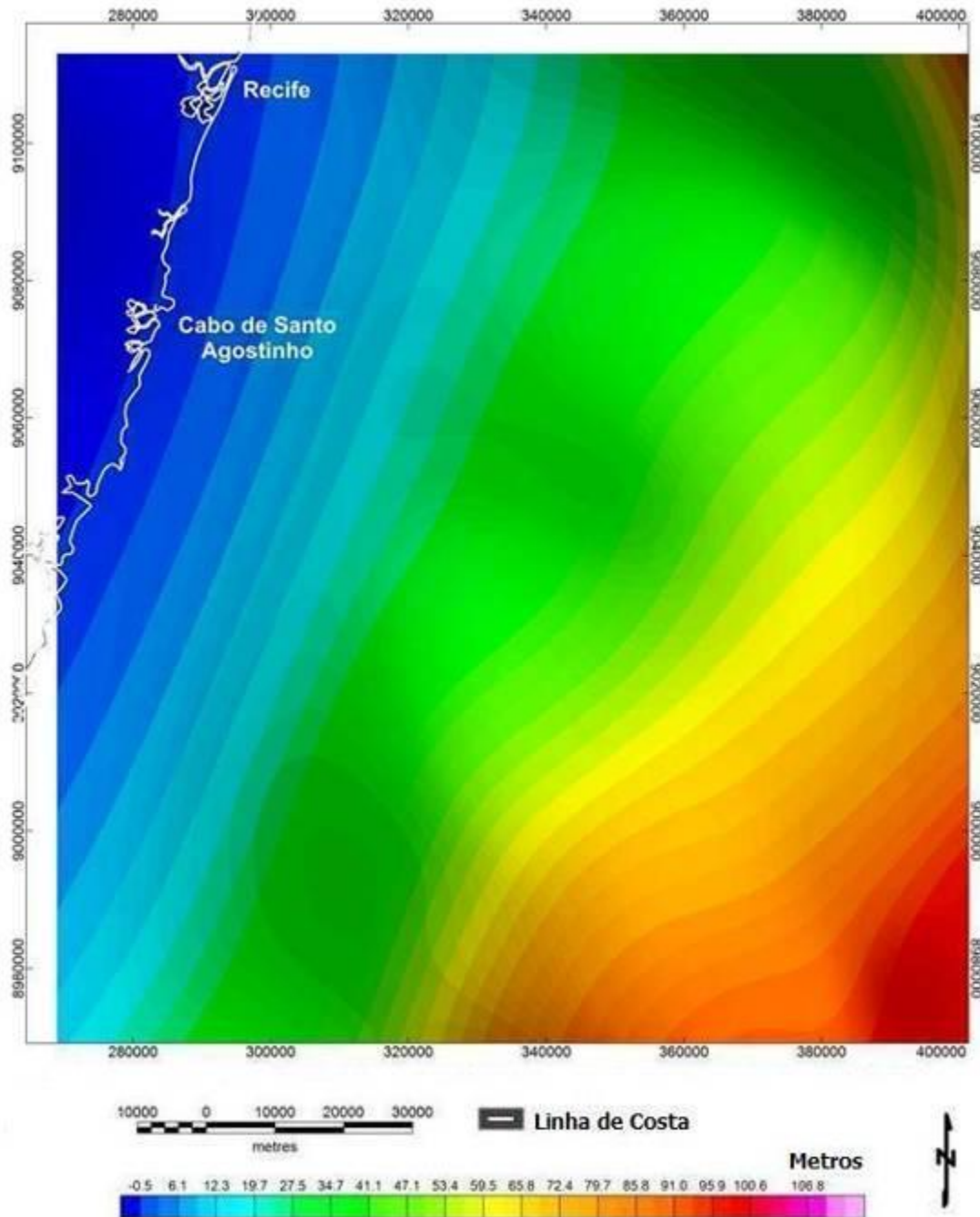


Fig. 6.15 – Mapa Gravimétrico Regional com os níveis regionais de compensação isostática na região da Baía de Pernambuco e de seu platô.

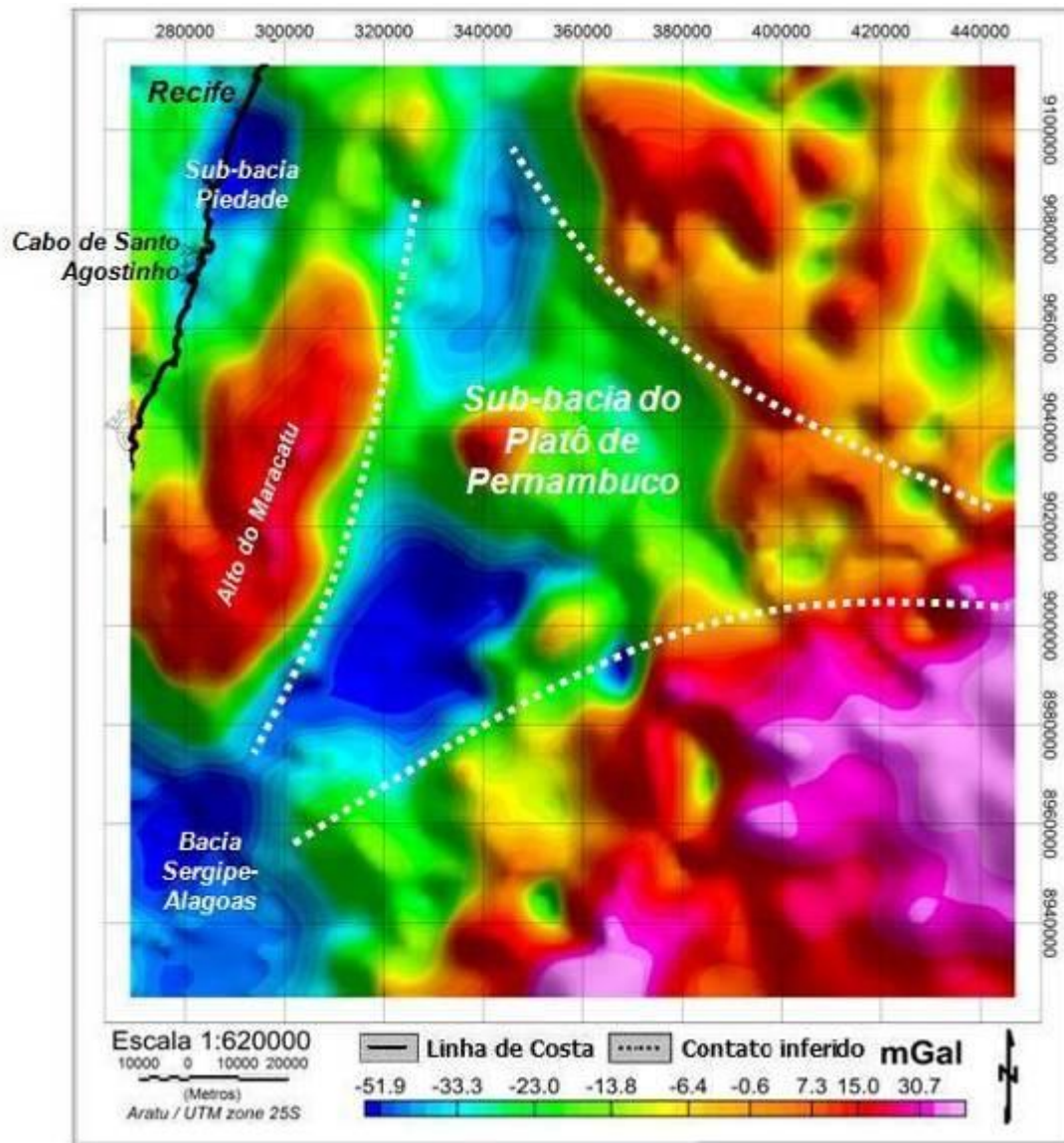


Fig. 6.16 – Mapa Gravimétrico Residual Isostático, apresentando níveis locais de compensação isostática, com a definição de estruturas a partir do comportamento do contorno do embasamento.

6.1.6. Modelagem Gravimétrica 3D

A partir da inversão estrutural do embasamento cristalino foi obtido o modelo adotado (Fig. 5.17) tendo como referência para calibrar as profundidades estimadas para o embasamento o poço 2 CP-01- PE, perfurado no Cupe (região *onshore* da Bacia de Pernambuco), cuja profundidade atingiu aproximadamente 3000 metros de rochas sedimentares sem, no entanto, atingir o embasamento. Este modelo foi obtido com a Descontinuidade de Mohorovicic estabelecida a 20 km, valores de densidade para o embasamento variando lateralmente de 2,66 a 2,82 g/cm³ com sentido de oeste para leste e valor inicialmente fixo da densidade do sedimento.

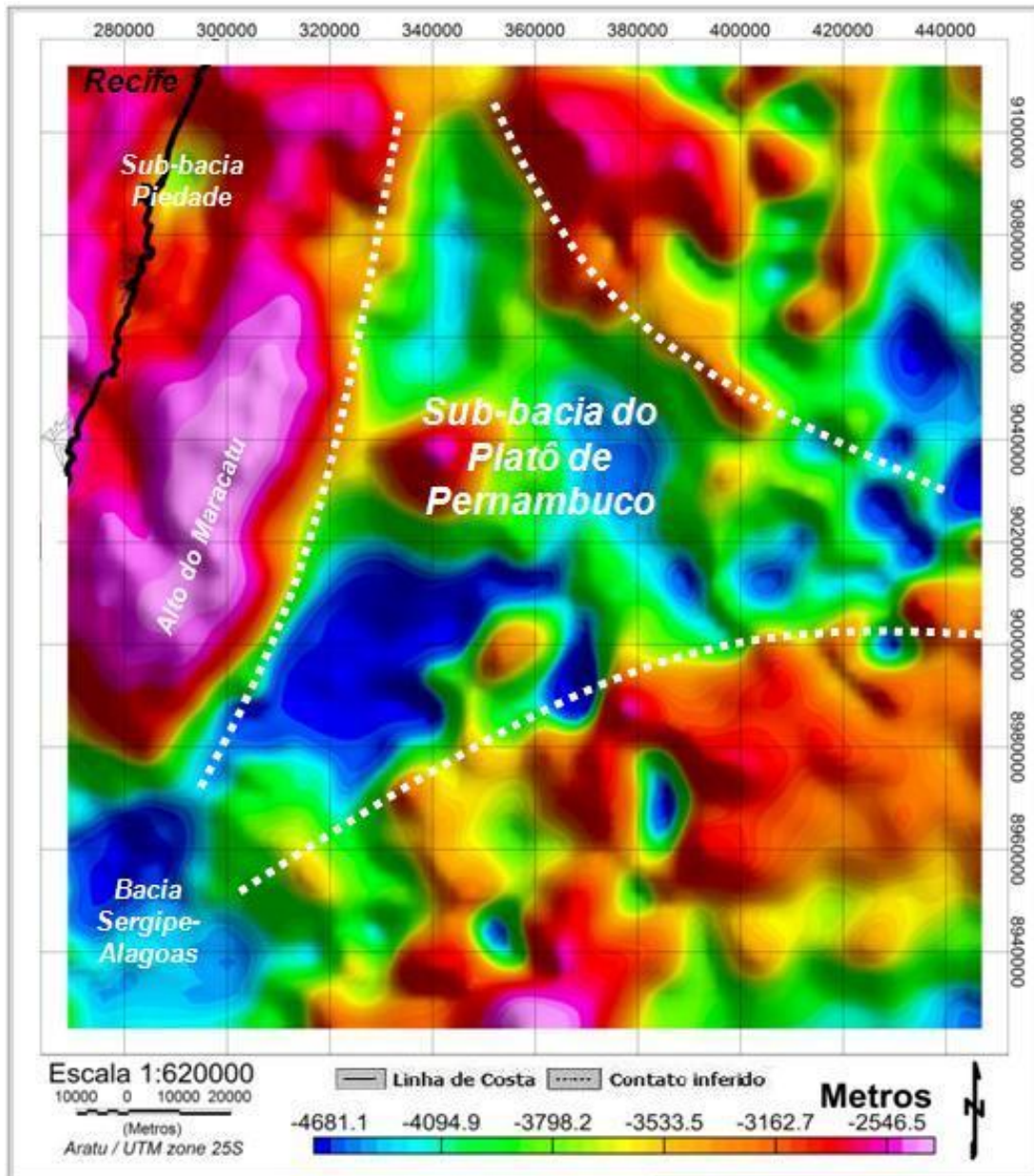


Fig. 6.17 – Modelo 3D obtido para o embasamento cristalino através de inversão gravimétrica, com as profundidades correspondendo a integração dos modelos 2D e 3D.

6.1.7. Modelagem Gravimétrica e Magnetométrica 2D sobre Linhas

Tendo como base os Mapas Gravimétrico Bouguer e o de Campo Magnético Anômalo (Fig. 5.18 e Fig. 5.19, respectivamente) foram confeccionados os modelos 2D das linhas A-A' e E-E', distribuídas em regiões de interesse, a fim de caracterizar e melhor representar visualmente alguns dos principais corpos vulcânicos observados através dos métodos potenciais, relacionando-os lito-estruturalmente no contexto da área estudada.

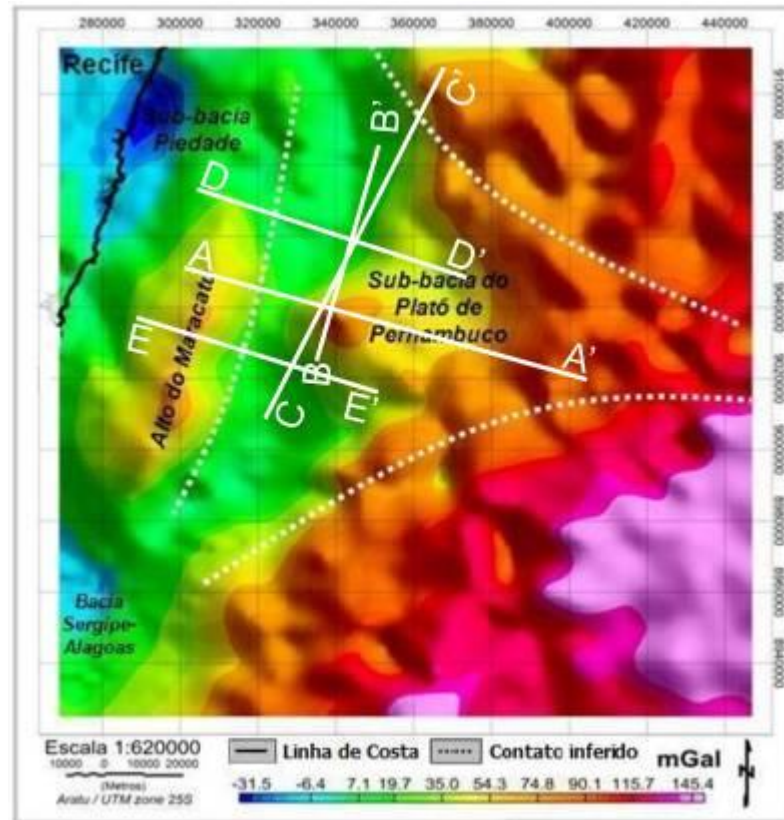


Fig. 6.18 – Mapa Bouguer utilizado para a modelagem 2D das linhas A-A' e E-E'. As demais linhas sísmicas serão apenas analisadas no método sísmico.

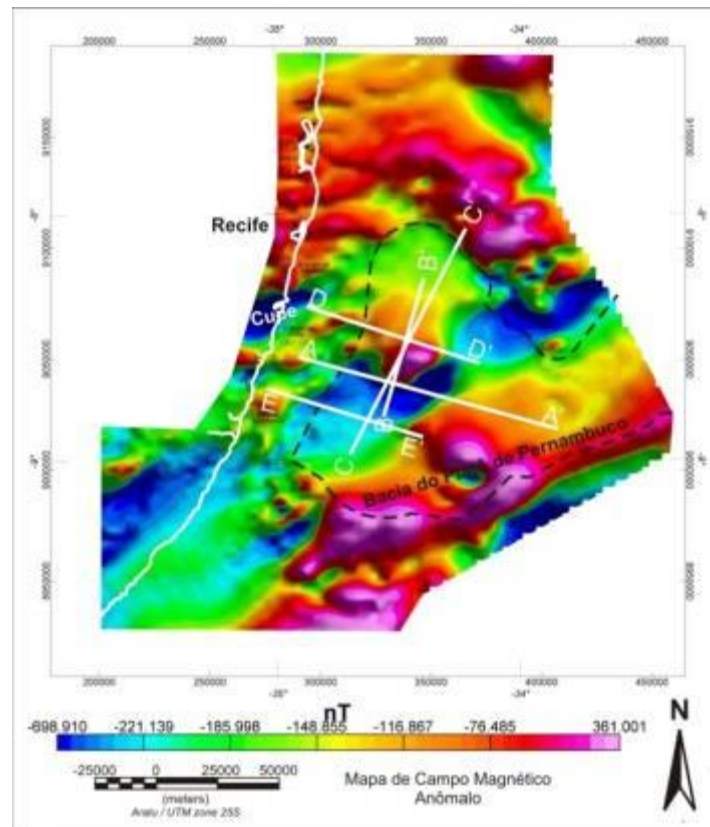


Fig. 6.19 – Mapa de Campo Magnético Anômalo utilizado para a modelagem 2D, mostrando a localização dos perfis A-A' e E-E' modelados. Os demais perfis serão apenas analisados na sísmica.

Tanto nas análises gravimétricas como magnetométricas, foram propostos modelos, apresentando variação lateral de densidade e de susceptibilidade magnética, para os blocos do embasamento e sedimento, adotando-se valores gradativos, em busca de um melhor ajuste dos mesmos e eliminando-se dessa forma os limites bruscos entre a crosta continental, intermediária e oceânica.

Tornou-se possível uma análise simultânea e integrada dos métodos aplicados devido ao fato de todas as linhas sísmicas terem sido cobertas, em termos de aquisição de dados por levantamento gravimétrico e magnetométrico.

Os modelos 2D (Perfis) foram construídos a partir de superfícies pré-definidas importadas do modelo 3D, tais como: superfície da topografia, do contato sedimento-embasamento e do contato embasamento-manto, que foram respectivamente, importadas dos arquivos de topografia, embasamento e da superfície que corresponde à descontinuidade de Mohorovicic.

Para construção e análises desses modelos, posicionados nos mesmos pontos das linhas sísmicas (porção *offshore* da Bacia de Pernambuco), foi adotada uma distribuição lateral de densidades, variando de 2,66 a 2,82 g/cm³ para os blocos correspondentes ao embasamento, e de 2,30 a 2,40 g/cm³ para os blocos que correspondem ao sedimento.

Em relação às suscetibilidades magnéticas, constatou-se que o embasamento da área estudada é muitas vezes mascarado por rochas vulcânicas, e os valores adotados variaram de 2.000 a 10.000 μ CGS. Para as rochas vulcânicas, principal objeto de estudo desse trabalho, foi adotado suscetibilidades magnéticas entre 10.000 a 14.000 μ CGS. Às rochas sedimentares (não afetadas por contaminação vulcânica) foi atribuída suscetibilidade magnética da ordem de 100 μ CGS. Ressaltamos ainda que, por estarmos no hemisfério Sul, o mapa de Campo Magnético Anômalo mostra duas polaridades na anomalia provocada pelo mesmo corpo, o que é normal. Como consequência, as rochas mais magnéticas têm os valores de intensidade de campo mais negativos. Não foi utilizado o mapa reduzido ao pólo, pois ele mostraria apenas a polaridade positiva da anomalia, devido ao filtro de redução ao pólo ser passível de distorções e, assim, poder conduzir a erros ainda maiores.

6.1.7.1. Modelo Linha A-A'

A linha A-A' mostrada na (Fig. 5.20), apresenta uma extensão de 124 km e encontra-se posicionada nos Mapas de Gravimétrico Bouguer (Fig. 5.18) e de Campo Magnético Anômalo (Fig. 5.19). Para ajuste satisfatório do modelo gerado foi adotada, ao longo desta

linha, uma distribuição lateral de densidades e de susceptibilidade magnética, que variaram respectivamente, de 2,66 a 2,82 g/cm³ e 1.100 a 11.000 μCGS para os blocos correspondentes ao embasamento. Para o sedimento, a variação de densidade foi de 2,30 a 2,40 g/cm³ mantendo-se uma susceptibilidade magnética constante de 100 μCGS.

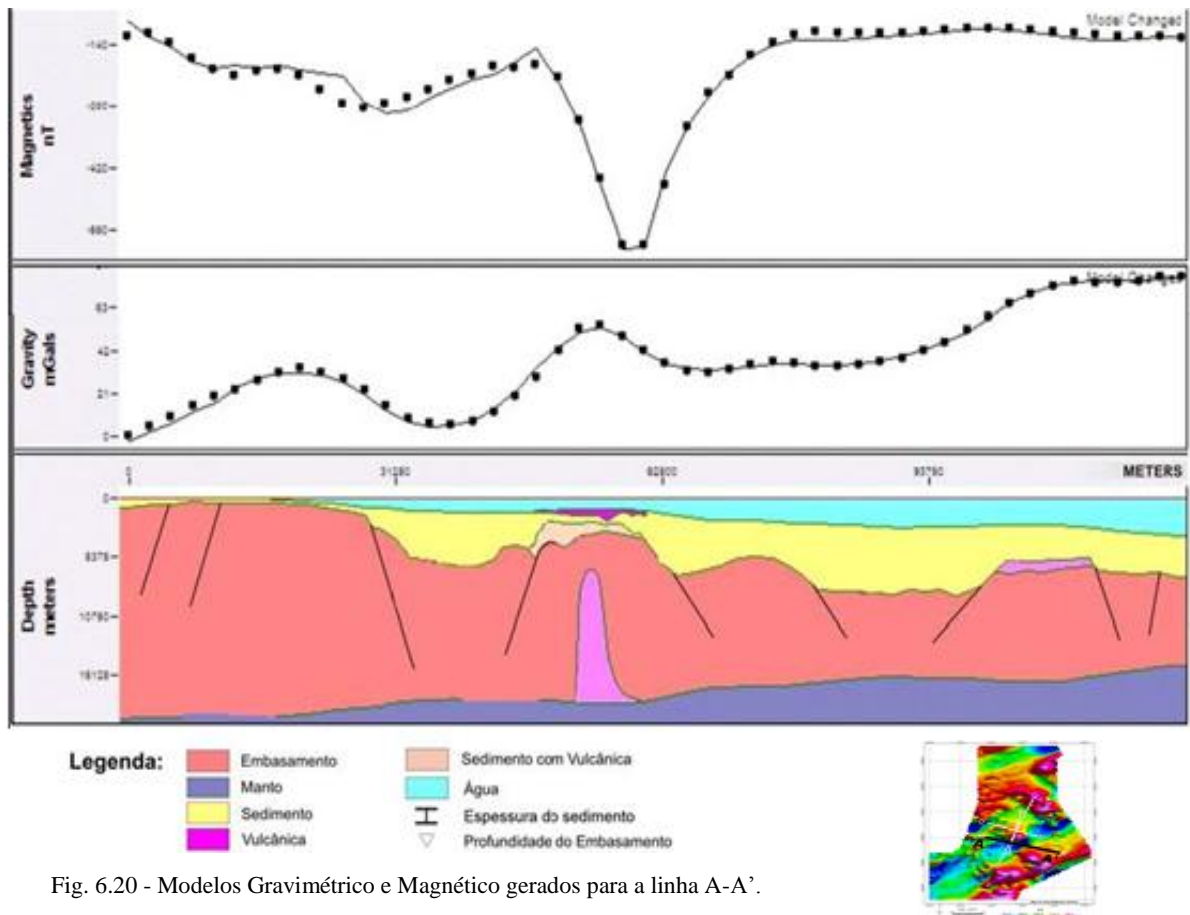


Fig. 6.20 - Modelos Gravimétrico e Magnético gerados para a linha A-A'.

No modelo obtido para a linha A-A' são notáveis três estruturas principais: a primeira é o Alto do Maracatu caracterizado por uma anomalia gravimétrica positiva e magnética no geral negativa com inflexões. No sentido para o leste observamos a segunda anomalia correspondente a um graben, cuja inflexão da curva gravimétrica é negativa e mais evidente do que a magnética.

A terceira estrutura encontra-se na porção central da linha A-A' (Fig. 5.20), representando a mais expressiva anomalia magnética negativa e também uma pronunciada anomalia gravimétrica positiva. O ajuste dos dois modelos só é possível após a inserção de um grande corpo intrusivo, que representa a subida de rochas vulcânicas através de fraturas. Essas fraturas possivelmente formaram o conduto de alimentação do derrame vulcânico que se observa capeando o sedimento e que no Mapa Magnético Campo Magnético Anômalo (Fig. 5.19), é representado por um centro de vulcanismo de contorno arredondado, localizado

na região mediana do Platô de Pernambuco. Entre o derrame vulcânico e o embasamento, cogita-se a ocorrência de uma espessa seção vulcano-sedimentar que representa uma mistura de sedimento e material magmático.

6.1.7.2. Modelo Linha E-E'

A linha E-E' mostrada na (Fig. 5.21) possui comprimento de 72,5 km e encontra-se posicionada nos Mapas de Gravimétrico Bouguer (Fig. 5.18) e de Campo Magnético Anômalo (Fig. 5.19). O modelo obtido área esta linha mostra basicamente duas feições estruturais: o Alto do Maracatu e um baixo na direção leste. Segundo este modelo, para atingir o ajuste da curva gravimétrica, o Alto do Maracatu se encontraria capeado por uma seção vulcano-sedimentar, embora não detectada pela sísmica, talvez devido à qualidade da linha.

Para o ajuste da curva de gravidade calculada foi necessária a inclusão de dois corpos sobre o Alto do Maracatu, caracterizando uma mistura de sedimento com rochas vulcânicas, com densidade de $2,64 \text{ g/cm}^3$ e susceptibilidade magnética variando de 250 a $750 \mu\text{gs}$, e uma rocha vulcânica com densidade de $2,75 \text{ g/cm}^3$ e susceptibilidade magnética de $2900 \mu\text{gs}$.

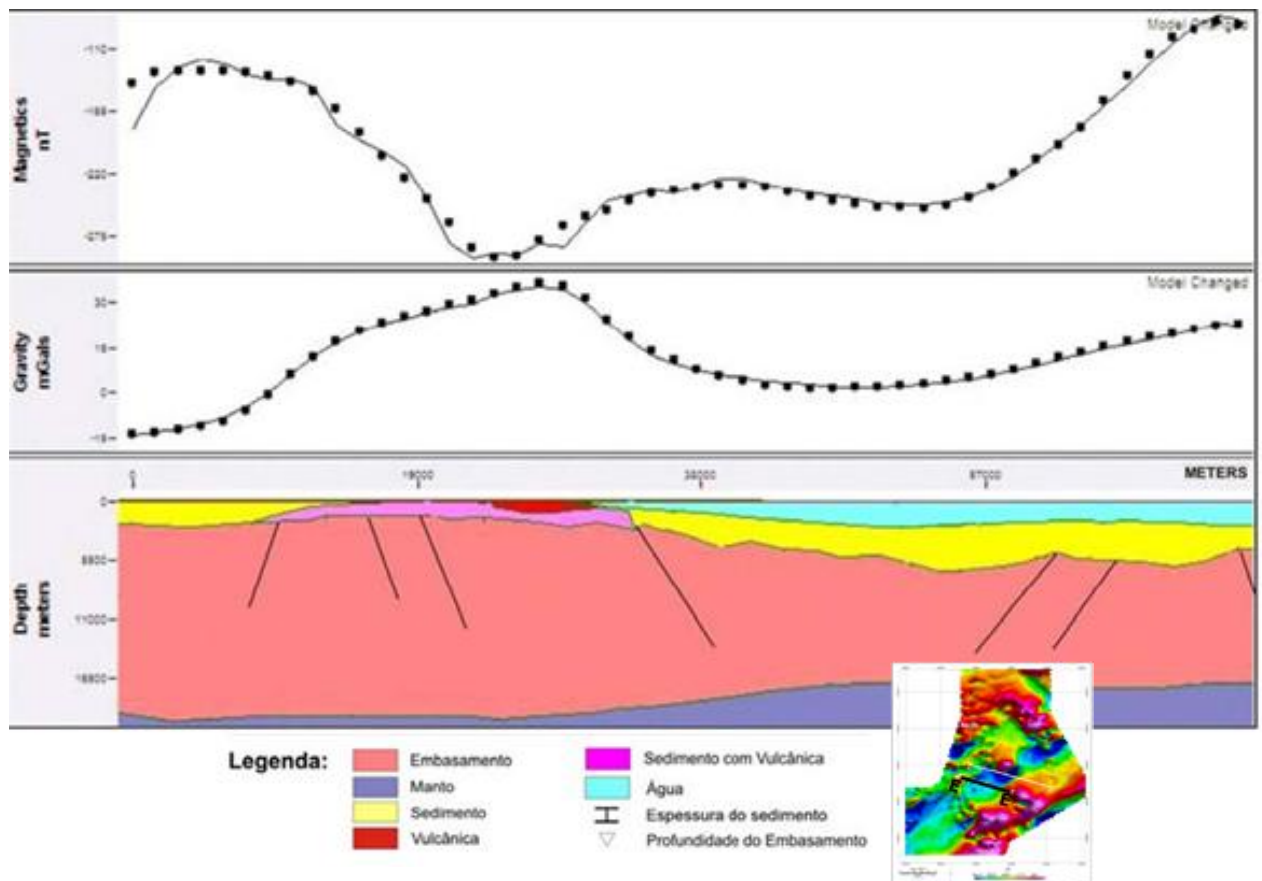


Fig. 6.21 – Modelo gravimétrico e magnetométrico da linha E-E'.

6.1.8. Integração dos Métodos Potenciais

No final dos trabalhos, realizou-se a integração entre os métodos potenciais, em que a partir da análise das assinaturas interpretadas (gravimétrica e magnetométrica) foram estabelecidas afinidades de identidade entre domínios litológicos e estruturais importantes, com o reconhecimento de estruturas descritas na literatura.

Em relação as bacia sedimentares foram identificados, nos mapas em geral, os domínios das Bacias de Sergipe-Alagoas (a sul-sudoeste) e da Bacia da Paraíba (na porção norte), embora ambos não sejam objetos de estudo desse trabalho e também se identificaram as áreas de interesse nas porções centrais dos mapas, correspondente as sub-bacias que formam a Bacia de Pernambuco (a Sub-Bacia de Piedade e a Sub-Bacia do Cupe, na porção *on-shore* e a Sub-Bacia do Platô de Pernambuco, na porção *off-shore*).

As anomalias observadas nos Mapas Residuais Gravimétricos e Magnetométricos (Figs. 5.4 e 5.10) permitiram concluir que, os limites da porção *on-shore* da Bacia de Pernambuco são definidos a norte pela Zona de Cisalhamento Pernambuco (ZCPE), ao sul pelo Alto de Maragogi, a leste pelo Alto de Maracatu e a oeste com a borda do Maciço Pernambuco – Alagoas. Tectonicamente esta bacia é controlada por falhas normais, de direção NNE-SSW e também por falhas de transferência WNW-ESE sinistrais. A sub-bacia do Cupe é formada por dois semi-grabens controlados por estas falhas de transferência.

Já no centro da área (Figs. 5.6 e 5.13) ocorre a Sub-Bacia do Platô de Pernambuco (porção *off-shore* da Bacia de Pernambuco) cujo formato é aproximadamente triangular com os limites definidos, a norte pela Zona de Cisalhamento Pernambuco (ZCPE), a oeste pelo Alto de Maracatu, a sudoeste o Alto do Maragogi, ao sul-sudeste por rochas vulcânicas pertencentes ao Cinturão Atlântico e a nordeste pelo Alto Externo de Pernambuco (Liandrat et al., 1989; Costa e Barros, 1998).

Esta sub-bacia prolonga-se para leste (Figs. 5.6 e 5.13) na forma de um estreito corredor, impossibilitando definir seu limite por estender-se para fora da área estudada e é notável a presença em seu interior de dois vulcões de grande tamanho, alinhados com as vulcânicas do Cabo de Santo Agostinho ao longo do eixo NW-SE. Estes, podem estar relacionados a esforços distensivos (NW-SE) que provocaram ocorrência de falhas normais NE-SW e falhas de transferência NW-SE (Lima Filho, et al., 2005 e Almeida, et al., 2005b) .

Com relação aos altos estruturais, interpretou-se que o Alto de Maragogi, o Alto de Maracatu e a feição delineada pelo limite oeste da Bacia de Pernambuco (Borda do Maciço

Pernambuco – Alagoas) correspondem a uma única estrutura do ponto de vista gravimétrico-magnético, cuja natureza litológica é similar e representa a mesma resposta das rochas do Maciço Pernambuco – Alagoas. Essas estruturas podem ser mais bem visualizadas a oeste dos Mapas Residuais Gravimétrico e Magnético, Gravimétrico de Continuação Para Cima e Magnético de Sinal Analítico (Figs. 5.4, 5.10, 5.6 e 5.12).

6.2. MÉTODO SÍSMICO

A partir das linhas sísmicas disponibilizadas foi iniciado um estudo de detalhe da Sub-bacia do Platô de Pernambuco, o qual teve como foco as rochas ígneas presentes na região. Para isso, foram definidos e rastreados refletores indicadores de horizontes vulcânicos importantes, tanto para as hipóteses do posicionamento estratigráfico e estrutural dos corpos magmáticos existentes, como para a definição das relações geométricas ao redor desses corpos. O Mapa CMA apresentado na Fig. 5.22 abaixo, posiciona as linhas sísmicas comentadas nas descrições desenvolvidas ao longo das discussões que seguem.

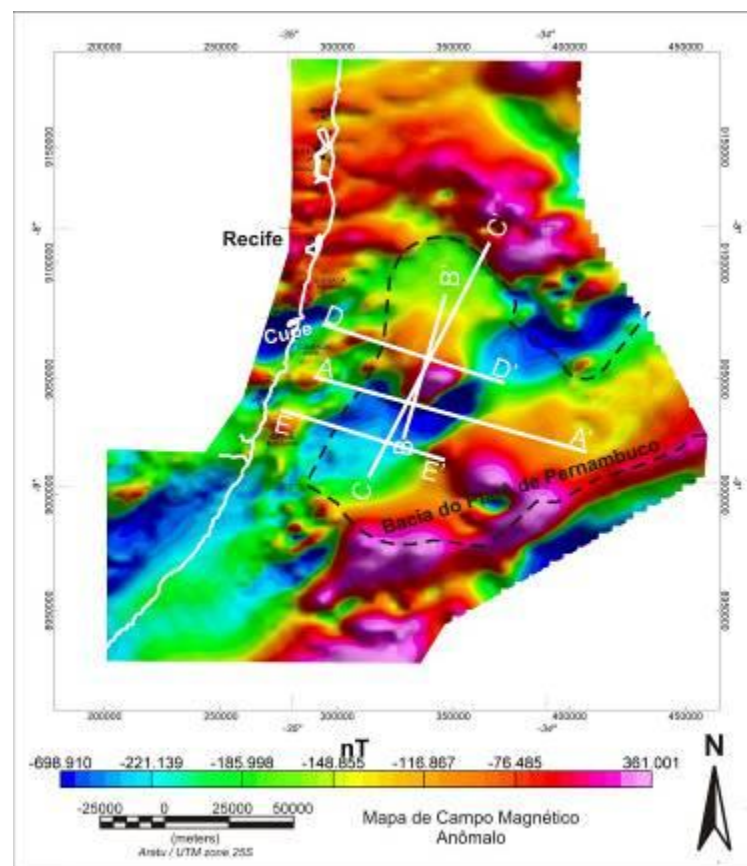


Fig. 6.22 – Mapa de Campo Magnético Anômalo (CMA) com a posição das linhas descritas.

6.2.1. Rochas Vulcânicas da Sub-Bacia do Platô de Pernambuco

Observou-se a existência de derrames de rochas vulcânicas na região do Platô de Pernambuco, a partir da análise de perfis sísmicos (apresentados a seguir) corroborada por resultados de métodos potenciais, localizando os corpos vulcânicos, por exemplo, como mostrado no Mapa de Primeira Derivada Vertical abaixo (Fig. 5.23). Além disso, vários trabalhos têm apontado a existência do vulcanismo ocorrido tanto na porção *onshore*, como a *offshore* da Bacia de Pernambuco (Liandrat et al., 1989; Costa e Barros, 1998; Borba, 1975; Amaral et al., 1979; Cobra, 1970 e Almeida et al., 2005a) indicando os pontos de ocorrência dos mesmos.

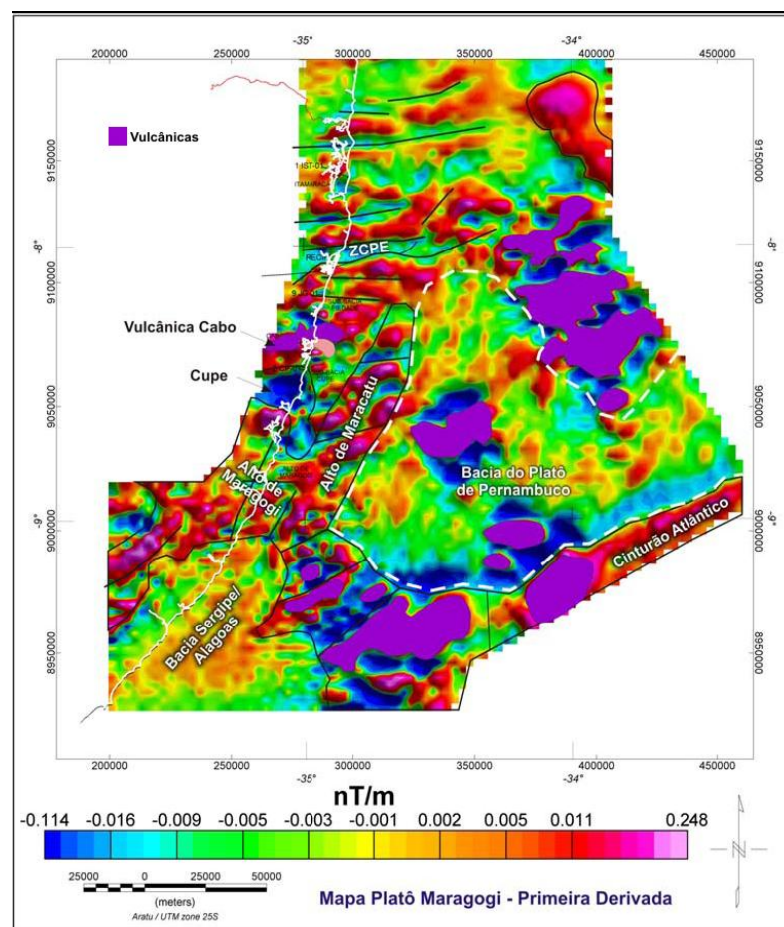


Fig. 5.23 - Mapa de Primeira Derivada Vertical, destacando as rochas vulcânicas observadas.

Alguns dos corpos magmáticos tornaram-se notáveis, não somente pelas anomalias magnéticas e gravimétricas que causam, mas também devido às gigantescas dimensões que apresentam – o mais expressivo deles, posicionado no centro da Sub-bacia do Platô de Pernambuco, surge com forte expressão na batimetria, como mostrado na linha sísmica A-A' antes e depois da interpretação, na Fig. 5.24, e em detalhe na Fig. 5.25.

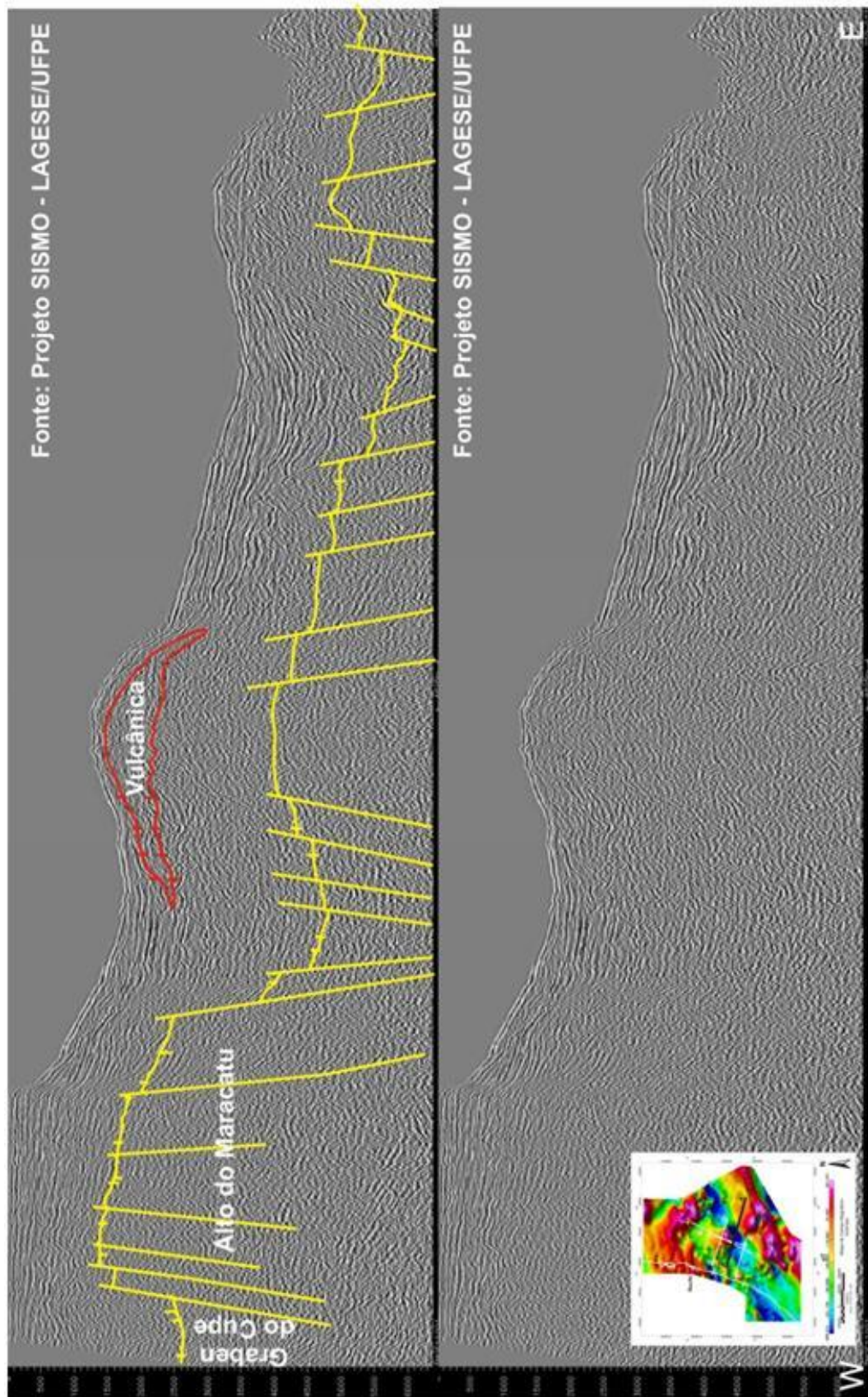


Fig. 6.24 – Linha sísmica *dip* A-A', depois e antes de ser interpretada.

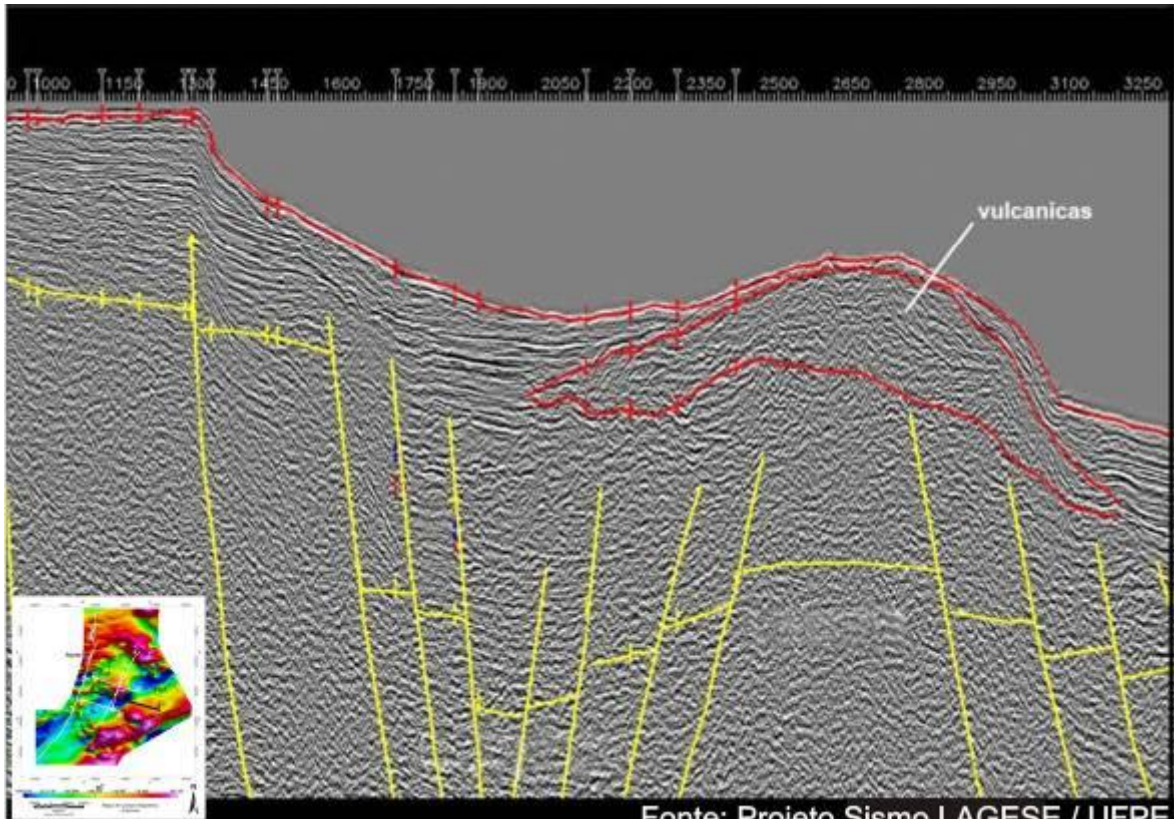


Fig. 6.25 – Detalhe da linha sísmica A-A' modelada mostrando o registro do maior corpo de rochas vulcânicas encontrado sobre a região do Platô de Pernambuco.

Ressalta-se que nas linhas sísmicas apresentadas, de uma forma geral, encontram-se destacados: em amarelo o horizonte correspondente ao embasamento cristalino e/ou as supostas falhas existentes no mesmo e também sobre camadas de sal, em azul estão os horizontes que delineiam os corpos de sal e o horizonte mais superficial das linhas sísmicas, destacado em vermelho, corresponde ao fundo do mar (interpretação da equipe sísmica do Projeto SISMO – LAGESE / UFPE). No trabalho aqui desenvolvido foram rastreados apenas os horizontes das rochas vulcânicas da região estudada, estando estes destacados em vermelho conforme adiante apresentados nas linhas analisadas.

As principais feições sísmicas que puderam ser observadas relacionadas a este corpo se devem à sua fácies sísmica característica, dada por um padrão de configuração caótico, arqueamento típico de um vulcão e deformações das rochas laterais. Observa-se um discreto escorregamento de camadas sedimentares pós-vulcanismo, provocado pelo arqueamento do corpo ígneo e ainda ausência de reflexões na base, o que dificultou a precisão na determinação da mesma.

Abaixo desse corpo mais superficial não é possível distinguir com segurança a presença de outros pulsos vulcânicos potenciais nem a sua forma, característica esta normal

na interpretação sísmica de rochas dessa natureza. Observa-se, entretanto, a existência de reflexões desordenada no interior e também abaixo deste corpo, podendo nesta visualização obscura estarem mascaradas estruturas e litologia existentes sob o mesmo.

Relacionando-se os estudos desenvolvidos na interpretação sísmica aos derrames de rochas vulcânicas da província vulcânica do Cabo de Santo Agostinho, é sugerida uma idade mais jovem para as rochas vulcânicas identificadas na região do platô. Esta sugestão é baseada na observação da formação de um alinhamento de intrusões de grande magnitude ao longo do eixo principal da bacia em sentido NW-SE (Fig. 5.26), incluindo a província vulcânica do Cabo de Santo Agostinho, a região intrudida no centro-sul do Platô e estruturas existentes na região de transição entre as crostas continental e oceânica, na borda do platô.

Associado a informações fornecidas por calibrações e/ou correlações com outros refletores interpretados pela equipe do Projeto SISMO – LAGESE / UFPE, as rochas vulcânicas em referência podem ser posicionadas no Neo-Cretáceo, supostamente em evento de vulcânico associado a pulso tectônico ocorrido entre o Coniaciano e o Santoniano.

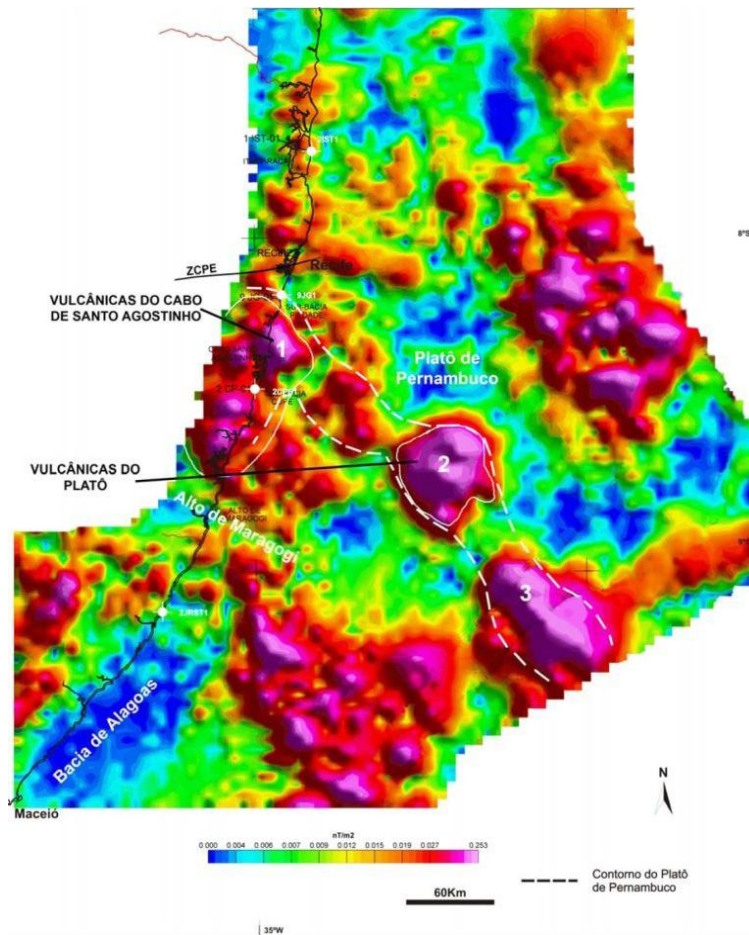


Fig. 6.26 - Mapa Magnético do Sinal Analítico indicando a possível migração de uma pluma que ocorreu na bacia, com os principais centros de vulcanismo numerados desde a região do Cabo de Santo Agostinho.

Este vulcanismo é tentativamente sugerido como resultante da ação continuada da subida de material do manto, impulsionada por uma pluma, a qual teria gerado o vulcanismo anterior na porção *onshore* da Bacia de Pernambuco, conforme evidenciado pelo alinhamento NW-SE visualizado no Mapa Magnético do Sinal Analítico (Fig. 5.26).

O efeito desse vulcanismo no platô apresenta-se em maiores proporções quando comparado ao vulcanismo da bacia interna, provavelmente devido à fusão da porção inferior da placa atuar sob porção da litosfera continental fraturada e bastante estirada, onde a injeção de material teria sido muito maior e/ou mais eficiente em relação ao vulcanismo da porção *onshore*, o qual atuou em condição de maior rigidez e espessura da placa continental.

6.2.2. Corpos Vulcânicos versus Evaporitos na Sub-Bacia do Platô de Pernambuco

Alguns corpos vulcânicos (intrusões e derrames de rochas ígneas) ocorrem na Sub-Bacia do Platô de Pernambuco e concomitantemente observa-se também a existência de pequenos corpos evaporíticos. A presença desses corpos é responsável pela formação de estruturas que, caracteristicamente na área em foco, deram margem à incerteza ao longo da interpretação de algumas linhas sísmicas estudadas. Entretanto, através do estudo integrado da sísmica com os métodos potenciais foi possível a diferenciação das mesmas, com a confirmação da presença de grandes focos de vulcanismo, em toda a Bacia de Pernambuco e, principalmente, na Sub-bacia do Platô.

Nos estudos dos corpos ígneos, enfoque deste trabalho, fez-se necessária a distinção entre essas rochas e os evaporitos da região estudada. Salienta-se que, nas seções sísmicas apresentadas a seguir, os refletores correspondentes ao sal e informações relativas ao mesmo foram estabelecidos pela equipe do Projeto SISMO – LAGESE / UFPE e em concordância com os parâmetros para estes adotados, foram definidos neste trabalho os horizontes das rochas vulcânicas e as conclusões sobre as mesmas.

A principal dificuldade em distinguir essas duas litologias é atribuída à semelhança das fácies sísmicas e dos efeitos que a presença desses corpos costuma promover nas camadas circundantes. Assim sendo, alguns critérios de classificação foram adotados para diferenciar estruturas associadas à movimentação de corpos de sal das provocadas por intrusões e derrames de rochas vulcânicas.

Geralmente as intrusões ocorrem como corpos discordantes ascendentes (diques) ou corpos concordantes com forma tabular (soleiras e/ou lacólitos), apresentando uma ruptura ou interrupção dos estratos. Não se observam zonas de descolamento ao redor dessas estruturas,

diferindo-as assim da camada de sal. Além disso, intrusões ígneas não causam falhas lítricas nem estruturas do tipo “*rollover*” diretamente associadas aos corpos, além de que, são mais magnéticas e densas (gerando anomalia gravimétrica positiva) quando comparadas a corpos evaporíticos.

Observa-se que a halocinese que atuou na Bacia Pernambuco gerou apenas concentrações e/ou corpos sutis de sal, ou seja, em algumas áreas chega a formar “almofadas” de sal e pequenos diápiros (Fig. 5.27).

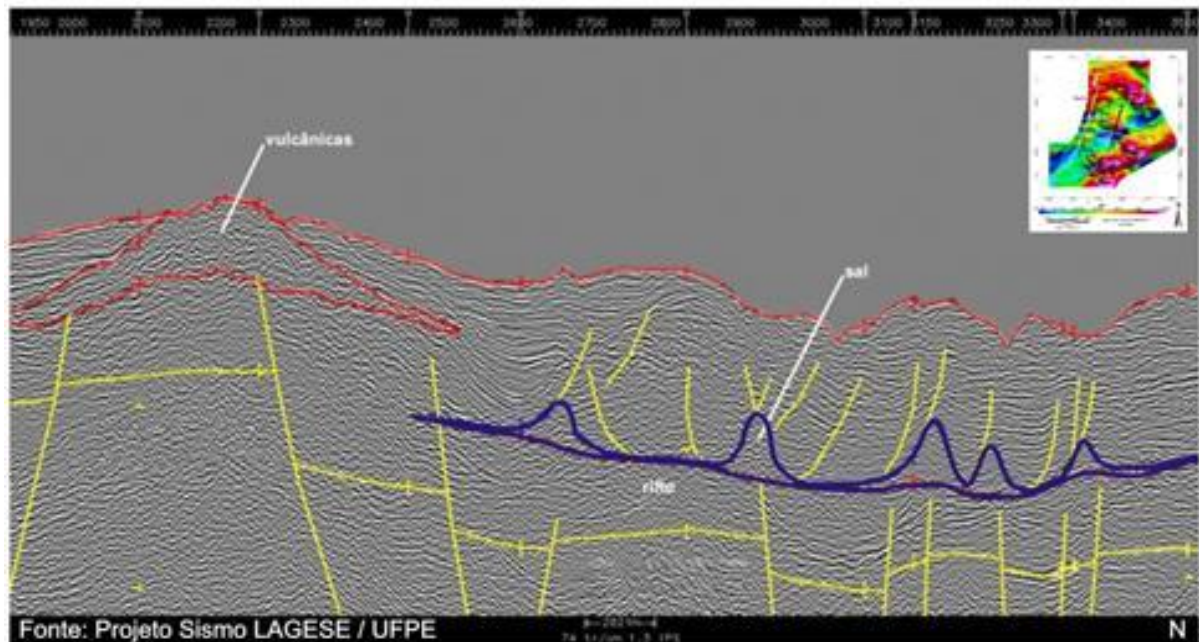


Fig. 6.27 – Linha B-B', destacando a presença de um grande corpo vulcânico e de diápiros de sal.

A idade atribuída ao sal é suposta como Neo-Alagoas coincidindo com a última etapa da fase golfo neste trecho do Oceano Atlântico, segundo suposto por estudos do grupo do Projeto SISMO – LAGESE / UFPE.

Supõe-se que a pequena quantidade de evaporitos originalmente depositada na Bacia de Pernambuco, associada à pequena espessura da sedimentação pós-rifte que recobre o sal, sejam responsáveis pela ausência de estruturas mais expressivas normalmente causadas por grandes movimentações de sal, como as verificadas em bacias marginais da Margem Continental SE Brasileira.

Na Fig. 5.27 é mostrada uma linha *strike* B-B', na qual é interpretado um derrame de rochas vulcânicas na região do Alto de Maragogi e, a norte deste, diápiros de sal sobre a seção rifte, cortando estratos superiores. Sobre esses se desenvolveram falhas lítricas que afetam a seção sobrejacente.

Outras ocorrências interessantes de corpos vulcânicos são visualizadas ao longo da linha *strike* C-C' cortando (NNE-SSW) a Sub-bacia do Platô de Pernambuco (Fig. 5.28).

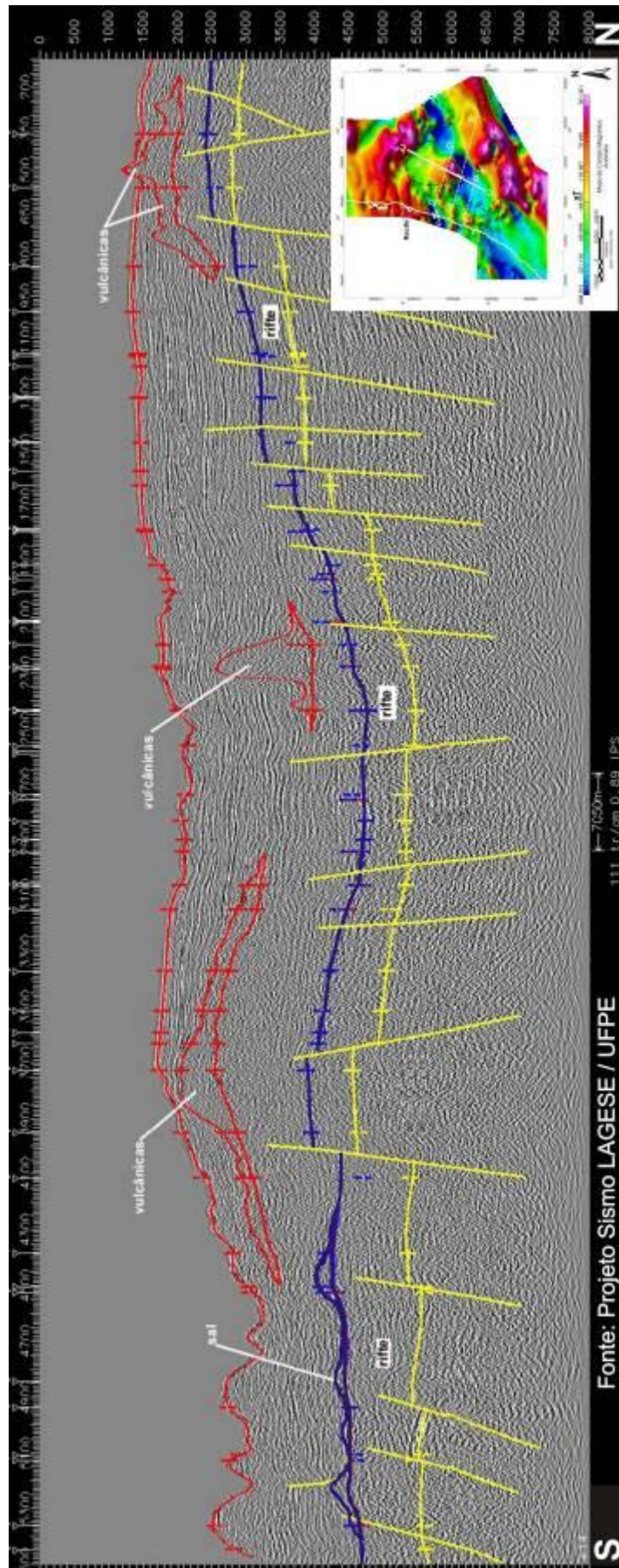


Fig. 6.28 – Linha *strike* C-C' que cruza a região norte da Bacia de Pernambuco.

A Fig. 5.29 focaliza a porção mediana da linha C-C' e mostra detalhadamente uma estrutura isolada no formato de um grande diápiro (corpo na parte central da figura), onde se verifica que a camadas de sal parecem estar bem abaixo dessa estrutura. Ao observar esta linha em conjunto juntamente com outras linhas que a cruzam, posicionadas tanto nesse corpo como em suas proximidades, constata-se uma maior probabilidade dessa estrutura ser mais uma ocorrência de intrusão de rocha vulcânica, alinhada com outras intrusões.

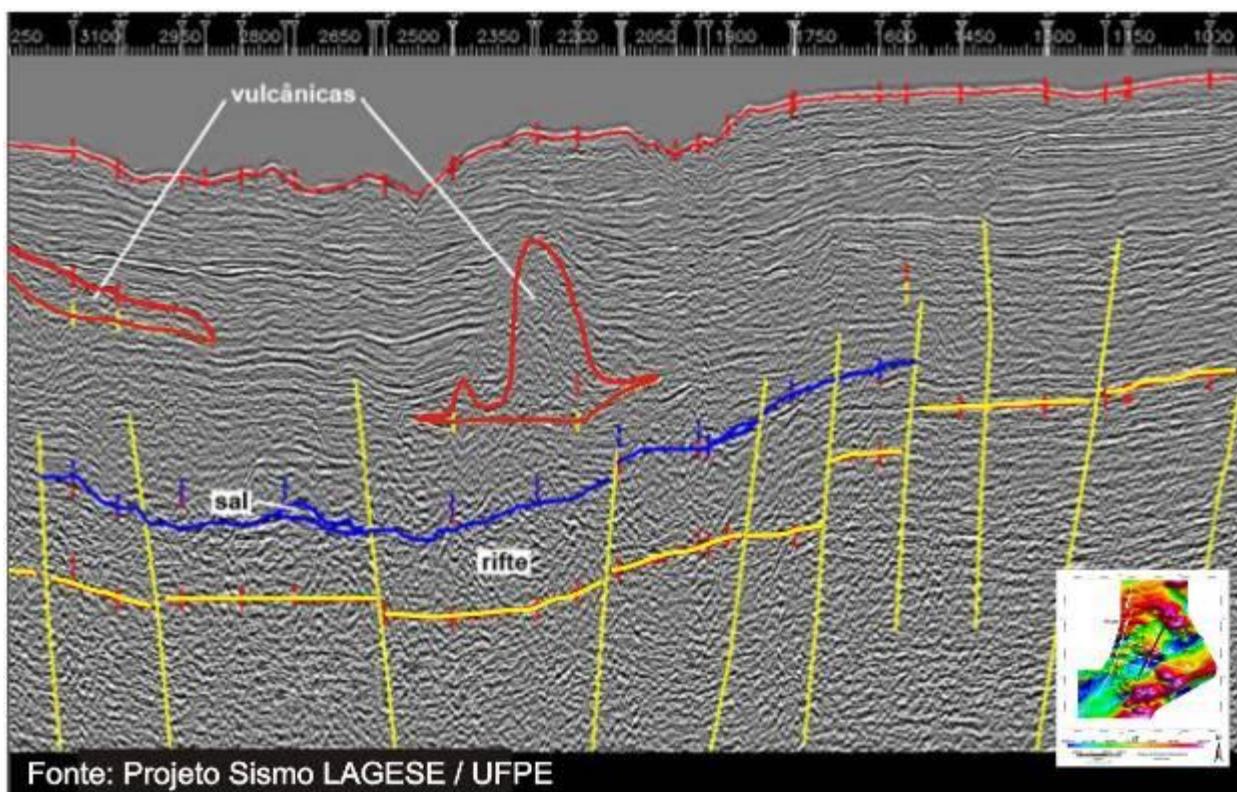


Fig. 6.29 – Detilhe da parte mediana da linha C-C' mostrando ao centro uma grande estrutura isolada, com forma de diápiro alongado, acima da camada de sal.

Outra feição curiosa da tectônica intrusiva ainda pode ser notada na linha *strike* C-C', no detalhe da sua porção mais a norte (Fig. 5.30), onde os derrames/intrusões (conjunto de diques e edifícios vulcânicos) ascendem e chegam a aflorar na superfície do fundo oceânico.

Na linha *dip* D-D' (Fig. 5.31), também foi observado um possível derrame/intrusão de rochas magmáticas sobrepostas a um sistema de falhas em padrão dominó.

Vale salientar que uma característica importante para a exploração petrolífera detectada a partir dos estudos do tectonismo intrusivo é o fato das intrusões vulcânicas induzirem deformações de rochas sedimentares circundantes, como observado em corpos ígneos presentes na área de estudo (Fig. 5.29 e 5.30), os quais podem ocasionar a formação de trapas de jazidas significativas de hidrocarbonetos (Conceição et al., 1993). Dentre os padrões estruturais potenciais promotores desse tipo de trapeamento destacam-se: estrutura-gaiivota,

estrutura-cogumelo, diques com dobras e falhas reversas e estruturas dômicas, observados na Sub-bacia do Platô neste e em trabalhos anteriores (Costa & Barros, 1998).

Aliado à possibilidade de aprisionamento de hidrocarbonetos, estudos da profundidade do embasamento, através dos três métodos aqui utilizados, apontam para a existência de camadas sedimentares com espessuras consideráveis nessa sub-bacia, assunto este não abordado neste trabalho devido não ser o foco de interesse da pesquisa. Tais estudos incentivam novas pesquisas para a avaliação do potencial petrolífero da porção *offshore* da Bacia de Pernambuco, devido às perspectivas otimistas de possíveis ocorrências de hidrocarbonetos economicamente viáveis nesta região.

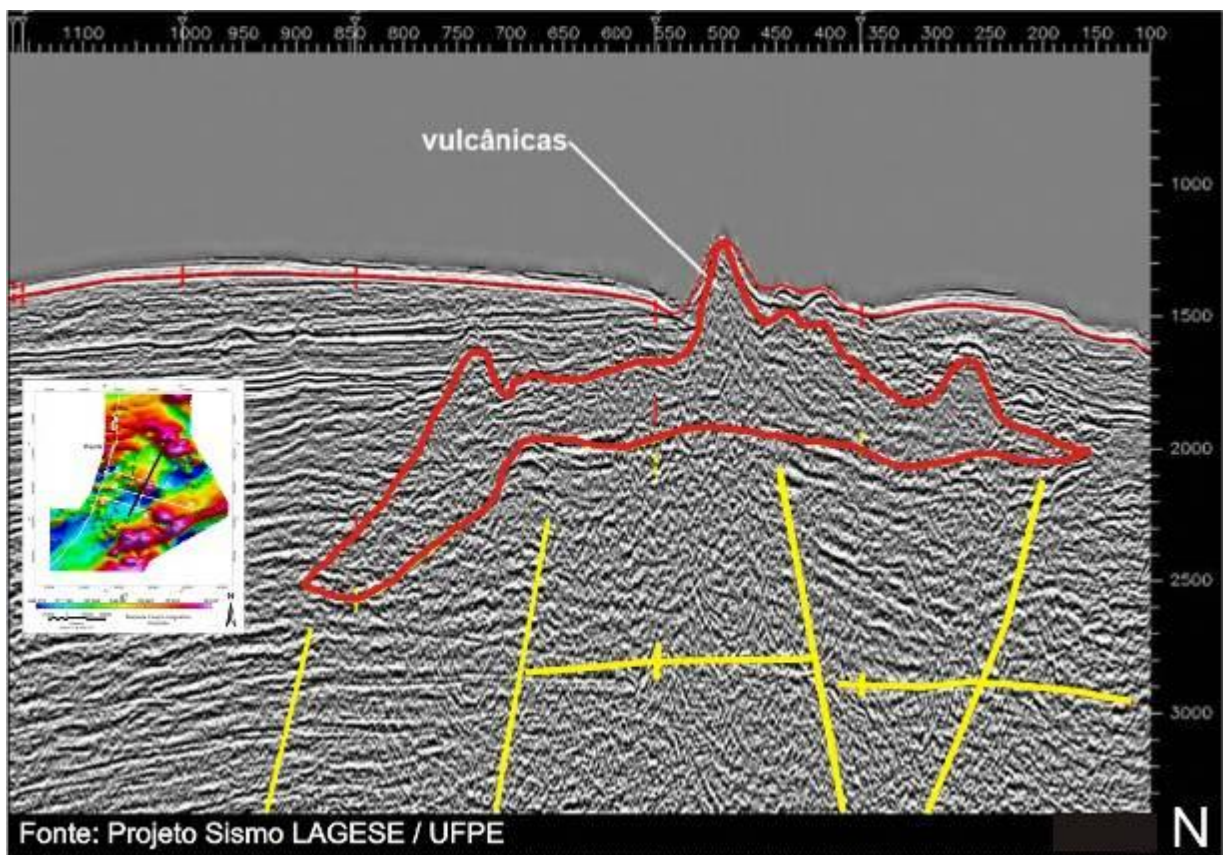


Fig. 6.30 – Detalhe da porção norte da Linha C-C' mostrando a ocorrência de rochas intrusivas entre camadas sedimentares, chegando a um vulcão emergente do assoalho oceânico, a partir da intrusão.

Convém ressaltar que, em relação à interpretação sísmica, a escassez de poços nesta área associada a uma qualidade de regular a deficiente da malha sísmica disponível tornam limitadas algumas observações sobre a caracterização dos corpos vulcânicos ocorrentes na Sub-Bacia do Platô de Pernambuco e ao mesmo tempo motivam comprovações e aprofundamentos de estudo futuros que complementem as idéias aqui levantadas.

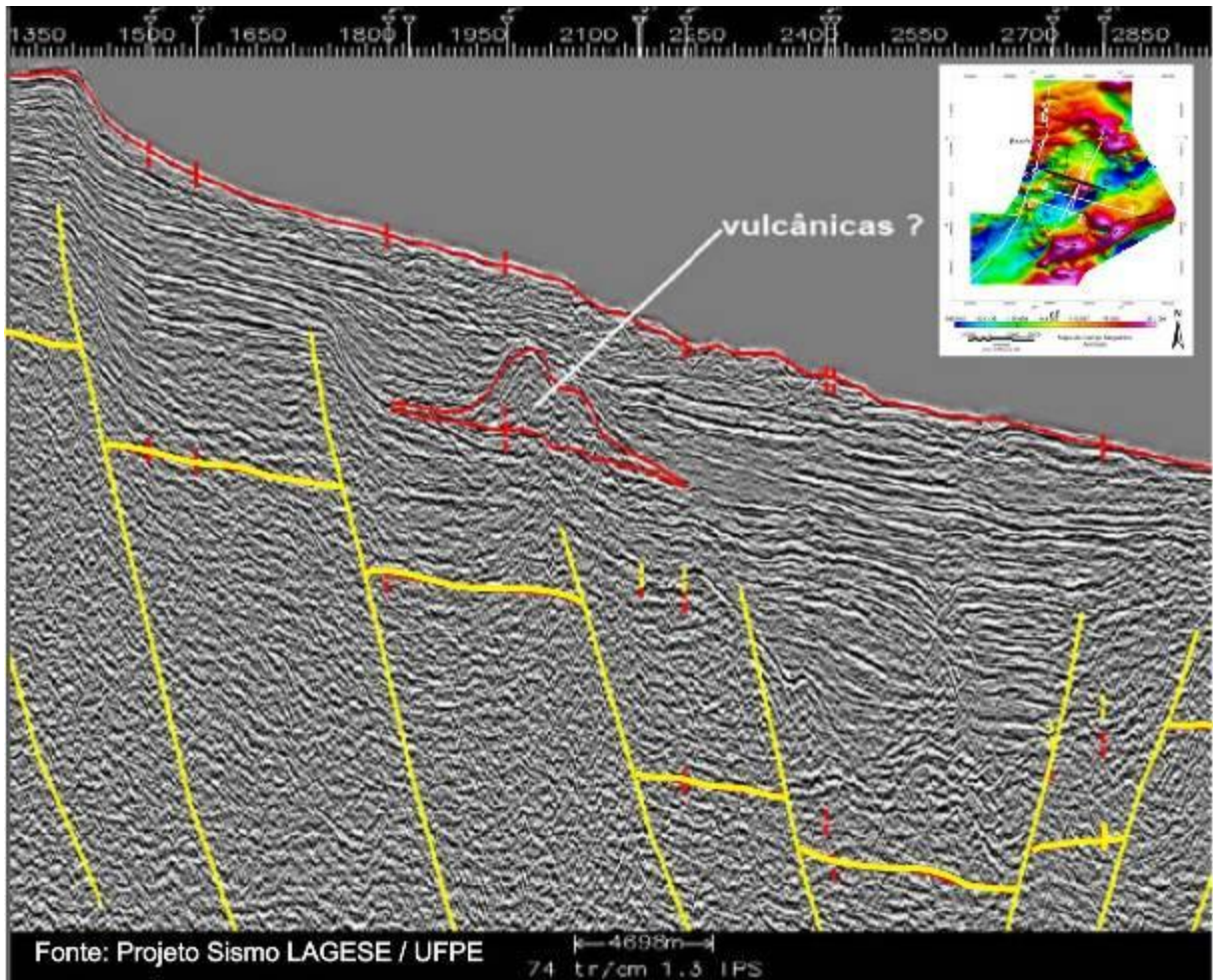


Fig. 6.31 – Linha D-D' exibindo em detalhe um possível derrame/intrusão de rochas magmáticas na região norte do Platô.

6.2.3. Integração dos métodos sísmico e potenciais

Na fase conclusiva dos estudos geofísicos foi realizada uma interpretação conjunta dos métodos, ocorrendo uma integração das análises dos dados magnetométricos, gravimétricos e sísmicos a qual possibilitou uma caracterização mais segura dos corpos ígneos estudados na Sub-Bacia do Platô de Pernambuco.

A partir da integração dos dados constatou-se algumas divergências que afrontam os resultados obtidos na interpretação isolada de cada um dos métodos. Exemplos deste fato é a ocorrência de alguns corpos vulcânicos que não são observados em linhas sísmicas, mas claramente detectados pela gravimetria/magnetometria, como mostrado na integração dos modelos das linhas A-A' e E-E' (Figs. 5.32 e 5.33) posicionadas no mapa da Fig. 5.22.

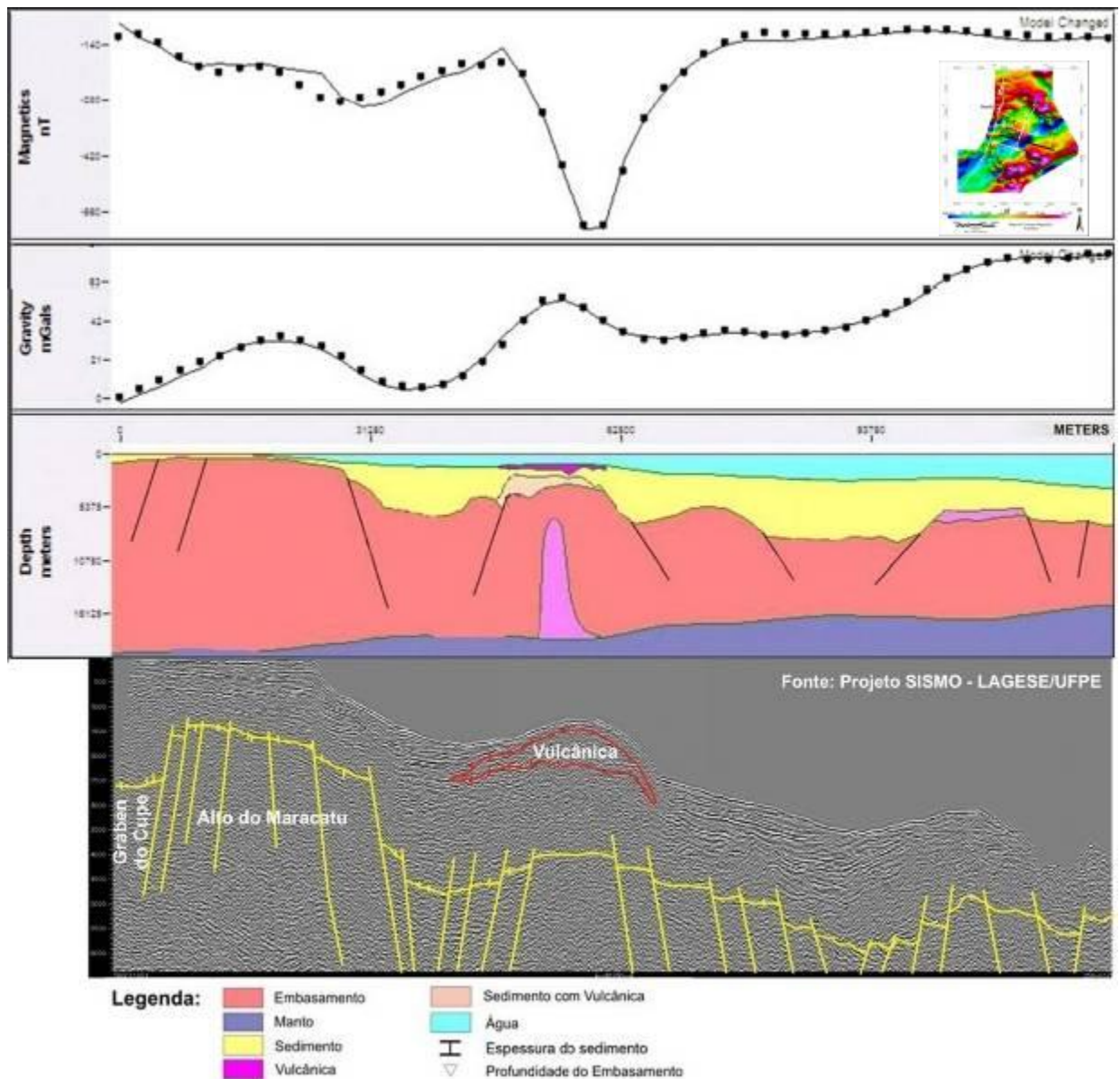


Fig. 6.32 - Modelos gravimétrico, magnético e sísmico gerados para a linha A-A', mostrando ajustes obtidos.

Esse fato pode ser atribuído à qualidade irregular em termos de eficiência da malha sísmica na qual essas interpretações foram obtidas. Outro exemplo são anomalias magnéticas que, não aparecem ou provavelmente sofrem influencia de sobreposição de outras mais fortes, como é o caso a ausência dos Grabens de Piedade e do Cupê, que aparentemente são mascarados pelas anomalias relacionadas às rochas vulcânicas do Cabo. Entretanto, essas são feições visíveis nos Mapas Gravimétricos.

Na parte central do perfil A-A' (Fig. 5.32) é reconhecido, nos três métodos estudados, o grande centro superficial de vulcanismo existente. Este representa a maior anomalia magnética da Sub-Bacia do Platô de Pernambuco. A geometria sugerida para o mesmo está de acordo com o ajuste realizado do modelo gravimétrico, o qual atesta que a subida dessas

rochas vulcânicas se daria através de falhas e fraturas, corroborando assim a interpretação feita para o horizonte vulcânico da linha sísmica A-A'.

Tendo por base a análise conjunta pelos três métodos geofísicos aqui empregados, sugere-se que o intervalo entre o derrame vulcânico acima mencionado e o embasamento é formado por uma intercalação de sedimento com rochas vulcânicas, ou seja, trata-se de uma seção vulcano-sedimentar. Também é sugerido que tenha sido desenvolvida uma plataforma carbonática isolada no meio do platô, em consequência da existência de um alto paleogeomorfológico criado pelas intrusões/derrames, o que também está de acordo com os modelos gravimétrico e magnético.

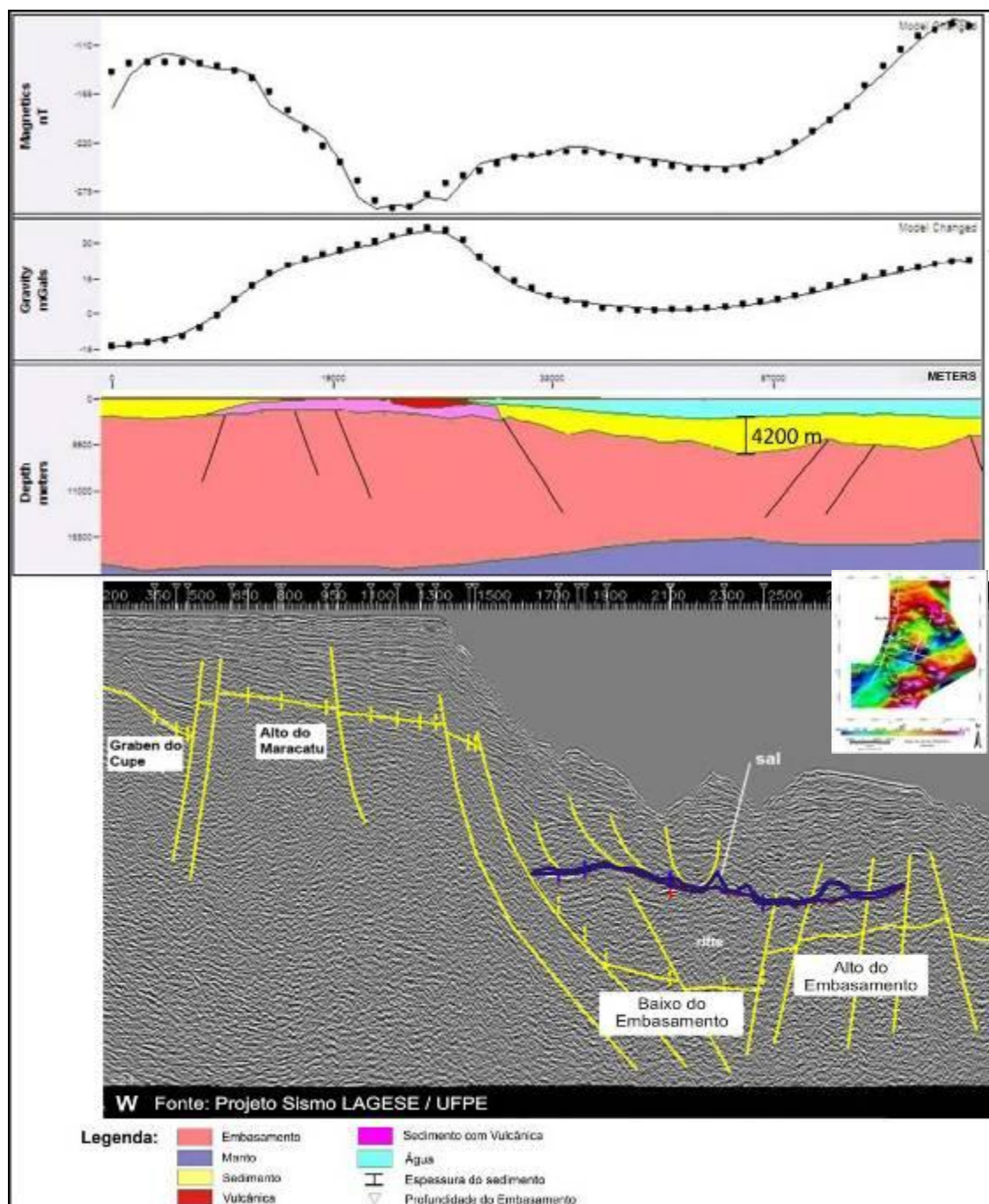


Fig. 6.33 – Modelo gravimétrico, magnetométrico com a interpretação sísmica da linha E-E'.

No perfil E-E' observa-se (Fig. 5.33) a não existência de indícios de vulcanismo, segundo o modelo proposto pela equipe do Projeto Sismo - LAGESE/ UFPE. Este, entretanto, diverge com os modelos magnético e gravimétrico, onde somente foi possível atingir o ajuste das curvas inserindo em ambos a sedimentação vulcano-sedimentar associada com a presença de rocha vulcânica justificando as anomalias observadas.

7. CONCLUSÕES

As análises dos Métodos Potenciais possibilitaram o reconhecimento de algumas estruturas descritas na literatura, como, a existência da Sub-Bacia do Platô de Pernambuco e o Alto de Maracatu.

A presença de falhas de transferência (NW-SE e N-S) e de gravidade (NE-SW) apontam para um movimento de distensão da crosta continental na fase rifte da formação da Bacia de Pernambuco.

Os estudos desenvolvidos na interpretação sísmica aos derrames de rochas vulcânicas sugerem uma idade mais jovem para estas rochas, baseada na observação da formação de um alinhamento de intrusões de grande magnitude ao longo do eixo principal da bacia em sentido NW-SE, incluindo a província vulcânica do Cabo de Santo Agostinho, ao vulcanismo da região central-sul do Platô e estruturas existentes na borda do platô. Associado a informações fornecidas por calibrações e/ou correlações com outros refletores (Projeto SISMO LAGESE/UFPE), as rochas vulcânicas estariam posicionadas no Cretáceo Superior.

O Modelo Gravimétrico forneceu uma visão 3D da área de estudo, elucidando as principais estruturas presentes em toda a área estudada;

Os modelos 2D gerados fornecem uma idéia de espessura sedimentar e profundidade do embasamento.

O estudo dos Métodos Sísmicos permitiu a diferenciação entre corpos evaporíticos e corpos vulcânicos presentes na Sub-Bacia do Platô de Pernambuco.

O estudo integrado dos métodos Magnetométrico, Gravimétrico e Sísmico permitiu uma avaliação mais segura no que se relaciona aos corpos vulcânicos existentes na Sub-Bacia do Platô de Pernambuco.

Alguns padrões estruturais observados apontam a Sub-Bacia do Platô de Pernambuco como uma área promissora para exploração de hidrocarbonetos, devido os corpos vulcânicos estudados serem potencialmente promotores de formas de trapeamento, devido às deformações causadas nas rochas sedimentares circundantes. São recomendados estudos futuros complementares que possam aprofundar as idéias aqui levantadas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALHEIROS, M.M. 1987. *Caracterização sedimentológica da Formação Cabo, Pernambuco*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 99p.
- ALMEIDA, C. B., CRUZ, L. B., JARDIM DE SÁ, P. M. P., MEDEIROS, W. E. 2005a. Estilo da tectônica distensional do estágio rifte na Sub-bacia de Pernambuco. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos – SNET, 10. Curitiba, Boletim de Resumos expandidos, 67-69
- ALMEIDA, C. B., CRUZ, L. B., JARDIM DE SÁ, E. F., VASCONCELOS, P. M. P., MEDEIROS, W. E. 2005b. *Tectônica e relações estratigráficas na Sub-bacia de Pernambuco, NE do Brasil: contribuição ao conhecimento do Rifte Sul-Atlântico*. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, (13)2: 167-180.
- ALVES, E.C. & COSTA, M.P.A. 1986. Interpretação sismoestratigráfica da porção norte do Platô de Pernambuco e suas possíveis correlações com a bacia Pernambuco Paraíba. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 34, Goiânia. Anais, 1: Págs.286-297.
- AMARAL, A.J.R. & MENOR, E.A. 1979. A seqüência vulcano-sedimentar cretácea da região de Suape (PE): interpretação faciológica e considerações metalogenéticas. Simpósio de Geologia do Nordeste, Natal, 9, Atas..., SBG: 251-269.
- BORBA, G.S. 1975. Rochas vulcânicas da faixa costeira sul de Pernambuco: aspectos petrográficos e geoquímicos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 134p.
- BRITO NEVES B. B., SIAL, A. N., RAND, H. M., MANO, V. V. 1982. The Pernambuco – alagoas massid, northeast Brasil. Rev. Bras. Geoc., Vol.124, nº . 1-3 p. 240-250.
- COBRA, R.Q. 1960. Geologia da região do Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 70p.
- CONCEIÇÃO J. C. J., ZALAN, P. V., DYAN, H. 1993. Deformações em rochas sedimentares induzidas por intrusões Magmáticas: Classificação e Mecanismos de Intrusão. Boletim de Geociências da PETROBRÁS. Rio de Janeiro,7 (1/4): 57-59, jan/dez.
- CORREIA, P. B.. Levantamento geofísico na região de Itambé – PE e Pedras de Fogo- PB. Dissertação de Mestrado. 1989.
- COSTA, M.N.C. & BARROS, F.A.R. 1998. Interpretação Geológica e perspectiva petrolífera na porção sul da Bacia Pernambuco-Paraíba. PETROBRAS E&P-SE/AL. Relatório Interno.
- COSTA, M. P. A. e MAIA, M. C. A. C., 1986. Prováveis Contatos de Crostas Continentais/Oceânicas no Platô de Pernambuco, Nordeste do Brasil. XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia, Goiânia.

- DOBRIN, M. B. 1976. *Introducción a la Proyección Geofísica*. Barcelona. Ediciones Omega. 245p.
- DUARTE, O. O. 1985. *Processamento de Reflexão Sísmica*. PETROBRAS - Relatório Interno; CENPES - DIVEN.
- FEIJÓ, F. J. 1994. *Bacias de Pernambuco- Paraíba*. Boletim de Geociências da PETROBRAS, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1.
- FOWLER, C. M. R. 1990. *The solid Earth: An Introduction to Global Geophysics*. Cambridge University Press.
- GOMES, P. O. & GOMES, B. S., 1997. *Transição Crustal no Platô de Pernambuco: uma Caracterização Geofísica a Partir de Dados do Projeto Leplac*. PETROBRAS, 16-14.
- GOMES, P. A. 2005. *Tectonismo, vulcanismo e processos erosivos no segmento nordeste da margem continental brasileira*. Faculdade de Geologia, UERJ. Tese de Doutorado, 183 p.
- KHAN, M. A. 1980. *Geologia Global*. Madrid, PARANINFO.
- LEAL, S. T. D. 1988. *Introdução aos Métodos Sísmicos*. PETROBRAS - Relatório Interno; DEBAR/DIRGEF.
- LIANDRAT, E., BOA HORA, M. P. P., MORAES, R. A. V. 1989. *Resultados dos Levantamentos aeromagnetométricos offshore no litoral brasileiro entre Salvador e João Pessoa*. In Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, 1, SBGF, Rio de Janeiro, Anais V2: 626-629.
- LIMA FILHO, M.F, PEDROSA, F.J.A., MEDEIROS, A.B, BRITO, M. F., ARAÚJO, R. D., NÓBREGA, V.A., MOTTA, J.A. – 1994 – *Geologia da Bacia do Cabo - PE*. 3. Simp. Sobre o Cretáceo do Brasil. Rio Claro-SP.
- LIMA FILHO M. 1998. *Análise estratigráfica e estrutural da Bacia de Pernambuco*. Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 139p.
- LIMA FILHO, M. F., BARBOSA, J. A., NEUMANN, V.H., SOUZA, E.M., 2005. *Evolução estrutural comparativa da Bacia de Pernambuco e da Bacia da Paraíba*. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos - SNET, 5, Curitiba. Boletim de Resumos Expandidos, 45-47.
- LUIZ, J. G., SILVA, L. M. C. 1995. *Geofísica de Prospecção*. Belém: Universidade Federal do Pará; Cejup.
- MORAIS, D.M.F., 2008. *Sismoestratigrafia do Cretáceo Superior/ Neógeno nas Bacias da Paraíba e parte de Pernambuco, NE do Brasil*. Dissertação de Mestrado. UFPE, Recife.
- MOTTA, J. A. – 1986-*Reconhecimento Geofísico e Sedimentológico da Região de Cajá – Santa Rita (PB)*. Dissertação de Mestrado. UFPE
- NASCIMENTO, M.A.L. 2003. *Geologia, geocronologia, geoquímica e petrogênese das rochas ígneas cretácicas da província magmática do Cabo e suas relações com as unidades sedimentares da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, PPGUFRN, Tese de Doutorado, 235 p.
- NEVES, S. P; MARIANO, G.; CORREIA, P.B; SILVA, J.M.R. 2006. *70 m.y. of synorogenic plutonism in eastern Borborema Province (NE BRAZIL): temporal and kinematic constraints on the Brasiliano Orogeny*.
- RAND, H. M. 1967 - *Estudos geofísicos na faixa sedimentar costeira Recife-João Pessoa*. Bol. Soc. Bras. Geol. 16(1) 87-99.

- RAND, H. M. 1976. Estudos geofísicos na faixa litorânea ao Sul de Recife. Tese de Livre Docência. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 112 p.
- RAND, H.M. 1977 - Reconhecimento gravimétrico da bacia João Pessoa. Bol. Núcleo NE Soc. Bras. Geol., 6-Atas VIII Simp. Geol. Nordeste, Campina Grande (PB). 429-438.
- RAND, H. M. 1978. Análise gravimétrica e magnetométrica da estrutura superficial da faixa costeira do Nordeste brasileiro. In: Cong. Bras. Geol., 30, Recife. Anais, 5: 2336-2346.
- RAND, H. M. & Mabesoone, J. M. 1982. Northeastern Brazil and the final separation of South America and Africa. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 38: 163-183.
- RAND, H.M. 1985. Ligação "landbridge" (ponte internacional) entre Pernambuco, Paraíba e Nigéria-Camarões. Univ. Fed. Pernambuco, Depart. Geol., Série D-Textos didát., 1 (Fanerozóico nordestino). 44(sinopse).
- RAND, H. M. 1986. Anomalias gravimétricas em redor do Recife. In: Estudos e Pesquisas, UFPE/ DEMI., 8:79-85.
- RAND, H.M. & Manso, V. A.V. 1990. Mapas gravimétricos e magnetométricos da faixa costeira do Nordeste do Brasil. Soc. Bras. Geol., Anais 36 Congr., Natal (RN). v. 5, p. 2431-2438.
- SEVERIANO RIBEIRO, H. J. P. 2001. *Estratigrafia de Sequência: Fundamentos e Aplicações* São Leopoldo, RS: Editora da Universidade do Vale do Rio Sinos.
- SILVA, E. P. 2006. Mapeamento Gravimétrico e Cintilométrico das estruturas da Bacia Paraíba (Parte Oriental) entre os paralelos Ponta do Funil (PE) e Pitimbu (PB). Monografia – Recife, UFPE.
- TEIXEIRA, W., TOLEDOM. C. M., FAIRCHILD, T. R., TAIOLI, F. 2001. *Decifrando a terra*. São Paulo, Oficina de Textos.
- TSUBOI, C. 1983. *Gravity*. London, George Allen & Unwin.
- VILLAS BOAS, N., DOCA, R. H., BISCOLOLA G. J., 2001. *Tópicos de Física 2: Termologia, Ondulatória e Óptica*. São Paulo: Saraiva, 16ª Ed.