



UFRJ

David de Figueiredo Sarmento

MÉTODO GRAVIMÉTRICO NA BACIA DO ESPÍRITO SANTO

Trabalho de Conclusão 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:

Paula Lúcia Ferrucio da Rocha

Leonardo Borghi

Rio de Janeiro

Março de 2007

MGL
5246M

UFRJ Centro de Ciências Matemáticas e de Natureza Biblioteca Central	
N.º RESERVA	DATA
6080/10	06/01/10
ORIGEM: <i>Doações/UFRJ</i> <i>Dep. de Geologia</i>	

inv. 2011

DAVID, de Figueiredo Sarmento
**MÉTODO GRAVIMÉTRICO NA BACIA DO ESPÍRITO
 SANTO / David de Figueiredo Sarmento** - Rio de Janeiro:
 UFRJ / IGeo, 2007, 62 p. : 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: Paula Lúcia F. da Rocha e Leonardo Borghi
 1. Geofísica. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental –
 Trabalho de Conclusão de Curso. I. Paula, Lúcia F. da Rocha e
 Leonardo Borghi II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
 Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em
 Geologia. III. Título.

David de Figueiredo Sarmento

MÉTODO GRAVIMÉTRICO NA BACIA DO ESPÍRITO SANTO

Trabalho de Conclusão 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:

Paula Lúcia F. da Rocha
Leonardo Borghi

Aprovada em: 27/03/2007

Por:

Paula Lúcia Ferrucio da Rocha

Leonardo Borghi

UFRJ
Rio de Janeiro
2007

Dedico esta monografia à minha esposa
Deborah e ao meu filho Pedro.

Agradecimentos

À Petrobras pela oportunidade de estar realizando esta especialização.

Aos meus orientadores Leonardo Borghi e Paula Lúcia Ferrucio da Rocha, por todo o suporte acadêmico durante a realização deste trabalho.

A todos os professores que ministraram aulas na Universidade Petrobras, compartilhando seus conhecimentos e experiências profissionais.

Ao Coordenador do Curso de Formação de Geofísico Júnior, Álvaro Lucio de Oliveira Gomes, pelo empenho em garantir a excelente qualidade e infra-estrutura oferecida no curso.

A todos os funcionários das bibliotecas da Universidade Petrobras, Compartilhado/RSUD e CENPES, pelo apoio prestado.

Aos Geofísicos do setor de Métodos Potenciais, pelas sugestões e comentários sempre precisos e relevantes, em especial, a Julio César Soares de Oliveira Lyrio, pelas idéias trocadas e dúvidas solucionadas durante o desenvolvimento do trabalho.

A todos os amigos e amigas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos os alunos do Curso de Formação de Geofísico Júnior, pela amizade construída.

E, em especial, à minha esposa Deborah e ao meu filho Pedro, pelo incentivo, carinho, compreensão e apoio.

“Geofísica é a ciência de ver, apalpar, medir as rochas que estão lá no fundo”

Visconde de Sabugosa (Monteiro Lobato em *O Poço do Visconde*)

Resumo

SARMENTO, David de Figueiredo. Método Gravimétrico na Bacia do Espírito Santo. 2007, 62p. 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.

Neste trabalho, encontram-se descritos alguns aspectos do método gravimétrico de prospecção. Está subdividido em 7 partes. A quarta refere-se à geologia da Bacia do Espírito Santo. Na quinta discutem-se os princípios teóricos do método gravimétrico. Na sexta discute-se os resultados obtidos e as soluções encontradas para determinados problemas, pertinentes a um levantamento gravimétrico realizado na bacia do Espírito Santo. As conclusões são apresentadas na última parte.

Palavras-chave: bacia; método; anomalia.

Abstract

SARMENTO, David de Figueiredo. Método Gravimétrico na Bacia do Espírito Santo.: Gravimetric Method in the Espírito Santo Basin. 2007, 62p. 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.

Some aspects of the gravimetric method as applied to geophysical prospection are described in this work. The fourth chapter deals with the geology of the Espírito Santo sedimentary basin. Following there is a brief introduction to the theoretical principles of the gravimetric method. In the sixth chapter there is an analysis of some case studies using gravimetric surveys of the Espírito Santo basin. The conclusions are presented in the last chapter.

Palavras-chave: basin; method; anomaly.

Lista de figuras

Figura 1 Mapa de localização das províncias geológicas da Bacia do Espírito Santo	6
Figura 2 Classificação das Bacias Sedimentares segundo Klemme e Szatimari	7
Figura 3 Esquema das bacias sedimentares brasileiras.....	8
Figura 4 Carta Estratigráfica da Bacia do Espírito Santo.....	11
Figura 5 Seção Sísmica na Bacia do Espírito Santo	17
Figura 6 Mapa Batimétrico da região da bacia do Espírito Santo.....	23
Figura 7 Arcabouço tectono-magmático da região do Complexo Vulcânico de Abrolhos.....	24
Figura 8 Seção Strike no campo de Rio Itaúnas	26
Figura 9 Representação esquemática do Campo de Cação	27
Figura 10 Campo de Cangoá.....	28
Figura 11 Campo de Lagoa Parda.....	28
Figura 12 Mapa BOUGUER da bacia do Espírito Santo.....	44
Figura 13 Interpretação de anomalias na bacia do Espírito Santo	47

Sumário

Agradecimentos	v
Resumo	vii
<i>Abstract</i>	viii
Lista de figuras	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	2
3 METODOLOGIA	3
4 GEOLOGIA DA BACIA DO ESPÍRITO SANTO	4
4.1 Introdução	4
4.1.1 Contexto Geológico	4
4.1.2 Generalidades sobre a bacia	5
4.2 Evolução exploratória	9
4.3 Estratigrafia	11
4.4 Geologia Estrutural	15
4.5 Evolução Tectonossedimentar	18
4.6 Magmatismo	21
4.6.1 Complexo Vulcânico de Abrolhos	23
4.7 Geologia do Petróleo	25
4.7.1 Sistemas petrolíferos	25
5 MÉTODO GRAVIMÉTRICO	29
5.1 Introdução	29
5.2 Princípios Fundamentais	29
5.2.1 Lei da Atração Universal da Gravidade	29
5.2.2 Aceleração da Gravidade	30
5.3 Gravidade da Terra	31
5.3.1 Variação da Gravidade com a latitude	31
5.3.2 Geóide	32
5.4 Redução dos Dados Gravimétricos	33
5.4.1 Correção de Latitude	34
5.4.2 Correção de Elevação (Ar-Livre)	35
5.4.3 Correção Bouguer	36

5.4.4 Correção Topográfica de Terreno.....	36
5.4.5 Correção de Maré	37
5.4.6 Correção da Variação (DRIFT) do instrumento	38
5.4.7 Correção de Eötvös	38
5.4.8 Mapa Bouguer	39
5.5 Interpretação.....	40
5.5.1 Método Direto	40
5.5.1.1 Corpos Tridimensionais	40
5.5.1.2 Corpos Bidimensionais	41
5.5.2 Método Inverso	42
5.5.3 Realce dos dados e imageamento	42
6 ESTUDO DE CASO.....	43
6.1 Introdução.....	43
6.2 Interpretação Gravimétrica na bacia do Espírito Santo	43
7 CONCLUSÕES.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

A prospecção gravimétrica é utilizada como ferramenta de exploração, rápida e econômica, na investigação da configuração estrutural de uma bacia sedimentar. Este sistema permite a seleção de áreas mais favoráveis, apresentadas em forma de anomalias, indicativas de regiões onde os estudos sísmicos devem ser efetuados. Sua aplicabilidade é bem variada, incluindo desde análises que se referem a corpos localizados na superfície ou em subsuperfície, até a determinação da espessura da crosta, passando pela localização, identificação e avaliação do potencial econômico de jazidas diversas como petróleo, carvão, sal, assim como de matéria prima para indústria de cerâmica e construção.

2 OBJETIVO

O objetivo geral dessa monografia é contribuir para o entendimento do método gravimétrico, em relação aos conceitos, requisitos e aplicação.

O objetivo específico é apresentar o estudo de um caso de aplicação do método gravimétrico na bacia do Espírito Santo, baseado no artigo de Edyr de Oliveira e Paulo J. M. de Castro, "Problemas de Interpretação Gravimétrica no Brasil", que discute os resultados obtidos em diversas bacias sedimentares brasileiras, quanto à aplicação do método gravimétrico, as soluções encontradas para determinados problemas, e as hipóteses aventadas para o equacionamento de outros.

3 METODOLOGIA DO ESPÍRITO SANTO

A proposta usa a metodologia de revisão bibliográfica. As informações sobre os artigos relacionados à Bacia do Espírito Santo foram coletadas no Portal de Informações de Dados da rede interna da PETROBRAS, que inclui o sistema PETROSIN (interno), AAPG, Science Direct.

O item 5 foi fundamentado nas orientações de BOMFORD, DEHLINGER, FERNADES, LUIZ & SILVA, RIKITAKE & HAGIWARA, ROCHA e TELFORD, presentes na bibliografia deste trabalho.

O item 6 foi baseado no artigo de Edyr de Oliveira e Paulo J. M. de Castro, "Problemas de Interpretação Gravimétrica no Brasil".

4 GEOLOGIA DA BACIA DO ESPÍRITO SANTO

4.1 Introdução

4.1.1 Contexto Geológico

O continente sulamericano pode ser dividido em regiões de acordo com a atividade tectônica mais atuante desde a quebra do paleocontinente Gondwana na era Mesozóica. Desta forma podem ser caracterizados quatro domínios principais na placa sulamericana: (1) interior (cráton), com espessas camadas de sedimentos paleozóicos e mesozóicos; (2) a oeste, margem convergente com intensa atividade orogênica (Andes); (3) a Leste, margem divergente (passiva), com extensão de aproximadamente 10.000 Km; e (4) ao Norte, região (Caribe) associada a regime tectônico transcorrente em contato com a placa caribenha.

Na margem Leste estão as bacias mais relevantes do ponto de vista petrolífero, uma das quais é a bacia do Espírito Santo (BES). Em comparação com a plataforma sulamericana, que é primordialmente formada por rochas ígneas e metamórficas arqueanas e que está consolidada desde o Neoproterozóico (540 Ma), a margem Leste é jovem, tendo sua origem sido iniciada apenas na era Mesozóica (250 Ma). Em linhas gerais, a evolução se iniciou com uma fase rifte, com deposição de sedimentos lacustres, seguida por deposição salina em tempos aptianos e finalmente uma fase marinha que culmina com a invasão do Atlântico. Como cicatrizes desta fase têm-se as presenças de várias bacias rifte abortadas, com grábens em direção ao cráton (aulacógenos), como Potiguar e

Recôncavo/Tucano/Jatobá que se desenvolveram nos estágios iniciais do Atlântico Sul (neocomiano) e foram abortadas no Aptiano.

A margem divergente da placa sulamericana se estende por 10.000 Km, do delta do Orinoco, na Venezuela, até a terra do fogo, na Argentina. Como dito no parágrafo anterior, suas bacias sedimentares compartilham algumas características gerais como a presença de seqüências rifte, transicional e marinha. Entretanto, é importante notar que a abertura do Atlântico foi um evento diacrônico ao longo da costa, tendo ocorrido no fim do triássico no Norte, no jurássico no Sul da Argentina, no Neocomiano na margem brasileira e no Aptiano na margem equatorial. Por ter se prolongado durante um período de aproximadamente 100 Ma é de se esperar que, descontadas características gerais, as bacias sedimentares em questão tenham estruturas bastante diversificadas.

4.1.2 Generalidades sobre a bacia

A Bacia está localizada na região costeira e margem continental, dos estados do Espírito Santo e da Bahia, entre os paralelos de 18° 21' e 21°, abrangendo aproximadamente 20.000 Km² offshore, figura 1. Juntamente com suas "bacias irmãs" de Campos e Santos a bacia do Espírito Santo é um bom exemplo de bacia formada em margem continental passiva. Interessante notar que, rigorosamente falando, não há separação entre as três bacias em regiões de águas profundas. Em águas rasas os limites se dão no arco de Vitória (ES/Campos, Pré-cambriano) e no arco de Cabo Frio (Campos/Santos). É limitada ao sul pelo alto de Vitória, a oeste pelo embasamento cristalino da Faixa Ribeira e ao norte, esta bacia é limitada pelo paleocânion de Mucuri. GUERRA (1989) descreve este último como um limite arbitrário, assim como as extensões para o mar dos limites norte e sul sendo que

BIASSUSI (1990) cita ainda o Complexo Vulcânico de Abrolhos como o limite leste da bacia. Seu embasamento é constituído por rochas ígneas e metamórficas pré-cambrianas. Assim como em Campos e Santos, houve importante deposição de evaporitos durante a fase transicional ("proto-golfo"). Atualmente as barreiras de sal são importante entrave à exploração de hidrocarbonetos nestas regiões.

A principal característica que a distingue das bacias de Campos e Santos é a ocorrência de intensa atividade vulcânica, como uma extrusão de basalto no neoaptiano conhecida como Formação Cabiúnas. Já na Formação Cricaré temos sedimentação sin-rifte com espessura de 5.000 m, desde o Neocomiano até o Aptiano da qual resultam arenitos, coquinas, calcilutitos e dolomitas com folhelho negro.

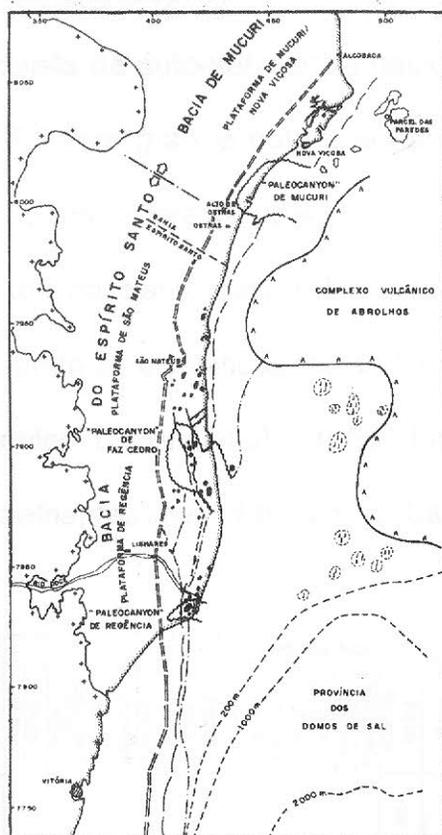


Figura 1 - Mapa de localização das províncias geológicas da Bacia do Espírito Santo. Fonte: BIASSUSI (1990).

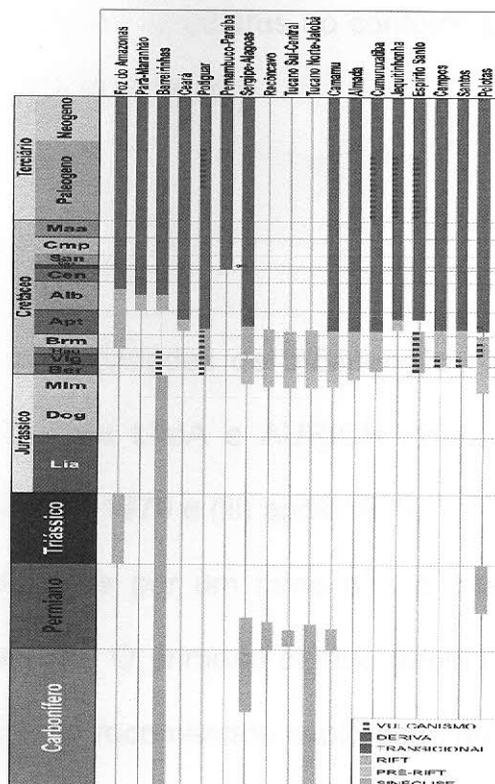


Figura 3 - Classificação das Bacias Sedimentares segundo Klemme e Sztimari. Fonte: Modificado de Souza e Lima (2003).

O intenso magmatismo terciário proporcionou o desenvolvimento de uma ampla plataforma carbonática, que alargou a plataforma continental desta bacia em relação às outras adjacentes, criando uma estruturação um tanto quando peculiar que, na fase pós-rifte, gerou diferentes compartimentações estruturais nas regiões norte e sul (GUERRA, 1989). Além do intenso magmatismo que gerou o Banco de Abrolhos e da notável compartimentação estrutural, a Bacia do Espírito Santo possui ainda outras peculiaridades, como duas províncias de domos salinos (GUERRA, 1989).

Conseqüências do episódio de magmatismo que gerou o Banco de Abrolhos incluem, além da influência sobre a fisiografia e batimetria, importantes modificações na história geológica mais recente das bacias do Espírito Santo,

Campos e Santos, que as tornaram singulares no contexto pós-rifte da evolução da margem leste (SOBREIRA, FRANÇA, 2006).

4.2 Evolução Exploratória

A evolução histórica das atividades de prospecção na BES, resumidamente extraída de COSMO (1991) e de LIMA e AURICH (1992), apresenta três fases principais: (i) 1959-1971, (ii) 1972-1979 e (iii) após 1979.

1. Esta fase é caracterizada por um ritmo pouco intenso das atividades de perfuração e exploração. O primeiro estudo geológico regional na BES foi realizado em 1959. Este recomendou exploração geofísica nas margens do rio Doce e na costa atlântica adjacente (COSMO, 1991). Mas a exploração efetivamente começou no início dos anos 50 com levantamentos sísmicos, gravimétricos, magnetométricos e com um poço estratigráfico teste perfurado em 1959 (LIMA, AURICH, 1992).

Um levantamento gravimétrico em 1958 indicou a presença de um baixo estrutural confirmado por uma sondagem estratigráfica teste em 1968. As zonas de óleo foram testadas, mas o poço foi abandonado como subcomercial (COSMO, 1991). Neste mesmo período foi realizada uma das primeiras sondagens offshore do Brasil com a perfuração do poço 1-ESS-1. Os extensivos levantamentos geofísicos e as sondagens estratigráficas permitiram o delineamento dos principais padrões estruturais e estratigráficos que resultaram na primeira descoberta de óleo onshore realizada em 1969 na plataforma de São Mateus.

2. Baseando-se no mapeamento sísmico da superfície basal de um paleocânion foi descoberto o paleocânion de Fazenda Cedro e do campo

com esse mesmo nome. A partir deste fato, as atividades de perfuração assumiram um caráter mais intensivo iniciando também os processos de exploração. Os levantamentos sísmicos realizados até então, guiados por estudos prévios e interpretações fotogeológicas, resultaram no delineamento de outro padrão geral de paleocânion, denominado paleocânion de Regência. Um programa de reflexão sísmica na área foi realizado em 1978 (387 Km de linhas sísmicas) visando aumentar a definição dos limites e para propósitos exploratórios. A produção de óleo em 1978 era de 7.600 bpd.

3. Com a descoberta do campo de Lagoa Parda, verificou-se uma notável intensificação no processo de avaliação da bacia, com grande ênfase nas atividades de desenvolvimento.

Até 1990 existiam 285 poços exploratórios (área emersa), 66 poços pioneiros na plataforma continental e 36 campos produtores, dos quais apenas 1 se encontrava na porção submersa (BIASSUSI, 1990). Até 2002, haviam sido perfurados 405 poços exploratórios e levantados 19.715 Km de sísmica em terra. No mar, havia 129 poços exploratórios e 125.380 Km de linhas sísmicas. Já foram descobertas 51 acumulações de hidrocarbonetos, sendo 46 na parte terrestre, com volumes da ordem de 467 MM m³ de Óleo-Equivalente *in place* (MILANE *et al.*, 2000). Hoje, com uma melhor aquisição de sísmica de reflexão e melhor processamento, juntamente com dados paleontológicos, tornou-se mais fácil mapear bases dos paleocânions, que são os principais alvos exploratórios, e detectar as trapas.

4.3 Estratigrafia

A análise estratigráfica adotada obedece à precedência das definições de VIEIRA *et al.* (1994), Figura 4. Atualmente, as rochas sedimentares da Bacia estão organizadas em três Grupos: Nativo, Barra Nova e Espírito Santo, com idades que variam do Eocretáceo (Neocomiano) até o Terciário.

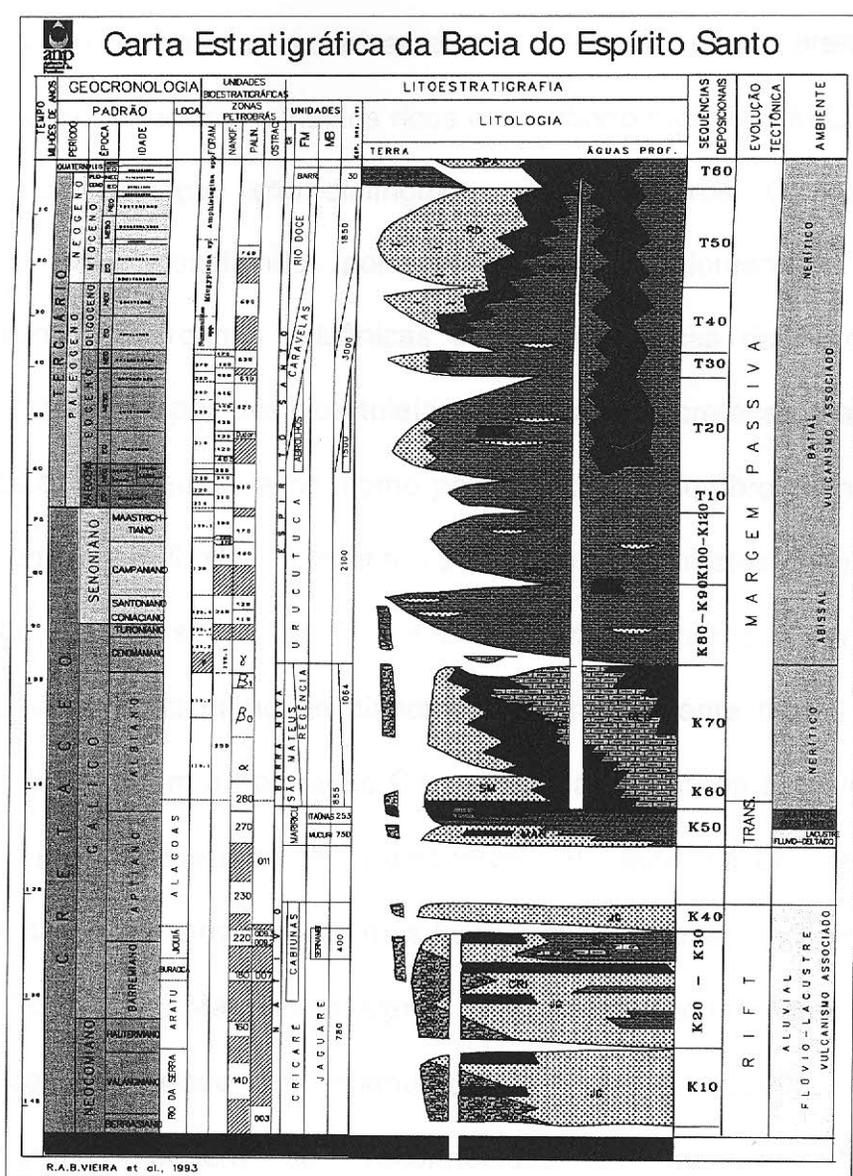


Figura 4 - Diagrama estratigráfico da Bacia do Espírito Santo. Retirado de VIEIRA *et al.* (1994)

O embasamento sob a bacia do Espírito Santo é formado por um complexo de terrenos ígneos e metamórficos pertencentes à Província da Mantiqueira, representado por gnaisses, granulitos e migmatitos (BIASSUSI, 1990).

O Grupo Nativo congrega clásticos grossos, folhelhos, calcáreos e evaporitos das formações Cricaré e Mariricu. A idade conhecida destas rochas vai do Berriasiano (Rio da Serra) até o eoalbio (neoalagoas).

A Formação Cricaré caracteriza-se por conglomerados, arenitos, coquinas e dolomitos, associados a folhelhos ricos em carbono orgânico (MILANI *et al.*, 2000).

Nesta Formação são distinguidos dois membros. O Membro Jaguaré é essencialmente constituído por arenitos e conglomerados, frequentemente intercalados com rochas vulcânicas e vulcanoclásticas da Formação Cabiúnas. Esta é constituída por basaltos toleíticos de idade eocretácea, caracterizada como derrames e, em alguns casos, como paleossolos. O Membro Sernambi é composto por camadas de folhelhos, calcáreos e margas. Os contatos, inferior e superior, da Formação Cricaré são discordantes com o embasamento e com os arenitos do Membro Mucuri. As datações disponíveis, principalmente dados de palinologia e ostracodes, atribuem à Formação Cricaré as idades Rio da Serra/eoalagoas (Vieira *et al.* 1994). A interpretação paleoambiental deste pacote sedimentar aponta sistemas de leques aluviais, sistemas fluviais entrelaçados e lacustres.

A Formação Mariricu designa as rochas sedimentares siliciclásticas e evaporíticas de idade neoptiana (MILANI *et al.*, 2000). Nesta unidade litoestratigráfica podem ser reconhecidos os membros Mucuri, formado predominantemente de clásticos grosseiros, arenitos e conglomerados com delgadas intercalações de folhelhos e níveis evaporíticos, e Itaúnas, composto por um pacote de evaporitos - anidritas e halitas - intercalado com finas camadas de

folhelhos negros. A Formação Mariricu assenta discordantemente sobre o embasamento ou com a Formação Cricaré (discordância pré-neoalagoas). Suas rochas são resultados da primeira ingressão marinha na bacia. As rochas clásticas foram depositadas por sistemas fluviais entrelaçados e deltáicos, e os evaporitos provêm de Sabkhas e sub-bacias. A partir de determinações bioestratigráficas atribui-se idade neoalagoas para esta unidade (Vieira *et. al.* 1994).

O Grupo Barra Nova representa a primeira sedimentação essencialmente marinha na bacia. Reúne as formações São Mateus e Regência, compostas por arenitos grossos de fácies marinha marginal que gradam para calcários no sentido do mar (MILANI *et al.*, 2000), com idades que compreendem desde o eoalbiano até o eocenomaniano.

A Formação São Mateus corresponde a espessos pacotes de arcóseos médio/grosso, castanhos e cinzentos. Seu contato inferior com a Formação Mariricu é concordante e o superior é gradacional ou interdigitado lateralmente com a Formação Regência, ou discordante sob o Grupo Espírito Santo. As datações bioestratigráficas com base em palinomorfos, foraminíferos, foraminíferos plantônicos e nanofósseis calcários conferem idade albiana à Formação São Mateus (Vieira *et. al.* 1994). Interpreta-se para as rochas da Formação São Mateus a deposição em antigos leques aluviais e costeiros associados à ambiente marinho raso.

A Formação Regência é caracterizada por espessas camadas carbonáticas constituídas por calcarenitos e calcirruditos de plataforma rasa. Seu contato inferior é gradacional com as formações São Mateus e Mariricu, e discordante com o embasamento. As determinações bioestratigráficas conferem idade albiana aos

carbonatos (Vieira *et. al.* 1994). O ambiente de deposição preconizado para esta unidade era marinho raso, em plataforma carbonática.

O Grupo Espírito Santo distribui-se do Cenomaniano ao Recente, formando um sistema transgressivo e posteriormente regressivo, onde se reconhece o ambiente nerítico, batial e abissal. Segundo MILANI *et al* (2000), corresponde a uma seqüência de plataforma progradacional, formada por uma face arenosa proximal (Formação Rio Doce), intercalada com carbonatos (Formação Caravelas); o conjunto torna-se pelítico em seu contexto mais distal, junto ao talude e à bacia profunda (Formação Urucutuca).

A Formação Urucutuca é constituída por folhelhos cinza-escuro a claros com intercalações delgadas de calcilutitos e margas. Interpostos nestes sedimentos ocorrem pequenos níveis de arenitos turbidíticos. Seus contatos, superior e lateral, com as formações Rio doce e Caravelas são transicionais. A idade Cenomaniana a Recente é conferida pela presença de nanofósseis calcários, palinomorfos e foraminíferos plantônicos (Vieira *et. al.* 1994). Esta sedimentação pelítica foi depositada em águas profundas e ambientes de talude.

A Formação Caravelas é composta predominantemente por calcarenitos bioclásticos e calcilutitos plataformais. Seus contatos inferior, superior e lateral são gradacionais com as formações Urucutuca e Rio Doce; localmente, os carbonatos repousam sobre as rochas vulcânicas da Formação Abrolhos. Sua idade terciária, entre o mesoeoceno e o Holoceno, é interpretada a partir da presença de foraminíferos bentônicos (Vieira *et. al.* 1994). Esta unidade foi depositada em plataforma carbonática.

A Formação Rio Doce designa os arenitos e carbonatos que ocorrem ao longo da borda oeste da bacia. Seu contato inferior é gradacional com as formações

Urucutuca e Caravelas, ou discordante com as formações Regência, São Mateus, Mariricu ou mesmo o embasamento. Estas rochas foram depositadas por leques costeiros e plataforma carbonática.

A Formação Abrolhos, de idade neopaleoceno/eoceno, é caracterizada por uma associação litológica complexa aflorante no arquipélago de Abrolhos. Engloba basaltos de composição toleítica, material piroclástico e sedimentos intercalados, assumindo uma tendência subalcalina a alcalina. Trata-se de um vulcanismo de conduto central em ambiente marinho e acumulado sobre plataforma continental estreita. Sua área de maior ocorrência é na porção submersa destas bacias, incluindo-se aí o Banco de Abrolhos (ALMEIDA; CARNEIRO; MIZUSAKI, 1996).

4.4 Geologia Estrutural

Os episódios tectônicos prévios à fragmentação do Gondwana (episódios Transamazônico e Brasileiro, por exemplo) estabeleceram lineamentos pré-cambrianos importantes na estruturação da Bacia do Espírito Santo. Estes lineamentos facilitaram o rifteamento nas zonas de fraquezas da porção sul do Gondwana gerando uma série de falhamentos normais e complexos.

O embasamento da bacia do Espírito Santo consiste em gnaisses, granulitos, migmatitos e granitóides, cuja estruturação possui direção geral N/NE (CORDANI *et al.* 1984). Esses constituem a Faixa Ribeira, que sofreu retrabalhamento tanto no ciclo Transamazônico quanto Brasileiro. Desses períodos foi herdada uma estruturação na direção N20 - 30E. Essa direção controla fortemente as orientações das falhas normais no interior da bacia.

As seqüências sedimentares dos andares Jiquiá e Alagoas apresentam padrão tectônico semelhante ao embasamento, prevalecendo o sistema N/NE de falhamentos normais, principal condicionador da estruturação da fase rifte.

A partir do Albiano, a bacia evoluiu para um ambiente marinho, enquanto a formação de crosta oceânica, decorrente do estiramento litosférico, marcava a ruptura definitiva do Gondwana. Durante a abertura do Atlântico Sul foram geradas fraturas de extensão de direção preferencial N60-80E, que segundo GUERRA (1989), poderiam ter controlado a estruturação do paleocânion de Regência. Ao final da fase distensiva, deu-se o resfriamento da anomalia térmica produzida durante a extensão litosférica, levando à contração e conseqüente subsidência térmica. Esta, ampliada pela sobrecarga sedimentar e pela ascensão do nível do mar, causou o basculamento progressivo da plataforma continental em direção ao mar e o soerguimento das regiões emersas adjacentes. Este basculamento provocou o deslizamento gravitacional dos sedimentos, condicionando a estruturação pós-rifte da bacia, fortemente influenciada pela tectônica halocinética. A bacia apresenta diferentes taxas de extensão nos setores norte e sul, com as falhas lítricas mantendo-se ativas por mais tempo na área sul. Estruturas localizadas de compressão são mapeadas na porção norte da bacia, e atribuídas por GUERRA (1989), a um evento transcorrente de direção noroeste, iniciado no Neo-Alagoas. Existem ainda os lineamentos de direção N45-60W, relacionadas às zonas de cisalhamento reativadas verticalmente, que segundo GUERRA (1989), exerceram controle no paleocânion de Fazenda Cedro.

Do Neocretáceo ao Terciário, o estilo tectônico é predominantemente controlado pelo fluxo de sal, porém com forte influência dos derrames da Formação Abrolhos. Segundo MORIAHK (2003), o estilo de tectônica de sal apresentado é condicionado

pela sobrecarga das rochas vulcânicas de Abrolhos formando frentes de empurrão com vergência na direção do continente. Numa primeira fase de halocinese, ocorreu a formação de falhas extensionais normais com mergulho predominantemente para leste. Numa Segunda fase, a barreira formada pela extrusão e intrusão de lavas basálticas e rochas ígneas na região de Abrolhos resultou num obstáculo para o fluxo de sal na direção da bacia profunda, causando a mobilização de evaporitos e folhelhos em direção contrária (oeste), associada a falhas de empurrão com vergência na direção do continente, e formação de feições compressivas (Figura 5). No terceiro estágio, ocorreu a formação de diápiros de sal penetrante nas camadas mais jovens, alguns dos quais afetam o Terciário Superior e o Quaternário.

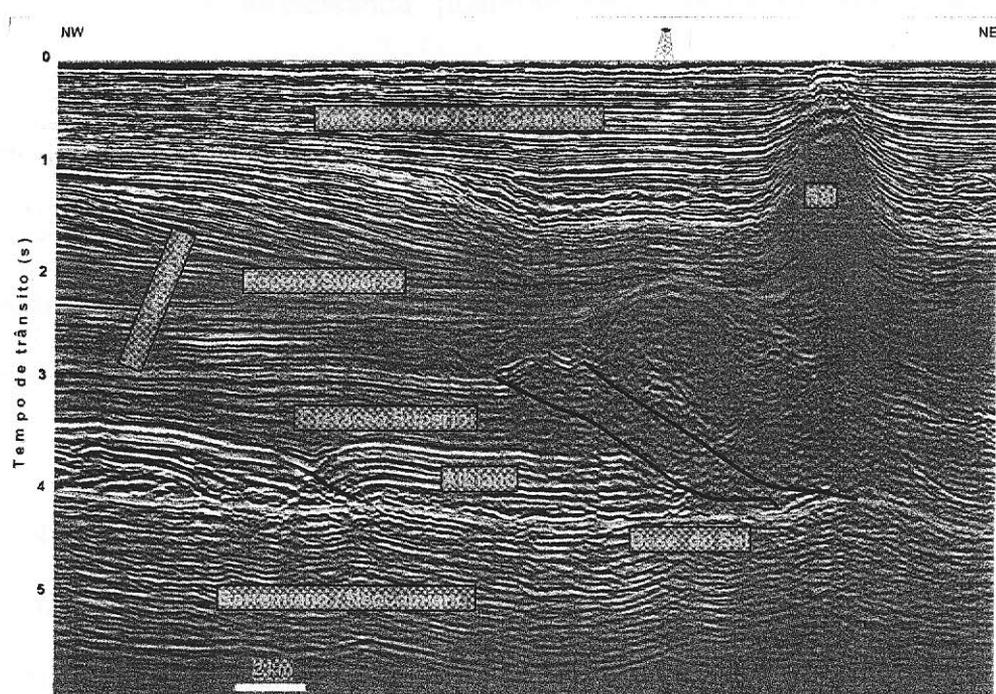


Figura 5 - Seção sísmica na Bacia do Espírito Santo (parte marinha), mostrando seqüências estratigráficas Rifte e Pós-rifte e estruturas extensionais e compressivas características da tectônica do sal. FONTE: BIZZI et al. (2003).

4.5 Evolução Tectonossedimentar

A Bacia do Espírito Santo é uma bacia típica de margem divergente. Sua origem está relacionada ao processo de rifteamento que afetou o continente Gondwana durante o Eocretáceo. Ao longo da sua evolução sedimentar podem-se individualizar três grandes unidades com características tectono-sedimentares distintas: (1) Seqüência Continental - abrange os basaltos da Formação Cabiúnas e rochas continentais da Formação Cricaré, afetados pela tectônica rifte; (2) Seqüência Transicional, caracterizada pela sedimentação siliciclástica-evaporítica da Formação Mariricu e relativa quiescência tectônica; e (3) Megasseqüência Marinha, caracterizada pela deposição marinha franca, carbonática no início e predominantemente siliciclástica posteriormente, representada pelas formações Urucutuca, Caravelas, Rio Doce e Abrolhos, afetadas por intensa tectônica adiastrófica.

Do Neocomiano ao eoaptiano, sobre o embasamento Pré-cambriano, foi instalado um sistema de vales em rifte como resultado de esforços tensionais associados à ruptura crustal do continente Gondwana. O registro sedimentar ocorreu em depocentros alongados controlados por falhas, cujas irregularidades paleotopográficas foram responsáveis pela sedimentação de um amplo espectro de fácies, desde conglomerados junto às falhas até pelitos mais distais, constituindo-se desta sucessão sedimentar flúvio/lacustrina a Formação Cricaré.

Na transição Barremiano/Aptiano, um período de peneplanização do relevo da bacia, condicionou a sedimentação posterior sobre uma ampla discordância pós-rifte de caráter regional, indicativa do término da fase de estiramento litosférico e rifteamento da crosta continental.

O neoptiano marca o início da incursão marinha na bacia. A seqüência sedimentar é representada pela Formação Mariricu, caracterizada por uma seção basal de clásticos do Membro Mucuri, cobertos por um pacote de evaporitos do Membro Itaúnas. Segundo CHANG *et al.* (1992), esta seqüência sedimentar sofreu influência da estreita passagem do mar entre as costas brasileiras e africanas, responsável pela restrição da circulação de água que em conjunto com o clima quente e seco vigente na época conseguiu manter alta a taxa de evaporação em relação ao influxo de água, resultando na deposição de espesso pacote evaporítico.

Durante o Albiano-Cenomaniano, devido ao progressivo afastamento entre as placas da América do Sul e África, a bacia evoluiu para condições marinhas rasas propiciando o desenvolvimento de uma ampla plataforma carbonática instalada sob um clima quente e seco. Sua deposição ocorreu em meio à instabilidade tectônica. Nas áreas litorâneas, leques aluviais se interdigitam com a seção carbonática. A seção Albiana é caracterizada pelos carbonatos da Formação Regência e os arenitos da Formação São Mateus. Localmente, os arenitos constituem-se em excelentes reservatórios, enquanto que os calcáreos, folhelhos e margas da Formação Regência representam os geradores albianos da bacia. Na transição eoalbiano/mesoalbiano, a evolução da bacia é intensamente influenciada pela tectônica adiastrófica relacionada à movimentação de sal (halocinese) originada pela sobrecarga de sedimentos e basculamento da bacia. A halocinese teria criado uma série de falhas lítricas que se propagaram para a sedimentação mais nova, criando uma estruturação complexa associada à tectônica salífera, com almofadas de sal, cascos de tartaruga, diápiros de sal, muralhas de sal, falhas extensionais e compressionais.

No fim do Albo/Cenomaniano, o progressivo aumento da taxa de basculamento para leste e a elevação do nível do mar levou ao aprofundamento da bacia. Como consequência, a plataforma carbonática é afogada, marcando em definitivo a fase oceânica com o estabelecimento do ambiente marinho profundo a batial.

Durante o Cenomaniano passa a dominar uma sedimentação pelítica em ambiente abissal representada basicamente por folhelhos e margas, com intercalações de arenitos turbidíticos, depositados em ambiente de talude, que correspondem à Formação Urucutuca. Segundo PEREIRA (1992), a base da Formação Urucutuca representa um marco na história deposicional da bacia, pois está relacionada à importante perturbação tectônica, iniciada no neoturoniano e ligada a esforços gerados por reajustes gerais da geometria ou na velocidade de deslocamento/criação da placa Sul-americana. Esta etapa coincide com a principal fase de escavação dos paleocânions de Fazenda Cedro e Regência.

Para BIASSUSI (1990), os paleocânions tiveram sua implementação controlada por sistemas de falhas do embasamento e proporcionaram situações ideais para a formação de acumulações de hidrocarbonetos. A implantação dos paleocânions permitiu a divisão da porção emersa da bacia em três províncias geológicas distintas (Figura 1): (1) Plataforma de São Mateus, a norte, que constitui as partes mais rasas, caracterizadas por reservatórios arenosos de idade Alagoas; (2) Plataforma Regência, a sul, onde ocorreu o desenvolvimento de extensa plataforma carbonática durante o albio; (3) e, intercalados a esta, os paleocânions de Fazenda Cedro e Regência, onde os reservatórios são arenitos turbidíticos com idades que variam do neocretáceo ao Eoceno.

No neopaleoceno/Eoceno um intenso magmatismo alcalino, representado na bacia pela Formação Abrolhos, alterou a fisiografia da porção leste desta, com

expressivos derrames de lavas seguidos pela construção de uma plataforma carbonática sobre o substrato vulcânico, denominada Banco dos Abrolhos (ASMUS; GOMES; PEREIRA, 1971).

Do mesoeoceno ao Recente, instalou-se um sistema de leques costeiros, plataforma-talude, representado por arenitos de ambiente marinho nerítico/transicional da Formação Rio Doce, carbonatos de águas rasas depositados em ambiente de talude da Formação Caravelas e a parte superior dos pelitos da Formação Urucutuca.

4.6 Magmatismo

O processo de rifteamento que, do Neojurássico ao Eocretáceo, deu origem ao Oceano Atlântico Sul foi acompanhado e sucedido por inúmeros eventos magmáticos nas bacias da margem continental, nos altos que as separam, bem como no continente emerso adjacente (ALMEIDA; CARNEIRO; MIZUSAKI, 1996). Na literatura são descritos dois importantes episódios de vulcanismo: um ligado ao processo de rifteamento no cretáceo, e outro ligado possivelmente a um hot spot. O estudo do magmatismo na BES é importante porque, além de outras coisas, nesta bacia a zona de geração (janela de geração e craqueamento térmico) pôde ser alcançada a profundidades menores do que as convencionais devido ao sobreaquecimento nas porções proximais ao derrame que originou o CVA. O vulcanismo basáltico da fase rifte, de idade Neojurássica/Eocretácea, representa-se amplamente nas camadas inferiores das bacias da região sul-sudeste, Santos e Campos, e estende-se à Bacia do Espírito Santo, assim como aos altos que as separam Cabo Frio e Vitória (ALMEIDA; CARNEIRO; MIZUSAKI, 1996). As rochas ígneas básicas da Formação Cabiúnas ocorrem principalmente na porção terrestre

da Bacia do Espírito Santo, sob a forma de derrames de basalto de composição toleítica eventualmente associados com paleossolos (ALMEIDA; CARNEIRO; MIZUSAKI, 1996).

A Formação Abrolhos, representativa do segundo evento (hot spot), é caracterizada por uma associação litológica complexa, englobando rochas ígneas básicas de composição toleítica a alcalina, vulcanoclásticas e eventuais intercalações de rochas sedimentares. Trata-se de um vulcanismo de conduto central em ambiente marinho e acumulado sobre plataforma continental estreita. Sua área de maior ocorrência é na porção submersa destas bacias, incluindo-se aí o Banco de Abrolhos (ALMEIDA; CARNEIRO; MIZUSAKI, 1996).

O Complexo Vulcânico de Abrolhos (CVA) é uma província ígnea basáltica formada durante o Paleogeno na margem continental leste brasileira, no segmento correspondente às bacias do Espírito Santo, Cumuruxatiba e Mucuri \cite{sobreira}.

Ao olhar a figura 6, percebemos a Cadeia Vitória-Trindade e o Banco de Abrolhos, uma feição peculiar a esta bacia que estende grandemente a quebra da plataforma nesta região.

A cadeia vulcânica Vitória-Trindade orienta-se a leste-oeste, em direção à Bacia do Espírito Santo. É um conjunto de montes submarinos, guyots e, em seu extremo oriental se situam as ilhas de Trindade e Martim Vaz, formadas de produtos vulcânicos alcalinos (ALMEIDA 1965).

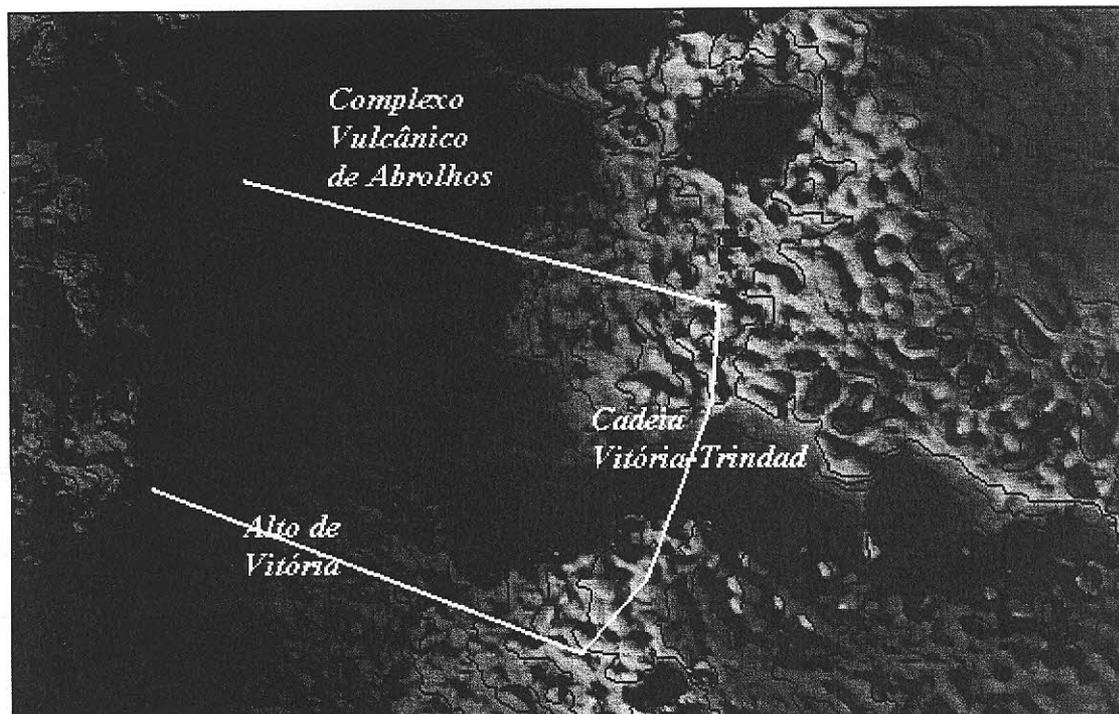


Figura 6 - Mapa Batimétrico da região da bacia do Espírito Santo. Em azul temos as isóbatas, e em amarelo, a porção emergida da BES. (Fonte: TOPEX)

4.6.1 Complexo Vulcânico de Abrolhos

Talvez a característica mais marcante da bacia ES seja a ocorrência de uma província vulcânica, o Complexo Vulcânico de Abrolhos (CVA). De acordo com os modelos atuais, Abrolhos teria sido formado já em tempos cenozóicos durante um importante evento magmático provavelmente associado a um ponto quente mantélico (hot spot), cujo ápice foi entre 60 e 40 Ma. Esta atividade provoca um rearranjo estrutural importante do neopaleoceno ao Eoceno. Por abranger uma grande extensão territorial, indo da linha de costa até praticamente a quebra da plataforma continental e por conta das alterações estruturais que causou, a presença de Abrolhos é importante para a correta caracterização da bacia e teria impactos em atividades exploratórias de hidrocarbonetos.

O CVA pode ser descrito como uma província ígnea basáltica, formada durante atividade vulcânica no Paleogeno. O vulcanismo desenvolveu-se já em ambiente

submarino e derramou basalto sobre crosta continental formada desde a fase rifte no eocretáceo. Os únicos afloramentos do CVA são cinco ilhotas na costa sul da Bahia.

Diferentemente de autores que descrevem o complexo vulcânico de abrolhos como uma província ígnea aproximadamente contínua, SOBREIRA E FRANÇA (2006) propuseram um modelo tectono-magmático baseado na integração de dados geológicos e geofísicos, no qual uma distribuição não-uniforme das rochas vulcânicas é sugerida bem como a localização de antigas câmaras magmáticas, possíveis focalizadoras do fluxo térmico (Figura 7).

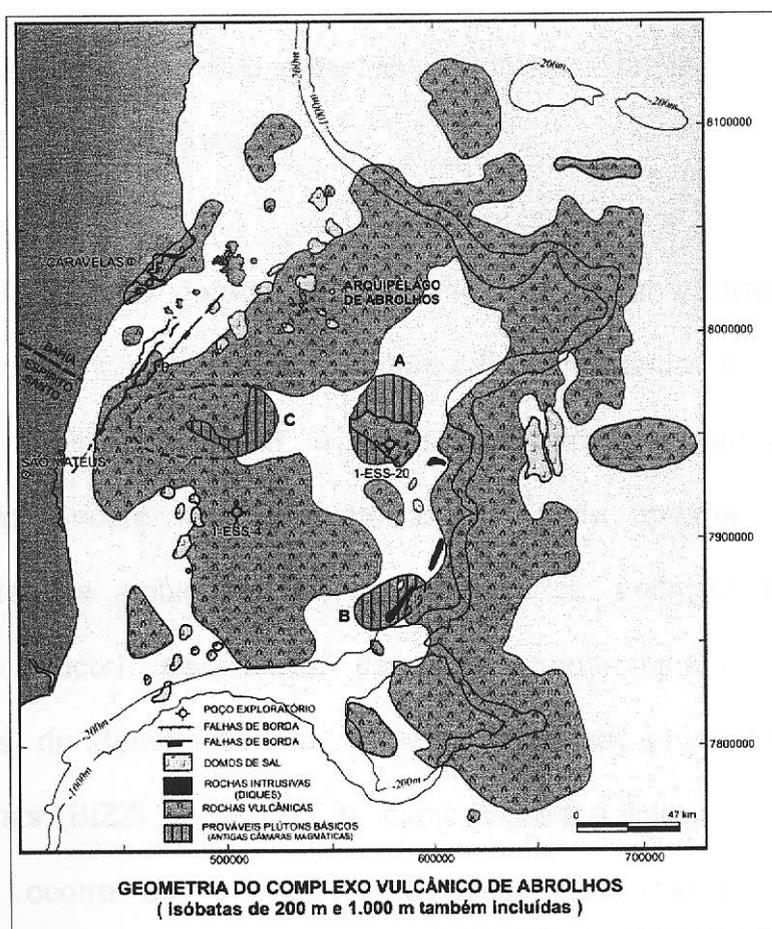


Figura7 - Modelo para o arcabouço tectono-magmático da região do Complexo Vulcânico de Abrolhos. Fonte: Sobreira e França (2006).

Também mencionam que, perifericamente a esta zona de ocorrência principal de rochas vulcânicas, teriam sido depositadas rochas sedimentares e

vulcanoclásticas mais jovens, que devido a uma menor sobrecarga, seriam possíveis locais de nucleação dos domos salinos e intrusões ígneas.

4.7 Geologia do Petróleo

Segundo a ANP, em 2001, foram descobertas na bacia do Espírito Santo, 51 acumulações de hidrocarbonetos, sendo 46 na parte terrestre. As reservas atuais são de 12 MM de M³ de óleo de 11 BB de M³ de gás.

4.7.1 Sistemas petrolíferos

Na BES são descritos dois sistemas petrolíferos: provado (!), provável ou suposto (?) e quatro plays, a saber:

1. Cricaré-Mucurí

Nesse sistema, o gerador é de idade Neocomiana/Barreimiana, sendo composto por folhelhos lacustres com carbono orgânico na faixa de 2-7%, com querogênio do tipo II, e espessuras que alcançam até 300 m da Formação Cricaré. Os reservatórios, de idade aptiana, são depósitos resultantes de ambientes fluviais entrelaçados, deltaicos e lacustres do Membro Mucurí, geralmente capeadas pelos folhelhos e evaporitos (anidritas) do Membro Itaúnas, onde as trapas são predominantemente do tipo Horsts (BIZZI *et. al.*, 2003), como mostra a figura 8. O óleo Cricaré também ocorre em trapas estratigráficas nos reservatórios arenosos turbidíticos da Formação Urucutuca. Engloba os campos de Rio Itaúnas, Ilha da Caçumba, Rio Preto, São Mateus, Rio São Mateus, Lagoa Parda e Fazenda Cedro.

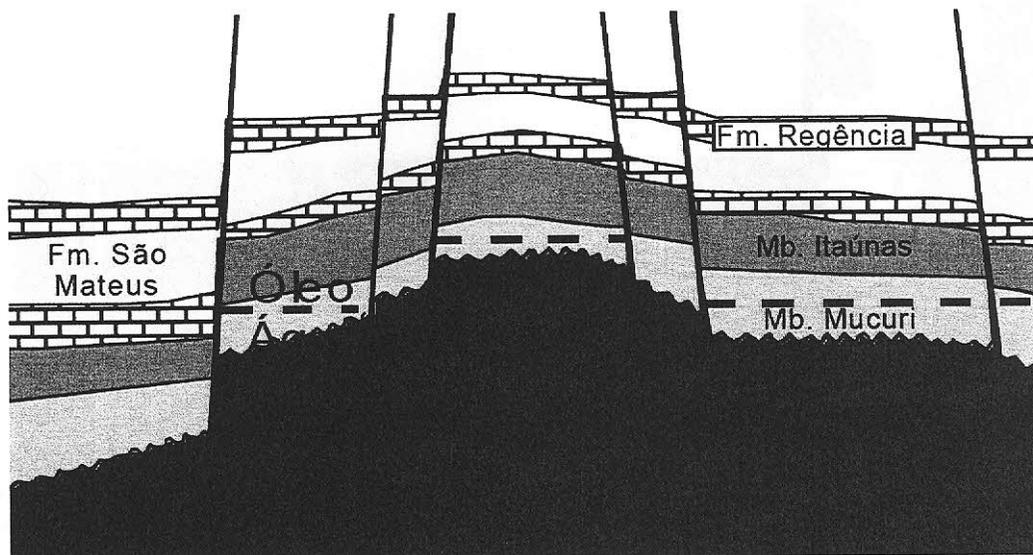


Figura 8 - Esquerda: Seção Strike no campo de Rio Itaúnas. Direita: Em verde, a área de Ocorrência do Play Mucuri. FONTE: Petrobrás, Marília Rodrigues de Castro, ANP.

2. Cricaré-Itaúnas (Play Itaúnas)

O gerador e o selante são os mesmos descritos no sistema Cricaré-Mucuri (!), mas os reservatórios são carbonatos secundários do Membro Itaúnas, Alagoas superior. Nesse play estão incluídos os campos de Fazenda São Jorge, Guriri e Lagoa Bonita.

3. Regência-São Mateus (Play Barra Nova)

Os geradores são os calcários, folhelhos e margas da Formação Regência, de idade albiana/cenomaniana. Os reservatórios são os arenitos da Formação São Mateus, também de idade albiana/cenomaniana. Nesse play, os selantes são os folhelhos da Formação Urucutuca e os calcilitos da Formação Regência. Um fato a ser enfatizado é que o gerador às vezes se comporta também como selante. As trapas são tanto do tipo estrutural, relacionadas a *rollovers*, quando do tipo estratigráficas (paleogeomórficas). O campo de Cação, Figura 9, está contido nesse play.

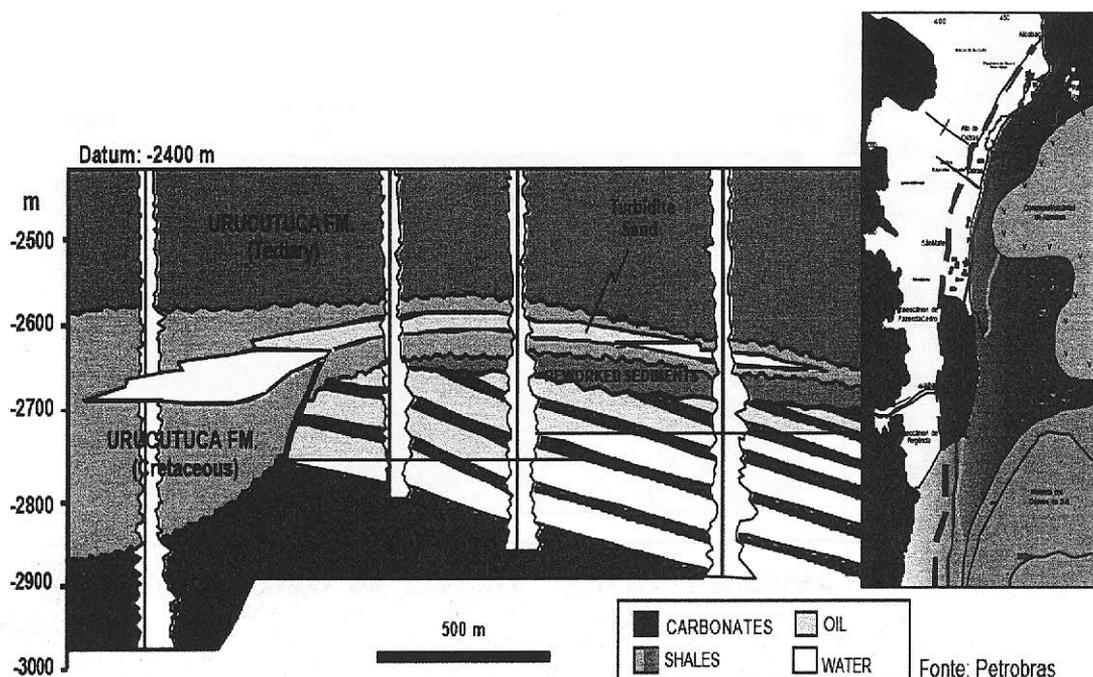


Figura 9 - Esquerda: Representação esquemática do Campo de Cação. No canto direito superior: Área de ocorrência do Play Barra Nova. FONTE: Petrobrás, Marília Rodrigues de Castro, ANP.

4. Regência-Urucutuca (Play Urucutuca)

O sistema petrolífero Regência-Urucutuca tem como geradoras os folhelhos da Formação Urucutuca; os calcários, folhelhos e margas da Formação Regência, e até os Folhelhos da Formação Cricaré. São calcilutitos e folhelhos calcíferos que ocorrem com espessuras reduzidas, da ordem de até 50 m, tendo conteúdo de carbono orgânico que alcança até 4%, e querogênio do tipo II e III. A migração ocorreu por contato lateral ou vias falhas e superfícies de discordância BIZZI (2003). Os reservatórios são os arenitos turbidíticos da Formação Urucutuca, onde os folhelhos desta mesma formação selam os reservatórios. As trapas são estratigráficas (Pinch-outs de turbiditos) e truncamentos contra os domos de sal na porção offshore, Figuras 10 e 11. Engloba os campos de Congoa, Peroá e Lagoa Parda.

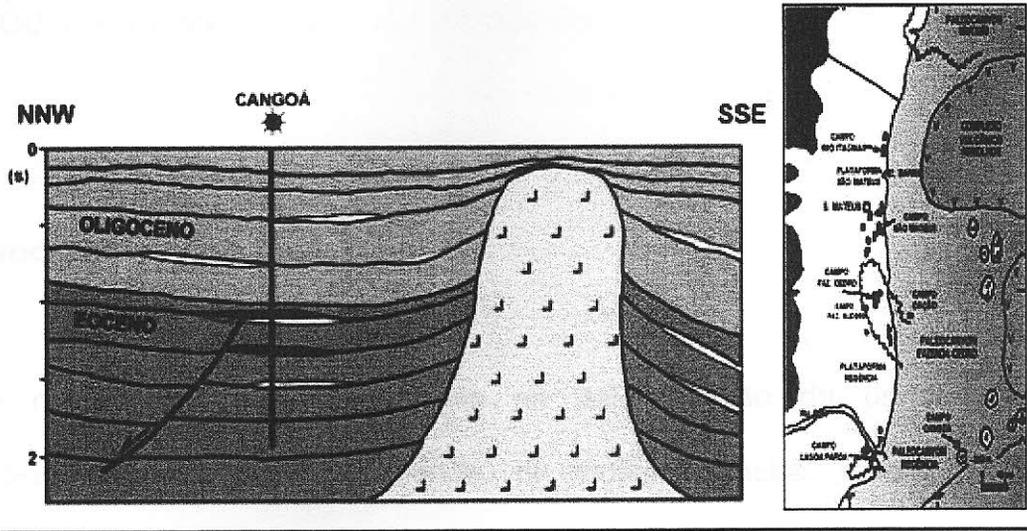


Figura 10 – Campo de Cangoá. FONTE: Petrobrás, Marília Rodrigues de Castro, ANP.

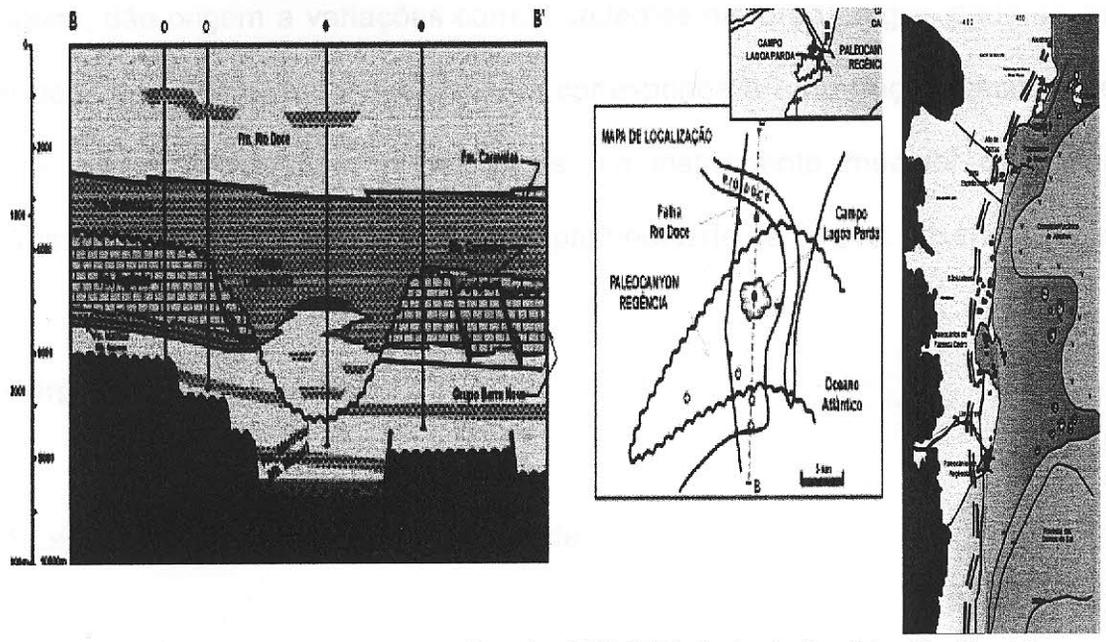


Figura 11 – Campo de Lagoa Parda. FONTE: Petrobrás, Marília Rodrigues de Castro, ANP.

5 MÉTODO GRAVIMÉTRICO

5.1 Introdução

O método gravimétrico consiste na determinação da profundidade de diferentes distribuições de densidade, na crosta terrestre, responsáveis pela alteração no valor local da aceleração da gravidade (g). As variações laterais de densidade no subsolo, que correspondem pela maior ou menor concentração de massa e são causadas por feições geológicas (estruturas, intrusões, variações de litologias), dão origem a variações correspondentes na força da gravidade ao longo da superfície. Essas variações, embora correspondam a uma fração diminuta de g , podem ser registradas com o auxílio de um instrumento medidor denominado gravímetro e, permitem deduções sobre a profundidade de corpos em subsuperfície.

5.2 Princípios Fundamentais

5.2.1 Lei da Atração Universal da Gravidade

Os fundamentos do método gravimétrico de prospecção geofísica estão baseados na lei de atração universal de Newton sobre os campos gravitacionais, relacionadas à atração entre massas, que expressa a força de atração mútua entre duas partículas em termos de suas massas e distância entre si.

Esta lei estabelece que toda partícula material no universo atrai outras, com uma força diretamente proporcional ao produto das massas das partículas e, inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre elas. Então:

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

F é a força gravitacional sobre qualquer das duas partículas, m e m' são suas massas, r é a distância entre elas e G é uma constante universal chamada constante gravitacional. Nessa expressão o valor de G , determinado por Cavendish, é aproximadamente $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{Kg}^{-2}$ e independe do meio.

Como a aceleração da gravidade é à força de atração por unidade de massa, sua determinação nos permite conhecer o campo gravitacional num ponto qualquer.

5.2.2 Aceleração da Gravidade

Pela segunda lei de Newton, sabemos que um corpo de massa m sob a ação de uma força resultante externa está sujeita a uma aceleração dada por,

$$a = \frac{F}{m}.$$

Logo, no caso da força externa ser a da gravitação teremos que

$$a = G \frac{M}{r^2}.$$

No caso de um objeto na superfície da Terra, teremos que r é a distância do corpo m ao centro da Terra e M será a massa da Terra e a aceleração será justamente a aceleração da gravidade.

A aceleração da Terra pode ser considerada como força por unidade de massa, de forma que se usa normalmente o termo aceleração de gravidade em vez de força de gravidade.

A unidade de aceleração utilizada em gravimetria é o miliGal, em homenagem a Galileu, onde $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$ (c.g.s.). Como a aceleração normal da gravidade na superfície da Terra é cerca de 980 Gal, então 1 mGal é aproximadamente $1/10^6$ da gravidade normal, isto é, uma parte em um milhão. Os gravímetros são sensíveis a 00,1 mGal.

5.3 Gravidade da Terra

As medições de gravidade são necessariamente realizadas no campo gravitacional da Terra.

5.3.1 Variação da Gravidade com a latitude.

Esta variação resulta de dois fatores:

i) Força centrífuga oriunda do movimento de rotação: a rotação da Terra impõe uma aceleração adicional no corpo oposta à aceleração da gravidade. O corpo atraído gravitacionalmente sente uma força centrífuga atuando para cima, reduzindo seu peso. Este efeito atinge valores que variam de $3,37 \text{ m/s}^2$ no equador, e 0 (zero) nos pólos.

ii) Achatamento da terra nos pólos: a forma não totalmente esférica da Terra torna os objetivos nos pólos mais próximos do que o equador. O raio polar é cerca

de 21,5 Km menor do que o raio equatorial. Como a atração gravitacional entre dois corpos varia inversamente ao quadrado da distância entre eles, objetos no equador experimentam uma força gravitacional mais fraca do que os mesmos objetos nos pólos. A diferença total entre a gravidade o pólo e no equador é de aproximadamente 5200 miligal, ou seja, a força da gravidade sobre um objeto é 0,5% maior nos pólos do que no equador.

5.3.2 Geóide

A crosta terrestre é heterogênea e formada por superfícies equipotenciais deformadas pelas variações de densidade das rochas. Por razões práticas, as referências de nível têm como "datum" o nível médio dos mares.

Entende-se por Geóide o modelo físico da forma da Terra. Trata-se da superfície equipotencial (superfície de potencial gravitacional constante) e que, em média, coincide com o valor médio do nível médio das águas do mar. A superfície do geóide é mais irregular do que o elipsóide de revolução usado habitualmente para aproximar a forma do planeta, mas consideravelmente mais suave do que a própria superfície física terrestre. Um elipsóide de referência é uma superfície matematicamente definida que se aproxima do geóide, a verdadeira figura da Terra. Devido à sua relativa simplicidade, os elipsóides de referência são usados como uma superfície preferida na qual são efetuados os cálculos da rede geodésica e são definidas as coordenadas de pontos tais como latitude, longitude e elevação. O Elipsóide Internacional de Referência aceita como a melhor aproximação matemática para a forma da Terra, é definido através de acordos internacionais coordenados pela IAG (International Association of Geodesy).

Nas regiões onde existem variações locais de massa, as diferenças entre o geóide e o elipsóide são maiores. Variações de massas positivas indicam excesso de massas e, variações de negativas indicam déficit de massas.

5.4 Redução dos Dados Gravimétricos

Todas as medidas de gravidade são efetuadas no campo gravitacional da Terra. Seu conhecimento, portanto, é fundamental para que tais medidas sejam utilizadas em aplicações geológicas.

A magnitude da gravidade na Terra varia com a latitude, com a distância até o centro da Terra (relacionada às elevações), topografia dos terrenos circundantes, marés e variações de densidade na subsuperfície. Uma variação adicional é introduzida pelos instrumentos de medida, a qual é inerente ao seu funcionamento (*drift* do instrumento).

A exploração gravimétrica se interessa pelas anomalias causadas pelo último fator citado, e estas anomalias são muito menores do que as mudanças relacionadas à latitude e elevação, embora maiores do que aquelas relativas à maré e, normalmente, aos efeitos de topografia. A mudança de gravidade do equador para regiões polares é em torno de 5 Gals, ou 0.5% do valor médio de g (980 Gal), e o efeito da elevação pode ser maior do que 0.1 Gal, ou 0.01 % de g . Uma anomalia gravimétrica considerada grande para explorações petrolíferas gira em torno de 10 mGal, ou 0.001% de g . Assim, variações em g que sejam significantes para prospecção são pequenas em comparação com sua magnitude, como também quando comparadas com os efeitos da latitude e da elevação. Com isso, os valores de gravidade não podem ser diretamente comparados logo após sua observação,

quando a finalidade for identificar anomalias de densidade. Pode-se, porém, remover a maior parte dos fatores que mascaram as anomalias gravimétricas de interesse para a prospecção geológica (Telford, 1990).

5.4.1 Correção de Latitude

Esta correção se faz necessária porque a Terra não possui uma forma esférica perfeita. É utilizada para remover o efeito da gravidade, cujo valor aumenta à medida que nos afastamos do equador em direção aos pólos, ao longo dos meridianos. Esta variação é induzida não só pela rotação, mas também porque o campo gravitacional da Terra real possui uma simetria aproximadamente elipsoidal.

A correção de latitude é aplicada nas medidas, visto que a aceleração gravitacional varia proporcionalmente com a latitude do ponto de medida, portanto deve-se eliminar este efeito dos dados gravimétricos.

Durante o século XX duas expressões têm sido utilizadas para descrever, matematicamente a variação da gravidade com a latitude. A primeira é conhecida como a Fórmula Internacional da Gravidade de 1930, e tem a expressão:

$$g_{\phi} = 9,780318(1 + 0.00530244\sin^2\phi - 0.00000582\sin^2\phi)$$

A segunda, conhecida como a Fórmula WGS84 (World Geodetic System 1984), é expressa por:

$$\gamma_{84} = 978032.67714 \left(\frac{1 + 0.00193185138639\sin^2\phi}{\sqrt{1 - 0.00669437999013\sin^2\phi}} \right) \text{ mGal},$$

onde ϕ corresponde à latitude (ROCHA, 1998, *op. cit.*). Os valores da gravidade para cada ponto de latitude ϕ , calculados com esta fórmula, chamam-se valores

teóricos ou normais da gravidade para pontos sobre a superfície da Terra ao nível do geóide. O valor gerado a partir desta equação, quando subtraído do valor observado, gera um valor que poderia ser chamado de Anomalia Gravimétrica Observada, que corresponde à diferença entre a gravidade esperada e aquela efetivamente medida (Fernandes, 1983). Pode dizer-se, de um modo aproximado, que cerca de 40% da variação de g com a latitude é devida ao fato da forma da Terra não ser uma esfera perfeita e os outros 60% são devidos à rotação da Terra.

5.4.2 Correção de Elevação (Ar-Livre)

A correção de elevação é empregada para compensar os efeitos da diferença de altitudes das estações em relação ao geóide ou a um nível de referencia arbitrário. Esta correção é conhecida com correção ar-livre (*free-air correction*), já que só leva em consideração o efeito da variação da distância do ponto de observação em relação ao centro da Terra, não considerando, contudo o efeito gravitacional das rochas presentes entre o ponto de observação e o nível de referência.

Como a gravidade varia inversamente com o quadrado da distancia, é necessário se fazer correção para mudanças nas elevações entre as estações, de modo que todas as leituras de campo sejam reduzidas a uma superfície de referencia. Esta correção é conhecida com ar-livre, já que a mesma não considera o material existente entre a s estações e a superfície de referencia. A equação para esta correção é:

$$C_{AL} = 3,086 h \text{ mGal (h em metros),}$$

onde h é a distancia da estação à superfície de referência.

5.4.3 Correção Bouguer

A correção Bouguer elimina o efeito das rochas localizadas entre o nível de referência e a estação de observação. As massas de rochas exercem uma atração gravitacional extra à uma estação de observação situada a uma altura maior ^{que} àquela da estação base. A correção de Bouguer remove este efeito fazendo, no entanto, a aproximação de que a camada de rochas abaixo do ponto de observação é uma placa horizontal infinita com uma espessura igual a h . A fórmula utilizada para esta correção é:

$$g_b = 2 \pi G \rho h,$$

onde ρ representar a densidade das rochas localizadas entre o nível de referência e o nível da estação de observação em g/cm^3 , G é constante gravimétrica universal ($6,67 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \text{g}^{-1} \text{s}^{-2}$) e, h como a espessura da camada de rocha.

5.4.4 Correção Topográfica de Terreno

Corrige os efeitos causados pelas irregularidades topográficas nas vizinhanças da estação de medição, desprezando o efeito do material localizado em cotas acima ou a falta de material em cotas abaixo. Atualmente, os valores de correção são determinados calculando-se o efeito gravimétrico 3D da topografia a partir de modelos digitais de terreno. A partir destas representações da superfície do solo, podemos calcular o efeito de atração provocado pela camada de terreno através da aplicação de um dos vários algoritmos matemáticos que existem na literatura.

A correção de terreno permite o cálculo de duas anomalias gravimétricas principais. São elas:

a) anomalia *Free-air* (ΔG_{AL}) – designa o valor de gravidade resultante após a aplicação da correção ar-livre. É representada pela equação, $\Delta G_{AL} = g_{obs} + C_{AL} - g$, onde g_{obs} é o valor medido, C_{AL} é a correção de ar-livre e g o valor teórico da aceleração da gravidade. A Anomalia Free-air é fortemente influenciada pela topografia.

b) anomalia Bouguer (ΔG_B) – É a diferença entre o valor da aceleração da gravidade calculado para um ponto da superfície do geóide a partir de um valor observado em outro ponto situado acima daquele, na mesma vertical, e o valor teórico, fornecido pela fórmula:

$$g_0 = 978,049(1 + 1,0052884 (\sin \phi)^2 - 0,0000059(\sin 2\phi)^2),$$

em que ϕ representa a latitude dos pontos. A anomalia Bouguer é representada pela equação, $\Delta G_B = g_{obs} + C_{AL} + C_B - g$, onde g_{obs} é o valor medido, C_{AL} é a correção de ar-livre, C_B é a correção Bouguer e g o valor teórico da aceleração da gravidade.

5.4.5 Correção de Maré

A mudança da posição da Terra em relação ao Sol e à Lua causa oscilações cíclicas diárias na gravidade. A correção de maré é, geral a primeira a ser aplicada aos dados gravimétricos. A correção é feita utilizando programas e dados, fornecidos por instituições, que calculam e monitoram estes efeitos (ON, por exemplo). Os gravímetros modernos fazem estas correções automaticamente.

5.4.6 Correção da Variação (*DRIFT*) do instrumento

A variação do *drift* do instrumento é relacionada às mudanças no sistema mecânico do sensor (fadiga da mola), causadas pelas alterações das propriedades físicas da mola com o tempo que compõe a unidade de atração do equipamento. Esta variação instrumental pode ser corrigida pela repetição sistemática de leituras em estações reocupadas em determinados intervalos de tempo que dependem do instrumento. As variações positivas são subtraídas, enquanto as negativas são somadas, sendo o erro distribuído nas estações medidas durante esse período. Os instrumentos mais modernos apresentam um *drift* muito pequeno.

5.4.7 Correção de Eötvös

Esta correção é aplicada em levantamentos marinhos, aéreos e orbitais, porque a plataforma de observação possui uma velocidade angular diferente da prevista pelo modelo da Terra para aquela latitude. Objetos em movimento sofrem uma aceleração adicional cuja componente vertical é chamada de efeito Eötvös. Este fenômeno aumenta a gravidade para objetos movendo-se em direção ao oeste e reduz a gravidade para objetos movendo-se para leste.

A correção Eötvös (c_e) é computada, em mGal, através da seguinte fórmula:

$$c_e = 7.503v \cos \lambda \sin \alpha + 0.004154v^2,$$

onde v é a velocidade em nós, α o azimute do movimento e λ é a latitude.

5.4.8 Mapa Bouguer

O mapa de anomalia Bouguer é a síntese das informações contidas nos dados gravimétricos, e, a qualidade do mesmo reflete-se diretamente na qualidade e confiabilidade da interpretação. Este mapa é obtido quando são aplicadas, à gravidade medida nas várias estações, as correções anteriormente discutidas. Trata-se de um mapa de contorno de igual valor das leituras corrigidas; é, portanto, um mapa de anomalia gravimétrica.

Constitui uma forma de apresentação da gravidade observada e o seu traçado constitui o marco inicial da interpretação. A natureza e a aparência do mapa Bouguer dependerão do tipo de levantamento, da qualidade do trabalho de campo e da geologia da área.

As anomalias do mapa Bouguer, podem aparecer como uma variação gradual ou como um acidente isolado. As variações graduais correspondem às chamadas anomalias regionais, que se correlacionam, muitas vezes, a mudanças laterais de densidade das rochas ou a mudança progressiva de profundidades ou espessuras.

A remoção das anomalias regionais do mapa Bouguer, de modo a destacar as anomalias isoladas, permite a confecção de outro mapa, denominado mapa residual. Também com a mesma finalidade, preparam-se os mapas de derivada da segunda, por indicarem o valor de variação da variação Bouguer.

5.5 Interpretação

O trabalho de interpretação dos dados gravimétricos consiste em se estimar os parâmetros de uma ou mais fontes gravimétricas, a partir dos dados reduzidos, vinculados a outras observações geológicas e geofísicas. Isto porque, uma anomalia gravimétrica não tem uma única solução, pois a forma da anomalia depende de fatores como: profundidade do corpo, volume do corpo, e contraste de densidade. Desta forma, a variação destes três parâmetros permite uma infinidade de soluções. Vale ressaltar, que a integração desta parametrização com o conhecimento geológico de uma determinada região pode, em algumas situações, permitir uma solução unívoca.

As técnicas de interpretação, segundo Blakely (1995), podem ser divididas em classes: método direto e inverso, e, realce dos dados e imageamento.

5.5.1 Método Direto

Constrói-se um modelo inicial que melhor se aproxima das informações geológicas e geofísicas disponíveis. O efeito gravimétrico deste modelo é calculado e então comparado com a anomalia gravimétrica observada. Se há um ajuste aceitável, o modelo é retido, caso contrário os parâmetros são modificados até que a condição de ajuste seja atingida.

5.5.1.1 Corpos Tridimensionais.

O efeito gravimétrico de um corpo tridimensional de forma arbitrária, localizado em um ponto $P(x, y, z)$, com densidade $\sigma(x', y', z')$, é dado por:

$$g_z(x, y, z) = \iiint_{x' y' z'} \sigma(x', y', z') \psi(x - x', y - y', z - z') dx' dy' dz'$$

onde,

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

é denominada de função de Green, e representa o efeito gravitacional no ponto $P(x, y, z)$ causado por uma massa pontual situada em (x', y', z') .

Se a massa deste corpo tridimensional de forma arbitrária, for substituído por uma esfera de raio R , densidade uniforme σ e cujo centro se situe a uma profundidade h , ao longo do eixo z , o efeito da componente vertical gravitacional, efeito gravimétrico, será:

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

esta equação revela que o efeito gravimétrico da esfera se distribui radialmente em torno da origem. Tal simetria permite que estimemos a profundidade de seu centro de massa através da relação: $h = 1.305x_{1/2}$, onde $x_{1/2}$ é a abscissa correspondente à metade do valor máximo da anomalia.

5.5.1.2 Corpos Bidimensionais.

Corpos bidimensionais são formas que possuem dimensão espacial, em mapa, em uma direção muito maior do que na outra direção. Em geral, tais feições, apresentam contornos elípticos e suas dimensões mais alongadas são pelo menos três vezes maiores que as dimensões menores.

Uma das formas normalmente usadas para situações geológicas simples é o cilindro horizontal. No caso de um corpo cilíndrico horizontal de um certo raio R , densidade σ , e cujo o centro situa-se à uma profundidade z , abaixo do nível de referência, considera-se o efeito gravimétrico na direção vertical, g_z , dado por:

$$g_z = \frac{2\pi G \sigma R^2 z}{z^2 + x^2}$$

O efeito gravitacional máximo se produz a uma distancia $x = 0$. A profundidade do centro do cilindro pode ser calculada através da relação: $h = x_{1/2}$, onde $x_{1/2}$ é a abscissa correspondente à metade do valor máximo da anomalia

5.5.2 Método Inverso

Neste caso a forma e densidade do corpo causal são simuladas por um modelo cuja anomalia é calculada. A forma do corpo e o contraste de densidade, $\Delta\sigma$, são alterados até que as anomalias observadas e calculadas coincidam o melhor possível. Devido à ambigüidade do problema inverso, o modelo obtido não é único. A ambigüidade só pode ser diminuída usando restrições, baseadas em informação de outra natureza, sobre a forma do corpo anômalo.

5.5.3 Realce dos Dados e Imageamento

Nenhum dos parâmetros do modelo é calculado, mas a anomalia passa por um processamento especial de modo a enfatizar algumas características da fonte, tais como, profundidades relativas, alinhamentos, distribuição e resolução espaciais.

6 ESTUDO DE CASO

6.1 Introdução

Este capítulo foi baseado no artigo de Edyr de Oliveira e Paulo J. M. de Castro, intitulado “Problemas de Interpretação Gravimétrica no Brasil”, que discute os resultados obtidos em diversas bacias sedimentares brasileiras, quanto à aplicação do método gravimétrico, as soluções encontradas para determinados problemas, e as hipóteses aventadas para o equacionamento de outros.

6.2 Interpretação Gravimétrica na Bacia do Espírito Santo

O comportamento variável do campo gravitacional regional traz sérias dificuldades à interpretação. A seguir, encontram-se descritos as principais anomalias mapeadas, sua correlação com a geologia, e a explicação dos problemas de interpretação encontrados para cada uma das situações:

- O comportamento gravimétrico regional da bacia do Espírito Santo é invertido, isto é, caminhando-se da borda (embasamento) para o centro da bacia, os valores Bouguer crescem ao invés de diminuírem (Figura 12).

Este fenômeno pode ser explicado como efeito conjunto da elevação do manto e a presença de altos estruturais subparalelos à costa.

- A bacia é delimitada, em sua porção útil terrestre, por uma cadeia de altos gravimétricos correspondente ao embasamento raso; essas áreas apresentam contornos bastante irregulares, bem distintos da parte profunda.

Nas partes rasas da bacia, isto ocorre em função das pequenas variações no contorno do embasamento - por estarem mais perto da fonte apresentam este tipo de resposta gravimétrica.

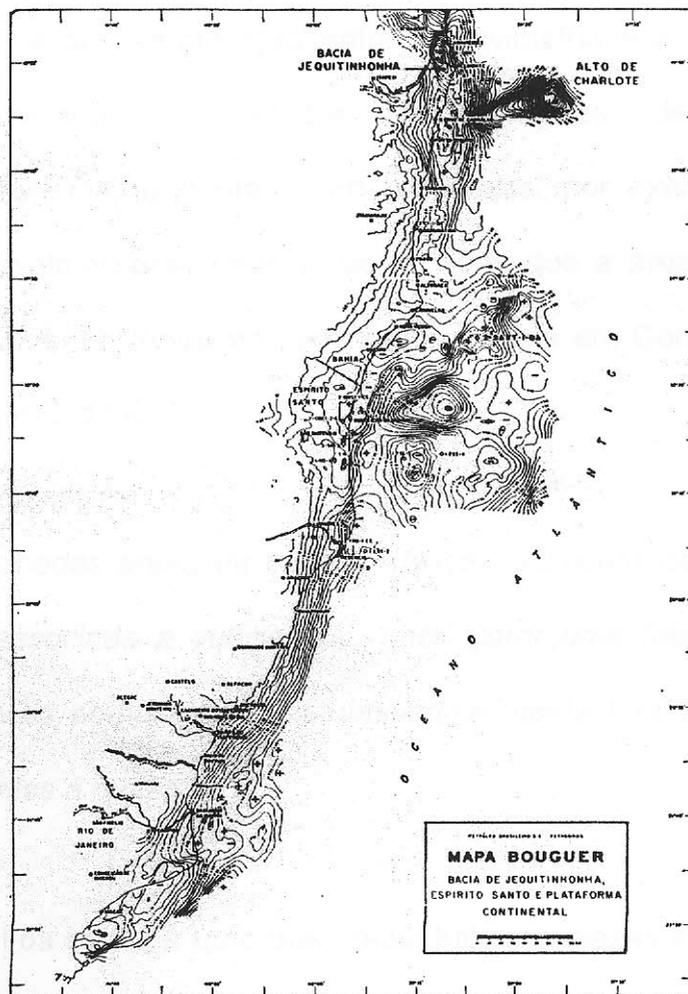


Figura 12 – Mapa BOUGUER da bacia do Espírito Santo. Fonte: Oliveira e Castro (1971).

- Na Foz do Rio Doce uma grande anomalia positiva domina o campo gravimétrico não permitindo a representação da arquitetura da parte sul da bacia.

Supõe-se que este alto corresponda à soma dos efeitos do campo regional ascendente e de vulcanismo localizado - massas básicas intra-embasamento.

- A divergência de interpretação entre a gravimetria e a sísmica é algumas vezes explicada, por efeitos de derrames de rochas ígneas comprovadamente existentes. Em Caravelas, por exemplo, os derrames elevam os valores gravimétricos de tal sorte que a área aparece como se tivesse menor espessura de sedimentos do que em Conceição da Barra, o que não é verdadeiro.

Em determinadas áreas da bacia o desconhecimento da presença de uma anomalia associada a vulcanismo, pode gerar uma falsa interpretação da localização do embasamento, atribuindo-se, desta forma, menor espessura de sedimentos à região.

- A parte sul da bacia, é uma das áreas mais complexas sob o ponto de vista da interpretação gravimétrica. Foram identificados os seguintes problemas:
 - i) a cadeia de altos que parece separar a bacia terrestre daquela mais profunda toda contida na plataforma, parece resultar de um somatório de efeitos de intrusões básica e de estruturas.

A distinção desses efeitos pode ser atribuída à forma e ao comportamento das anomalias: anomalias isoladas, normalmente redondas, e bem localizadas, geralmente, são associadas a corpos básicos, e, anomalias lineares ou que tenham forma mais combinadas, podem refletir os dois efeitos – intrusões ou estruturas.

- ii) Em Abrolhos, imediatamente ao norte, o poço SBst-1-BA perfurou praticamente um cone vulcânico que deveria causar uma anomalia gravimétrica de amplitude superior à encontrada na altura do paralelo de São Mateus, interpretada como o efeito de uma massa básica (stock) dentro do embasamento, com topo a 11 Km de profundidade (Figura 13). Tal não se dá porque em Abrolhos o mapa Bouguer reflete apenas o extravasamento da massa básica originária do “stock”, cujo volume é muito maior.

Só o mapa Bouguer não foi suficiente para isolar estas anomalias. Se a partir deste, fosse tirada uma derivada, teria sido possível isolar o cone vulcânico perfurado pelo poço do stock.

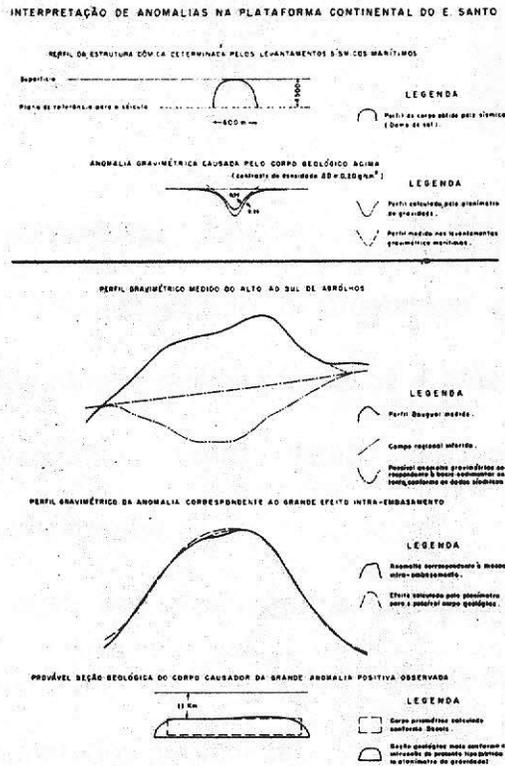


Figura 13 – Interpretação de anomalias na bacia do Espírito Santo. Fonte: Oliveira e Castro (1971).

- As anomalias concêntricas correspondentes aos domos de sal, uma das quais foi comprovada pela perfuração do poço 1-ESS-1. A gravimetria conseguiu indicar vários domos na área (Figura 13).

Anomalias concêntricas negativas estariam associadas aos domos de sal, enquanto que às positivas a rochas vulcânicas.

7 CONCLUSÕES

Os trabalhos de interpretação gravimétrica são direcionados no sentido de compreender de modo mais detalhado o arcabouço geológico de uma área sedimentar, caracterizando falhas, delimitando altos e baixos estruturais, estimando profundidades, e permitindo uma visão tridimensional do conjunto embasamento/cobertura sedimentar.

No entanto, em função das limitações e ambigüidades do método, faz-se necessário efetuar a correlação dos resultados obtidos com os dados geológicos disponíveis e com outros métodos geofísicos.

Dentro deste contexto, o método gravimétrico tem contribuído na seleção de áreas mais favoráveis à exploração petrolíferas, apresentadas em forma de anomalias, onde os estudos sísmicos devem ser feitos a fim de procurar as estruturas favoráveis.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, F. As ilhas oceânicas brasileiras e uma hipótese sobre a origem do atlântico. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 37, p. 141, 1965.
- ALMEIDA, F. et al. Correlação do magmatismo das bacias da margem continental brasileira com o das áreas emersas adjacentes. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 26, n. 3, p. 125, 1996.
- ASMUS, H. et al. Integração geológica regional da bacia do espírito santo. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 25. [S.1.]: SBG, 1971. v. 3, p. 235.
- BIASSUSI, A. S. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 4, n. 1, p. 13, 1990.
- BIZZI, L. A.; et al. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Texto, Mapas e SIGs*. [S.1.]: CPRM, 2003.
- BOMFORD, G. *Geodesy*. Oxford University Press, 1977.
- CHANG, H. K. et al. Tectonics and stratigraphy of the east brazil rift system: an overview. *Tectonophysics*, 1992
- CORDANI, U. G. et al. Estudo preliminar de integração do pré-cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. *Ciência-Técnica-Petroleo. Seção Exploração de Petróleo*, PETROBRAS/CENPES, p. 15, 1984.
- COSMO, C. A. et al. Lagoa parda field brazil espírito santo basin, southeaster brazil. *AAPG Special Volumes*, 1991.
- DEHLINGER, P. *Marine Gravity*. Elsevier Oceanography Series, 22. *Elsevier Scientific Publishing Company*, 1978
- FERNANDES, C. E. M. Fundamentos de Prospecção Geofísica. *Interciência*, p. 109, 1984.
- GUERRA, M.C. D. *A Estruturação da Bacia do Espírito Santo por Halocinese e Influência do Vulcanismo de Abrolhos*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, 1989.
- LIMA, V.; AURICH, N. Cação Field – Brazil Espírito Santo Basin, Southeaster Brazil. *AAPG Special Volumes*. p. 301-312, Vol. TR: Stratigraphic Traps III, 1999.
- LUIZ, J. ; SILVA, L. Geofísica de Prospecção. UFPA, p. 311, 1995.

MILANI, E. J. et al. Petróleo na margem continental brasileira: Geologia, exploração, resultados e perspectivas. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 18, n. 3, 2000.

MOHRIAK, W. Bacias sedimentares da margem continental brasileira. In: BIZZI, L. A. et al. (Ed.). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Texto, Mapas e SIG*. [S.1.]: CPRM, 2003.

OLIVEIRA, E. de, CASTRO, P. J. M. de. Problemas de interpretação gravimétrica no Brasil. In: *Congresso Brasileiro de Geologia 25*. [S.1.]: SBG, 1971, v. 3, p. 73-78.

PEREIRA, J. Considerações sobre a estratigrafia do cenomaniano-santoniano em algumas bacias marginais brasileiras e sua implicação na história tectônica e sedimentar da margem continental. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 1992.

RIKITAKE, T.; SATO, R.; HAGIWARA, Y. Applied Mathematics for Earth Scientists. *Terra Scientific Publishing Co.*, p. 435, 1985.

ROCHA, P. L. F. *Estudo da Litosfera do Brasil entre os Paralelos de 17°S e 33°S, a Partir de Dados Gravimétricos, Magnéticos e de Fluxo de Calor*. Tese de Doutorado - Observatório Nacional, 1998.

SOBREIRA, J. F. F.; FRANÇA, R. L. Um modelo tectono-magmático para a região do complexo vulcânico de abrolhos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 14, n. 1, p. 143, 2006.

SOUZA-LIMA, W.; JUNIOR, G. P. H. Bacias sedimentares brasileiras. *FUNDAÇÃO PALEONTOLOGICA PHOENIX*, v. 5, n.49, 2003

SZATMARI, P.; PORTO, R. Classificação tectônica das bacias sedimentares terrestres do Brasil. In: FIGUEIREDO, A. M. F.; GABAGLIA, G. P. R. (Ed.). *Sistema classificatório aplicado às bacias sedimentares brasileiras*. [S.1.]: Revista Brasileira de Geociências 16 (4), 1986. p. 357.

TELFORD, W. M. et al. Applied Geophysics. 2. ed. [S.1.]: Cambridge University Press, 1990.

VIEIRA, R. et al. Bacias do Espírito Santo e Mucuri. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, n. 1, p. 191, 1994.