



UFRJ

Eduardo Batista Neiva

**APLICAÇÕES DO MÉTODO GRAVIMÉTRICO NA EXPLORAÇÃO DE
PETRÓLEO: ANÁLISE DE ESTUDO DE CASO APLICADO À BACIA
DO RECÔNCAVO**

Trabalho de Conclusão de Final de Curso submetido ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro –UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Especialista em Geofísica do Petróleo.

Orientadores:

Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes
Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
Paula Lúcia Ferrucio da Rocha

Rio de Janeiro

Março de 2007



MGL
N397A

Neiva, Eduardo Batista

Aplicações do Método Gravimétrico na Exploração de Petróleo: análise de estudo de caso aplicado à bacia do Recôncavo/ Eduardo Batista Neiva - Rio de Janeiro: UFRJ/IGeo, 2007. 101p. : il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia, 2007.

Orientadores: Leonardo Borghi, Paula Ferrucio da Rocha.

I. Geofísica. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Leonardo, Borghi; Paula, Ferrucio da Rocha. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. **Aplicações do Método Gravimétrico na Exploração de Petróleo: análise de estudo de caso aplicado à bacia do Recôncavo**

Eduardo Batista Neiva

**APLICAÇÕES DO MÉTODO GRAVIMÉTRICO NA EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO:
ANÁLISE DE ESTUDO DE CASO APLICADO À BACIA DO RECÔNCAVO**

Trabalho de Conclusão de Final de Curso
submetido ao Programa de Pós-
Graduação em Geologia, Instituto de
Geociências, da Universidade Federal do
Rio de Janeiro –UFRJ, como requisito
necessário à obtenção do grau de
Especialista em Geofísica do Petróleo.

Orientadores:

Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes
Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
Paula Lúcia Ferruccio da Rocha

Aprovada em: 27/03/2007 .

Por:

Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida

Paula Lúcia Ferruccio da Rocha

*Dedico este trabalho a minha Mãe,
Estelmar Batista Neiva, a minha irmã
Elizeth Batista Neiva, a minha Sogra,
Maria Luiza Pereira Rae, a minha querida
Esposa, Rosana Pereira de Souza Neiva e a
minha eterna paixão, minha filha Maria
Eduarda.*

Agradecimentos

Ao País, na figura do Excelentíssimo Presidente da República, Luiz Inácio Lula da Silva, pela autorização do concurso público para a Petrobras.

Ao Presidente da Petrobras, José Sérgio Gabrielli, pela condução administrativa da empresa, reforçando cada vez mais a importância social e econômica da Petrobras para o desenvolvimento integrado do país.

Ao Diretor de Exploração e Produção da Petrobras, Guilherme Estrella, pela preocupação permanente na busca pela excelência da qualidade dos serviços executados, sempre atrelado ao compromisso do respeito ao meio ambiente e desenvolvimento social.

Aos Gerentes Executivos de Exploração e de Engenharia de Produção da Diretoria de Exploração e Produção da Petrobras, Paulo Manoel Mendes de Mendonça e José Mirando Formigli Filho.

Ao Gerente Geral da Geofísica Aplicada à Exploração da Petrobras, Celso Carlos Martins.

Ao Coordenador da Universidade Corporativa Petrobras, Ricardo Sá, pelo cuidado e zelo com o desenvolvimento das nossas habilidades profissionais.

Aos Coordenadores Acadêmico e Administrativo do Curso de Formação de geofísicos da Petrobras, Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes e Luiz Carlos Alves Gonçalves, por toda atenção disponibilizada durante o período do curso de formação.

Aos companheiros da Petrobras que atuaram como professores da turma de formandos de 2007 do curso de formação de geofísicos, devido ao zelo, integração e respeito aos novos colegas de trabalho.

Aos professores do Instituto de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, em especial aos Professores Doutores Orientadores Leonardo Borghi e Paula Ferruccio da Rocha, pela orientação e correção do presente trabalho e pela atenção disponibilizada durante o curso.

Aos companheiros da turma de formação pela interação, respeito e companheirismo, demonstrando ser este o melhor caminho para a manutenção do bem estar social dentro da empresa.

A toda equipe de trabalho da aquisição sísmica terrestre, nas figuras dos Tutores Marcus Petracco Marques e Jefferson Swierczynski Pitombo, pela aprendizagem e disponibilidade durante o vivencial de campo, proporcionando fatos marcantes para toda a minha existência.

A toda equipe do Processamento Sísmico da UN-BC, na figura do Gerente Luiz Henrique Amaral, por toda presteza durante o vivencial neste setor, em especial para o nosso Tutor Geofísico Gilberto Rodrigues de Lima.

Em particular, aos meus companheiros de vivencial na UN-BC, João Maurício Figueiredo Ramos, Cleber Antonio Carbonari e Vanessa Souza Leite. Em destaque, ao meu amigo João Maurício pela convivência durante a parte teórica do curso de formação, evidenciando o grande profissional que é, sendo uma das grandes promessas para Petrobras.

Ao Chefe do laboratório de Engenharia de Reservatório e de Exploração (Lenep) da UENF, Abel González Carrasquilla, pelo incentivo em seguir uma carreira voltada o desenvolvimento de trabalhos e atividades na área de geofísica do petróleo.

***Todo saber
E todo aumento do saber,
Antes que resulte numa solução,
Acarretará em uma nova dúvida.***

Eduardo Batista Neiva

Resumo

NEIVA, EDUARDO BATISTA. **APLICAÇÕES DO MÉTODO GRAVIMÉTRICO NA EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO: ANÁLISE DE ESTUDO DE CASO APLICADO À BACIA DO RECÔNCAVO**. 2007. 101p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A bacia do recôncavo constitui-se num dos mais importantes bacias sedimentares brasileira. Sempre foi e continua sendo objeto de interesse de estudos e aplicações de métodos e técnicas geofísicas, com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre o mapeamento das suas feições geológicas. Este trabalho apresenta, de forma geral, o contexto geológico desta bacia e as técnicas de aquisição, tratamento e interpretação de dados geológicos a partir do método do gravimétrico. Especificamente, realizou-se a análise de parte de um trabalho técnico que utilizou o método de deconvolução de Euler para estimar a distribuição espacial e profundidades das anomalias gravimétricas da porção nordeste da bacia do Recôncavo. Os resultados obtidos foram comparados com dados de campo da região, onde estão concentrados os campos de petróleo. Pelas comparações realizadas, inclusive com mapas sísmicos, concluiu-se que o método gravimétrico e a técnica de interpretação utilizada são confiáveis. Houve boa concordância com o modelo geológico conhecido da região, além de tornar evidentes novas feições estruturais. Como estudo de caso complementar, foi apresentado um trabalho de gradiometria realizado a partir de dados de levantamentos gravimétricos da porção central da bacia do Recôncavo. A técnica aplica o tensor do campo gravitacional e ampliou as informações obtidas com os mapas de anomalias gravimétricas Bouguer.

Palavras-chave: Recôncavo; Gravimetria; Petróleo.

Abstract

Neiva, Eduardo Batista. **APLICAÇÕES DO MÉTODO GRAVIMÉTRICO NA EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO: ANÁLISE DE ESTUDO DE CASO APLICADO À BACIA DO RECÔNCAVO.** [*Applications of the Gravimetric Method in Petroleum Exploration: Analyze of Case Study applicable to Recôncavo basin*]. 2007. 101p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Recôncavo basin is an important Brazilian sedimentary basin. It was and has been object of interest for applications in geophysical methods and techniques which the principal objective is to maximizing the knowledge about its geological structures. This work show in general line the geological context of the basin and the acquisition, treatment and interpretation techniques of geological data using gravimetric method. Specifically, part of a technical work was analyzed. In that work the method of Euler deconvolution was utilized for estimating the spatial distribution and depths of gravimetric anomalous of Recôncavo basin northeastern portion. The results were compared with local data where are positioned the wells and seismic maps. The conclusions showed that gravimetric methods and interpretation technique applied had a good results and agreement with geological model of region. The methodology was able to predict news geological structures too. Other case study about gradiometry was presented. The work was realized with gravimetric data of Recônvaio basin central part. The techniques apply the tensor of gravitational field and amplified the information obtained with Bouguer gravimetric anomalous maps.

Key-Words: Recôncavo; Gravimetry; Petroleum.

Lista de Figuras

- Figura 1** – Localização geográfica das bacias do Recôncavo – Tucano – Jatobá.....p.2
- Figura 2** – Coluna estratigráfica da bacia do Recôncavo.....p.6
- Figura 3** – Modelo de Rifting para Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá. (A) Fase inicial no início do Berriasiano. (B) Fase sin-rifte, com o espalhamento do oceano Atlântico.....p.7
- Figura 4** – Arcabouço estrutural ao nível da seqüência Pré-Rifte da bacia do Recôncavo....p.9
- Figura 5** – Paleo-reconstrução da configuração continental no Neopálio.....p.13
- Figura 6** – Arcabouço estrutural da bacia do Recôncavo.....p.17
- Figura 7** – Secção geológica esquemática representando os *plays* exploratórios da bacia do Recôncavo.....p.18
- Figura 8** – Modelos de Migração e acumulação de hidrocarbonetos na bacia do Recôncavo. A) Trapas estruturais do sistema Pré-rifte. B) Trapas Estratigráficas ou combinadas do sistema Rifte Candeias. C) Trapas por inversões estruturais do sistema Rifte Ilhas.....p.19
- Figura 9** – Representação da atração gravitacional da massa elementar dmp.24
- Figura 10** – Esquema do pêndulo simples.....p.28
- Figura 11** – esquema de medição do gravímetro de queda livre.....p.29
- Figura 12** – Representação esquemática de um sistema de massa e mola na vertical.....p.31
- Figura 13** – Diagrama esquemático do princípio físico de funcionamento do gravímetro Lacoste-Romberg.....p.32
- Figura 14** – Curvas da variação da maré terrestre (*Tidal*) e deriva (*Drift*) do gravímetro....p.34
- Figura 15** – a) Deformação provocada na superfície geoidal devida à presença de massa. b) Ilustração entre as relações das superfícies geoidal, elipsoidal, oceânica e terrestre.....p.39
- Figura 16** – Variação do campo gravitacional teórico em função latitude da Terra.....p.43

- Figura 17** – Esquema de corpo tridimensional de forma irregular.....p.49
- Figura 18** – Corpo de forma irregular aproximado por um conjunto de prismas regulares de forma retangular.....p.50
- Figura 19(a)** – Campos produtores de petróleo e/ou gás natural na porção nordeste da bacia do Recôncavo.....p.56
- Figura 19(b)** – Campos produtores de hidrocarbonetos na porção nordeste da bacia do Recôncavo com os limites geológicos por classe de densidade de fraturamento.....p.57
- Figura 20** – a) Mapa de intensidade gravimétrica Bouguer da porção nordeste da bacia do Recôncavo; b) Mapa digitalizado com sombreamento NE.....p.58
- Figura 21** – Mapa Bouguer residual com contraste por equalização em níveis de cinza da porção nordeste da bacia do Recôncavo.....p.59
- Figura 22** – Mapa Bouguer regional com sobreposição de mapa de morfoestruturas e lineamentos, com colorização de falsa cor, da porção nordeste da bacia do Recôncavo.....p.60
- Figura 23** – Mapa de campo gravimétrico Bouguer e da distribuição espacial das fontes gravimétricas da porção nordeste da bacia do Recôncavo, com o histograma de freqüências das profundidades das anomalias geradoras das fontes.....p.62

Sumário

Agradecimentos	v
Resumo	vii
<i>Abstract</i>	viii
Lista de figuras	ix
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Geografia e Limites Geológicos	1
1.3 Prospectividade para hidrocarbonetos	3
1.4 Objetivos	3
CAPÍTULO 2 – CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA	4
2.1 Estratigrafia	4
2.2 Arcabouço Estrutural	7
2.3 Evolução Tectônica	12
2.4 Geologia do Petróleo	15
CAPÍTULO 3 – O MÉTODO GRAVIMÉTRICO	21
3.1 Fundamentos Teóricos	21
3.2 Aquisição Gravimétrica	27
3.2.1 Medidas Absolutas	27
3.2.2 Medidas Relativas	30
3.2.3 Levantamentos Terrestres	34
3.2.4 Levantamentos Marítimos	35
3.2.5 Levantamentos Aerogravimétricos	37
3.3 Reduções Gravimétricas	38
3.3.1 Correção de Latitude	41
3.3.2 Redução e Anomalia da Ar Livre	43
3.3.3 Redução e Anomalia Bouguer	45
3.4 Interpretação dos Dados	46
3.4.1 Método Direto	48
3.4.2 Método Inverso	51
CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASO	55
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	64
Referências Bibliográficas	65
APÊCNICE I	72
APÊNDICE II	81

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A bacia do Recôncavo consiste na primeira província petrolífera brasileira. Durante muitos anos foi e ainda continua sendo laboratório para a pesquisa e aplicações de métodos geofísicos direcionados a descoberta e otimização da produção de hidrocarbonetos.

Nesse contexto, o método gravimétrico sempre teve destaque, proporcionando bons resultados para indústria do petróleo, particularmente para a bacia do Recôncavo.

O presente trabalho aborda sobre o contexto geológico desta bacia e a aplicação do método gravimétrico, com explanação da instrumentação e reduções utilizadas na aquisição e as técnicas de interpretação. Ao final apresenta-se um estudo de caso e um outro, de forma complementar, sobre a aplicação da gradiometria.

1.2 Geografia e Limites Geológicos

A bacia do Recôncavo localiza-se na região Nordeste do Brasil, ocupando uma área de aproximadamente 11.500 km² (Figura 1). Esta bacia corresponde à porção sul de um aulacógeno intracontinental que se estende para o norte, englobando também as bacias de Tucano e Jatobá. Seus limites são a falha de Salvador a leste; a falha de Maragogipe a oeste; o alto de Aporá ao norte, fronteira com a bacia do Tucano Sul; e o alto de Itacaré ao sul. Contudo, alguns autores descrevem a falha da Barra como sendo o limite sul da bacia.



Figura 1 – Localização geográfica das bacias do Recôncavo – Tucano – Jatobá

(FIGUEIREDO et al., 1994)

1.3 Prospectividade para Hidrocarbonetos

De acordo com MAGNAVITA (1992), a bacia do Recôncavo constitui um meio-gráben inclinado para leste contra a Falha de Salvador, sendo caracterizado por um sistema de falhas extensionais que definem plataformas e baixos estruturais. Os processos de sedimentação são típicos de um rifte abortado durante a abertura do oceano Atlântico entre o Neojurássico e o Eocretáceo (ROSTIROLLA, 2003), com seqüência sedimentar cuja espessura máxima aproximada é de 6900 m (BEISL, 1996).

Mais antiga província petrolífera brasileira, segundo FIGUEIREDO *et al.* (1994), a bacia do Recôncavo já produziu quase 180 MMm³ de hidrocarbonetos e as reservas atuais são da ordem de 07 MMm³.

1.4 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo proporcionar uma visão geral da geografia e geologia da bacia do Recôncavo e do método gravimétrico, abordando os processos de aquisição, tratamento e técnicas de interpretação dos dados.

Especificamente, tem objetivo de desenvolver análises de dois estudos de caso, dissertando sobre as técnicas de interpretação de dados de levantamentos gravimétricos, aplicados à prospecção de hidrocarbonetos na bacia do Recôncavo, utilizados para o mapeamento das feições estruturais da bacia.

CAPÍTULO 2 – CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA

2.1 Estratigrafia

A definição fornecida pelo *INTERNATIONAL STRATIGRAPHIC GUIDE* (2007), apresenta a estratigrafia como uma ciência que estuda a sucessão e a idade das rochas estratigráficas, assim como sua forma, distribuição, composição litológica, conteúdo paleontológico, propriedades geofísicas e geoquímicas, ou seja, seus atributos, propriedades e caracteres, procurando inferir sobre seus ambientes de origem e história geológica.

Segundo SANTOS & BRAGA (1990), a coluna sedimentar da costa brasileira, com origem no Cenozóico intermediário, apresenta quatro grandes seqüências estratigráficas: do Continente, do Lago, do Golfo e do Mar. Os mesmos autores afirmam, ainda, que a bacia do Recôncavo apresenta somente as Seqüências do Continente e do Lago. Apontam para essa situação, justificando-se pelo fato dessa bacia ter tido uma interrupção no processo formador do rifte, que ocorreu provavelmente no final Andar Alagoas.

Dessa forma, a revisão estratigráfica da bacia do Recôncavo, inicialmente proposta por VIANA *et al.* (1971), aponta para as correspondências entre as fases de sedimentação, dando origem às respectivas formações e as grandes Seqüências do Continente e do Lago. A Figura 2 apresenta a coluna estratigráfica da bacia do Recôncavo atualizada, obtida no site oficial da Agência Nacional do Petróleo – ANP (2007).

No caso da Seqüência do Continente, os sedimentos se depositaram durante a Fase Pré-Rifte e envolvem às seguintes formações: Aliança, Sergi, Itaparica e Água Grande. Para a Seqüência do lago, os sedimentos foram depositados durante a Fase Rifte e envolvem as seguintes formações: Candeias, Marfim, Pojuca, Taquipe, São Sebastião e Salvador.

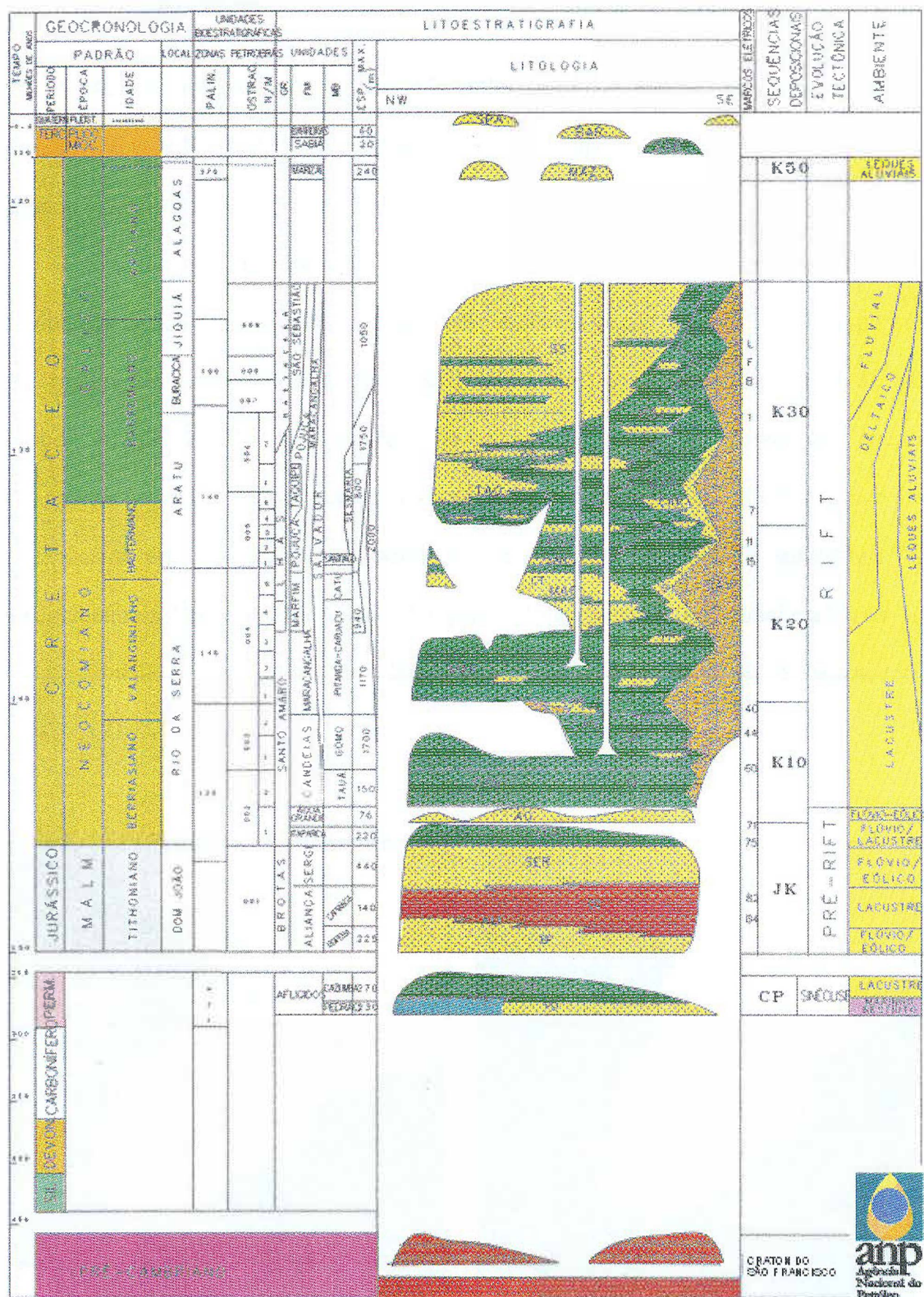
O conteúdo fossilífero das rochas permite datá-las e correlacioná-las com as de outras localidades. A Bioestratigrafia faz uso desse conteúdo fossilífero. No caso da indústria do petróleo, usam-se principalmente microfósseis, por razões práticas. Fósseis de grandes dimensões não conseguem ser recuperados pelas sondas utilizadas nas perfurações petrolíferas; entretanto, os microfósseis são facilmente encontrados em amostras retiradas durante a perfuração.

Entre os microfósseis mais utilizados em Bioestratigrafia estão os foraminíferos, os radiolários, as diatomáceas, os palinórfos e os ostracodes. Segundo SANTOS & BRAGA (1990), a bioestratigrafia da bacia do Recôncavo, relacionada aos sedimentos depositados entre os Períodos Jurássico e Cretáceo, está baseada em ostracodes não marinhos.

Tal divisão bioestratigráfica baseia-se no conceito de zona de intervalo. Na Bacia do Recôncavo são reconhecidas, atualmente, nove zonas e vinte seis subzonas, com cinco zonas de palinórfos, apresentando uma distribuição regional relativamente grande (SANTOS & BRAGA, 1990 - A).

A Litoestratigrafia consiste no estudo estratigráfico que visa a determinação do empilhamento ou sucessão estratigráfica vertical de unidades litológicas (rochosas) e de lacunas neste empilhamento e a continuidade lateral dessas unidades cujos limites podem ser diacrônicos.

A Cronoestratigrafia se preocupa com as idades de rochas e de camadas geológicas, culminando com a determinação e apresentação de um quadro estratigráfico com definição de idades, absolutas ou relativas, de unidades estratigráficas e de processos geológicos registrados nas rochas. Verifica-se a inexistência de registros geológicos por falta de deposição ou por erosão em algumas regiões da Bacia na fase rifte e determinados momentos do Período Cretáceo. Contudo, há ocorrência de grande deposição de sedimentos (arenitos) de origem fluvio-deltáico chegando a 1000 m de deposição no Barremiano.



J.M.CAIXETA, 1993

Figura 2 – Coluna estratigráfica da bacia do Recôncavo (fonte: site da ANP, 2007)

2.2 Arcabouço Estrutural

A bacia do Recôncavo apresenta três ciclos tectônicos em sua estruturação: dois no Neocomiano (141,0 – 137,5 Ma) e um no Barremiano Superior/Aptiano (121,8 – 118,0 Ma), segundo HARLAND *et al.* (1982).

O primeiro ciclo, resultante do ajuste compensatório em resposta ao desequilíbrio da distribuição de forças na litosfera, causado pelo processo de estiramento crustal responsável pela ruptura do paleocontinente Gondwana, estabeleceu o arcabouço estrutural da bacia segundo Aragão (1994). Tais esforços distensivos, do início do Berriasiano, geraram falhamentos normais planares, que delimitaram a arquitetura da bacia, individualizando áreas relativamente estáveis (patamares, plataformas e rampas) e áreas mais subsidentes, que configuraram os depocentros regionais. A Figura 3(A) apresenta a fase inicial e a Figura 3(B) a fase sin-rifte de separação das placas, originando o Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá (MAGNAVITA *et al.*).

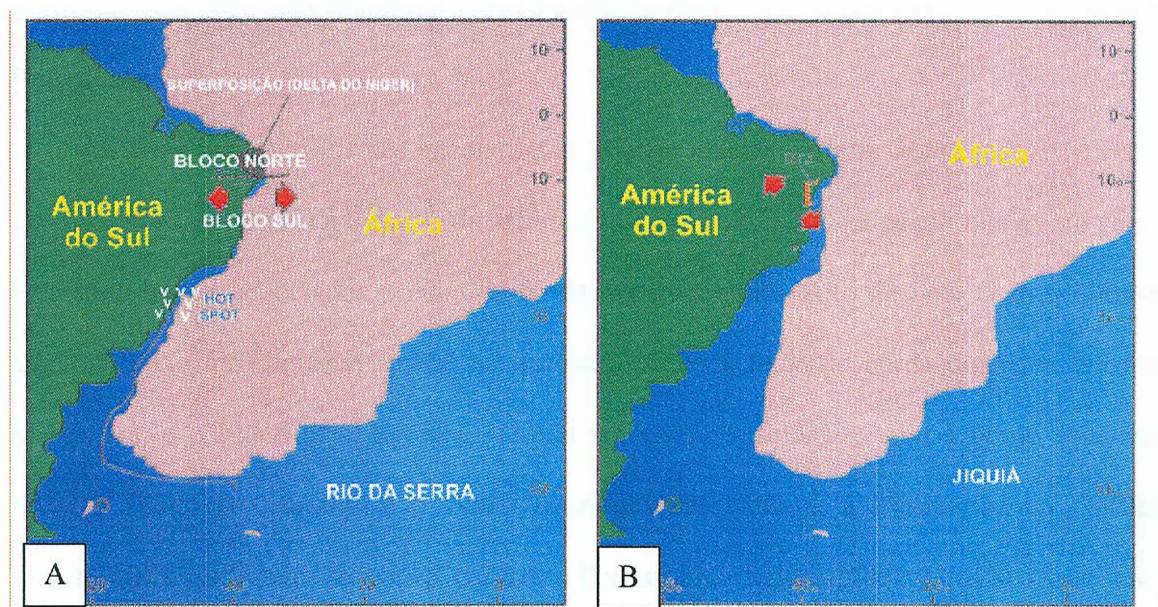


Figura 3 – Modelo de Rifteamento para Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá. (A) Fase inicial no início do Berriasiano. (B) Fase sin-rifte com o espalhamento do oceano Atlântico (fonte: MAGNAVITA *et al.*).

A unidade tectônica fundamental é um meio-gráben, estando a borda falhada a leste, definida pelo Sistema de Falhas de Salvador. Os falhamentos NE-SW com rejeito variando de 500 a 1000 m são predominantemente sintéticos na porção nordeste do rifte, destacando-se a falha de Pedras, a qual caracteriza-se por apresentar uma geometria lítrica com 13° de inclinação em sua porção mais basal. No restante da bacia, esses falhamentos são predominantemente antitéticos (ARAGÃO, 1994).

As falhas de direção NW-SE têm como principal representante a Falha de Mata-Catu que, além de possuir a maior variação de rejeito vertical da bacia (100 a 4000 m), mostrou-se ativa durante toda a história geológica do rifte (Figura 4).

Os Sistemas de Falhas de Salvador, de direção NW-SE, revelou-se associado com rampas ou patamares ao longo de todo o rifte, com geometria *limited back-faulting* como proposto por MAGNAVITA (1992) para a evolução da borda deste rifte. Em ambas áreas é comum a presença de conglomerados sobre o embasamento. Na área adjacente à Falha de Mata-Catu observa-se apenas a existência de uma rampa onde se constata a presença da Formação São Sebastião em *on lap* sobre o embasamento, a qual é conhecida como Rampa da Borda Leste.

As áreas mais subsidentes encontram-se em sua maioria a leste, destacando-se o Baixo de Quiambina (3.800 m) e o Baixo de Miranga (a norte com 5.200 m, sendo que ao sul atinge 6.900 m), ambos associados à falha de borda, separados pelo Alto de Sete Galhos. Têm-se ainda o Baixo de Camaçari (6.900 m) associado tanto à falha de borda quanto a falha de Mata-Catu, e o Baixo de Alagoinhas (3.800 m), único relacionado com a borda ocidental. Entre o Baixo de Miranga e o Baixo de Alagoinhas situa-se a Plataforma de Quiricó, caracterizada por manter-se estável durante o Berriasiano e o Valanginiano (todo o tempo Rio da Serra).

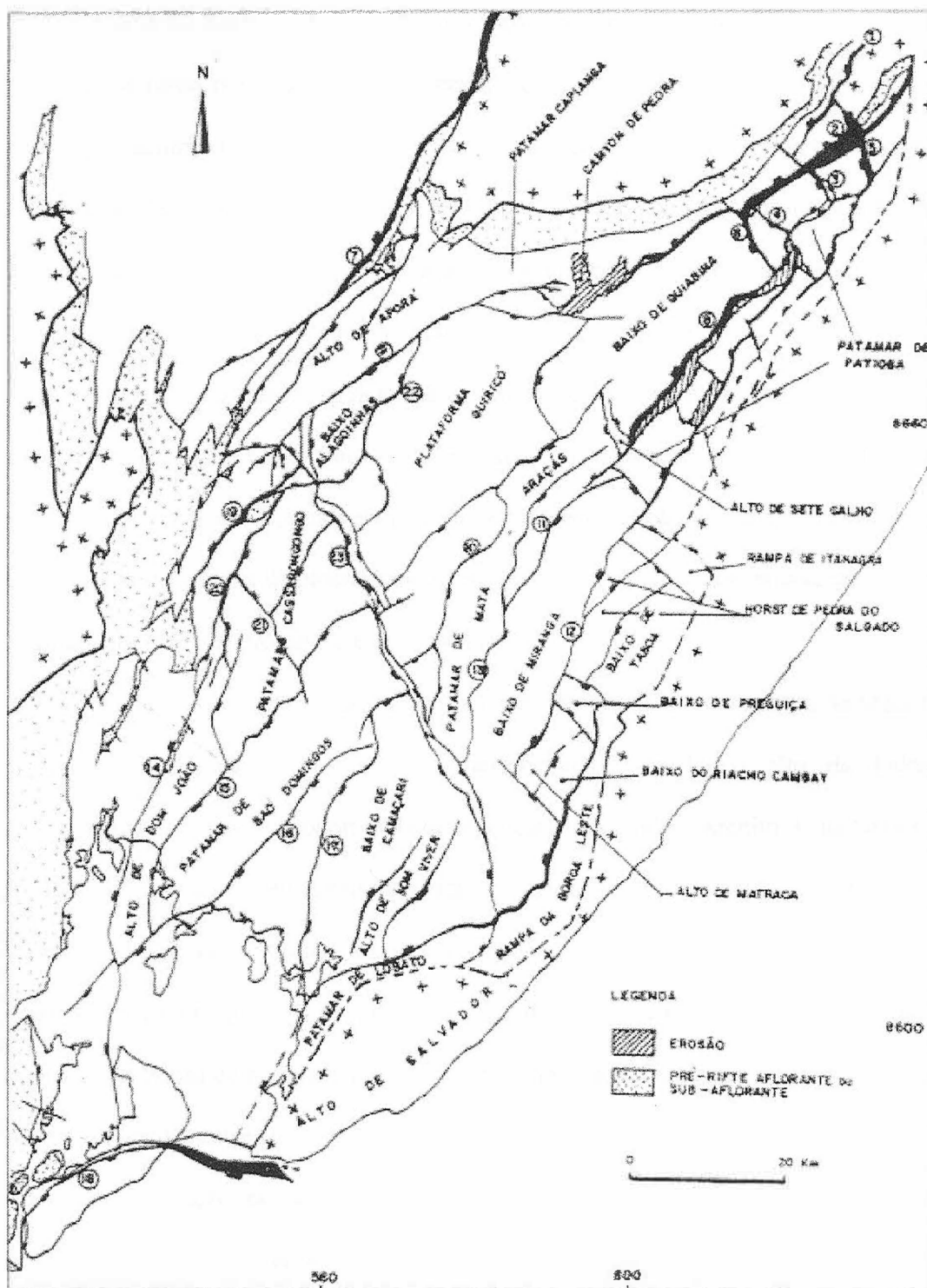


Figura 4 – Arcabouço estrutural ao nível da seqüência Pré-Rifte da bacia do Recôncavo. As principais falhas são: (1) de Altamira, (2) de Pedras, (3) de Fazenda Alvorada, (4) de Baixa Grande, (5) de Fazenda Cajueiro, (6) de Palmeiras, (7) de Inhambupe, (8) de Patioba, (9) de Tombador, (10) de Araçás-Boa Esperança, (11) de Progresso, (12) de Pedra do Salgado, (13) de Biriba, (14) de Capimirim, (15) de Nova América, (16) de Candeias, (17) de Lamarão, (18) da Barra, (19) de Orobó, (20) de Paranaguá, (21) de Cassarongongo, (22) de Sauípe, e (23) Mata-Catu (fonte: ARAGÃO, 1993).

A passagem do Baixo de Miranga para o Baixo de Camaçari ocorre através da Falha de Mata-Catu, que nessa região perde sua expressão, com rejeito da ordem de 100m, devido ao Anticlinal de Jacuípe. Como consequência desse pequeno rejeito, a gravimetria não mostra contraste entre essas duas feições, aparecendo como um único baixo. Apesar dessa região ter sido a mais subsidente da bacia, acomoda a feição denominada Alto de Bom Viver, de direção NE/SW, que corresponde a uma anomalia positiva no mapa gravimétrico residual.

O Anticlinal de Jacuípe, situado na extremidade sudeste da Falha de Mata-Catu, é provavelmente resultante de esforços transpressivos ao longo desse trecho da falha. Tais esforços seriam também responsáveis pela presença de repetição de camadas no Campo de Remanso e pela ocorrência de blocos localmente rotacionados, que causam inversão do rejeito (de normal para reverso) próximo a esse anticlinal.

A Falha de Cassarongongo, sobre o patamar homônimo, paralela à falha de Mata-Catu, também sugere a atuação de esforços transpressivos. No bloco alto da Falha de Cassarongongo, suspeita-se da ocorrência de repetição de camadas (Arenito Água Grande).

MORLEY *et al.* (1990) definiram zonas de transferência em riftes como sistemas coordenados de feições deformacionais, que conservam o *strain* causado pela distensão regional. Observaram que essas zonas de transferências variam desde discretas zonas de falhas a amplas zonas de arqueamento, propondo uma classificação baseada na interação dos falhamentos normais entre si.

Essa classificação permitiu classificar a Falha de Mata-Catu como uma zona de transferência conjugada divergente colinear, caracterizada pela mudança de sentido do mergulho do plano de falha ao longo da sua direção. Por sua vez a rampa de Itanagra, área compreendida entre a Falha de Pedra do Salgado e a falha de borda, foi classificada como uma zona de transferência sintética com superposição, caracterizada pela formação de uma *strike ramp* ou uma *relay ramp* (LARSEN, 1988).

A zona de transferência seria, portanto, responsável pelo deslocamento observado em mapa do Sistema de Falhas de Salvador. Com o auxílio do mapa gravimétrico residual, foram individualizados nessa feição o *Horst* de Pedra do Salgado, o Baixo de Taboa, o Baixo de Preguiça, o Alto de Matraca e o Baixo do Riacho Cambay. Eventos erosivos de Idade Berriasiano que afetam o topo do Grupo Brotas, são identificados, principalmente ao longo da borda do Patamar de Patioba (adjacente à falha de borda), ao longo da falha de Mata-Catu e sobre o Patamar de Capianga, originando a feição denominada de *Canyon* de Pedras.

O segundo ciclo tectônico afetou basicamente a seqüência neocomiana (sedimentos lacustres), sendo caracterizada por falhas de crescimento, as quais controlam localmente a ocorrência de turbiditos dentro da Formação Candeias, originando atrativos prospectos (Aragão, 1994).

O terceiro e último ciclo tectônico, caracterizado por falhamentos lístricos, afetou apenas a seqüência rifte superior, constituída por sedimentos deltáicos e fluviais (ARAGÃO, 1994).

O diapirismo de folhelho é reportado desde o meso/neoBerriasiano, estando ativo até o neobarremiano/Aptiano. Advoga-se que tanto a estruturação decorrente do primeiro ciclo, o basculamento da bacia, quanto à sobrecarga sedimentar foram responsáveis pelo desenvolvimento do diapirismo na bacia.

Após a última fase diastrófica, ocorreu um período erosivo. Sobre essa superfície arrasada, foram depositados em extensas áreas sedimentos de idade Alagoas, que se encontram sub-horizontais, evidenciando o abortamento do rifte.

2.3 Evolução Tectônica

A história tectônica e sedimentar do rifte do Recôncavo – Tucano – Jatobá revela íntima relação com o campo de esforços distensionais do Jurássico – Cretáceo que resultaram na ruptura do Gondwana e individualização das placas Sulamericana e Africana, com conseqüente abertura do Atlântico Sul. Sob este campo de esforços, uma pequena microplaca conhecida como Microplaca do Leste Brasileiro (SZATMARI *et al.*, 1985, *apud* SANTOS *et al.*, 1990, p. 235) se distinguiu. Seu movimento dextrógiro, em relação ao continente Sulamericano, permitiu o desenvolvimento de um rifte intracontinental naquela área, conforme pode ser visualizado na Figura 5.

No Aptiano, os esforços distensionais concentraram-se na margem das placas recém-formadas, conduzindo à sua separação definitiva e interrompendo o processo de rifteamento do Recôncavo, o que impediu a deposição de sedimentos marinhos em sua calha.

Os *red beds* das formações Aliança e Sergi e os sedimentos das formações Itaparica e Água Grande constituem os depósitos do estágio Pré-Rifte que, durante o Tithoniano e início do Berriasiano Inferior, preencheram uma ampla calha formada durante a fase de subsidência que antecedeu a ruptura da crosta. Esta deposição ocorreu sobreposta aos remanescentes de uma sedimentação paleozóica (base do Membro Afligidos).

O intervalo compreende sedimentos fluviais, lacustres e eólicos que podem atingir uma espessura superior a 1000 m. Na cronoestratigrafia local os sedimentos do Pré-Rifte equivalem aos depósitos do andar São João e base do andar Rio da Serra, repousando sobre os sedimentos da Formação Afligidos, identificados como permianos por AGUIAR & MATO (1990).

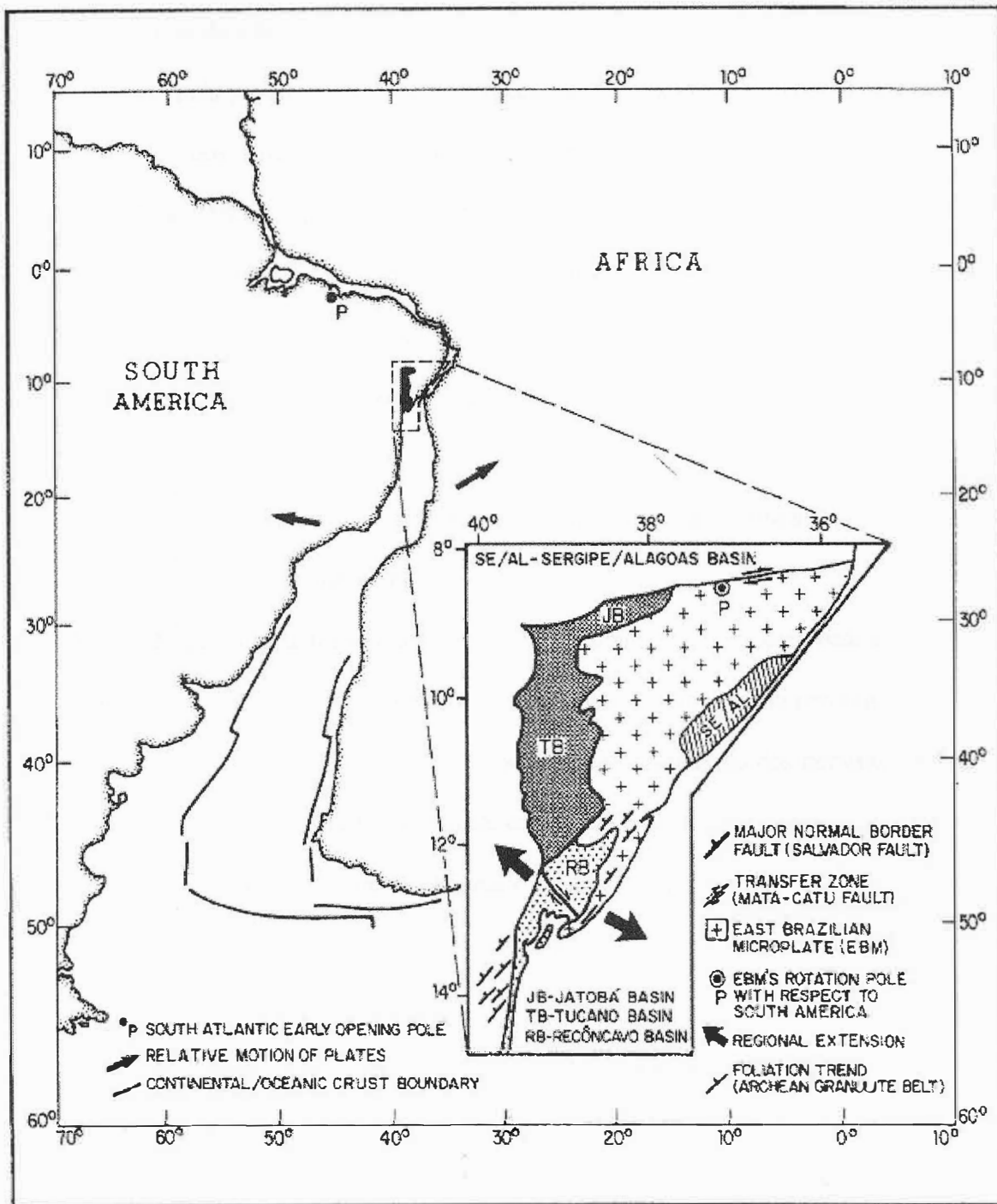


Figura 5 – Paleo-reconstrução da configuração continental no Neoproterozoico. O destaque mostra o campo de esforços distensionais na bacia do Recôncavo deduzido da análise estrutural do rifte e coincidente com o movimento interpretado para a Microplaca do Leste Brasileiro (fonte: SANTOS et al., 1987).

A passagem do estágio pré-rifte para o sinrifte ocorreu a cerca de 144 Ma (Berriasiano), sendo marcado pela paraconformidade que separa os arenitos fluviais e eólicos da Formação Água Grande dos folhelhos lacustres do Membro Tauá da Formação Candeias (MAGNAVITA, 1992). O paroxismo do processo de ruptura da crosta deu origem a fossas tectônicas onde se implantaram lagos profundos e estreitos, à semelhança do que se observa atualmente no sistema de riftes do leste Africano.

Durante a evolução do rifteamento, ao longo do Berriasiano e o Valanginiano, essas fossas foram palco de uma sedimentação predominantemente pelítica, intercalada com depósitos arenosos turbidíticos, formalmente abrigados nas Formações Candeias e Maracangalha, do Andar Rio da Serra.

À medida que o tectonismo e a subsidência tornaram-se menos acentuados ao final do Valanginiano, a diminuição da taxa de criação do espaço de acomodação permitiu o início da colmatação das bacias lacustres. Isto ocorreu através da progradação dos depósitos deltaicos do Grupo Ilhas (Formações Marfim e Pojuca, compreendendo a parte superior do Andar Rio da Serra e Andar Aratu). A Formação Pojuca caracteriza-se por uma intercalação cíclica de arenitos, folhelhos e calcários, os quais formam marcos litológicos de extensão regional, com caráter cronoestratigráfico.

O assoreamento final, ocorrido aos tempos dos andares Buracica e Jiquiá (Eobarremiano), deu-se pelo avanço do sistema fluviodeltaico da Formação São Sebastião, axialmente posicionado em relação ao rifte Recôncavo – Tucano. Também esta unidade é caracterizada por uma notável ciclicidade deposicional, revelada pela alternância entre camadas de folhelhos e arenitos. As camadas de folhelhos mais expressivas e de maior extensão lateral, a exemplo da Formação Pojuca, formam marcos litológicos com forte caráter cronoestratigráfico.

2.4 Geologia do Petróleo

O poço Lobato 3 (1-L-3-BA), primeiro poço produtor de óleo do país, foi perfurado em 1939, localizado na bacia do Recôncavo. Seu sucesso desencadeou um programa exploratório petrolífero de 15 anos, cujo objetivo era fazer o mapeamento geológico de superfície da bacia. Durante o programa foram perfurados 36 poços exploratórios e 27 estratigráficos que resultaram nas descobertas de 09 (nove) campos petrolíferos, dentre eles os de Candeias (em 1941), Dom João (em 1947) e Água Grande (em 1951), atualmente responsáveis por 42% do volume de óleo provado da bacia.

A partir da década de 1950, com a fundação da Petrobras, iniciou-se um programa sistemático de exploração da bacia, empregando técnicas mais apuradas do que as do primeiro programa exploratório, como sísmica de reflexão e refração, além dos métodos potenciais, associados a fotointerpretação e estudos estruturais através dos dados de poço.

Oriundo desse programa de investigação da bacia surgiu um novo programa de perfuração que durou até 1967. Neste novo programa, maior que o primeiro, foram perfurados 439 poços exploratórios e 128 pioneiros, tendo como resultado o descobrimento de 35 novos campos, os quais acrescentaram mais 47% do total da reserva de óleo da bacia (13,7 BBm³). Destas novas descobertas, 84% estavam restritos a apenas quatro campos de grande importância, Taquipe (em 1958), Buracica (em 1959), Araçás e Miranga (em 1965).

Entre o final do programa exploratório anterior (final da década de 1960) e o início da década de 1980, viveu-se uma fase de extrema redução de descobertas na bacia, consequência do sucesso exploratório anterior, que focalizou todos os novos estudos somente nos altos estruturais mapeados pela sísmica. Nesta fase, foram descobertos menos de 3% do total de óleo provado na bacia.

Durante a década de 1980 a exploração começou a focalizar áreas localizadas na borda da bacia, anteriormente tidas como pouco prolíficas. A mudança, provocada em parte pela

melhora na resolução dos métodos sísmicos de reflexão, deu origem a mais 80 poços pioneiros que incorporaram às reservas mais de 2,42 BBm³, correspondendo a 8% do volume de óleo provado atual da bacia.

Como resultado dessas três fases de intensa exploração da bacia do Recôncavo, que totalizam mais de 60 anos de exploração, foram adquiridos um total de 22.000 km de linhas sísmicas e perfurados 5.050 poços, dos quais 978 exploratórios e 4.082 de produção. A reserva total de hidrocarbonetos da bacia é próxima de 30,1 BBm³ de óleo e de 82 BBm³ de gás natural, distribuídos em cerca de 80 campos de petróleo (Figura 6).

Os geradores da bacia do Recôncavo são os folhelhos da Formação Candeias, em especial os Membros Tauá e Gomo. O valor médio para o teor de carbono orgânico residual total (COT), obtido de sedimentos argilosos de Membro Gomo, oscilam em torno de 01% e seu potencial de geração chega a uma média de 5 kg de hidrocarboneto por tonelada de rocha.

O fraco conteúdo de matéria orgânica e os baixos valores de potencial de geração são explicados por uma alta taxa de conversibilidade de matéria orgânica em hidrocarbonetos. Esse processo é resultante do nível de maturação térmica alcançado pelos folhelhos da formação.

Com base em estudos de reflectância de vitrinita e modelagens de subsidência termal, pode-se afirmar que a geração de hidrocarbonetos da Formação Candeias iniciou-se no Aptiano inicial. Identifica-se um querogênio do tipo I para a formação. Este querogênio estaria relacionado à matéria orgânica do tipo algal, comumente encontrada em ambientes lacustres, onde a matéria vegetal é consumida e transformada pela ação decompositora microbiana durante períodos de exposição subárea e inundação.

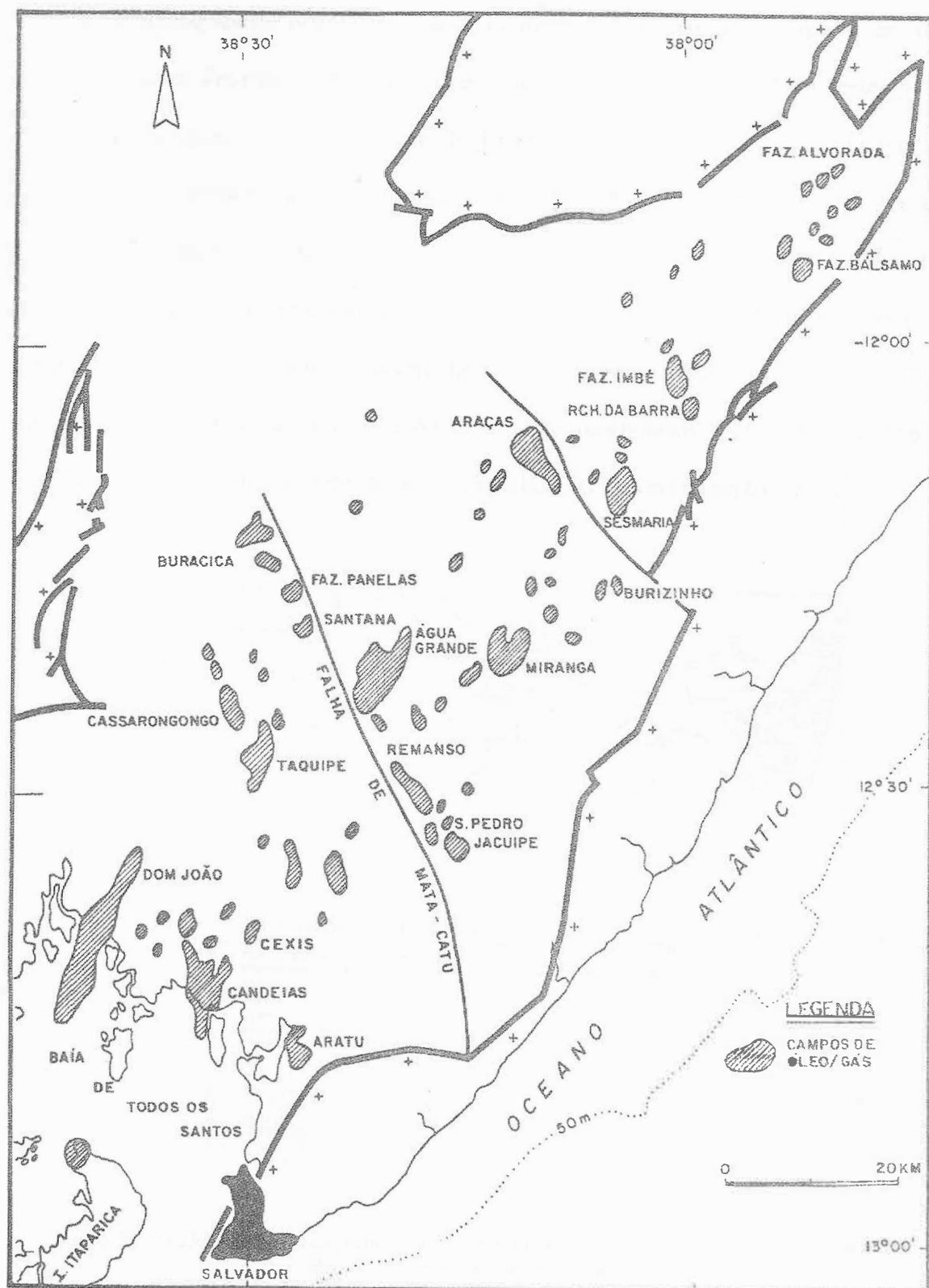


Figura 6 – Arcabouço estrutural da bacia do Recôncavo (SANTOS et al., 1990).

As acumulações de petróleo da bacia do Recôncavo podem ser agrupadas em três grandes sistemas: Pré-rifte, Rifte Candeias e Rifte Ilhas, representando 15 diferentes *plays* exploratórios (Figura 7). A modelagem da bacia em *horsts* e grábens fez com que os reservatórios do primeiro sistema, quando situados nos blocos altos, ficassem em contato lateral com os folhelhos geradores. Nesse caso, verifica-se então a migração direta. Também na situação em que os reservatórios estão envolvidos pelos folhelhos do Membro Gomo, no sistema Rifte Candeias, a migração ocorre diretamente do gerador para os reservatórios. Nos outros casos, as falhas atuam como os condutores de hidrocarbonetos. As Figuras 8(A), 8(B) e 8(C) representam os sistemas Pré-rifte, Rifte Candeias e Rifte Ilhas respectivamente.

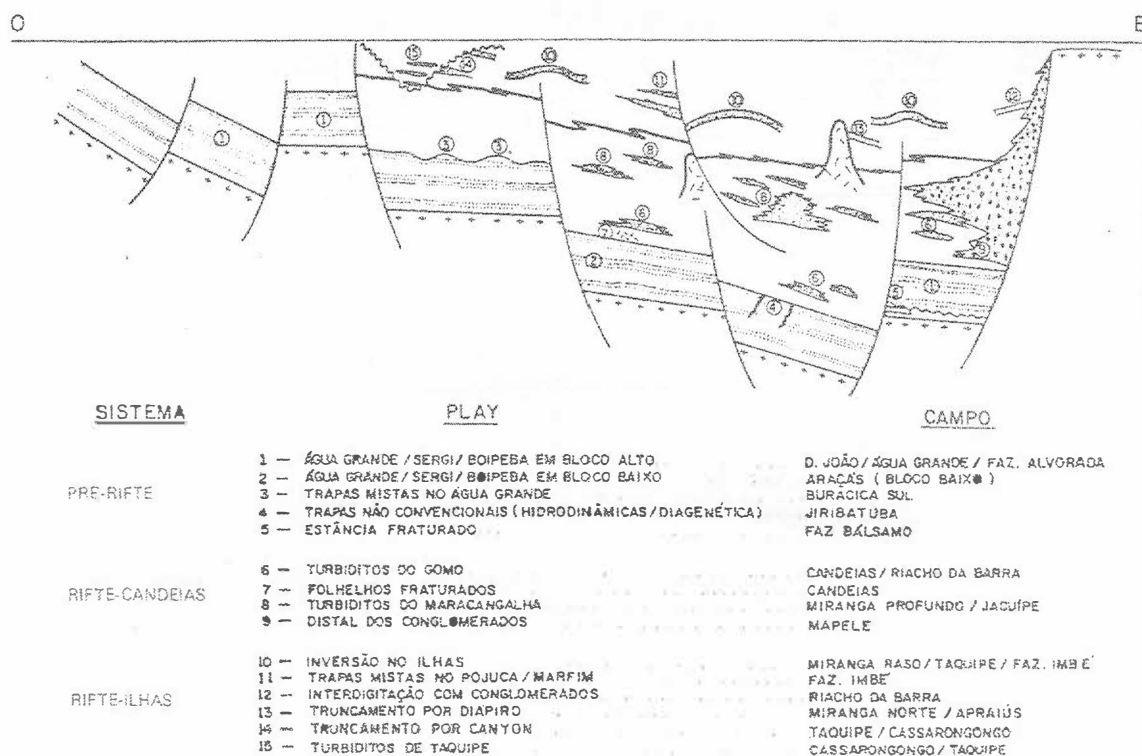


Figura 7 – Seção geológica esquemática representando os *plays* exploratórios da bacia do Recôncavo (SANTOS et al., 1990).

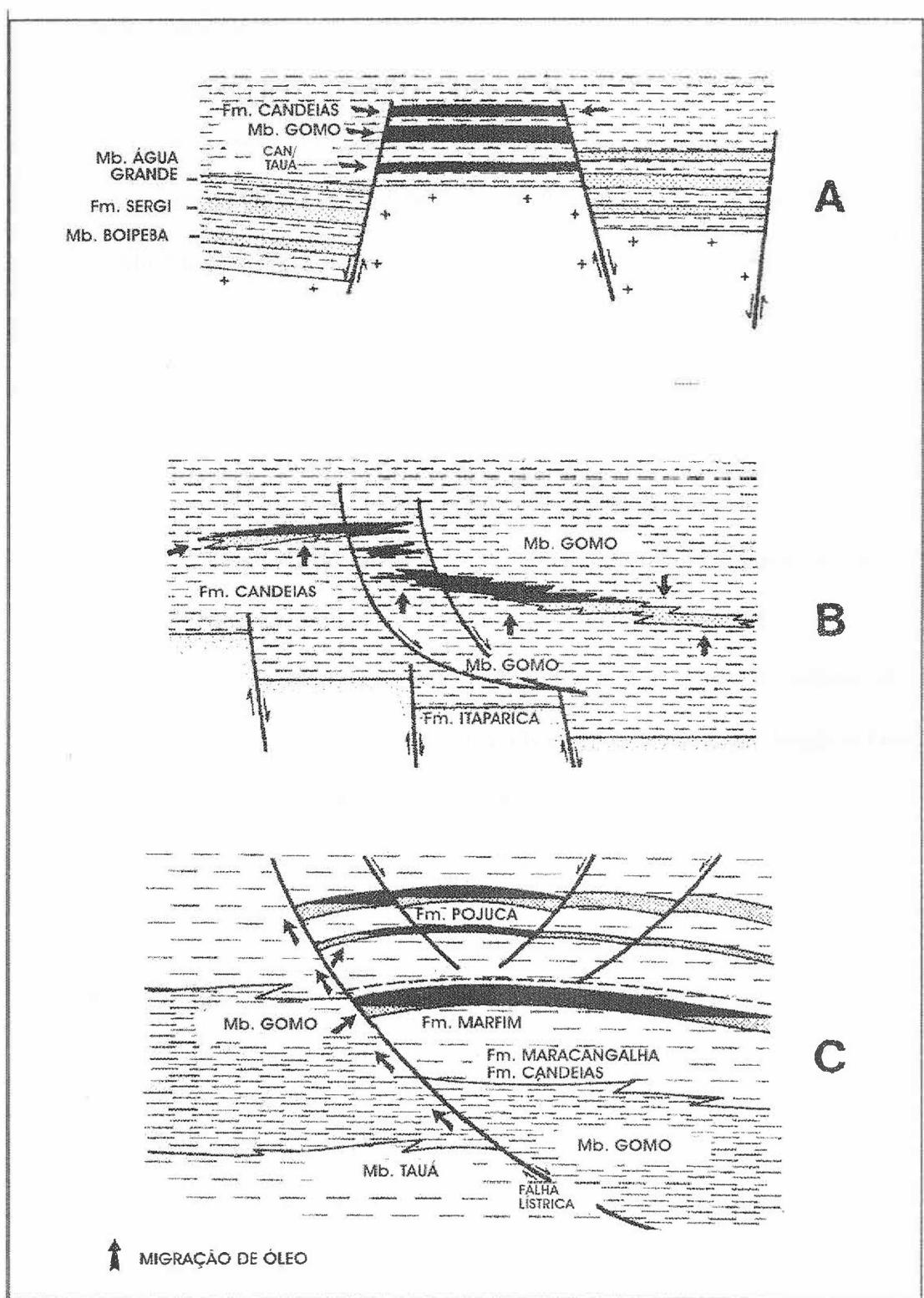


Figura 8 – Modelos de Migração e acumulação de hidrocarbonetos na bacia do Recôncavo. A) Trapas estruturais do sistema Pré-rifte. B) Trapas Estratigráficas ou combinadas do sistema Rifte Candeias. C) Trapas por inversões estruturais do sistema Rifte Ilhas. (BEISL, 1996).

O sistema Pré-Rifte é o responsável por quase 60% do volume provado de óleo na bacia, sendo Dom João, Água Grande e Buracica os campos mais importantes. O *play* Água Grande – Sergi – Boipeba em bloco alto é o mais importante, sendo que a formação Sergi é responsável por mais de 280 MMm³ e o Membro Água Grande, da Formação Itaparica, por mais de 89 MMm³ de óleo provado.

O sistema Rifte-Candeias é responsável por mais de 100 MMm³ do óleo provado, equivalente a 15% do total da bacia, dos quais 50% estão concentrados no Campo de Candeias e o restante nos campos de Riacho da Barra, Fazenda Bálsamo, Rio do Bu e em pequenos campos espalhados pela bacia. Dentro desse sistema concentram-se as maiores acumulações de gás não-associado da bacia, cujo volume provado é da ordem de 30 bilhões de m³. Os campos de Miranga Profundo e Jacuípe são os melhores exemplos.

O volume provado de óleo no sistema Rifte Ilhas é superior a 200 milhões de m³, representando quase 30% do óleo *in situ* da bacia. Os campos de Miranga, Araçás e Taquipe são os mais importantes representantes desse sistema.

CAPÍTULO 3 – O MÉTODO GRAVIMÉTRICO

3.1 Fundamentos Teóricos

Segundo NUSSENSVEIG (1981), a evolução dos conceitos relacionados ao conhecimento sobre a gravitação está ligada à evolução das idéias sobre o sistema solar. Este desenvolvimento histórico se deve ao fato da gravitação ser a interação mais fraca das quatro fundamentais na natureza.

Por isso, efeitos significativos só poderiam ser observados em escalas astronômicas, visto que o instrumental na época não tinha sensibilidade suficiente para identificar tais fenômenos em escalas relativamente reduzidas.

A contribuição para a evolução do conhecimento científico, a respeito da gravitação universal, desenvolvido por Platão e discípulos, Ptolomeu e Copérnico. Este último promoveu grandes avanços ao propor a teoria heliocêntrica.

Essa teoria foi reforçada, na segunda metade do Século XVI, com as observações de Tycho Brahe, com o auxílio de um observatório com uma instrumentação com poder de resolução pelo ao menos duas vezes maior que os outros anteriormente utilizados.

Contudo, seu assistente Johannes Kepler, foi o grande responsável pela determinação da regularidade das órbitas planetárias, publicado em 1619 no seu livro “Harmonices Mundi”.

O surgimento do telescópio proporcionou um grande poder de resolução, permitindo a Galileu visualizar até mesmo os vales e montanhas da Lua, semelhantes aos existentes no Planeta Terra (NUSSENSVEIG, 1981).

Os avanços na capacidade de medição dos movimentos dos corpos contribuíram para que Galileu determinasse a variação da velocidade dos corpos em queda livre nas

proximidades da superfície Terrestre. Ele concluiu, em função dos métodos e técnicas que dispunha à época, que para um determinado local todos os corpos adquiriam a mesma taxa de variação de velocidade. Essa taxa de variação da velocidade ficou conhecida como aceleração da gravidade (**g**).

Newton proporcionou ao mundo o entendimento sobre os movimentos planetários, estabelecendo a relação matemática que determina a intensidade da força de atração gravitacional mútua (\vec{F}_g) entre duas massas puntiformes (m_1) e (m_2), com dependência do inverso do quadrado da distância (r) entre as massas, com (\hat{r}) sendo o vetor unitário na direção de (r).

$$\vec{F}_g = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

O sinal negativo na equação (1) indica que a força gravitacional é sempre atrativa. O valor da constante de gravitação universal, obtido no experimento de Cavendish, foi de $6,71 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$, considerando o Sistema Internacional de Unidades – SI. Atualmente, o valor experimental aceito é de $6,670 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$, com uma incerteza de $0,005 \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ (NUSSENSVEIG, 1981).

NUSSENSVEIG (1981) aponta para a dificuldade na época de se justificar tal relação para o caso de partículas em órbitas em torno da Terra. Novamente Newton, em 1685, utilizando-se do cálculo integral, inventado por ele próprio, resolveu a questão. Para forças centrais, com dependência com a distância entre as massas, conforme estabelecido pela equação (1), a força exercida por uma esfera perfeita sobre uma partícula externa seria a mesma como se toda a massa da esfera estivesse concentrada no centro gravidade.

A Segunda Lei de Newton estabelece a relação entre a intensidade de uma força (F) aplicada em uma massa (m) e a intensidade da aceleração (a) por ela adquirida.

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (2)$$

Verifica-se que no caso da atração que a Terra exerce nos corpos em queda livre nas suas proximidades, a aceleração (a) adquirida pela massa (m) é a própria aceleração da gravidade (g), sendo simplesmente denominado de campo gravitacional conforme SYMON (1982) e WAN & ZENG (2004). Dessa forma, considerando m_1 na equação (1) como a massa da Terra (M_T) e m_2 como a massa da partícula (m) atraída pela Terra, e comparando-se as equações (1) e (2), obtém-se o valor da intensidade da aceleração da gravidade.

$$\vec{g} = G \frac{M_T}{r^2} \vec{r} \quad (3)$$

Em homenagem a Galileu e por questão de comodidade, utiliza-se nos estudos de gravimetria a unidade de aceleração da gravidade em mGal. Sendo que 1 Gal igual a 1cm/s^2 ou 1.10^{-2}m/s^2 considerando o SI.

Utilizando-se a equação (3), pode-se estimar o valor da intensidade de (\vec{g}) na superfície Terrestre. Aproximando-a para uma esfera simétrica, esse valor seria de $9,802\text{ m/s}^2$ para a projeção normal (g_z) do campo gravitacional (\vec{g}) (Figura 9). Com uma comparação rápida, observa-se que 1 mGal é aproximadamente $1/10^6$ da gravidade normal, portanto, pode-se considerar que 0.1 mGal seria a unidade gravimétrica (do termo inglês *gravity unit*).

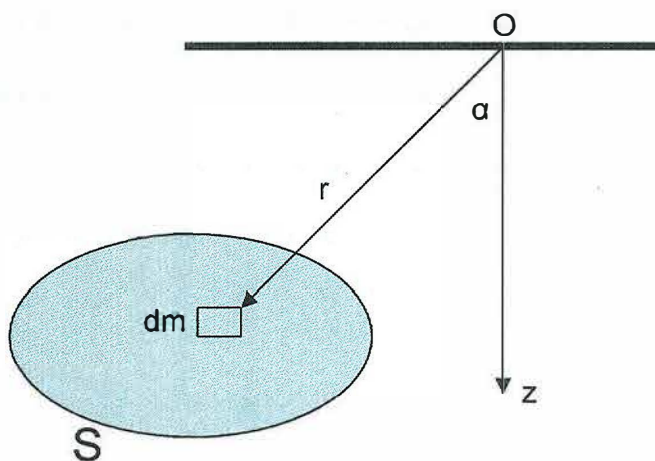


Figura 9 – Representação da atração gravitacional da massa elementar dm .

O valor da aceleração da gravidade normal do elemento de massa (dm) é fornecido pela equação (4).

$$g_z = G \cos(\alpha) \frac{dm}{r^2} \quad (4)$$

E para a massa total o valor de g_z é calculado utilizando-se a equação (5).

$$(g_z)_S = G \int \cos(\alpha) \frac{dm}{r^2} \quad (5)$$

Os campos de força e aceleração são de natureza vetorial. A manipulação das equações é muito complexa. Dessa forma, como as forças gravitacionais são conservativas, quase sempre se trabalha com o conceito de energia e potencial gravitacional. Por definição, o potencial gravitacional é energia em potencial por unidade de massa, em um determinado ponto P, com uma distância R da massa geradora do potencial.

Por outro ponto de vista, como trabalho da força resultante é igual a variação da energia cinética para se deslocar um corpo, o potencial seria o trabalho, por unidade de massa, realizado pela força gravitacional para deslocar um elemento de massa do infinito até aquele ponto P. Assim, o potencial gerado (dU) pelo elemento de massa (dm) é calculado pela equação (6).

$$dU = G \frac{dm}{r} \quad (6)$$

Contudo, ao se trabalhar com um corpo real e considerando sua distribuição de densidade $\rho(r)$ uniforme, podemos calcular o potencial gerado por esse corpo integrando sobre todo o volume da massa desse corpo. A equação (7) representa o resultado da integração.

$$U = G \frac{m}{r} \quad (7)$$

Comparando a equação (7) com a (3), verifica-se que o campo gravitacional normal de g pode ser obtido diretamente da derivada parcial negativa, do potencial gravitacional. Esse resultado considera deslocamentos na direção normal do campo e está representado pela equação (8).

$$g_z = -\frac{d(U)}{dz} = G \frac{m}{r^2} \quad (8)$$

O potencial gravitacional pode ser representado por superfícies equipotenciais, sobre o qual o valor do potencial é constante. Nesse caso, os vetores que representam as forças de atração gravitacional são perpendiculares a esta superfície, não realizando qualquer espécie de trabalho.

No caso da Terra esta superfície poderia ser representada pelo oceano, pois os fluidos apresentam características não cizalhantes, moldando-se mais facilmente à forma prevista para esta superfície equipotencial.

Dessa forma, por vezes é mais prático e interessante trabalhar com o potencial gravitacional em si do que com o campo gravitacional. No caso dos métodos potenciais (tais como o gravimétrico, magnético e elétrico) de aquisição e interpretação de dados geológicos as equações que envolvem o potencial gravitacional são largamente utilizadas.

Uma propriedade importante que torna o potencial gravitacional interessante, particularmente para as técnicas de interpretação dos dados gravimétricos e outros métodos potenciais de modo geral, é que os mesmos atendem a equação de Laplace.

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2}{\partial x^2}(U) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(U) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}(U) = 0 \quad (9)$$

Os campos potenciais, tal como o potencial gravimétrico em uma determinada posição (x,y,z) no espaço livre da carga fonte geradora do potencial, no caso específico aqui sendo a massa, atende a equação (9). No entanto, distribuições de massas diferentes podem propiciar a mesma solução da equação de Laplace, tornando o método ambíguo e dificultando na interpretação do tipo de feição geológica causadora do desvio de densidade do meio.

3.2 Aquisição Gravimétrica

As medições do campo gravitacional, ou seja, da aceleração da gravidade local são efetuadas de forma absoluta ou relativa. A aplicação depende do tipo de levantamento e suas finalidades e também do nível de exatidão e incertezas desejadas para cada processo.

BUONORA (2003), argumenta que para o caso da exploração geológica, particularmente no interesse da prospecção petrolífera, se utiliza mais intensivamente os gravímetros, que são de medição relativa. Apontam, ainda, para o grande sucesso obtido com a balança de torção, na descoberta de domos de sal nos campos petrolíferos do Golfo México.

Os levantamentos gravimétricos podem ser efetuados diretamente na superfície terrestre, no fundo ou na superfície dos mares e, também, no ar (aéreos).

3.2.1 Medidas Absolutas

No caso das medidas efetuadas de forma absoluta, o valor de g é registrado na própria estação de medição (ponto de medição do campo gravitacional) por um instrumento de medição direta. Dessa forma, não há necessidade de outras referências para determinação do valor de g . A instrumentação utilizada para as medidas absolutas compreendem, basicamente, o pêndulo simples e instrumentos que utilizam a queda livre como princípio físico de medição.

Um esquema representado na Figura 10 demonstra, de forma simplificada, o princípio físico de medição de g utilizando um pendulo simples. Seja (m) uma pequena massa suspensa num fio indeformável, de massa desprezível e comprimento (h), onde (I) é o momento de inércia do sistema.

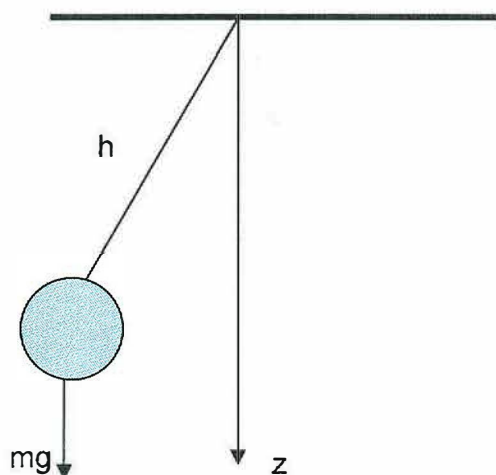


Figura 10 – Esquema do pêndulo simples.

Com o auxílio da equação (10) pode-se determinar o valor da intensidade da aceleração gravitacional (g) para uma determinada posição no Globo terrestre, Onde T é o período de oscilação natural do pêndulo.

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{mT^2} \quad (10)$$

Os instrumentos que utilizam a queda livre como princípio físico, medem o tempo de deslocamento de uma pequena massa entre pontos fixos. Usualmente, são três pontos fixos que apresentam valores com alto grau de exatidão. A Figura 11 apresenta o esquema básico do princípio físico de medição desses instrumentos.

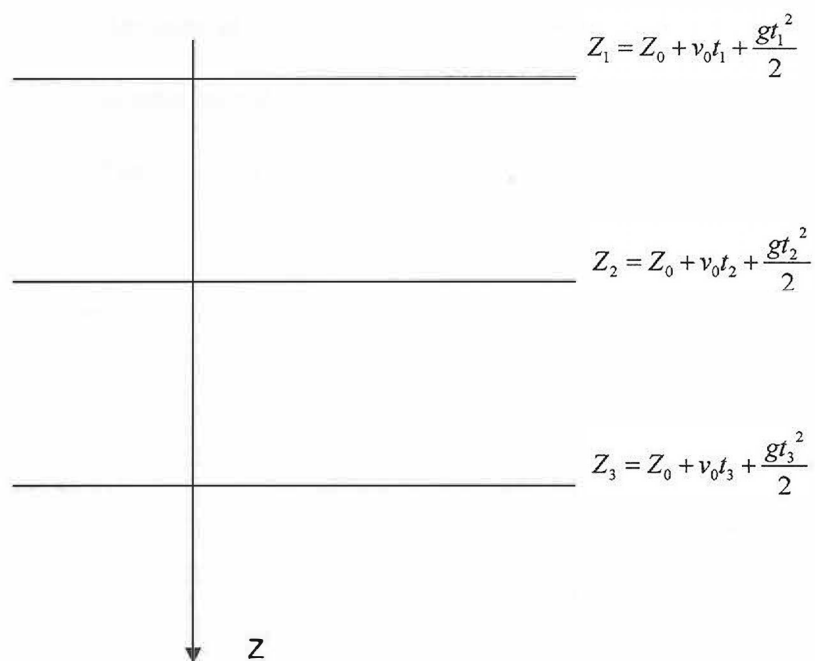


Figura 11 – esquema de medição do gravímetro de queda livre.

Utiliza-se, então, a equação (11) para se determinar o valor da componente vertical da aceleração da gravidade local.

$$g_z = 2 \left[\frac{(z_1 - z_2)(t_1 - t_3) - (z_1 - z_3)(t_1 - t_2)}{(t_1 - t_2)(t_1 - t_3)(t_2 - t_3)} \right] \quad (11)$$

Como na prática os experimentos com queda livre não são, em geral, muito fácil de serem executados, utiliza-se um outro dispositivo, o do lançamento vertical. Compreende o lançamento de uma pequena massa, onde se registra os tempos de passagens por dois pontos fixos, no qual se obtém quatro tempos. A exatidão da medida relatada neste experimento é de 0.006 mGal. Devemos considerar, contudo, a variação de g com a altitude, pois em 1 m a variação no valor observado para g pode ser de até 0.3 mGal (BUONORA, 2003).

As medidas com pêndulos necessitam do conhecimento de seus períodos de oscilação, além do que, se uma exatidão de 1mGal for desejável, então o comprimento (h) do pêndulo tem que ser conhecido com uma exatidão de $1 \cdot 10^{-6}$ m, para o caso em que $h=1$ m por exemplo.

3.2.2 Medidas Relativas

Os gravímetros são instrumentos de medidas relativas do campo gravitacional, pois registram as diferenças dos valores de aceleração da gravidade obtidos por estações gravimétricas em diferentes posições e altitudes. De acordo com BUONORA (2003), os gravímetros das marcas Worden e LaCoste & Romberg são os mais utilizados.

O princípio físico de medição desses gravímetros consiste num sistema de massa e mola, posicionado na vertical, conforme esquema representado pela Figura 12. Nessa configuração o valor da variação do campo gravitacional Δg será proporcional a elongação da mola Δx , causada pela variação atração da força gravitacional em vários locais da terra. O valor medido da elongação é relativo ao ponto de relaxamento da mola x_i , cujo valor é zerado no momento inicial antes da medição.

Resultados com boa exatidão, para este esquema de medição, depende da calibração do gravímetro que, neste caso, consiste na determinação da constante elástica da mola. A avaliação constante dos certificados de calibração, com a respectiva análise do seu histórico, permite realizar os ajustes necessários à manutenção da confiabilidade dos resultados.

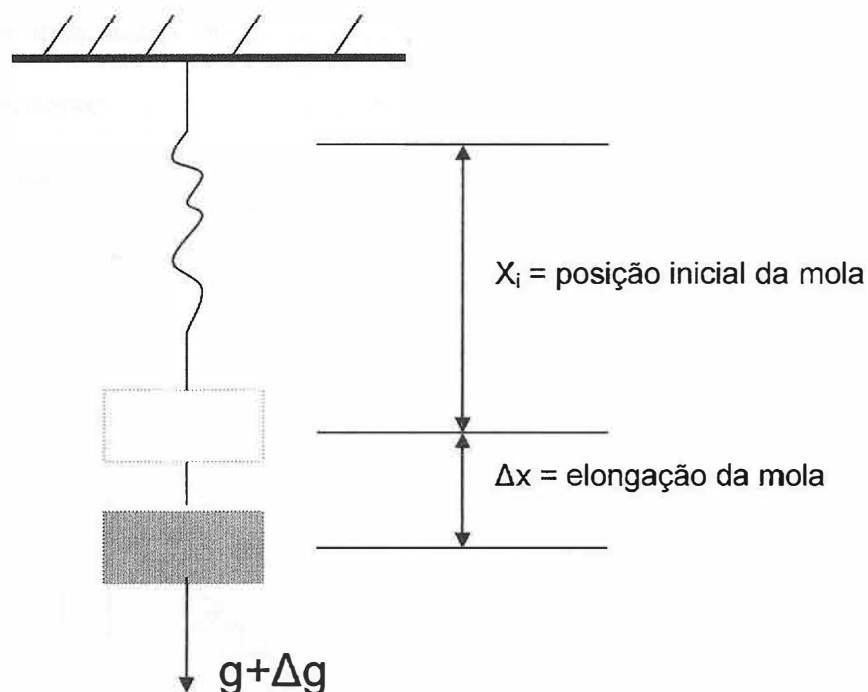


Figura 12 – Representação esquemática de um sistema de massa e mola na vertical.

BUONORA (2006) indica a subdivisão de dois tipos de gravímetros que utilizam este princípio físico de medição. O primeiro tipo, considerado estável, que avalia diretamente as eventuais alterações do posicionamento da massa, devido modificações do campo gravitacional. O segundo tipo, também denominado de instável, utilizam uma dinâmica que aumenta a sensibilidade do instrumento com relação as variações do campo gravitacional.

Esses autores afirmam, também, que os do tipo estável respondem linearmente para uma faixa relativamente grande de variação do campo gravitacional. Já para os do tipo instável, a resposta do instrumento só pode ser considerada linear para uma faixa relativamente pequena de variação do campo.

TELFORD *et al.* (1990) apresenta o esquema básico de funcionamento de um gravímetro do tipo LaCoste & Romberg. Tal esquema está demonstrado pela Figura 13, consistindo de uma massa presa na extremidade de um braço rígido de comprimento conhecido, posicionado aproximadamente na horizontal, suspenso por uma mola.

Semelhantemente ao sistema da mola na vertical, este sistema possui uma posição de relaxamento livre da carga adicional da massa.

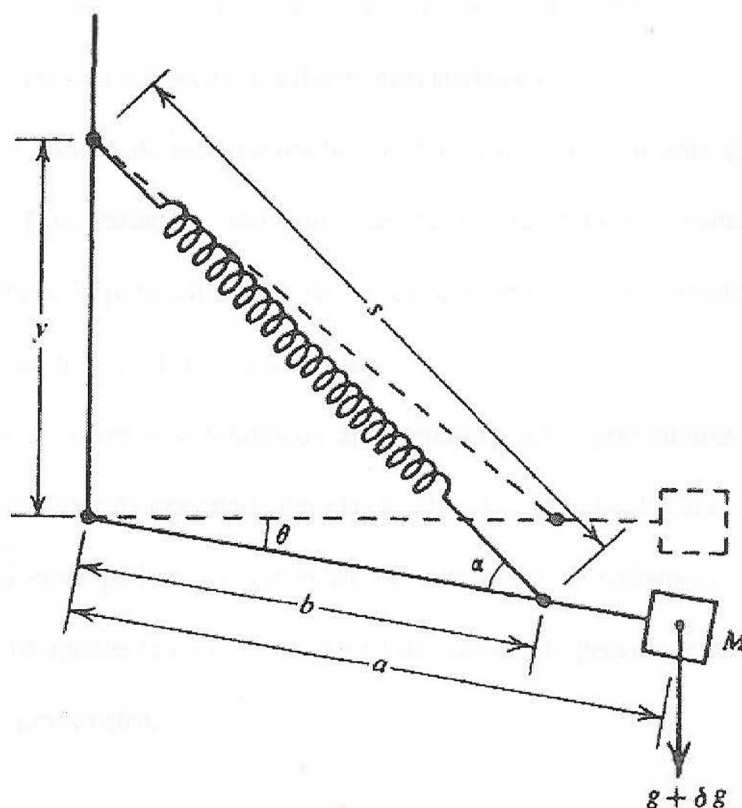


Figura 13 – Diagrama esquemático do princípio físico de funcionamento do gravímetro LaCoste-Romberg (fonte: TELFORD *et al.*, 1990).

As variações do campo gravitacional tiram o sistema do equilíbrio, que só retorna através de um ajuste, utilizando-se um parafuso micrométrico. Dessa forma, pode-se calcular o valor da variação da aceleração da gravidade, sendo que esta variação é proporcional a variação da posição do braço de sustentação cujo ajuste foi realizado pelo parafuso.

Segundo BUONORA (2003), determinados modelos desse tipo de gravímetro conseguem realizar medidas de variação da gravidade numa faixa de 7,0Gal. Essa faixa de medição, relativamente grande, permite efetuar medidas em qualquer posição geográfica na Terra. Porém, como no caso do sistema massa-mola na vertical, resultados confiáveis dependem da análise permanente dos certificados de calibração do instrumento.

Cabe ressaltar que nem sempre os certificados emitidos pelo fabricante são necessariamente de calibração. Portanto, a manutenção dos níveis de exatidão está relacionada a implantação de um programa permanente de confiabilidade metrológica dos processos envolvidos na aquisição dos dados gravimétricos.

As leituras obtidas de um gravímetro, ao longo do dia e em uma estação fixa, variam continuamente. Tais variações são causadas pelo relaxamento contínuo das molas dos gravímetros e pela imperfeição do sistema de compensação dos efeitos de temperatura, denominadas de *drift* ou deriva do gravímetro.

Outra causa de erros sistemáticos apresentados pelos gravímetros são as oscilações cíclicas diárias do valor da gravidade devidas às atrações do Sol e da Lua, denominadas marés terrestres. Tais desvios podem ser corrigidos, através do uso de softwares especializados.

A Figura 14 apresenta o comportamento das curvas de gravidade das marés terrestres e da deriva de um gravímetro.

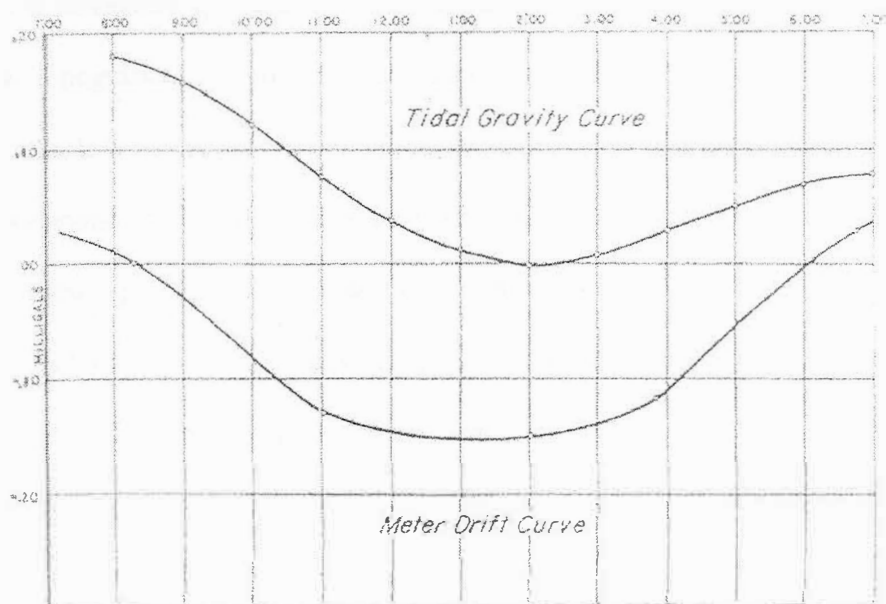


Figura 14 – Curvas da variação da maré terrestre (Tidal) e da deriva (Drift) do gravímetro (fonte: TSUBOI, 1983).

3.2.3 Levantamentos Terrestres

A escolha das estações em um levantamento gravimétrico depende de fatores tais como, facilidade de acesso, padrão da malha de estações necessário para detalhar as feições geológicas de interesse e disponibilidade de locais para a implantação das estações gravimétricas.

A distribuição das estações deve, sempre que possível, obedecer uma distribuição com um padrão retangular, ao menos no entorno da região de máximo interesse de investigação. A definição da área de cada célula da malha define o poder de resolução, tanto em nível de profundidade quanto de extensão lateral, para a investigação das feições geológicas. TELFORD *et al.* (1990), aponta para uma distribuição de uma estação para cada 2 ou 4 km² da malha de distribuição da medição, tendo em vista que as estruturas geológicas contendo as reservas de hidrocarbonetos quase sempre são maiores que estes valores.

Uma das atividades que causam mais impactos na confiabilidade dos resultados é o levantamento topográfico. As coordenadas plani-altimétricas devem ter boa exatidão, pois desvios, em relação a valores de referência, da ordem 0,3m na medida de altitude da estação, podem proporcionar desvios da ordem de 0,1mGal, dependendo dos níveis de incertezas associados durante o processo de medição (TELFORD *et al.*, 1990).

BUONORA (2003), afirma ainda que para levantamentos terrestres erros de 0,5 mGal são considerados adequados, para a maior parte dos propósitos exploratórios. Contudo, dependendo dos instrumentos utilizados e das condições de campo, e quando necessário, erros de 0,1 mGal podem ser detectados, proporcionando exatidão melhores ainda.

3.2.4 Levantamentos Marítimos

Os gravímetros denominados de fundo e os de bordo são freqüentemente utilizados nos levantamentos garvimétricos em ambientes aquosos. TELFORD *et al.* (1990), afirma que os gravímetros marítimos geralmente apresentam menos exatidão nas medições que os obtidos com os terrestres. Contudo, BUONORA (2003) aponta para bons resultados obtidos com os gravímetros de fundo, cuja qualidade de medição apresenta níveis de exatidão melhores que 0,5 mGal. Esta qualidade é assegurada devido ao fato dos instrumentos serem posicionados no fundo do mar, sendo seu controle efetuado via sensoriamento remoto.

A principal diferença entre os levantamentos com gravímetros de fundo e aqueles de bordo, consiste em desvios relativamente pequenos, em função da movimentação da embarcação que transporta a instrumentação. Essa movimentação da embarcação permite o surgimento do efeito Eötvös, relacionado à componente vertical da aceleração de Coriolis, que aparece quando o instrumento está posicionado em um referencial considerado não inercial.

Eötvös, que era um físico Húngaro, estudou a relação entre o movimento de um corpo na superfície da Terra com a aceleração da gravidade. Dessa forma, um corpo movendo-se no sentido de oeste para leste, por exemplo, experimenta um aumento em sua velocidade angular em relação ao eixo de rotação da Terra. Esse aumento promove um aumento na aceleração centrífuga, com a conseqüente diminuição no valor de \bar{g} . É fácil concluir que o movimento do corpo no sentido oposto acarretará em aumento da intensidade de \bar{g} (BUONORA, 2006).

O efeito *Eötvös*, aqui designado pela sigla Δg_E , depende da velocidade (v) do navio, de sua latitude ϕ e do seu rumo α em relação à direção norte-sul. Portanto, os níveis de exatidão desejados nas medições em levantamentos marítimos depende diretamente dos níveis de incertezas associados a estes parâmetros.

Pode-se estimar a correção nos resultados obtidos pelo gravímetro, devido ao efeito Eötvös (Δg_E), através da equação (12).

$$\Delta g_E = 7,508v \cos(\phi) \text{sen}(\alpha) + 0,004154v^2 \quad (12)$$

A equação (11) proporciona resultados em unidades de mGal, desde que se utilize a velocidade em unidades de nó (1nó=1,85325km/h). O segundo termo é usualmente desprezado. Porém, com uma rápida observação, verifica-se que este termo não pode ser desprezado para velocidades relativamente altas da embarcação.

Para efetuarmos correções com uma exatidão de 1 mGal, é necessário que a velocidade do navio seja conhecida em torno de 0,1 nó. Ademais, é evidente que a correção Eötvös se torna bastante elevada mesmo para velocidades moderadas no navio, por exemplo, a uma velocidade de 10 nós, no curso acima, a correção é de 75,08 mGal; positiva se o sentido do navio for para leste e 75,08 mGal negativa se o sentido for para oeste.

Nos últimos anos, com o advento do sistema de posicionamento global GPS (do termo inglês *global positioning system*), a literatura apresenta levantamentos gravimétricos marítimos com exatidão próxima à obtida em levantamentos terrestres regionais, isto é, da ordem de 0,5 a 1,0 mGal. Tal exatidão requer condições especiais de navegação, tais como velocidade baixa de navegação e boas condições marítimas.

O principal obstáculo na obtenção da informação gravimétrica útil com o gravímetro de bordo são os movimentos horizontais e verticais do navio, os quais podem ocasionar acelerações espúrias que podem ser da ordem de 100.000 mGal ou superior. Os efeitos horizontais são controlados por acelerômetros, instalados numa plataforma estabilizada por giroscópios, enquanto que as verticais são removidas através de um sistema de amortecimento que atua como um filtro passa-baixa. Esse sistema suprime as frequências associadas ao movimento do navio e deixa passar aquelas associadas às fontes gravimétricas em subsuperfície (BUONORA, 2003).

3.2.5 Levantamentos Aerogravimétricos

Medidas aerogravimétricas têm sido efetuadas com sucesso para a indústria petrolífera desde 1981. Muitas melhoras e modificações foram efetuadas no sistema de medidas, nos procedimentos operacionais e nas técnicas de processamento. Conforme vimos, medidas gravimétricas em plataformas móveis estão sujeitas ao efeito Eötvös. Portanto, as manobras das aeronaves precisam ser bem controladas para a garantia dos resultados das medições.

Com técnicas apropriadas de correções e medidas das variáveis necessárias a tais correções, associadas com a utilização do GPS, obtém-se mapas gravimétricos com exatidão da ordem de 2mGal. BUONORA (2006) afirma que existem diversos casos em levantamentos aerogravimétricos com níveis de exatidão ainda melhores.

3.3 Reduções Gravimétricas

Se existissem somente forças gravitacionais atuando, os corpos celestes teriam uma forma esfericamente simétrica. Contudo, devido às forças centrífugas que surgem em função da rotação do corpo, como o caso do Planeta Terra, ocorre um achatamento nos pólos. Esse achatamento proporciona a Terra uma forma mais semelhante com um esferóide.

No entanto, de acordo com MOTA (1992), é comum utilizar-se o elipsóide de referência para o cálculo do campo gravitacional teórico, chamado de gravidade normal, consistindo na superfície de rotação representando a forma da Terra. Mota afirma que apesar do esferóide de referência ser mais exato do que o elipsóide, por apresentar maior quantidade de coeficientes na sua relação constitutiva, o erro relativo pode ser considerado desprezível.

Dessa forma, definiu-se uma superfície teórica, denominada de geóide, de modo que em qualquer ponto dessa superfície o campo gravitacional g seja normal a essa superfície. O geóide consiste numa superfície equipotencial definida, segundo MOTA (1992), pelo nível médio da superfície do mar. Aponta, ainda, para a não coincidência dos valores do campo gravitacional, obtidas com o geóide de referência e os observados experimentalmente, devido à variação de densidade das rochas crustais e das grandes variações na topografia da superfície terrestre.

Essas variações provocam modificações na forma do geóide, denominadas de anomalias de massa. A Figura 15 demonstra a diferença conceitual entre o elipsóide e o geóide de referência terrestre, demonstrando as ondulações locais e regionais do geóide.

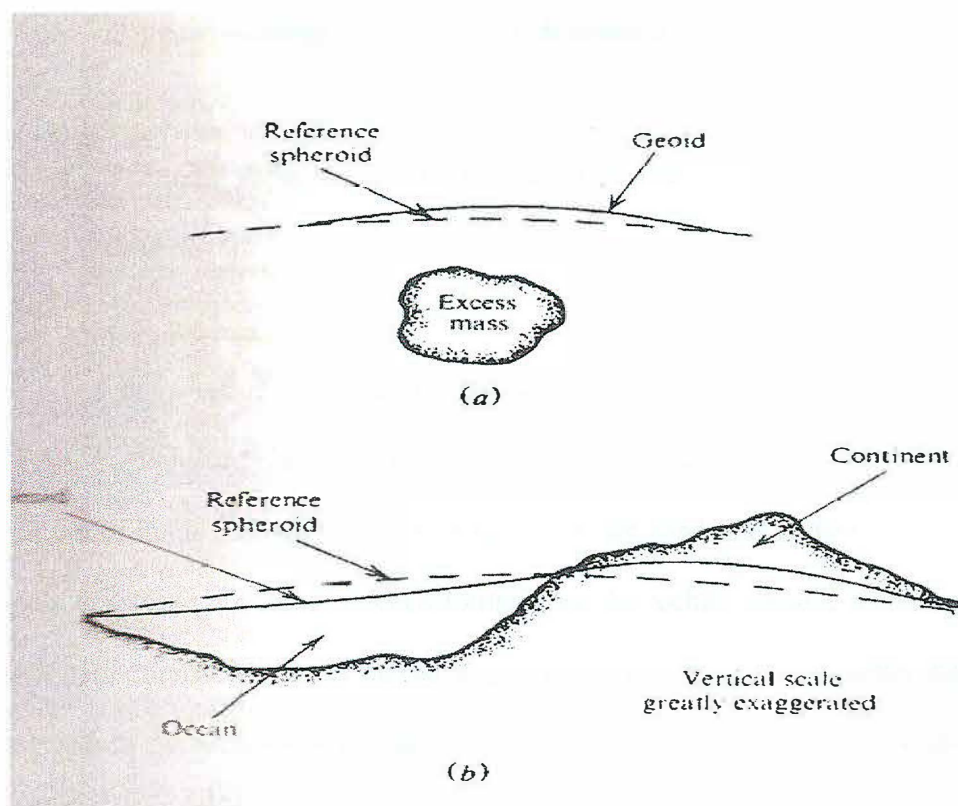


Figura 15 – a) Deformação provocada na superfície geoidal devido à presença de massa. b) Ilustração entre as relações das superfícies geoidal, elipsoidal, oceânica e terrestre. (fonte: TELFORD et al., 1990).

De modo Geral, segundo DUARTE (2003), o interesse na prospecção geofísica, compreende a avaliação de estruturas localizadas em sub superfície. Dessa forma, os dados geofísicos necessitam de tratamento durante o processamento das informações, onde correções são efetuadas, sendo as principais:

- Deriva (*drift*) do instrumento – variações nas propriedades da mola com o tempo.
- Efeitos de maré – variações na gravidade observada, resultantes da atração Sol-Lua.
- Latitude (gravidade normal ou teórica) – devido a forma e rotação da Terra.
- Ar-Livre (*free-air*) – corrige a medida da gravidade desde o ponto de amostragem até a altitude do *datum* de referência.

- Bouguer – corrige o excesso ou a deficiência de massa entre o ponto de amostragem e o datum.
- Terreno – variações devido ao excesso ou a falta de massa no relevo próximo ao ponto de medição.

A propriedade física das rochas que controla as variações no campo de gravidade da Terra é a densidade. Em prospecção gravimétrica a unidade g/cm^3 é ainda aceita, mas tem sido substituída gradativamente pela kg/m^3 . A densidade das rochas é basicamente controlada pela densidade dos seus minerais formadores. As rochas ígneas e metamórficas apresentam, em geral, densidades mais elevadas que as sedimentares. Os seguintes fatores controlam a densidade das rochas sedimentares: densidade dos grãos, porosidade, tipo de fluido nos poros, idade e profundidade de soterramento.

A variação máxima de densidade entre as rochas fica compreendida entre 1.0 e 3.3 g/cm^3 . As fontes de informação sobre densidades são: amostras (de campo, de calha e de testemunhos), perfis (densidade e velocidade sísmica) e gravimetria de poço. Entretanto, o interesse exploratório não está nos valores absolutos, mas nos contrastes de densidade entre as rochas.

A redução dos dados gravimétricos são as correções Bouguer, ar livre e de terreno (DUARTE, 2003). A anomalia gravimétrica é a diferença entre o campo gravitacional medido numa determinada estação gravimétrica e o valor teórico desse campo determinado pelo elipsóide de referência, sendo produzida pela distribuição de massas que causam o desvio da superfície geoidal em relação ao elipsóide. A anomalia inclui o efeito da diferença de altura N_0 entre o geóide e o esferóide. Diversos autores afirmam que as anomalias gravimétricas de interesse nos levantamentos geofísicos são as denominadas anomalias Bouguer, pois há pelo menos três correções a serem efetuadas: de latitude, de ar livre e de maré.

3.3.1 Correção de Latitude

Todo processamento de dados gravimétricos leva em conta a correção de latitude. Assim, o valor medido pela estação gravimétrica vem corrigido do valor do campo gravitacional teórico estabelecido pelo elipsóide de referência, para a latitude em que se encontra a estação. Essa correção, inclusive, já corrige também o efeito da rotação da Terra.

De acordo com MOTA (1992) o valor do campo gravitacional teórico g_N é dado pela equação (13).

$$g_N = g_e [1 + \beta \operatorname{sen}^2(\varphi) - \beta' \operatorname{sen}^2(2\varphi)] \quad (13)$$

Onde (g_e) é o valor da gravidade no equador e (φ) é valor da latitude da estação gravimétrica. Os coeficientes (β) e (β') dependem da velocidade angular de rotação (ω), do raio equatorial (a), do raio polar (b) e do grau de achatamento ε da Terra. Seus valores são obtidos pelas seguintes expressões (MOTA, 1992):

$$\beta = \frac{5}{2} \left(\frac{\omega^2 a}{g_e} \right) - \varepsilon - \frac{17}{14} \left(\frac{\omega^2}{g_e} \right) \varepsilon \quad (14)$$

$$\beta' = \frac{\varepsilon}{8} \left[\left(\frac{5\omega^2 a}{g_e} \right) - \varepsilon \right] \quad (15)$$

O valor do achatamento (ε), do termo inglês *flattening*, segundo MOTA (1992), é calculado pela equação (16).

$$\varepsilon = \frac{a-b}{a} \quad (16)$$

Segundo BUONORA (2007), os valores obtidos de satélites artificiais para (β) , (β') , (a) e (b) e adotados pela *The International Gravity Standardization Net-1971* (IGSN-71), proporcionam a seguinte expressão para o cálculo, em unidades de mGal, do campo gravitacional teórico:

$$g_N = 978,03185[1 + 0,0053024\text{sen}^2(\varphi) - 0,0000059\text{sen}^2(\varphi)] \quad (17)$$

Ou no Sistema Internacional de Unidades, mudando apenas o valor de (g_e) , pois todos os outros coeficientes são adimensionais.

$$g_N = 9,7803185[1 + 0,0053024\text{sen}^2(\varphi) - 0,0000059\text{sen}^2(\varphi)] \quad (18)$$

Mota (1992) informa que os valores dos raios equatorial e polar são respectivamente de 6.378,16km e 6.356,78km. O valor para o achatamento da Terra seria então de $\varepsilon = 1/298,257$. A Figura 16 demonstra, de modo geral, o comportamento do campo de gravidade teórico em função da variação da latitude de localização da estação gravimétrica.

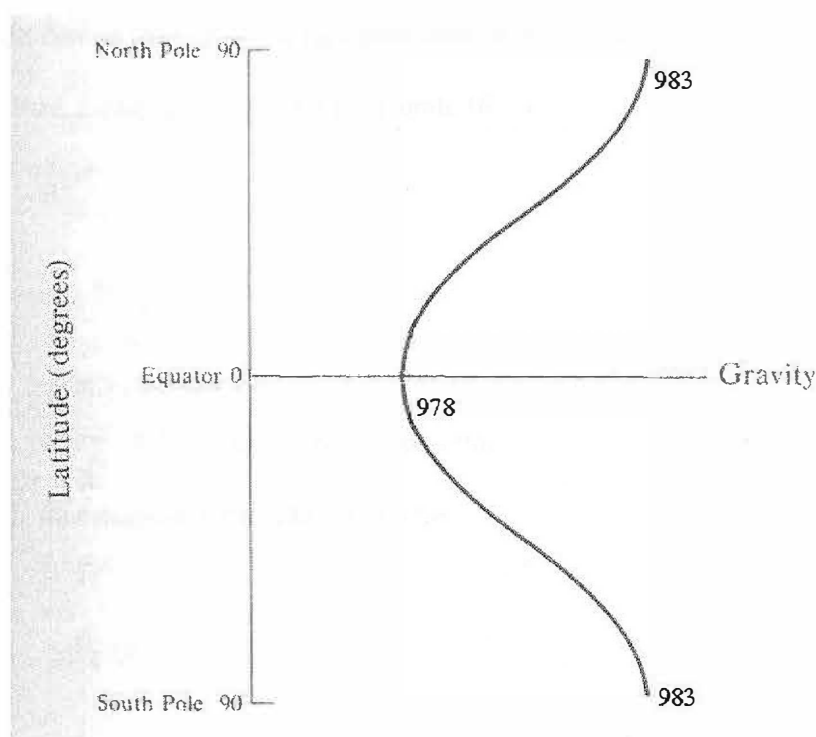


Figura 16 – *Varição do campo gravitacional teórico em função latitude da Terra (modificado de TSUBOI, 1983)*

3.3.2 Redução e Anomalia de Ar Livre

A redução de Ar Livre (do termo inglês *free-air*) ou correção de Faye (BARCELLOS, 1992), compreende a correção no valor do campo gravitacional, medido na estação gravimétrica, devido à variação de altitude h em relação ao nível médio do mar, ou para o datum escolhido como referência. Dessa forma, os valores registrados pelos gravímetros nas diversas estações, em diferentes altitudes, são reduzidos para o mesmo nível de referência.

Importante ressaltar, que a correção de Ar Livre não leva em conta a massa sólida ou gasosa compreendida entre a estação de medição e o Datum de referência (TELFORD *et al.*, 1990).

O valor do campo gravitacional (g_h) para uma determinada altitude (h_i), em relação ao nível médio do mar, é dado pela equação (19), onde (R) representa o raio da Terra.

$$g_h \approx G \frac{M_T}{(R + h_i)^2} \quad (19)$$

A equação (20) para o cálculo da magnitude padronizada para a redução de ar livre (Cg_{fa}), onde a altitude h_i da estação é fornecida em metros.

$$Cg_{fa} = 0,3086h_i \quad (20)$$

MOTA (1992) apresenta a equação para o cálculo da anomalia de ar livre (Δg_{fa}).

$$\Delta g_{fa} = g_o + \left(\frac{dg_N}{dz} \right) h_i - g_N \quad (21)$$

Onde g_o representa o valor da gravidade observada, ou seja, medida na estação gravimétrica.

$\left(\frac{dg_N}{dz} \right) = 0,3086 \frac{mGal}{m}$ é o gradiente vertical da aceleração da gravidade normal (g_N).

3.3.3 Redução e Anomalia Bouguer

A correção Bouguer (Cg_b) que corresponde ao acréscimo no valor de gravidade devido à massa de rocha entre o nível do mar e o ponto de observação é:

$$Cg_b = 2\pi G\rho h_i = 0,04185\rho h_i \quad (22)$$

Esta fórmula considera o efeito da atração de uma camada de rocha horizontalmente infinita (*Bouguer slab*), com uma espessura h_i (metros) e densidade ρ (g/cm^3). Usualmente, adota-se na maioria dos trabalhos técnicos o valor de $\rho = 2,67\text{g/cm}^3$ como densidade média de redução das rochas crustais (HINZE, 2003 - A).

A fórmula anterior é também denominada correção Bouguer simples, pois considera uma topografia plana nas vizinhanças da estação de medição. Em regiões de relevo acidentado, para uma exatidão melhor que 0,5 mGal, é necessária a aplicação da CORREÇÃO DE TERRENO (Cg_t). Fórmulas e tabelas para a referida correção são fornecidas por TELFORD *et al.* (1990) e DOBRIN & SAVIT (1988).

A anomalia Bouguer Completa (Δg_b), isto é, aquela em que inclui a correção de terreno, é a diferença entre g_o e a aceleração da gravidade prevista (g_p).

$$\Delta g_b = g_o - g_p \quad (23)$$

Onde:

$$g_p = g_N + Cg_{fa} + Cg_b + Cg_t \quad (24)$$

O valor da aceleração da gravidade prevista (g_p), além de incluir os termos da equação (21), deve também ser corrigido para os efeitos de maré, deriva instrumental, Eötvös (no caso dos gravímetros montados em plataforma móvel). Afora todos esses procedimentos, se deve amarrar os valores relativos de aceleração de gravidade a uma rede internacional de bases gravimétricas. Além disso, no valor de g_0 pode estar contido, também, o efeito das massas que suportam as cargas isostáticas (que levam em conta a topografia do terreno), devendo ser corrigido.

3.4 Interpretação dos Dados

De acordo com TELFORD (1990), as técnicas de interpretação podem ser divididas em dois grandes grupos: o método direto e o inverso. A escolha da aplicação de cada método está diretamente relacionada ao tipo de anomalia gravimétrica e de acordo com as observações geológicas previamente conhecidas.

Durante a interpretação dos dados, é importante ter a noção de que as anomalias gravimétricas são de contraste lateral de densidade. Contrastes de densidade da ordem de 0,1 a 0,2 g/cm^3 são significativas para essas variações laterais, enquanto que para variações verticais, cujo modelo se apresenta como camadas plano-paralelas horizontais, não se conseguem identificar tais contrastes (LUIZ & SILVA, 1995).

Ainda, segundo LUIZ & SILVA (1995), as anomalias com grande variação de gradiente horizontal, usualmente estão relacionadas às falhas. As caracterizadas por contornos fechados, de forma mais simétrica, representam maciços intrusivos, enquanto que aquelas mais alongadas tornam mais evidentes dobramentos e/ou intrusões discordantes do tipo diques.

Importante ressaltar que a expressão de um campo gravitacional é resultante da superposição de anomalias gravimétricas nas zonas de interesse e outras profundidades. Dessa forma, os efeitos das anomalias de massa mais profundos marcam o campo gravimétrico regional, enquanto que subtraindo-se as anomalias gravimétricas superficiais, caracterizadas por diferentes geometrias, dimensões e densidades contrastantes das rochas encaixantes, do campo regional, obtém-se o campo residual (TELFORD *et al.*, 1990 e RUGENSKI *et al.*, 2006).

Segundo RUGENSKI *et al.* (2006), é comum a utilização de filtros numéricos para separar os componentes regional e residual do campo gravimétrico composto. Os filtros tipo passa baixa são utilizados para ressaltar os maiores comprimentos de onda do sinal, tornando mais evidente o componente regional, mais associado a corpos de dimensão de escala crustal ou litoesférica.

O campo gravimétrico regional pode então ser modelado com várias técnicas, sendo a mais comum o método dos mínimos quadrados, com grau polinomial ajustado pelas características geométricas dos corpos e segmentos crustais da área de interesse.

Existem, também, diversas outras técnicas para separar e reduzir a componente residual da componente regional indesejável algumas vezes, como no caso da prospecção geofísica voltada para a exploração de hidrocarbonetos. TELFORD *et al.* (1990) apresenta, de forma sucinta, algumas dessas técnicas tais como: residualização gráfica, métodos de *fitting* de superfície, métodos de *gridding* empíricos, método da segunda derivada vertical do campo e o método da continuação do campo gravitacional.

De qualquer forma, vale ressaltar que em qualquer técnica geofísica, o parâmetro mais utilizado na interpretação geofísica é o conhecimento da geologia local (LUIZ & SILVA, 1995).

3.4.1. Método Direto

Esta técnica consiste na construção de um modelo inicial com base nas informações geológicas e geofísicas a priori. O efeito gravimétrico deste modelo é calculado e então comparado com a anomalia gravimétrica observada. Quando há uma discrepância relativamente grande, então os parâmetros são modificados e o processo fica iterativo até que uma condição aceitável de ajuste seja atingida.

Com esse método, é necessária a definição da dimensão do corpo ou da estrutura geológica de interesse na investigação da anomalia. Assim, pode-se trabalhar com modelos bidimensionais ou tridimensionais. Para este último as dimensões nas três direções estão relativamente equiparáveis. No entanto, para um modelo bidimensional, faz-se necessário o estabelecimento da hipótese de que uma das dimensões no plano paralelo às camadas seja desprezível com relação a outra dimensão no mesmo plano.

No caso mais geral, como é o caso de corpos tridimensionais com uma forma volumétrica e distribuição de densidade $\rho(x,y,z)$ qualquer, conforme esquema da Figura 17, a componente vertical do campo gravitacional $g_z(x,y,z)$ é dada pela equação (24).

$$g_z(x,y,z) = \int_{x'} \int_{y'} \int_{z'} \rho(x', y', z') \psi(x', y', z') dx' dy' dz' \quad (25)$$

Onde a função $\psi(x,y,z)$, denominada de função de Green, é o efeito gravitacional no ponto $P(x,y,z)$ causado por uma massa pontual situada em (x',y',z') , sendo calculado pela equação (25).

$$\psi(x, y, z) = -G \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (26)$$

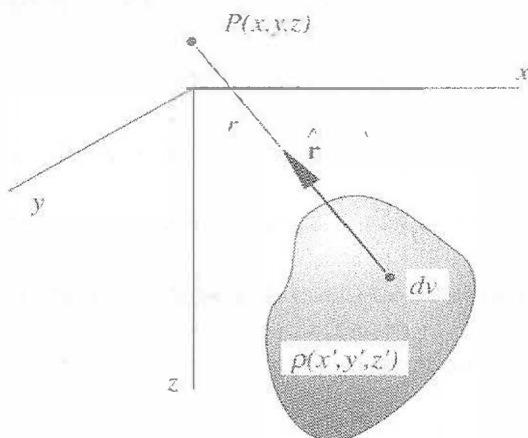


Figura 17 - Esquema de corpo tridimensional de forma irregular (fonte: BLAKELY, 1995).

Na hipótese do corpo modelado ser uma esfera, o valor do campo gravimétrico vertical é dado pela equação (27) (TELFORD *et al.*, 1990).

$$g_z = \frac{4\pi G \rho R^3 h}{3(h^2 + x^2)^{3/2}} \quad (27)$$

TELFORD *et al.*, (1990), apresenta os resultados das equações que calculam a componente vertical do campo gravimétrico para modelagem de outros corpos com geometria tridimensional, tais como de lâminas horizontais e de forma cilíndrica. No entanto, para corpos reais de geometria irregular, usualmente divide-se tal corpo em N partes. Dessa forma o campo gravitacional vertical é dado pela equação (28).

$$g_m = \sum_{n=1}^N \rho_n \omega_{mn} \quad (28)$$

Onde (g_m) é a atração vertical (g_z), no ($m^{\text{ésimo}}$) ponto de observação, ρ_n é a densidade na parte (n) e (ω_{mn}) é a atração no ponto (m) devida ao volume (n), com densidade unitária. Na prática, as formas geológicas podem ser aproximadas por um conjunto de prismas retangulares, conforme esquema da Figura 18, cujas densidades são mantidas constantes. O efeito de cada prisma é calculado para cada ponto de observação e depois todos eles somados para representarem a contribuição total no ponto desejado (PLOUFF, 1976).

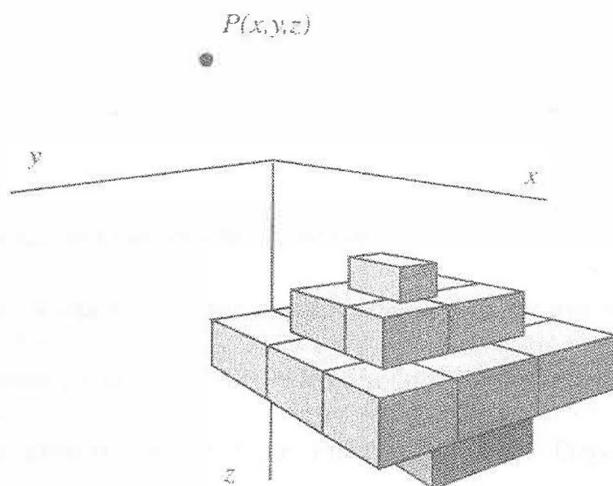


Figura 18 - Corpo de forma irregular aproximado por um conjunto de prismas regulares de forma retangular (fonte: BLAKELY, 1995).

Como no caso dos corpos com geometria bidimensional uma das dimensões é muito menor do que a outra no mesmo plano de observação, uma das formas utilizadas com grande frequência por parte dos interpretes é aquela do cilindro horizontal, que assemelha a um canal soterrado, por exemplo.

Assim, segundo (Luiz & Silva, 1995), o valor de (g_z) pode ser fornecido pela equação (29), onde R é o raio do cilindro com densidade (ρ), com centro situado a uma profundidade z, abaixo do nível de referência e (h) = ($x_{1/2}$), cujo valor ($x_{1/2}$) constitui-se da abscissa correspondente à metade do valor máximo da anomalia.

$$g_z = \frac{2\pi G \rho R^2 z}{z^2 + x_{1/2}^2} \quad (29)$$

3.4.2 Método Inverso

No caso do método inverso admite-se, também, um modelo geométrico a priori assim como no método direto. A diferença é que os dados das anomalias gravimétricas são obtidos a partir da determinação dos parâmetros calculados diretamente das técnicas de inversão.

As técnicas de inversão podem ser lineares ou não. Dependendo do grau de complexidade da geometria da anomalia de interesse, utiliza-se de modelos que podem assumir formas contínuas e suaves, ou quando são muito complexas e irregulares, faz-se uso de prismas verticais de seções horizontais retangulares ou poligonais e/ou conjuntos de lâminas horizontais com seções poligonais.

Os métodos de inversão de anomalias gravimétricas podem ser subdivididos em lineares ou não-lineares. Partindo da equação (28), que determina o valor do campo gravitacional, com uma distribuição discreta de uma seção transversal ou mapa de volume de (n), fornecido

pela função de Green, determina-se a função de distribuição de probabilidades para se estimar o valor da densidade da anomalia em estudo. Para se estimar algum parâmetro físico a partir de (ω_{mn}) , como coordenadas que retratam a profundidade da anomalia em questão, utiliza-se então os procedimentos para uma inversão não linear.

A maior dificuldade, porém, ao se trabalhar com inversões de dados provenientes de levantamentos, que utilizam métodos potenciais (não somente para o caso de gravimetria), está na dualidade das respostas. Como as respostas não são únicas, as informações a priori a respeito dos parâmetros desejados, função dos modelos geológicos bem estabelecidos, tornam-se essenciais para a confiabilidade dos resultados, garantindo os níveis de exatidão desejados com as incertezas bem estimadas BULAND & OMRE (2003).

Entretanto, SILVA *et al.* (2001 e 2002) e BARBOSA *et al.* (2002) apresentam técnicas específicas, aplicadas a um determinado modelo geológico, possibilitando a obtenção de soluções unívocas. Existe na literatura diversos autores que apresentam rotinas para implementação de algoritmos computacionais para inversão de dados gravimétricos, tomando como informação a priori corpos de duas ou três dimensões.

Pode-se utilizar, também, o método de Deconvolução de Euler para estimar a profundidade das fontes gravimétricas, a partir do potencial gravitacional gerado pelas fontes gravimétricas. BEISL (1996) disserta sobre as funções (f) que tem dependência tridimensional do tipo:

$$f = f(x, y, z) \tag{30}$$

Funções dessa natureza satisfazem a condição de homogeneidade se existir o parâmetro i tal que a equação (30) pode ser escrita na forma da equação (31).

$$f(ix, iy, iz) = i^k f(x, y, z) \quad (31)$$

Onde o índice k representa o grau do polinômio constitutivo da equação. Como a equação (31) satisfaz a condição de homogeneidade, a mesma pode ser reescrita de forma mais conveniente.

$$x \frac{\partial}{\partial x} (f) + y \frac{\partial}{\partial y} (f) + z \frac{\partial}{\partial z} (f) = -if \quad (32)$$

Por ser conservativo, o campo total de anomalia de potencial gravitacional (U) total atende as características de um campo do tipo (f). Sendo as coordenadas (x_0, y_0, z_0) a posição da fonte geradora do campo potencial, as coordenadas (x, y, z) a posição onde o potencial está sendo medido e (B) o valor do campo para um nível base de referência do potencial, a equação (32) pode ser reestruturada para a equação (33).

$$(x - x_0) \frac{\partial}{\partial x} (U) + (y - y_0) \frac{\partial}{\partial y} (U) + (z - z_0) \frac{\partial}{\partial z} (U) = -N_h (B - U) \quad (33)$$

O valor N_h indica o grau de homogeneidade é interpretado como um índice estrutural e pode indicar a feição estrutural da fonte geradora da anomalia gravimétrica. Adotando-se o valor de (B) como sendo o potencial gravitacional regional (U_{reg}), para a estimativa das variações das profundidades das anomalias, a equação (33) pode ser reescrita para incorporar o valor de (U_{reg}) (BARBOSA & SILVA, 2004).

$$(x - x_0) \frac{\partial}{\partial x}(U) + (y - y_0) \frac{\partial}{\partial y}(U) + (z - z_0) \frac{\partial}{\partial z}(U) = -N_h (U_{reg} - U) \quad (34)$$

Segundo BEISL (1996), como o método é geralmente empregado em dados de campo que representam anomalias oriundas de diversas situações geológicas, quase sempre é necessário realizar várias iterações com valores de N diferente (usualmente de 0 a 3). Ao final, plota-se os resultados e verifica-se o melhor ajuste.

De acordo com ALMEIDA FILHO *et al.* (1999), essa técnica que pode ser aplicado tanto para a gravimetria quanto para a magnetometria. Por utilizar-se do potencial gravitacional, apresenta a grande vantagem de não necessitar do conhecimento da intensidade do campo gravimétrico. Dessa forma, o processo de inversão utilizando o método de Euler torna a solução do problema mais confiável.

Assim, o índice estrutural N funciona como um medidor da forma geométrica da fonte causadora da anomalia gravimétrica, sendo que para $N_h=0$ indica um contato entre duas camadas, $N_h=1$ pode representar um dique vertical ou uma soleira, $N_h=2$ demonstra um corpo de forma cilíndrica posicionado na vertical ou horizontal e $N_h=3$ representa uma esfera (BARBOSA & SILVA, 2004).

CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASO

Como estudo de caso, o presente trabalho apresenta e realiza análises dos resultados obtidos no mapeamento das fontes de anomalias gravimétricas na porção nordeste da bacia do Recôncavo, sugeridas por BEISL na sua dissertação de Mestrado defendida em 1996 no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.

Como estudo complementar, apresenta-se o trabalho de monografia de final do curso de geofísica da Universidade Federal da Bahia - UFBA de RAMOS (2006), onde o mesmo utilizou os princípios da gradiometria, calculando o tensor do campo gravitacional a partir de dados gravimétricos da bacia do Recôncavo.

No caso do trabalho de BEISL, os dados gravimétricos utilizados correspondem a uma grade regular do campo gravitacional Bouguer a partir de perfilagens de campo, com espaçamento médio entre as estações de 500m. Todo o sistema de informações foi referenciado ao sistema de Projeção Universal Transversa Mercator (UTM) e ao Datum Horizontal 'Aratu'.

Foram aplicados filtros para separar o campo Bouguer residual do regional, através do uso da primeira derivada do campo gravimétrico. O campo Bouguer regional foi obtido pelo método do ajuste polinomial de terceira ordem, eliminando as altas frequências e realçando as grandes anomalias daquela porção da bacia. O campo Bouguer residual foi obtido através da primeira derivada vertical do campo gravimétrico.

BEISL (1996) Utilizou as equações de Euler para inferir sobre as profundidades das fontes. O mesmo realizou comparações com outras técnicas e métodos para identificação e mapeamento das feições geológicas da bacia.

A Figura 19(a) apresenta os campos produtores de petróleo e gás natural enquanto que a Figura 19(b) apresenta a mesma figura mostrando os limites norte e leste da área de estudo realizada. Neste trabalho, o interesse maior concentrou-se na localização dos campos do que no cálculo da densidade de fraturamento. Maior conhecimento sobre o assunto deve ser consultado no trabalho de BEISL (1996).

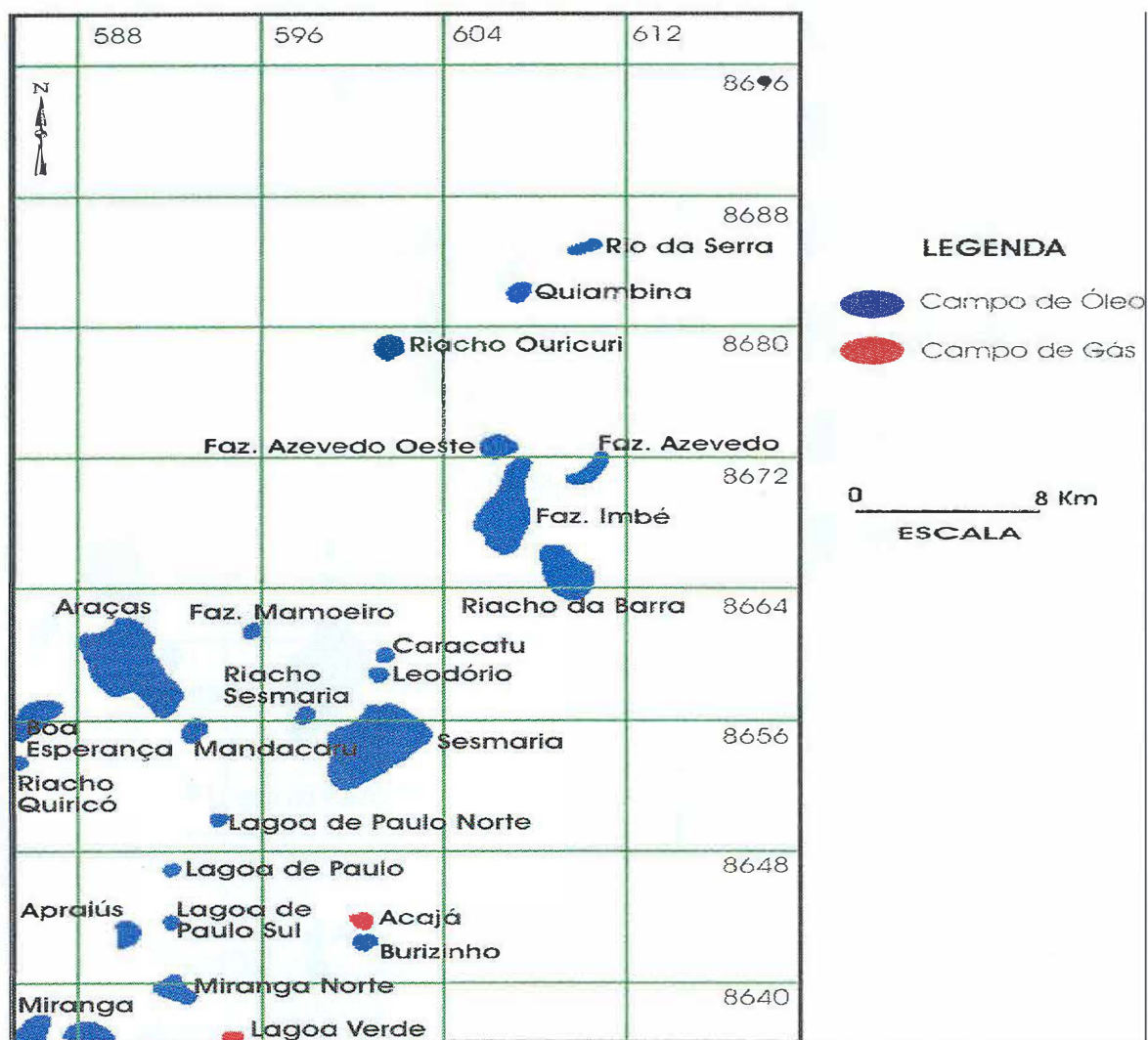


Figura 19(a) – Campos produtores de petróleo e/ou gás natural na porção nordeste da bacia do Recôncavo (fonte: BEISL, 1996).

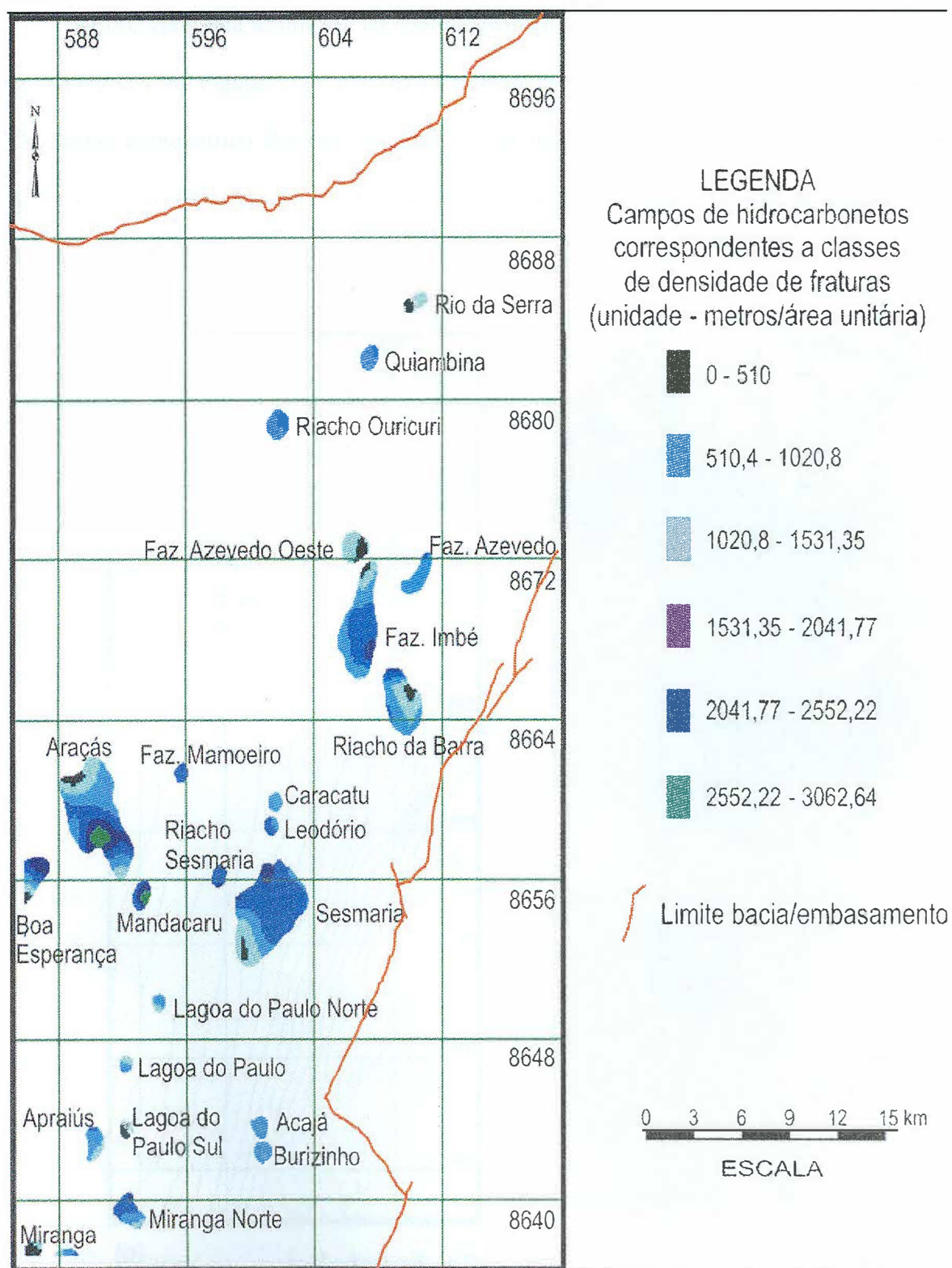


Figura 19(b) – Campos produtores de hidrocarbonetos na porção nordeste da bacia do Recôncavo com os limites geológicos por classe de densidade de fraturamento (fonte: BEISL, 1996).

BEISL apresenta as inferências sobre a geologia local obtidas com a análise dos mapas gravimétricos. As Figuras 20(a) e 20(b) apresentam os resultados obtidos para as intensidades do campo gravimétrico Bouguer, na forma de isolinhas e de forma digital com técnica de sombreamento respectivamente. Os intervalos das isolinhas são de 5mGal onde a intensidade fica na faixa de -31,1 a 88,0 mGal.

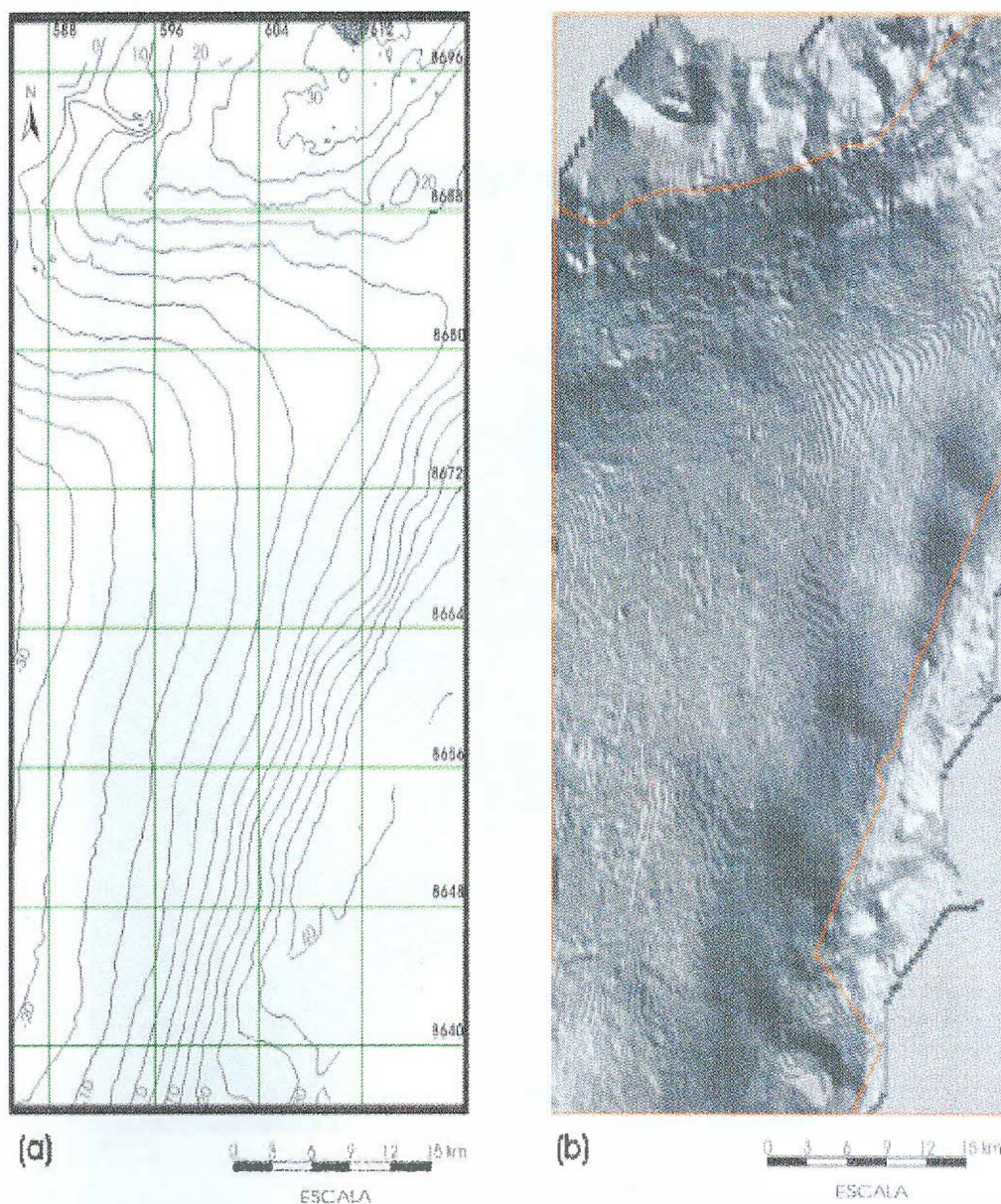


Figura 20 – a) Mapa de intensidade gravimétrica Bouguer da porção nordeste da bacia do Recôncavo; b) Mapa digitalizado com sombreamento NE (Fonte: BEISL, 1996).

A Figura 21 apresenta o resultado do mapa de intensidade gravimétrica Bouguer residual, já demonstrado em forma sombreada. A Figura 22 demonstra o resultado do mapa de anomalia Bouguer regional, utilizando-se da técnica de falsa cor ressaltando as anomalias regionais. O mapa foi composto com as dados morfoestruturais e lineamentos da região através da técnica IHS. Maiores esclarecimentos sobre esta técnica, deve ser verificado no trabalho do autor. A imagem do campo residual revela as feições arredondadas da Falha de Borda de Salvador.

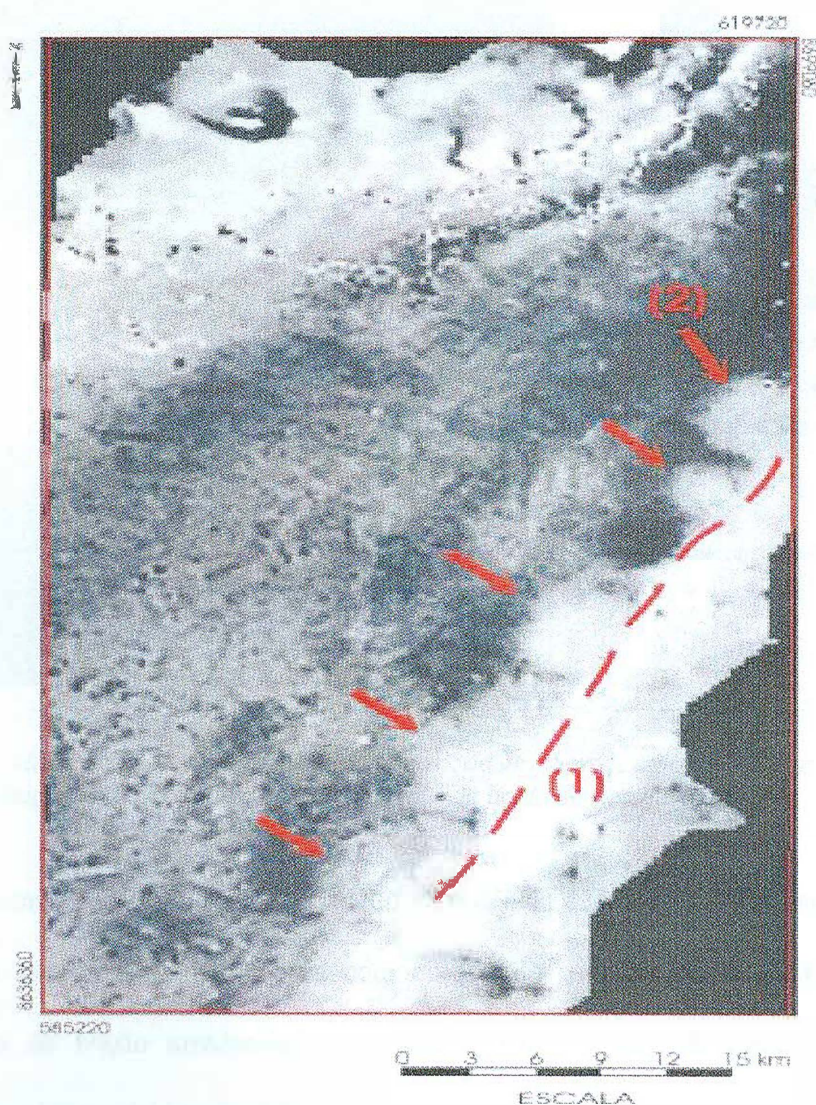


Figura 21 – Mapa Bouguer residual com contraste por equalização em níveis de cinza da porção nordeste da bacia do Recôncavo (Fonte: BEISL, 1996).

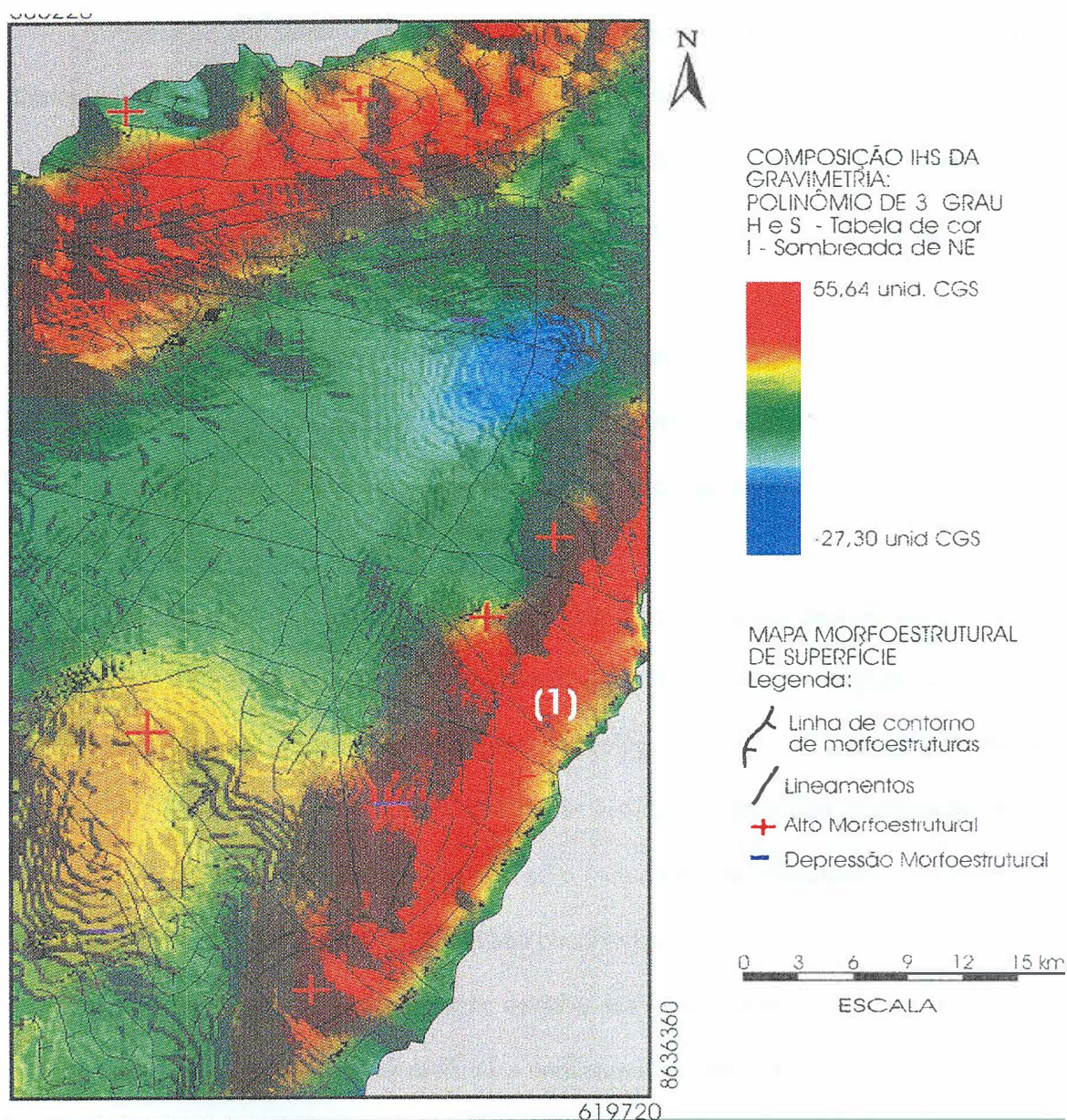


Figura 22 – Mapa Bouguer regional com sobreposição de mapa de morfoestruturas e lineamentos, com colorização de falsa cor, da porção nordeste da bacia do Recôncavo (Fonte: BEISL, 1996).

O resultado do campo regional realçou a existência de um baixo gravimétrico na porção nordeste da bacia, de forma elíptica com eixo maior na direção NE-SW e de um alto gravimétrico de feição arredondada, na porção SW da área de estudo, possivelmente relacionado ao Domo de Araçás (BEISL, 1996).

A Figura 23 apresenta os resultados de BEISL (1996), com a distribuição espacial das fontes de anomalia gravimétrica. O mapa consiste no campo gravitacional Bouguer, cujas profundidades foram obtidas pelo método de deconvolução de Euler. O referido mapa além de ter sido sombreado com direção NE, mostra os resultados do histograma de frequências das fontes gravimétricas por intervalo de profundidade.

Observa-se que a imagem desta figura contribui para o delineamento dos *trends* estruturais, relacionados às falhas na região geográfica desta bacia. Além disto, a análise dos dados deve ser feita sempre com base nas informações geológicas conhecidas da região (BEISL, 1996).

Esta análise deve levar em conta identificar três condições básicas para garantir a confiabilidade e robustez do método apresentado: se as feições geológicas, identificadas anteriormente em outros mapas de levantamento geológico, foram identificadas pelo método; se o método tem capacidade de identificar feições geológicas ainda não confirmadas, porém, com grandes possibilidades de existência; e se o método possui consistência suficiente para identificar novas feições geológicas ainda não observadas.

O trabalho aponta uma concentração de 88% das fontes em profundidades menores que 3000m, sendo que as fontes mais profundas concentram-se em grande parte nas adjacências da falha de Salvador. Uma análise qualitativa do histograma de frequências, revela que as fontes mais rasas, de até 1000m de profundidade, concentram-se nos afloramentos granulíticos do Alto de Salvador e do Alto do Aporá.

O autor apresenta outros mapas de anomalias do campo gravitacional, realizando comparações com as informações geológicas já conhecidas, demonstrando boa concordância com levantamentos anteriores. Realiza, também, comparações com resultados obtidos pelo método sísmico. Esta comparação, assim como os outros mapas, estão apresentadas no Apêndice I, onde parte da dissertação de mestrado do autor em referência foi compilada.

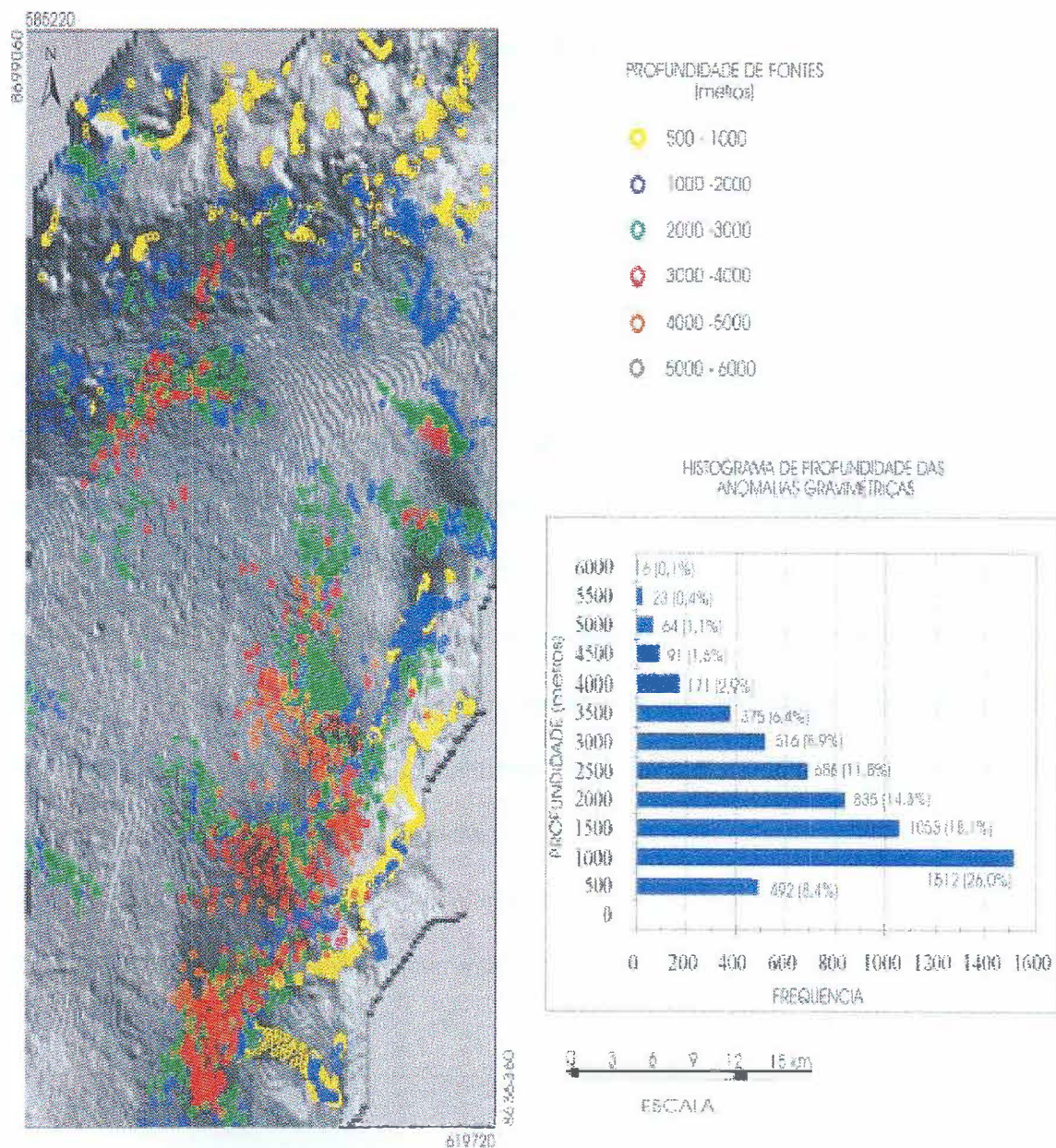


Figura 23 – Mapa de campo gravimétrico Bouguer e da distribuição espacial das fontes gravimétricas da porção nordeste da bacia do Recôncavo, com o histograma de frequências das profundidades das anomalias geradoras das fontes (Fonte: BEISL, 1996).

A seguir, disserta-se sobre o trabalho desenvolvido por Ramos (2006). Neste trabalho, o objetivo de apresentar a técnica de gradiometria, consistiu apenas em trazer contribuições com informações a respeito da importância desta técnica. Portanto, não se apresentou as equações que são utilizadas. Maior esclarecimento sobre o assunto deve ser consultado o trabalho do autor.

O método utilizado consiste em obter o valor do tensor do potencial gravitacional a partir da componente vertical do campo gravitacional. A metodologia empregada permite obter os três mapas referentes aos componentes do campo gravitacional tomando o gradiente do potencial e os nove mapas de sua curvatura. No entanto, como explicitado no trabalho, desses nove mapas cinco são linearmente independentes, devido à simetria do tensor.

Os dados finais obtidos, perfazendo um total de oito mapas, foram oriundos do processamento de dados reais de anomalias Bouguer da porção central da bacia do Recôncavo. Os resultados finais, segundo Ramos (2006), permitiram identificar possíveis novas feições geológicas além de confirmar as existentes, proporcionando melhorias na visualização da estrutura interna da bacia.

No Apêndice II segue-se a compilação do resultado dos oito mapas dos trabalhos de RAMOS (2006), reproduzindo as interpretações sugeridas.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Conforme pode ser observado no trabalho de BEISL (1996), a metodologia utilizada permitiu realçar as anomalias gravimétricas positivas e negativas nos mapas de anomalias Bouguer, através da digitalização das imagens.

A utilização dos mapas de campo gravitacional de anomalia Bouguer e dos seus componentes regionais e residuais permitiram realizar interpretações das relações entre as estruturas do embasamento, do pacote sedimentar e a geologia de superfície.

Os resultados desses mapas comprovaram boa exatidão dos resultados, pois demonstraram que está em acordo com os modelos previamente estabelecidos para bacias sedimentares, em particular para a bacia do Recôncavo.

Observa-se que a metodologia empregada para determinar a distribuição espacial e profundidades das fontes gravimétricas foi coerente com os resultados esperados. A qualidade dos resultados pôde ser comprovada, apresentando boa concordância com dados de campo e outros tipos de levantamentos geofísicos, tais como mapas sísmicos.

Essa metodologia, associada com o conhecimento geológico da região, tornou evidentes outros lineamentos de anomalias gravimétricas, contribuindo assim para ampliar o conhecimento da porção nordeste da bacia.

No caso do trabalho de RAMOS (2006), verifica-se que a gradiometria, integrada aos resultados obtidos das anomalias do campo gravimétrico, constitui-se em importante ferramenta para ampliar o conhecimento do arcabouço estrutural das bacias sedimentares.

Como sugestão para continuação do referido trabalho, seria interessante realizar uma correlação entre os dados obtidos, com a respectiva análise das feições geológicas e sísmicas que delimitam os campos de petróleo já existentes na bacia do Recôncavo, proporcionado mais confiabilidade ao método.

Referências Bibliográficas

AGUIAR, G. A.; MATO, L. F. (1990); Definição e relações estratigráficas da Formação Afligidos nas bacias do Recôncavo, Tucano Sul e Camamu, Bahia, Brasil. In: Anais do XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia 1, pp. 157-170. Sociedade Brasileira de Geologia, Natal, Brasil, 1990.

ALMEIDA FILHO, RAIMUNDO et al. (1999); FERREIRA, FRANCISCO J. F.; DA SILVA, FRANCISCO V.; Contribuição ao Estudo do Complexo Máfico/Ultramáfico do Campo Formoso Usando Sensoriamento Remoto e Dados Aeromagnéticos; Revista Brasileira de Geociências, 29(2):203-206, junho de 1999.

ANP (2007), <http://www.anp.gov.br>, site oficial de 2007.

ARAGÃO, M.A.N.F. (1993); Arquitetura da Bacia do Recôncavo. Anais do III Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, p. 142-145.

ARAGÃO, M.A.N.F. (1994); Arquitetura, estilos estruturais e evolução da Bacia do Recôncavo; Boletim do III Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, Rio Claro: 165-167.

BARBOSA, V. C. F.; SILVA, J. B. C.; MEDEIROS, W. E. (2002); *Practical Applications of Uniqueness Theorems in Gravimetry: Part II – Pragmatic Incorporation of Concrete Geological Information. Geophysics, 67(2002), 795-800.*

BARBOSA, VALÉRIA CRISTINA F. & SILVA, JOÃO BATISTA C. (2004); Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro; in: I Simpósio Regional da sociedade Brasileira de Geofísica, 26-28, São Paulo, setembro de 2004.

BARCELLOS, ÁLVARO GOMES SOBRAL (1992); Estudo Gravimétrico do Nordeste Brasileiro entre as latitudes de 4° e 12° Sul e Longitudes de 34° e 40° Oeste, Observatório Nacional, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, outubro de 1992.

BEISL, CARLOS HENRIQUE (1996), Integração de Dados de sensoriamento Remoto, Geologia, Gravimetria e Topografia para Estudo do Arcabouço Estrutural em uma Parte do Compartimento Nordeste da Bacia do Recôncavo; Instituto nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Dissertação de Mestrado, dezembro de 1996.

BLAKELY, R. J. (1995); *Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications*. Cambridge University Press (1995) – USA.

BUONORA, MARCO POLO PEREIRA (2003), Notas de Aula do Curso de Formação de Geofísicos da Petrobras, Publicação Interna, Rio de Janeiro, dezembro de 2003.

DOBRIN, M. B.; SAVIT, C. H. (1988); *Introduction to Geophysical Prospecting*. McGraw Hill International Editions (1988) –USA.

DUARTE, OSVALDO DE OLIVEIRA (2003); Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia, Sociedade Brasileira de Geofísica, Segunda Edição, 2003.

ESTRELLA, G. O. (1972); O estágio “rift” nas bacias marginais o leste brasileiro. In: Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Geologia 3, pp. 29-34. Sociedade Brasileira de Geologia, Belém, Brasil, 1972.

FIGUEIREDO, A. M. F.; BRAGA, J. A. E.; ZABALAGA, J. C.; OLIVEIRA, J. J.; AGUIAR, G. A.; SILVA, O. B.; MATO, L. F.; DANIEL, L. M. F.; MAGNAVITA, L. P.; BRUHN, C. H. L. (1994); Recôncavo Basin, Brazil: a prolific intracontinental rift basin; *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin. Memoir 59*: 157-203. 1994.

HARLAND, W.B., COX, A.V., LLEWELLYN, P.G. *et al.* (1982); *A geologic time scale. Cambridge. University Press, 131 p.*

HINZE, W. J. (2003 - A); Bouguer reduction density, why 2.67?; *Geophysics, vol. 68, No. 05, September/October, 2003.*

HINZE, W. J. (2003); *Gravity Exploration Methods; Geophysics, vol. 68, No. 65, September/October, 2003.*

INTERNATIONAL STRATIGRAPHIC GUIDE (2007); Site official:
<http://www.stratigraphy.org/guide.htm>

LUIZ, JOSÉ GOUVEIA & SILVA, LÚCIA MARIA DA COSTA (1995); *Geofísica de Prospecção, Volume 1, EDITORA CEJUP LTDA, Primeira Edição, Belém, Pará, 1995.*

LARSEN, P.H. (1988); *Relay structures in a Lower Permian basement-involved extension system, East Greenland. J. Struct. Geol., 10: 3-8.*

MAGNAVITA, L. P. (1992). Geometry and kinematics of the Recôncavo-Tucano-Jatobá rift, NE Brazil: University of Oxford, unpubl. PhD thesis, Oxford, UK.

MAGNAVITA, L. P.; da SILVA, ROBERTO R., SANCHES, C. P. (2005); Roteiros Geológicos: Guia de Campo da Bacia do Recôncavo, NE do Brasil; Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 301-334, maio/nov, 2005.

MILANI, Edison José (1990); **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro: Editora Gávea; Editoração Petrobras, p. 235-266, 1990.

MORLEY, C.K., NELSON, R.A., PATTON, T.L., MUNN, S.G. (1990), *Transfer zones in the East African Rift System and their relevance to hydrocarbon in rifts. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., 74: 1234-1253.*

MOTA, UBIRAJARA S. (1992); Estudo Gravimétrico da Depressão Circular de Colônia, Santo Amaro – SP; Observatório Nacional; Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, fevereiro de 1992.

NUSSENZVEIG, HERCH MOISÉS (1981), Curso de Física Básica 1 – Mecânica, 2ª Edição, EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA, São Paulo – SP.

PLOUFF, D. (1976); *Gravity and Magnetic Fields of Polygonal Prism and Application to Magnetic Terrain Corrections. Geophysics, No 41, 724-741.*

RAMOS, JOÃO MAURÍCIO FIGUEIREDO (2006), Monografia de Final de Curso de Geofísica da Universidade Federal da Bahia – UFBA, 2006.

ROSTIROLLA, S. P.; MATTANA A. C.; BARTOSZECK M. K. (2003); Bayesian assessment of favorability for oil and gas prospects over the Recôncavo basin, Brazil. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, vol. 87, n. 4, p. 647-666, 2003.

RUGENSKI *et al.* (2006), ANDRÉ; MANTOVANI, MARTA SILVIA MARIA MARIA; SHUKOWSKY, WLADIMIR; Investigação Gravimétrica do Complexo Alcalino de Ipanema, São Paulo, Brasil; *Geologia USP – Série Científica*, São Paulo, v. 06, nº 01. p. 13-27, julho 2006.

SANTOS, CLOVIS FRANCISCO & BRAGA, JOSÉ AYRTON ESTRELA (1990 - A); O "Estado da Arte" da Bacia do Recôncavo. **Boletim de Geociências Petrobras**, Boletim de Geociências da Petrobras, 4 (1), 35-43, janeiro/março 1990.

SANTOS, C.F,CUPERTINO & BRAGA, J.A.E (1990); Síntese sobre a geologia das bacias do Recôncavo – Tucano – Jatobá - In: Raja Gabaglia, G.P.; Rio de Janeiro, Boletim de Geociências da Petrobras, 1990. p235-268.

SILVA, J. B. C.; MEDEIROS, W. E.; BARBOSA, V. C. F. (2001); *Potential –field Inversion: Choosing the Appropriate Technique to Solve a Geologic Problem. Geophysics, 66(2001), 511-520.*

SILVA, J. B. C.; MEDEIROS, W. E.; BARBOSA, V. C. F. (2002); *Practical Applications of Uniqueness Theorems in Gravimetry: Part I – Constructing Sound Interpretation Methods. Geophysics, 67(2002), 788-794.*

SYMON, KEITH R. (1992); tradução de Gilson Brand Batista, *Mecânica*, 4ª Edição, Editora Campus LTDA, Rio de Janeiro – RJ.

SZATIMARI, P.; MILANI, E.; LANA, M.; CONCEIÇÃO, J. C. (1985); How South Atlantic rifting affects Brazilian Oil Reserves Distribution; *Oil & Gas Journal*, 14, p. 107-113. 1985.

TELFORD *et al.* (1990), WILLIAM MURRY; GELDART, L. P.; SHERIFF, ROBERT EDWARD. E.; *Applied Geophysics, Second Edition*, Cambridge University Press, New York, USA, 1990.

TSUBOI, C. (1983); *Gravity; George Allen & Unwin - London, UK.*

VIANA, C. F.; GAMA Jr., E. G.; SIMÕES, I. A.; MOURA, J. A.; FONSECA, J. R.; ALVES, R. J. (1971); Revisão Estratigráfica da Bacia do Recôncavo/Tucano. *Boletim Técnico da Petrobras. 14(3/4): 157-192, 1971.*

ZENG, HUALIN & WAN, TIANFENG (2004); *Clarification of the geophysical definition of a gravity field; Geophysics, vol. 69, No. 05, September/October, 2004.*

Outras Bibliografias Consultadas

CASTRO, ÁLVARO HENRIQUE AROUCA DE; Geologia e sistemas petrolíferos das bacias sedimentares brasileiras, Trabalho Técnico Petrobras, 2004.

NETTLETON, L. L.; *Gravity and Magnetism in Oil Prospecting. McGraw Hill Book Company, USA, 1976.*

PONTE, F. C.; NORTHFLEET, A. A.; GONÇALVES, A.; Evolução paleográfica do Brasil Oriental e África Ocidental. Salvador, Petrobras, Relatório Interno, 1971.

TALWANI, M. & EWING, M.; *Rapid Computation of Gravitational Attraction of Three-dimensional Bodies of Arbitrary Shape. Geophysics, No 25, 203-252, 1960.*

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.; KEYS, D. A., *Applied Geophysics. Cambridge University Press, USA, 1976.*

APÊNDICE I

Compilação de mapas da dissertação de mestrado de BEISL (1996).

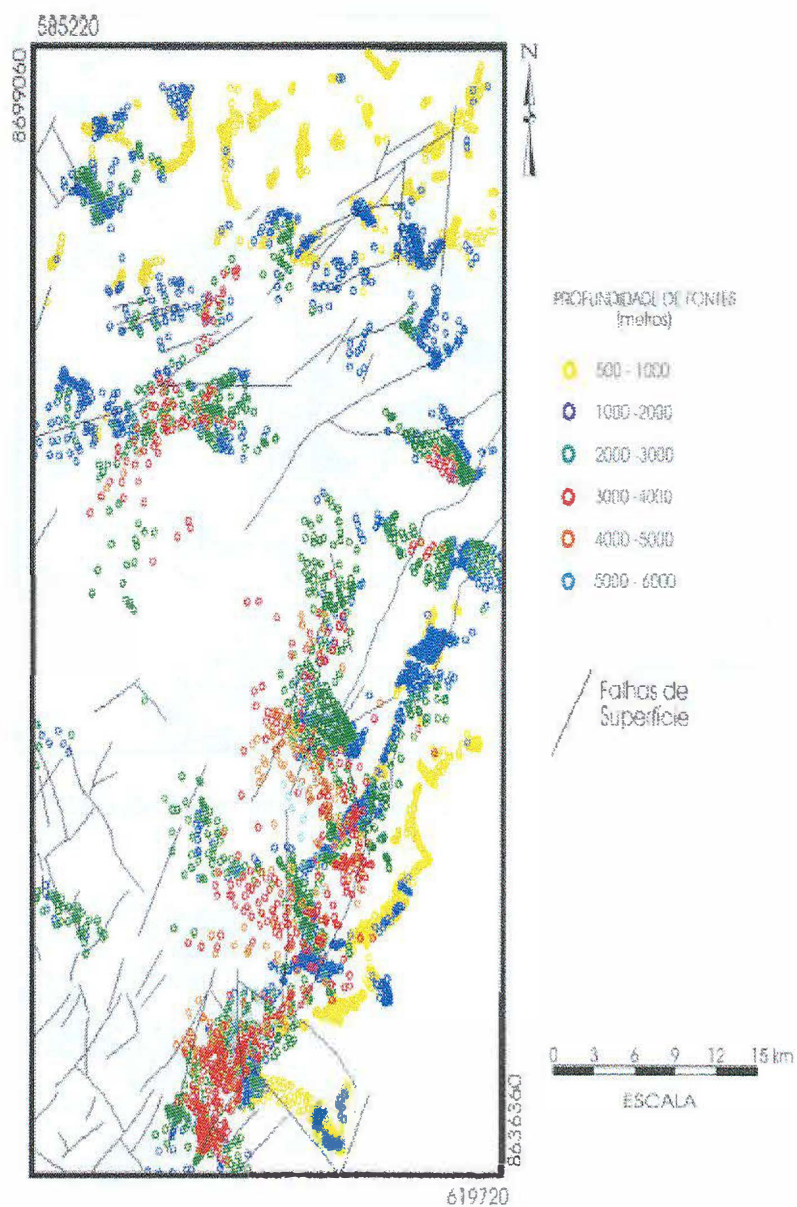


Fig. 4.22 - Mapa de fontes gravimétricas com sobreposição das falhas de superfície.

APÊNDICE I

Compilação de mapas da dissertação de mestrado de BEISL (1996).

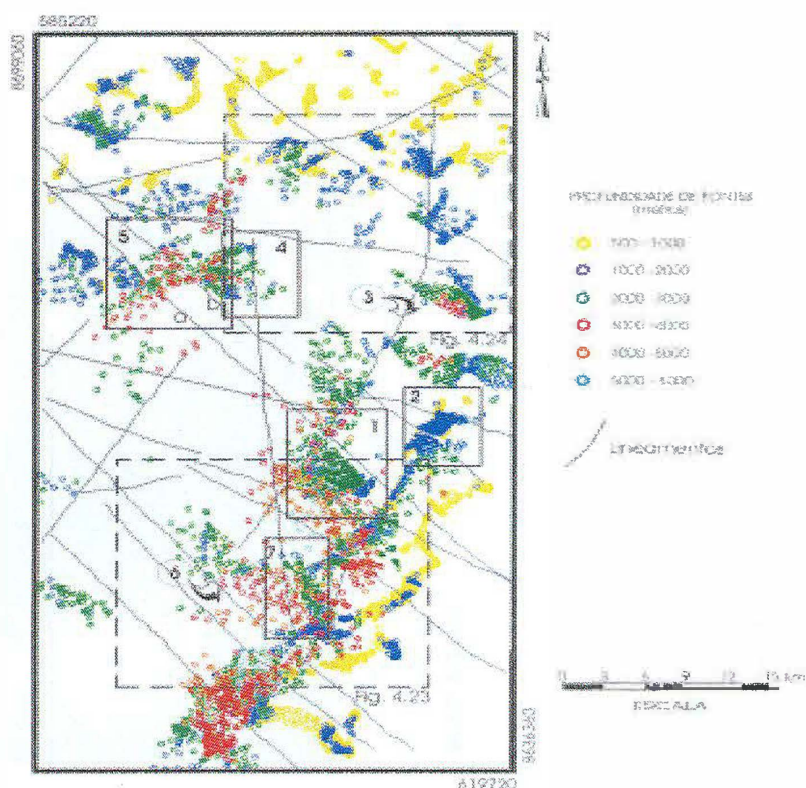


Fig. 4.23 - Mapa de fontes gravimétricas com sobreposição dos lineamentos.

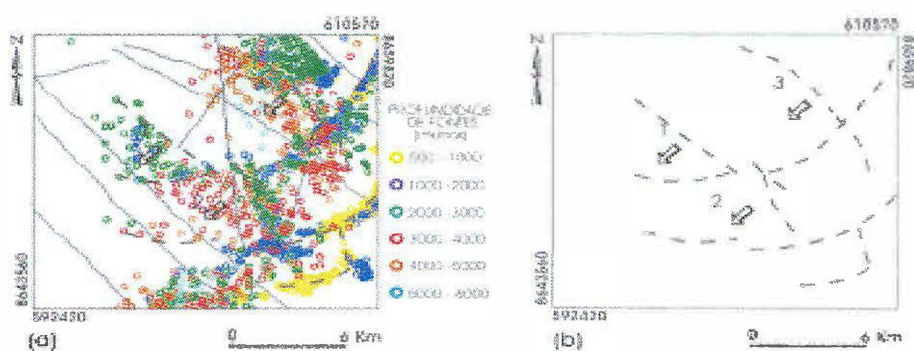


Fig. 4.24 - (a) Distribuição das fontes gravimétricas de 1000 a 6000 metros juntamente com os lineamentos na porção sudeste da área de estudo nas proximidades da Falha de Salvador. (b) Interpretação estrutural.

APÊNDICE I

Compilação de mapas da dissertação de mestrado de BEISL (1996).

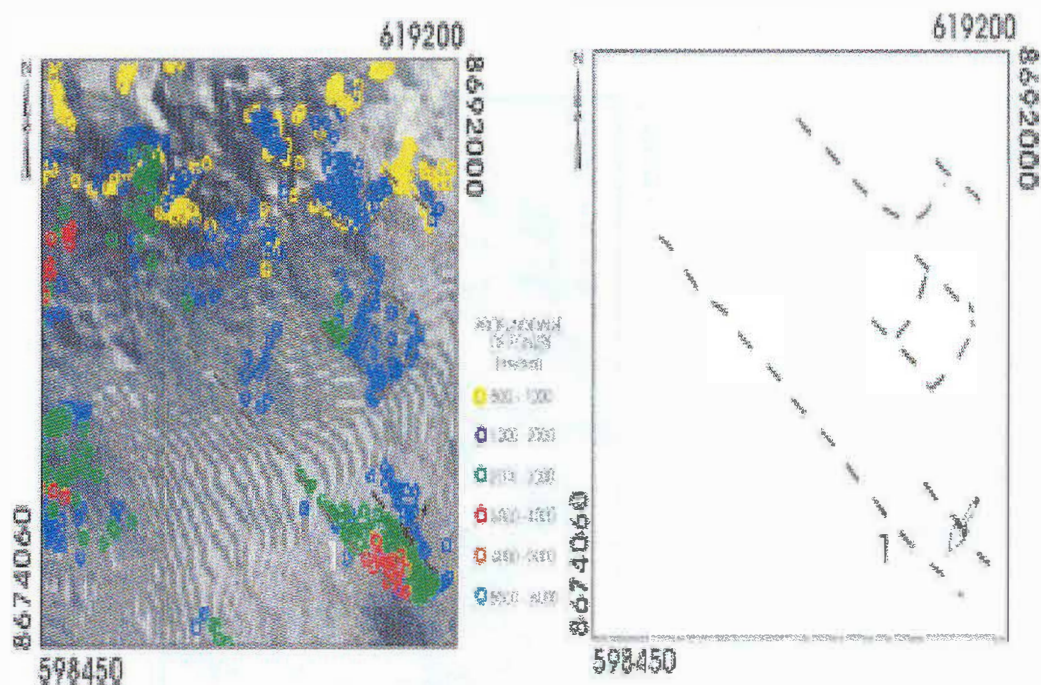


Fig. 4.25 - (a) Distribuição das fontes gravimétricas sobrepostas à imagem gravimétrica Bouguer sombreada de NE na porção nordeste da região de estudo. (b) Interpretação estrutural.

APÊNDICE I

Compilação de mapas da dissertação de mestrado de BEISL (1996).

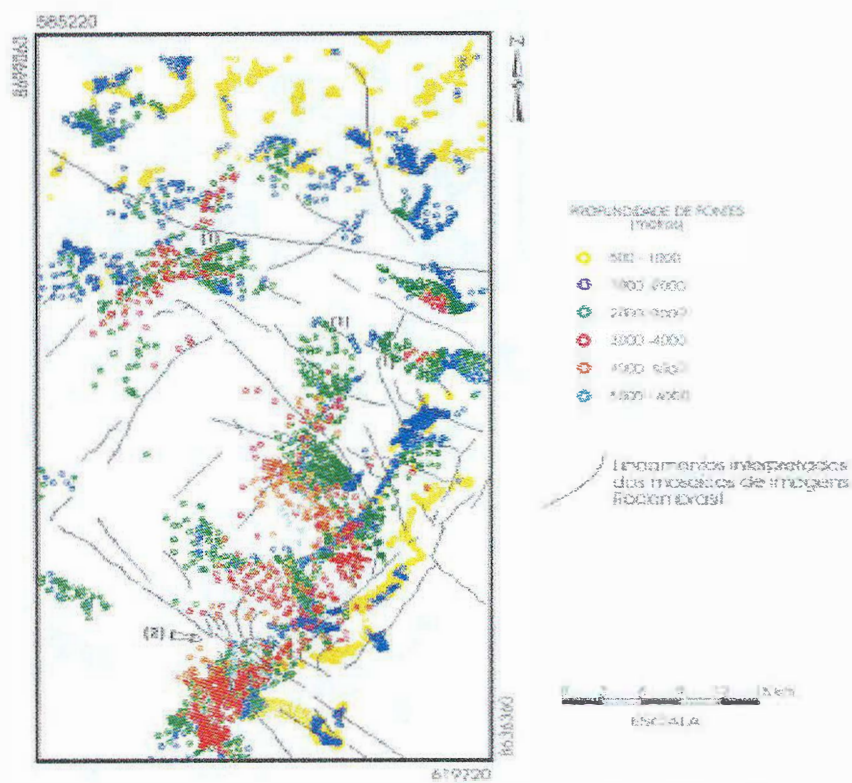


Fig. 4.16 - Mapa de fontes gravimétricas com sobreposição dos lineamentos obtidos a partir do mosaico de imagens Radarsat.

APÊNDICE I

Compilação de mapas da dissertação de mestrado de BEISL (1996).

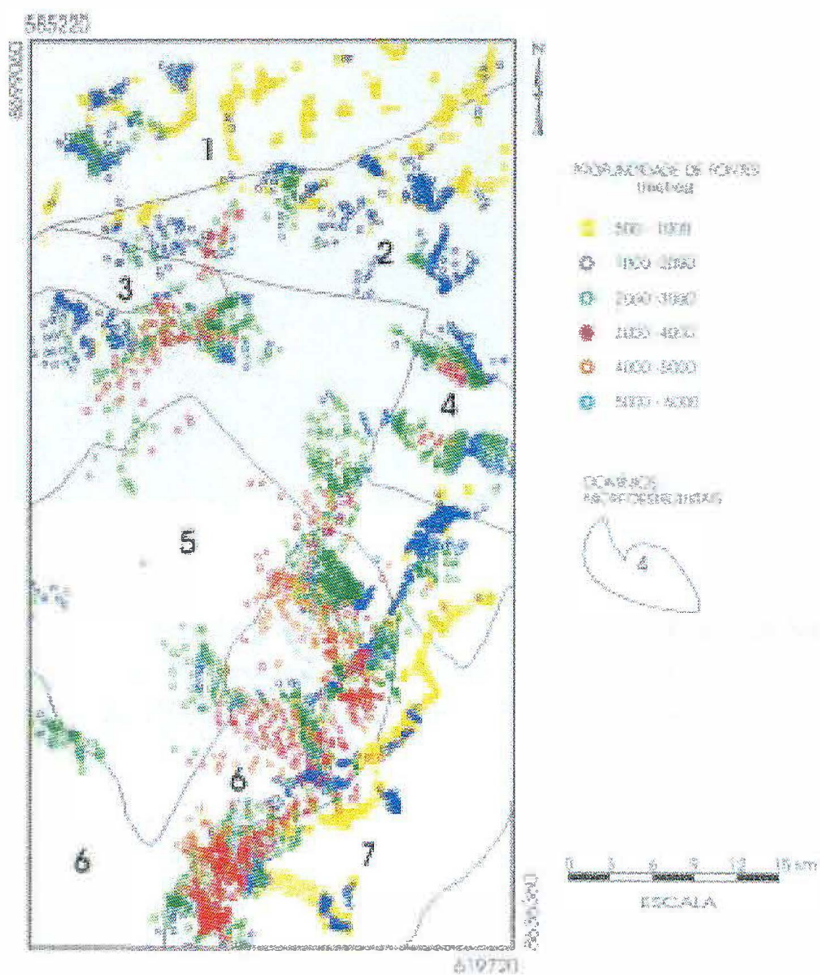


Fig. 4.27 - Mapa de fontes gravimétricas com sobreposição dos domínios morfoestruturais.

APÊNDICE I

Compilação de mapas da dissertação de mestrado de BEISL (1996).

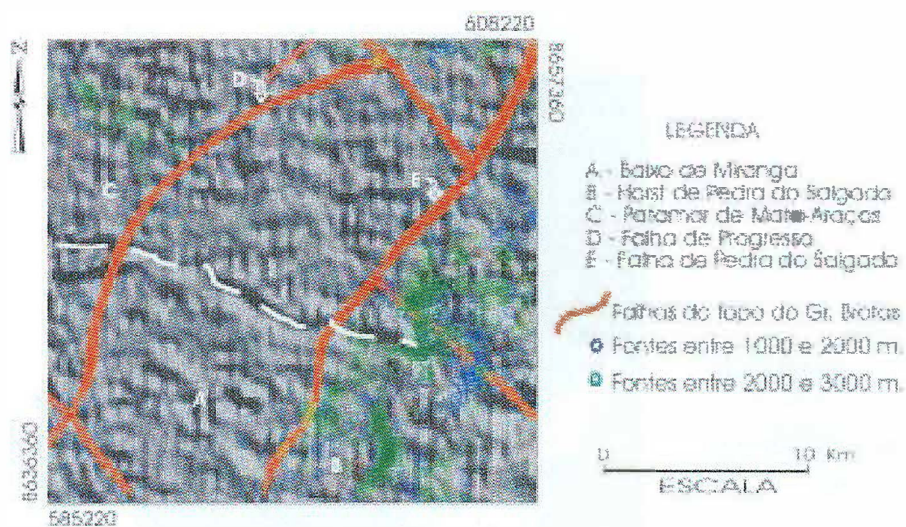


Fig. 4.34 - Imagem da gravimetria residual da região do Baixo de Miranga com sobreposição das estruturas pré-rifte e fontes gravimétricas de 1000 a 2000 (azul) e 2000 a 3000 (verde) metros.

APÊNDICE I

Compilação de mapas da dissertação de mestrado de BEISL (1996).

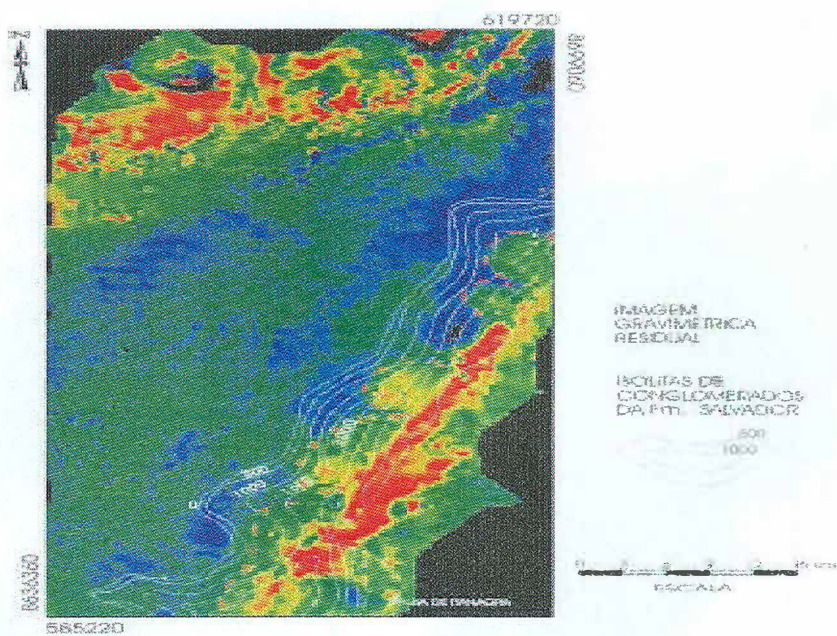


Fig. 4.37 - Imagem da gravimetria residual colorida com sobreposição das linhas de isopessuras de conglomerados da Formação Salvador.

APÊNDICE I

Compilação de mapas da dissertação de mestrado de BEISL (1996).

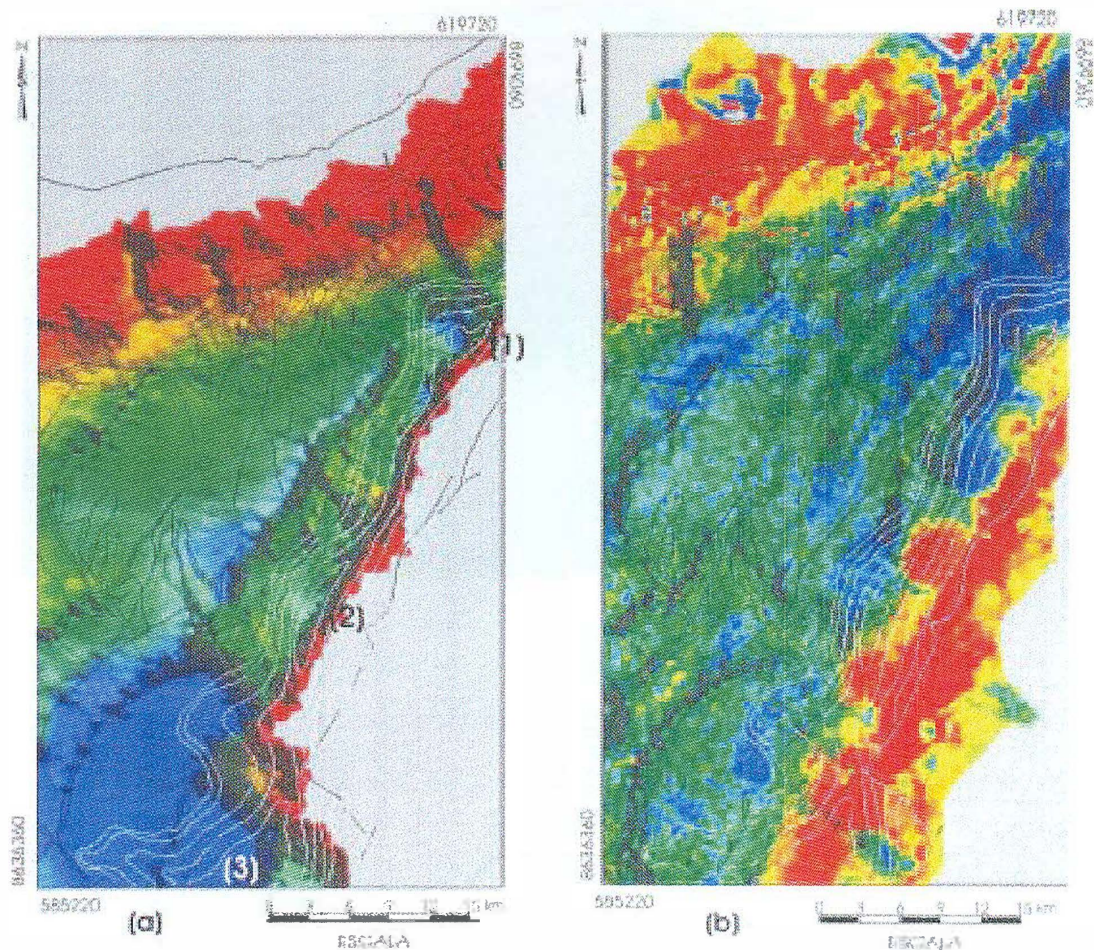


Fig. 4.38 - (a) Composição IHS do mapa sísmico do topo do Grupo Brotas com sobreposição das isóbatas da Fm. Salvador. (b) Composição IHS do mapa sísmico (I) com a imagem residual gravimétrica equalizada (H e S) e sobreposição das isóbatas da Fm. Salvador.

APÊNDICE I

Compilação de mapas da dissertação de mestrado de BEISL (1996).

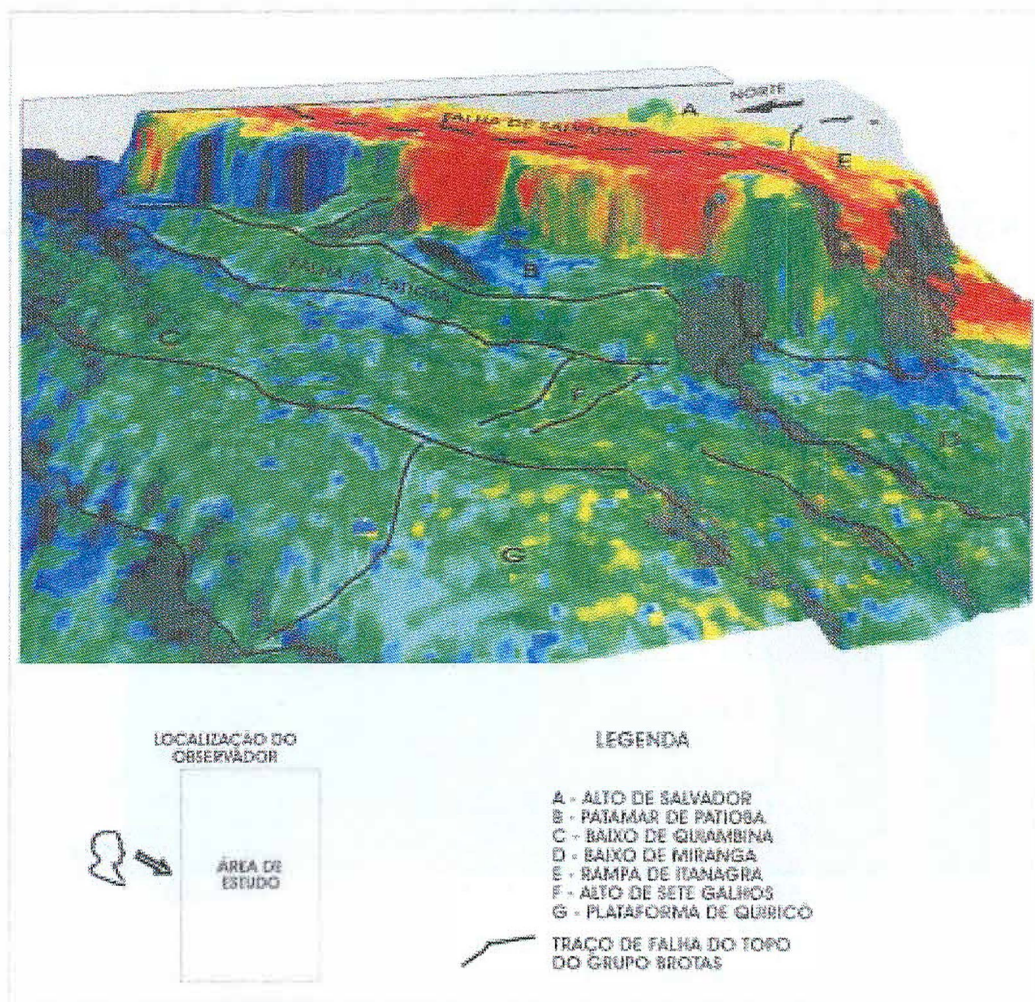


Fig. 4.39 - Composição IHS com visão panorâmica do topo do Grupo Brotas e anomalia residual gravimétrica. Nesta Figura, o observador está localizado a oeste da região de estudo e observando na direção SE. Estão sobrepostas as falhas do topo do pré-rifte.

APÊNDICE II

Compilação dos mapas gravimétricos da monografia desenvolvida por RAMOS (2006).

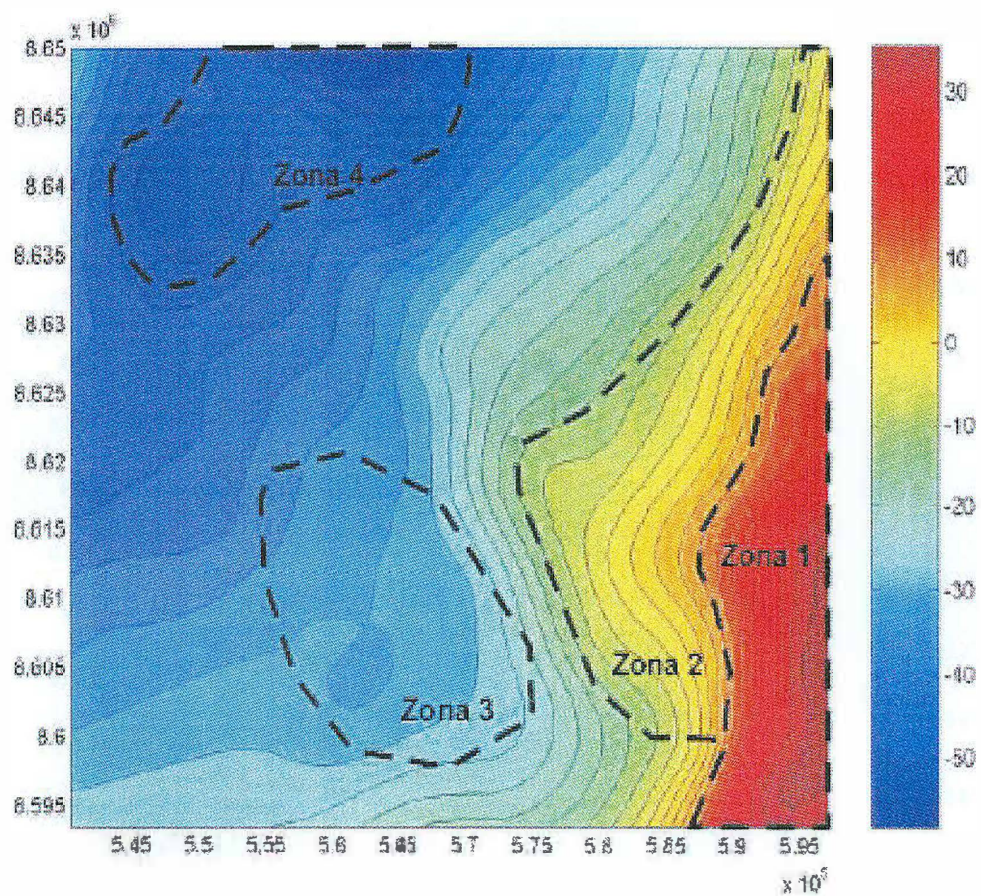


Figura 3.1: Mapa do gradiente U_g e os limites das zonas 1 a 4.

APÊNDICE II

Compilação dos mapas gravimétricos da monografia desenvolvida por RAMOS (2006).

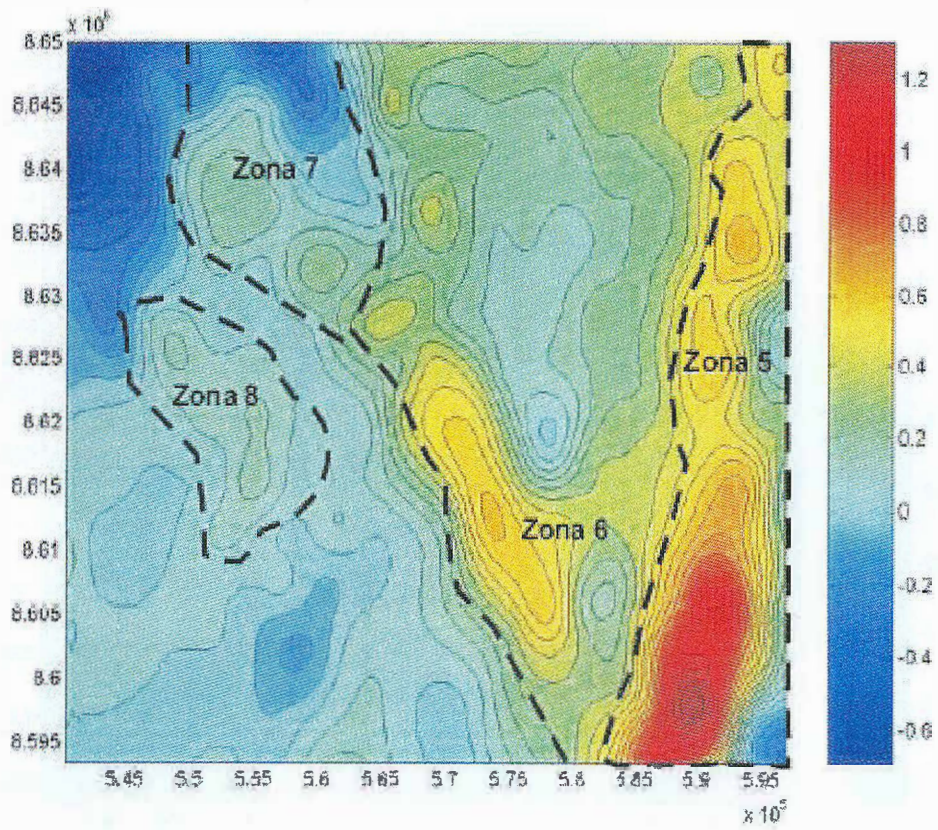


Figura 3.3: Mapa do gradiente U_z e os limites das zonas 5 a 8.

APÊNDICE II

Compilação dos mapas gravimétricos da monografia desenvolvida por RAMOS (2006).

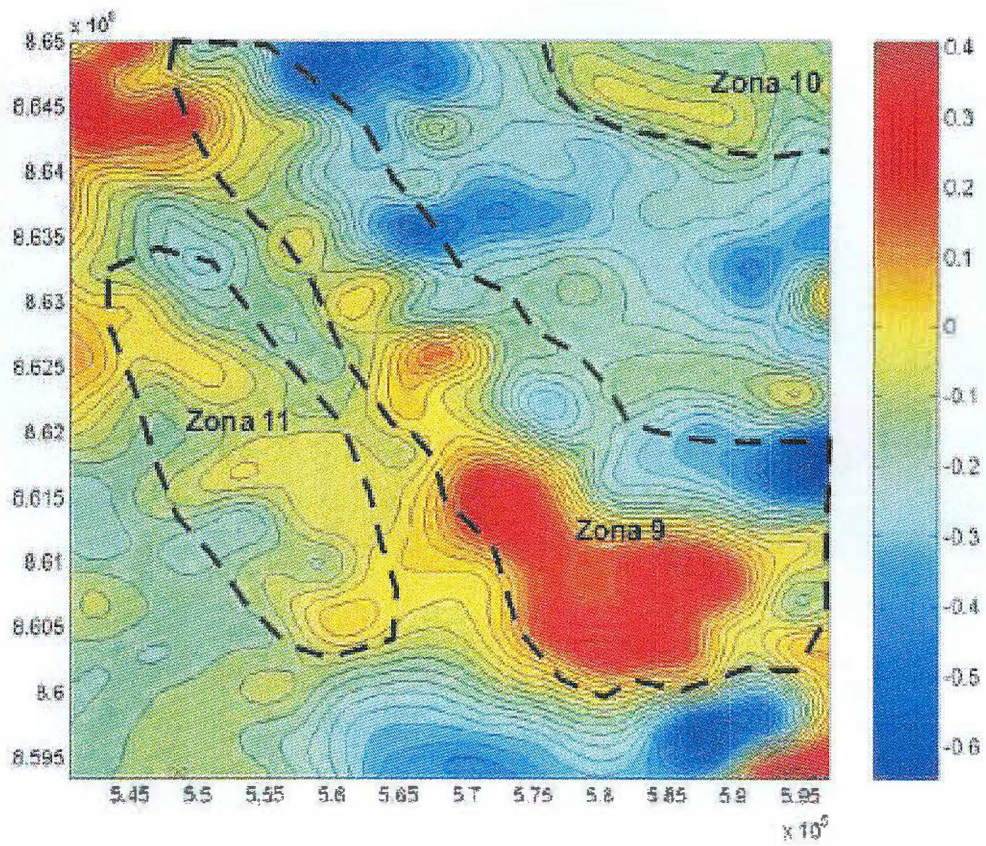


Figura 3.4: Mapa do gradiente U_g e os limites das zonas 9 a 11.

APÊNDICE II

Compilação dos mapas gravimétricos da monografia desenvolvida por RAMOS (2006).

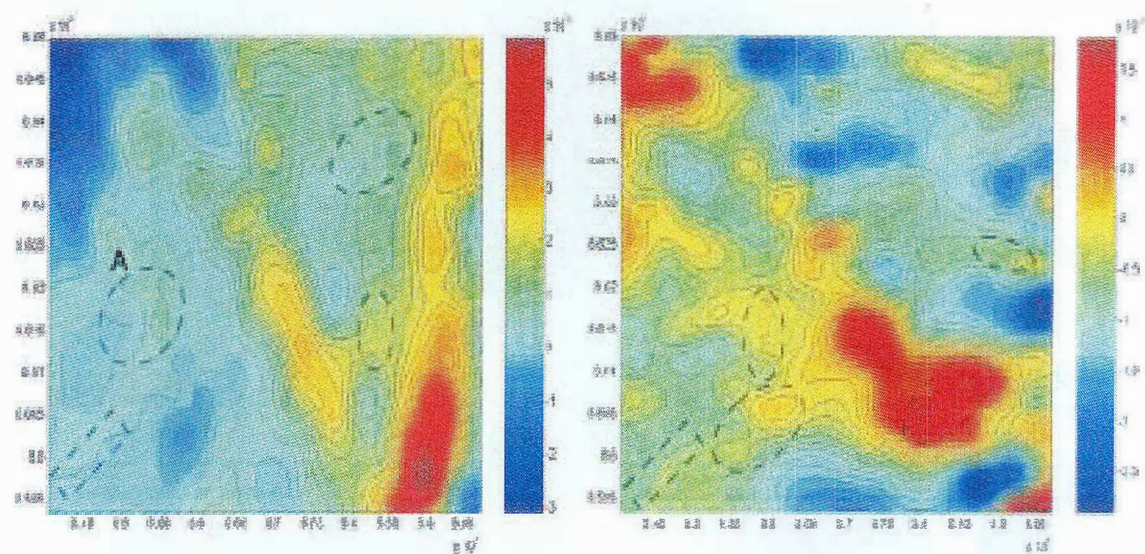


Figura 3.5: Mapas dos componentes tensoriais U_{xx} e U_{yy} .

APÊNDICE II

Compilação dos mapas gravimétricos da monografia desenvolvida por RAMOS (2006).

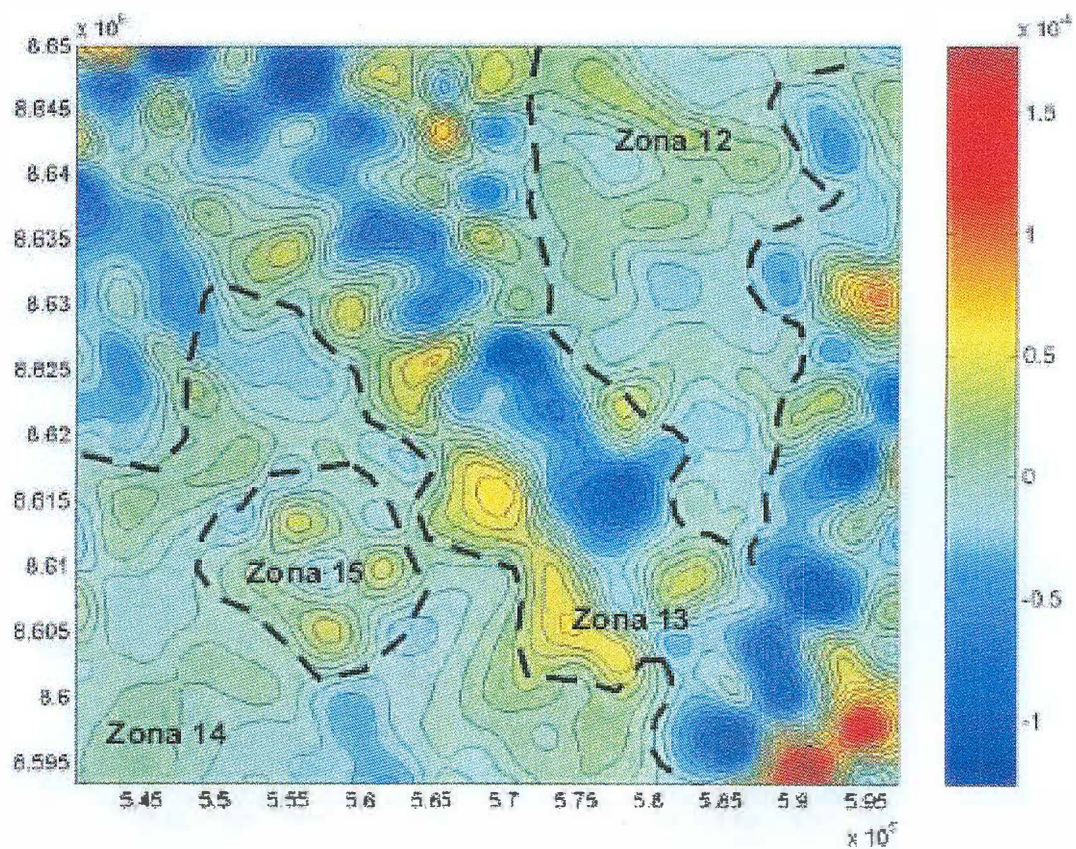


Figura 3.6: Mapa do componente tensorial U_{xy} . Quatro zonas bem distintas podem ser separadas no interior da Bacia.

APÊNDICE II

Compilação dos mapas gravimétricos da monografia desenvolvida por RAMOS (2006).

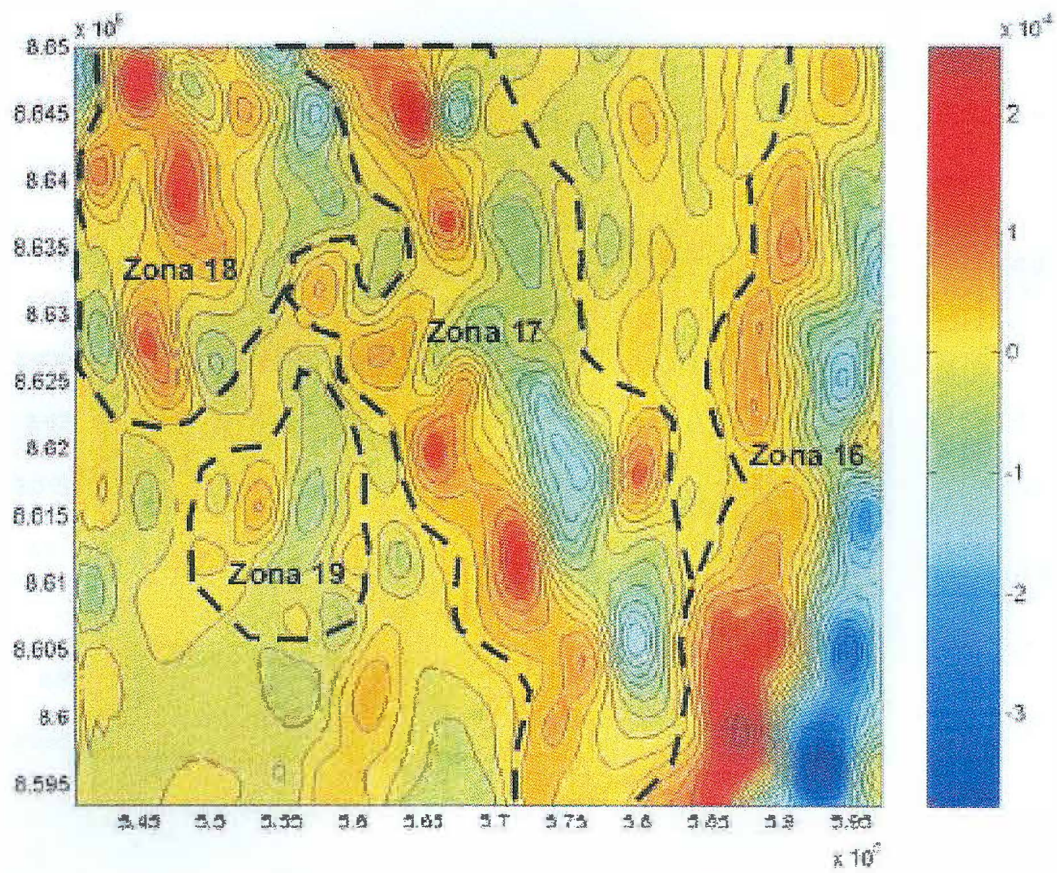


Figura 3.8: Mapa do componente tensorial U_{xx} .

APÊNDICE II

Compilação dos mapas gravimétricos da monografia desenvolvida por RAMOS (2006).

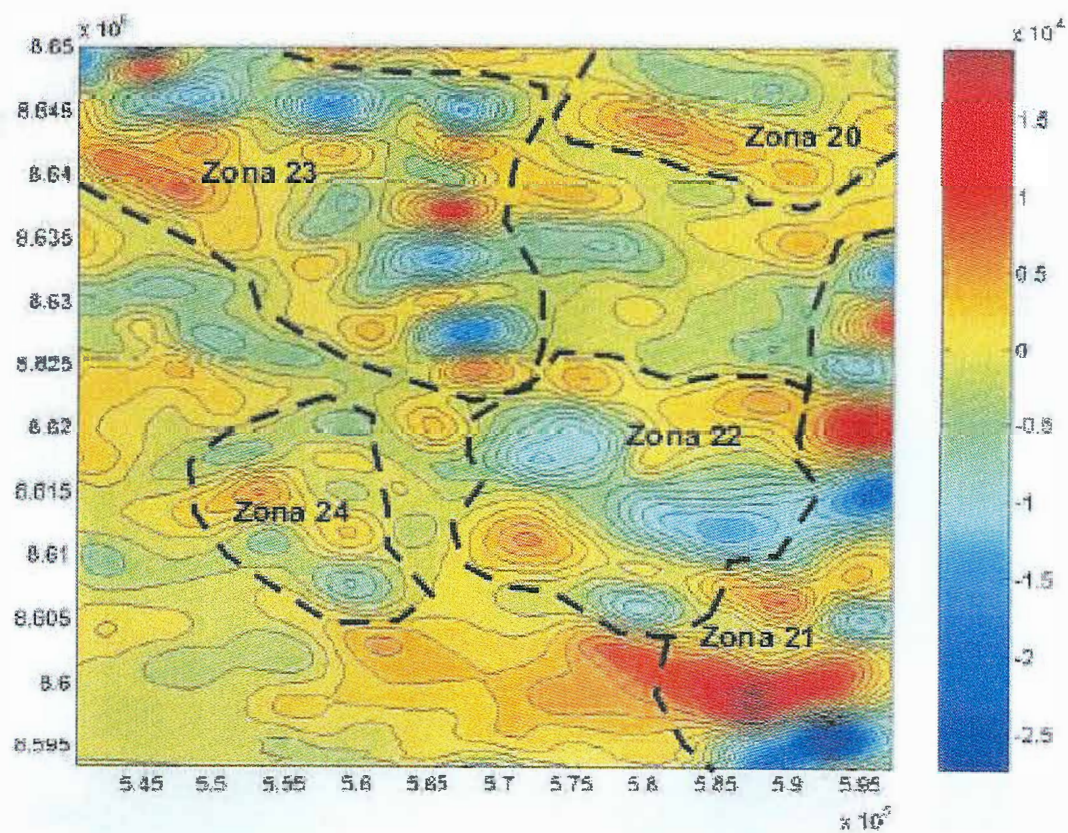


Figura 3.9: Mapa do componente tensorial U_{33} .

APÊNDICE II

Compilação dos mapas gravimétricos da monografia desenvolvida por RAMOS (2006).

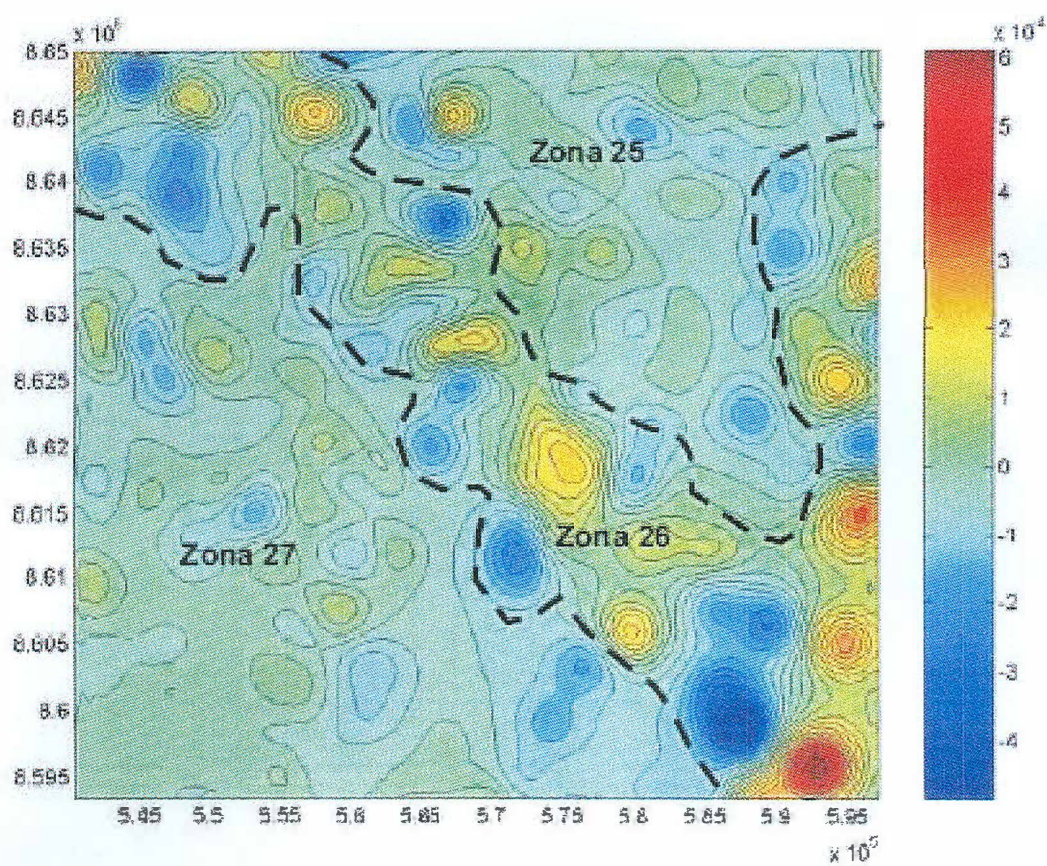


Figura 3.11: Mapa do componente tensorial U_{xx} e suas respectivas zonas.