



**UFRJ**

João Paulo Pereira Nunes

**APLICAÇÃO DO MÉTODO MAGNETOMÉTRICO NA INVESTIGAÇÃO  
EXPLORATÓRIA DA 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:

Leonardo Borghi  
Paula Ferrucio  
Julio Lyrio

M  
GL  
N972AM

Rio de Janeiro  
Março de 2007

<b>UFRJ</b>	
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza Biblioteca Central	
N.º REGISTRO	DATA
6891/12	03/01/2012
ORIGEM Doação / UFRJ - Dep. de Geologia	

PEREIRA NUNES, João Paulo

Aplicação do Método Magnetométrico na Investigação Exploratória da Bacia do Espírito Santo/ João Paulo Pereira Nunes - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2007.

xii 59 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: Leonardo Borghi, Paula Ferrucio, Julio Lyrio

1. Geofísica. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental - Trabalho de Conclusão de Curso. I. Borghi, Leonardo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós- graduação em Geologia. III. Título.

João Paulo Pereira Nunes

APLICAÇÃO DO MÉTODO MAGNETOMÉTRICO NA INVESTIGAÇÃO  
EXPLORATÓRIA DA 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:

Leonardo Borghi

Paula Ferrucio

Julio Lyrio

Aprovada em: 27 de março de 2007

Por:

---

Leonardo Borghi (UFRJ)

---

Paula Ferrucio (UFRJ)

---

Julio Lyrio (Petrobras)

Rio de Janeiro  
Março de 2007

*A todos os meus "colhegas"!*



## Agradecimentos

Inicialmente agradeço sinceramente aos meus “colhegas” de turma do CIGEF, graças a eles o ambiente de estudo/trabalho se tornou bastante produtivo. Em grande parte foi com sua ajuda que consegui passar pelo curso aproveitando ao máximo o tempo disponível. Menciono, em especial, a excelente companhia da galera do fundão (da sala !). Desejo a todos muito sucesso na nova carreira !

Não posso deixar também de lembrar de meus “colhegas” de grupo, David Sarmiento, Emanuel (vulgo Emânu) de Pinho e João Maurício Ramos, com os quais o primeiro capítulo foi escrito. Me ensinaram geologia e se esta monografia ficou pronta a tempo foi mérito deles.

Agradeço ao Álvaro por toda sua dedicação e enorme paciência, tanto como professor dos cursos de métodos sísmicos e processamento sísmico quanto como coordenador do curso de formação. Considero um grande desafio conseguir coordenar um curso com pessoas das mais variadas formações, tendo interesses bastante distintos e que deveria fornecer tanta informação em tão pouco espaço de tempo. Em grande parte foi por seu trabalho que esta especialização pôde ser realizada a contento.

Os inúmeros profissionais da Petrobras que foram nossos professores no CIGEF deram um exemplo de dedicação e comprometimento. Sua vontade de passar adiante conhecimentos acumulados ao longo de anos de trabalho fez com que essa etapa se tornasse imprescindível para nosso exercício da geofísica. Agradeço a todos e também ao professor Leonardo Borghi (UFRJ) por todo o tempo que nos foi dedicado.

A ajuda do geofísico Julio Lyrio da Petrobras me foi extremamente útil fornecendo referências sobre o método bem como na busca por um artigo adequado ao estudo de caso. Sou grato por sua atenção.

Gostaria ainda de mencionar o empenho dos tutores responsáveis pelas etapas vivenciais da especialização; na equipe sísmica (ES-26) Jefferson Pitombo e Marcus Petracco e no processamento geofísico Guilherme Amorim e Paulo Camargo.

Finalmente cabe uma menção aos “colhegas” Rodolfo e Emanuel que muito me ajudaram com a formatação latex.

## Resumo

PEREIRA NUNES, João Paulo. **APLICAÇÃO DO MÉTODO MAGNETOMÉTRICO NA INVESTIGAÇÃO EXPLORATÓRIA DA BACIA DO ESPÍRITO SANTO.** 2007. xiii, 58p. 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.

Nesta monografia é feita uma discussão da geologia da bacia sedimentar do Espírito Santo voltada para a exploração de hidrocarbonetos e uma exposição de um estudo de caso onde é feita uma aplicação do método magnetométrico à caracterização do arcabouço tectônico da bacia. No primeiro capítulo a geologia da bacia é descrita, no segundo é feita uma exposição teórica do método magnetométrico, no terceiro é apresentado um artigo de (SELCH 1971) que faz uma aplicação do método magnetométrico ao estudo do embasamento da bacia.

Palavras-chave: Magnetometria, Bacia do Espírito Santo, Método Magnético.

## *Abstract*

PEREIRA NUNES, João Paulo. **APLICAÇÃO DO MÉTODO MAGNETOMÉTRICO NA INVESTIGAÇÃO EXPLORATÓRIA DA BACIA DO ESPÍRITO SANTO.** (*Magnetometric Method in the Espírito Santo Basin Exploration*). 2007. xiii, 58p. 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.

This work discuss the geology of the Espírito Santo sedimentary basin as applied to hydrocarbons exploration it is also presented an article that employs the magnetometric method to characterize the tectonic framework of the basin. In the first chapter the geology is described, in the second a theoretical presentation of the magnetometric method and in the third one there is a discussion of one application of the magnetometric method to the characterization of the basin framework.

Keywords: Magnetometric, Espírito Santo Basin, Geophysical Magnetic Method.



## Lista de Figuras

1	<i>Mapa de localização das províncias geológicas da Bacia do Espírito Santo .</i>	2
2	<i>Classificação das Bacias Sedimentares segundo Klemme e Szatimari . . . .</i>	20
3	<i>Esquema das bacias sedimentares brasileiras . . . . .</i>	21
4	<i>Carta Estratigráfica da Bacia do Espírito Santo. . . . .</i>	22
5	<i>Seção Sísmica na Bacia do Espírito Santo . . . . .</i>	23
6	<i>Mapa Batimétrico da região da bacia do Espírito Santo . . . . .</i>	24
7	<i>Arcabouço tectono-magmático da região do Complexo Vulcânico de Abrolhos</i>	24
8	<i>Seção Strike no campo de Rio Itaúnas . . . . .</i>	25
9	<i>Representação esquemática do Campo de Cação . . . . .</i>	25
10	<i>Campo de Cangoá . . . . .</i>	26
11	<i>Campo de Lagoa Parda . . . . .</i>	26
12	Movimentação do polo norte magnético ao longo do tempo. Em (GOMES 2006)	34
13	IGRF em 1950. Retirado de (GOMES 2006) . . . . .	38
14	IGRF em 2000. Retirado de (GOMES 2006) . . . . .	39
15	Área do levantamento, de Belmonte até a foz do rio Doce (SELCH 1971). .	51
16	Mapa batimétrico da região do levantamento (SELCH 1971). . . . .	52
17	Anomalias do campo total como diferença entre valor medido e valor do campo regional ( $\Delta T$ ) e mapa de isogamas.(SELCH 1971). . . . .	53

18	Princípios da interpretação qualitativa. Separação em províncias, de acordo com o comportamento das anomalias e alinhamento dos eixos das anomalias, indicando uma possível falha (SELCH 1971). . . . .	54
19	Anomalias causadas por modelos sintéticos para inclinação de $-22^{\circ}$ (SELCH 1971).	55
20	Histograma relacionando o número de corpos encontrados e os valores de magnetização (SELCH 1971). . . . .	56
21	Resultado final da interpretação (SELCH 1971). . . . .	57

## Lista de Tabelas

- 1 Susceptibilidade de rochas e minerais em unidades SI (TELFORD et al. 1990) 33
- 2 Divisão de corpos de acordo com sua magnetização e susceptibilidade (SELCH 1971). 48

# Sumário

<b>Agradecimentos</b> . . . . .	v
<b>Resumo</b> . . . . .	vi
<b>Abstract</b> . . . . .	vii
<b>Lista de Figuras</b> . . . . .	viii
<b>Lista de Tabelas</b> . . . . .	ix
<b>1 Geologia da Bacia do Espírito Santo</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução . . . . .	1
1.1.1 Bacia do Espírito Santo . . . . .	1
1.1.2 Contexto Geral . . . . .	4
1.2 Evolução exploratória . . . . .	5
1.3 Estratigrafia . . . . .	7
1.4 Geologia Estrutural . . . . .	10
1.5 Evolução Tectono-sedimentar . . . . .	12
1.6 Magmatismo . . . . .	15
1.6.1 Complexo Vulcânico de Abrolhos . . . . .	16
1.7 Geologia do Petróleo . . . . .	18
1.7.1 Sistemas petrolíferos . . . . .	18
<b>2 Método Magnético</b>	<b>27</b>
2.1 Introdução . . . . .	27
2.2 Princípios Básicos . . . . .	28



2.2.1	Tipos de Magnetização . . . . .	30
2.3	Propriedades Magnéticas de Rochas . . . . .	32
2.4	O Campo Geomagnético . . . . .	32
2.4.1	Fontes Externas . . . . .	35
2.4.2	Fontes Internas . . . . .	35
2.4.3	Campo Magnético Principal da Terra . . . . .	36
2.5	Aquisição . . . . .	37
2.6	Interpretação . . . . .	40
2.6.1	Deconvolução de Euler . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Estudo de Caso</b> . . . . .	<b>44</b>
3.1	Contexto Histórico . . . . .	44
3.2	Descrição do Levantamento . . . . .	44
3.2.1	Dados Gerais . . . . .	44
3.3	Interpretação dos Dados . . . . .	45
3.3.1	Métodos de Interpretação . . . . .	46
3.3.2	Análise de Magnetização . . . . .	48
3.4	Esboço Estrutural do Embasamento . . . . .	49
	<b>Referências Bibliográficas</b> . . . . .	<b>58</b>

# Capítulo 1

## Geologia da Bacia do Espírito Santo

### 1.1 Introdução

#### 1.1.1 Bacia do Espírito Santo

Está localizada nos estados do Espírito Santo e da Bahia, entre os paralelos de 18° 20' e 21°, abrangendo aproximadamente 20000km<sup>2</sup> onshore e 200000km<sup>2</sup> offshore, figura 1. Juntamente com suas “bacias irmãs” de Campos e Santos a bacia do ES é um bom exemplo de bacia formada em margem passiva. Interessante notar que, rigorosamente falando, não há separação entre as três bacias em regiões de águas profundas. Em águas rasas as fronteiras 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 Mucurí. (GUERRA 1989) descreve este último como um limite arbitrário, assim como as extensões para o mar dos limites norte e sul e (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 proto-golfo. Atualmente estas 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 Neopliano conhecida como Formação Cabiúnas. Já na Formação Cricaré temos sedimentação sin-rifte com espessura de 5000m indo do Neocomiano ao Aptiano apresentando seqüências de arenito, coquinas, calcilitos e dolomitas com folhelho negro.

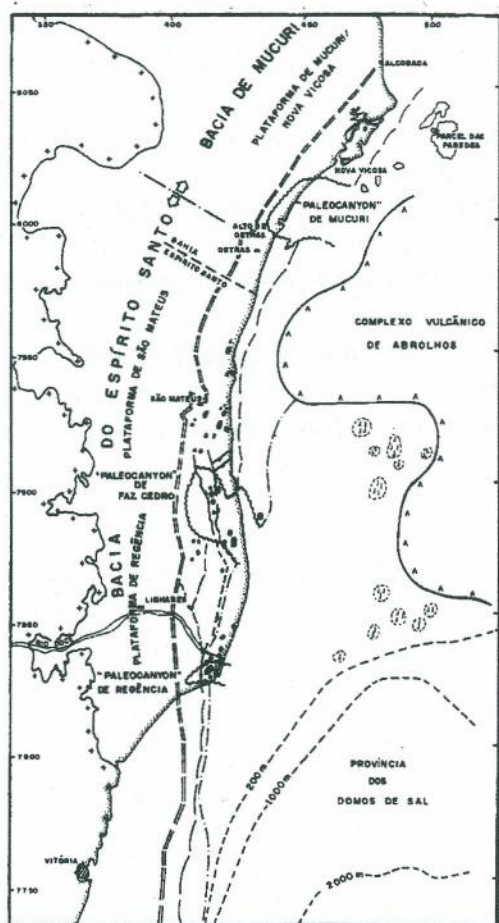


Figura 1: Mapa de localização das províncias geológicas da Bacia do Espírito Santo. Modificado de (BIASSUSI 1990)

Generalizando, esta bacia pode ser dividida em quatro províncias geológicas, já que diferenças significativas ocorrem muitas vezes entre setores da margem, o que em parte justifica serem tratadas como entidades geológicas individualizadas (MILANI et al. 2000). As províncias são: as plataformas de São Mateus e de Regência e os paleocânions de

Fazenda Cedro e Regência. Na porção emersa dessas províncias se enquadram os campos de Rio Itaúnas, São Mateus, Fazenda Cedro e Lagoa Parda. O campo de Cação se encontra na porção submersa no paleocânion de Fazenda Cedro.

A maior parte das atividades exploratórias futuras será direcionada para a BES juntamente com as bacias de Campos e Santos, pois foram responsáveis pelas maiores descobertas feitas nos últimos anos. Elas têm um papel importante na manutenção da auto-suficiência nacional na produção de petróleo. A BES tem grande potencial para novas descobertas de óleo leve e, já é a segunda maior produtora do país.

A BES está enquadrada na classificação III-V das Bacias Petrolíferas segundo Klemme (Figura 2) e, segundo as classificações de (SZATMARI e PORTO 1986), se enquadra no estilo tectônico Distensional - Rifte (Figura 2), sofrendo processos tectônico-estruturais semelhantes aos das outras bacias da margem continental (Figura 3).



O intenso magmatismo terciário proporcionou o desenvolvimento de uma ampla plataforma carbonática, que alargou a plataforma continental desta bacia em relação às outras da margem adjacente, 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 influências 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 e FRANÇA 2006).

### 1.1.2 Contexto Geral

O continente sul americano 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 Sul Americana: Interior (cráton) com espessas camadas de sedimentos paleozóicos e mesozóicos; a oeste, margem convergente com intensa atividade orogênica (Andes); a Leste, margem divergente (passiva) com extensão de aproximadamente 10000km; 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. Em comparação com a plataforma Sul Americana, que é primordialmente formada por rochas ígneas e metamórficas arqueanas e está consolidada desde o Neoproterozóico (540M.a), a margem Leste é jovem, tendo sua origem sido iniciada apenas na era Mesozóica (250Ma). 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, 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 Sul Americana se estende por 10000km, 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 diácrono 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 milhões de anos é de se esperar que, descontadas características gerais, as bacias sedimentares em questão tenham estruturas bastante diversificadas.

## 1.2 Evolução exploratória

A evolução histórica das atividades de prospecção na BES, resumidamente extraída de (COSMO et al. 1991) e de (LIMA e AURICH 1990), 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 et al. 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 e AURICH 1990).

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 et al. 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 um outro padrão geral de paleocânion, denominado paleocânion de Regência. Um programa de reflexão sísmica na área foi realizado em 1978 (387km de linhas sísmicas) visando aumentar a definição dos limites e para propósitos exploratórios. A produção de óleo em 1978 era de 7600 bpd.
3. Iniciado 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 19.715km de sísmica em terra. No mar,



havia 129 poços exploratórios e 125.380km de linhas sísmicas. Já foram descobertas 51 acumulações de HC's, sendo 46 na parte terrestre, com volumes da ordem de 467 milhões  $m^3$  de Óleo-Equivalente *in place* (MILANI et al. 2000). Hoje, com uma melhor aquisição de sísmica de reflexão e melhor processamento, juntamente com dados paleontológicos, tornou-se mais fácil mapear as bases dos paleocânions e detectar as trapas.

### 1.3 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. 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 continentais, arenitos, coquinas e dolomitos, associados à 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, freqüentemente 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, carbonatos e margas. O contato inferior e superior da Formação Cricaré é discordante 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 reconhece a presença de leques aluviais, sistemas fluviais entrelaçados e lacustres.

A Formação Mariricu designa as rochas sedimentares siliciclásticas e evaporíticas de idade NeoAlptiana (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-Neo-Alagoas). Suas rochas são resultados da primeira ingressão marinha na bacia. As rochas clásticas foram depositadas por sistemas fluviais entrelaçados e deltaícos, e os evaporitos provêm de Sabkas 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 carbonatos 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 por 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 a estes 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). A sedimentação pelítica Urucutuca 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 Meso-Eoceno 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 et al. 1996).

## 1.4 Geologia Estrutural

Os episódios tectônicos prévios ao breakup 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/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 Cânion 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 resultaram num obstáculo para o fluxo de sal na direção da bacia profunda, resultando na mobilização de evaporitos e folhelhos em direção contrária (oeste), associada a falhas de empurrão com vergência na direção do continente, e formação de feições compressionais (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.

## 1.5 Evolução Tectono-sedimentar

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: Seqüência Continental - abrange os basaltos da Formação Cabiúnas e os sedimentos continentais da Formação Cricaré, afetados pela tectônica rifte; Seqüência Transicional, caracterizada pela sedimentação siliciclástica-evaporítica da Formação Mariricu e relativa quiescência tectônica; e Mega Seqüência 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 pleneplanização do relevo da bacia, condicionou-se 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 Neoaptiano 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 calcários, 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 propagam 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 do Canyon 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 quatro províncias geológicas distintas (Figura 1): Plataforma de São Mateus, a norte, que constitui as partes mais rasas, caracterizadas por reservatórios arenosos de idade Alagoas; Plataforma Regência, a sul, onde ocorreu o desenvolvimento de extensa plataforma carbonática durante o albiano; e, intercalados a esta, os paleocânions de Fazenda Cedro e Regência, onde os reservatórios são arenitos turbidíticos com idades que variam do Cretáceo Superior ao Eoceno.

No Neo-Paleoceno/Eo-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 et al. 1971).

Do Meso/Eoceno ao Recente, instalou-se um sistema de leques costeiros, plataformatalude, 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.

## 1.6 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 et al. 1996). Na literatura são descritos dois importantes episódios de vulcanismo: um ligado ao processo de rifteamento no cretáceo, e um 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 et al. 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 et al. 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 et al. 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 (SOBREIRA e FRANÇA 2006).

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).

### **1.6.1 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 40M.a. 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 se desenvolveu 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).

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.

## 1.7 Geologia do Petróleo

Segundo a ANP, em 2001 foram descobertas na BES 51 acumulações de hidrocarbonetos, sendo 46 na parte terrestre. As reservas atuais são de 12 milhões de  $m^3$  de óleo de 11 bilhões de  $m^3$  de gás.

### 1.7.1 Sistemas petrolíferos

Na BES são descritos dois sistemas petrolíferos e quatro plays:

#### 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 300m 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 Urucutua. Engloba os campos de Rio Itaúnas, Ilha da Caçumba, Rio Preto, São Mateus, Rio São Mateus, Lagoa Parda e Fazenda Cedro.

#### 2. Cricaré-Itaúnas (Play Itaúnas)

O gerador e o selante são os mesmos descritos na Cricaré-Mucurí, mas os reservatórios são carbonatos secundários do Membro Itaúnas, do 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 está contido nesse play.

#### 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 calcilitos e folhelhos calcíferos que ocorrem com espessuras reduzidas, da ordem de até 50m, 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 et al. 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 Cangoa, Peroá e Lagoa Parda.

IDADE	BACIA	CLASSIFICAÇÃO	
		KLEMMÉ <sup>7</sup>	ESTILO TECTÔNICO <sup>16,17</sup>
CENOZOICA	Pantanal	I?	Intracratônica
	Bananal		
	Taubaté Itaboraí	III	Distensional - <i>rift</i>
MESOZOICA	Acre	II	Intracontinental cratônica da antefossa andina
	Tacutu	III	Distensional - <i>rift</i> abandonado (aulacógeno)
	Marajó		
	Recôncavo		
	Tucano		
	Jatobá		
	Araripe		Transtensional- <i>pull apart</i>
	Foz do Amazonas	VIII	Sinécise marginal
	Pará-Maranhão	III-V	Distensional - <i>rift</i> evoluindo para bacia <i>pull apart</i>
	Barreirinhas		
	Ceará		
	Potiguar		
	Pernambuco		
	Paraíba		
	Sergipe		
	Alagoas		
	Camamu		
Almada			
Jequitinhonha			
Cumuruxatiba			
Mucuri			
Espírito Santo			
Campos			
Santos			
Pelotas			
PALEOZOICA	Parnaíba	I	Intracratônica (arcos regionais amplos)
	Amazonas		
	Paraná		
	Solimões	I	Intracratônica submetida à orogenia herciniana
	Alto Tapajós	I?	Intracratônica?
Parecis	I?	Intracratônica?	
PROTEROZOICA	São Francisco	II?	Intracontinental cratônica da antefossa brasileira

Figura 2: Classificação das Bacias Sedimentares segundo Klemme e Szatimari. Modificado de (SOUZA-LIMA e Junior 2003)



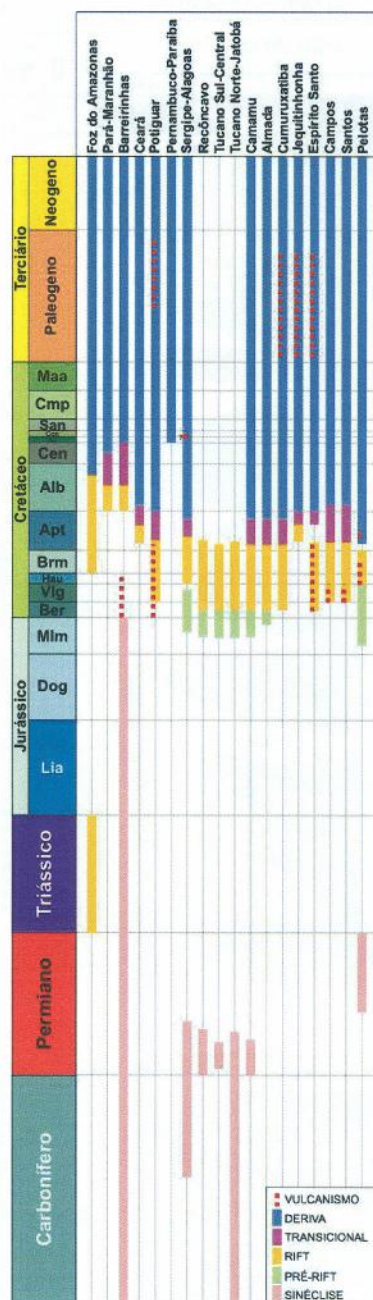


Figura 3: Esquema das bacias sedimentares brasileiras. Modificado de (SOUZA-LIMA e Junior 2003)

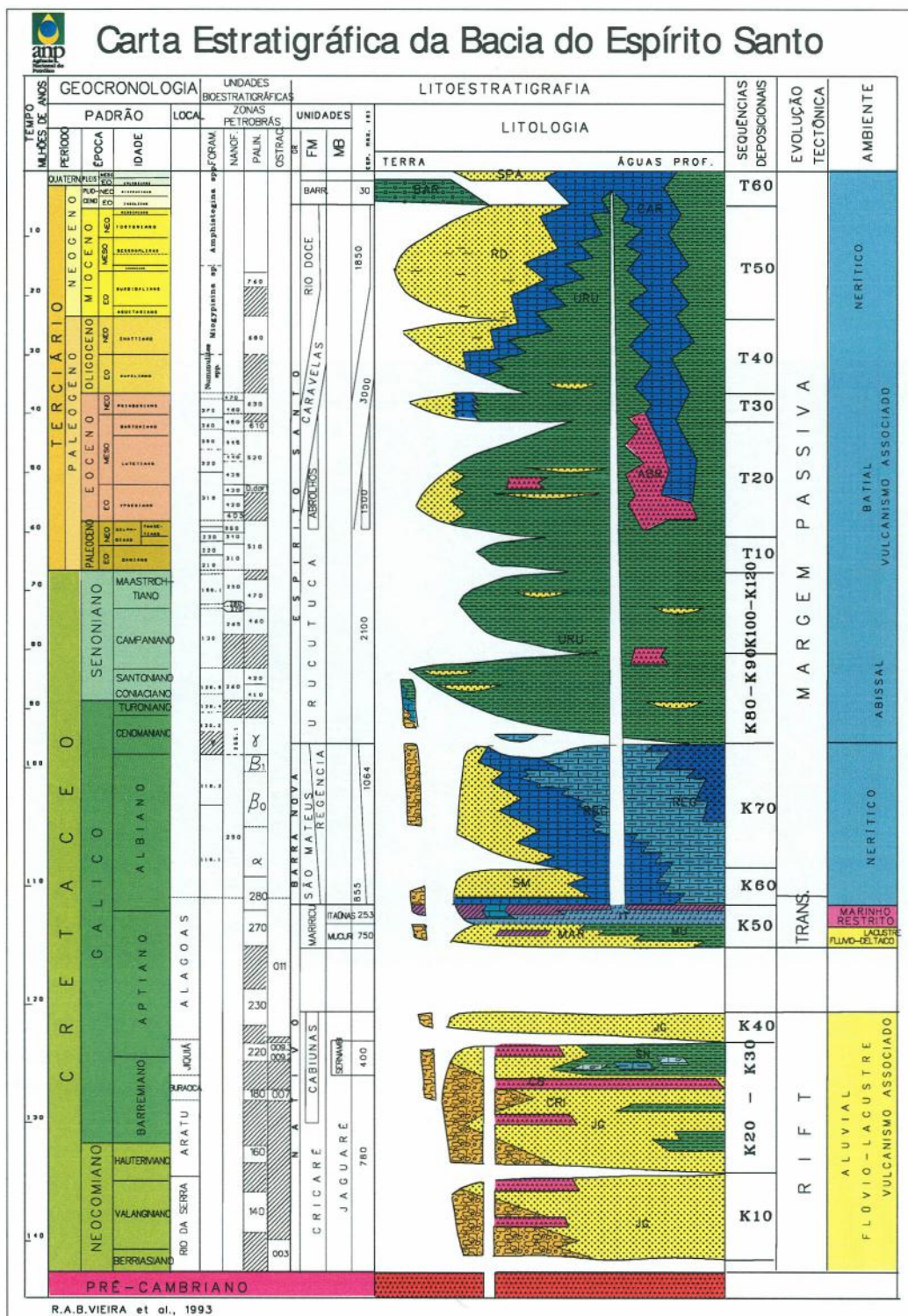


Figura 4: Carta Estratigráfica da Bacia do Espírito Santo. Retirado de (VIEIRA et al. 1994)



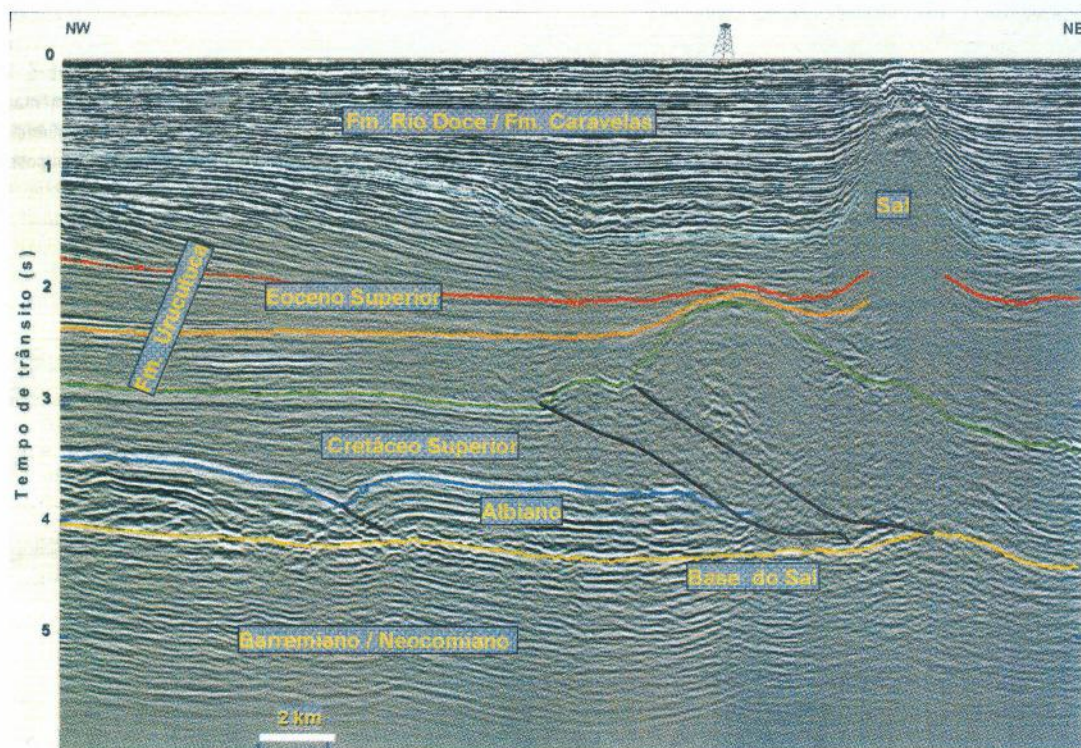


Figura 5: Seção sísmica na Bacia do Espírito Santo (parte marinha), mostrando seqüências estratigráficas sinrifte e pós-rifte e estruturas extensionais e compressionais características da tectônica do sal. (BIZZI et al. 2003)



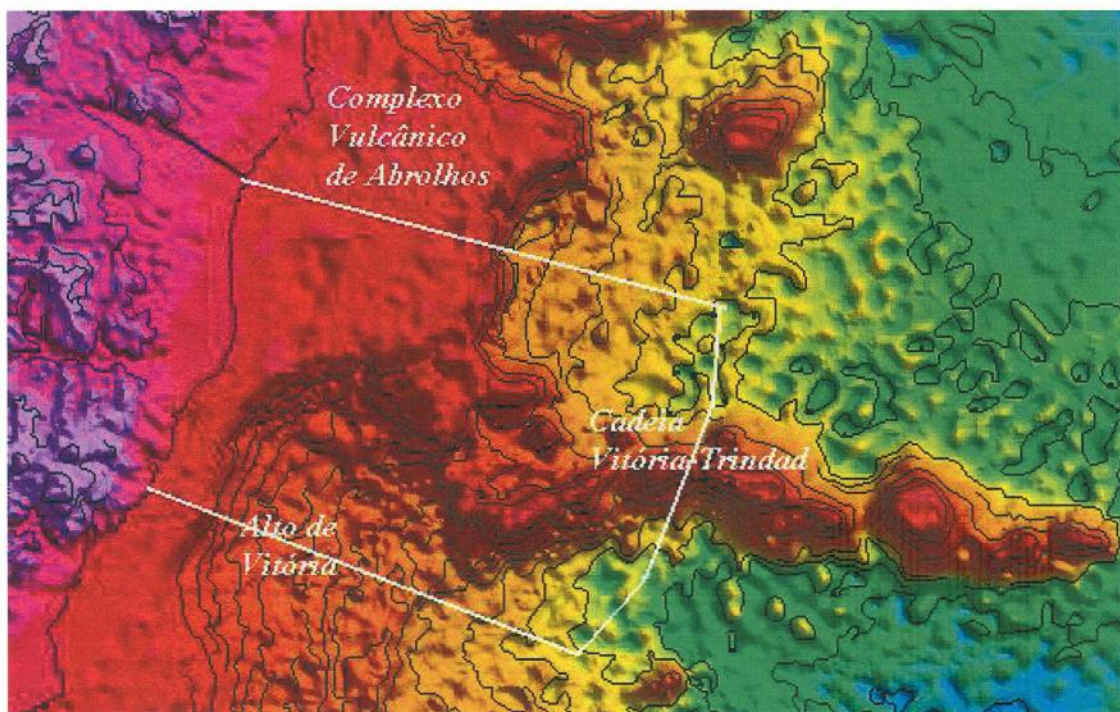


Figura 6: Mapa Batimétrico da região da bacia do Espírito Santo. Em azul temos as isóbatas, e em amarelo, a porção emersa da BES. (Fonte: TOPEX)

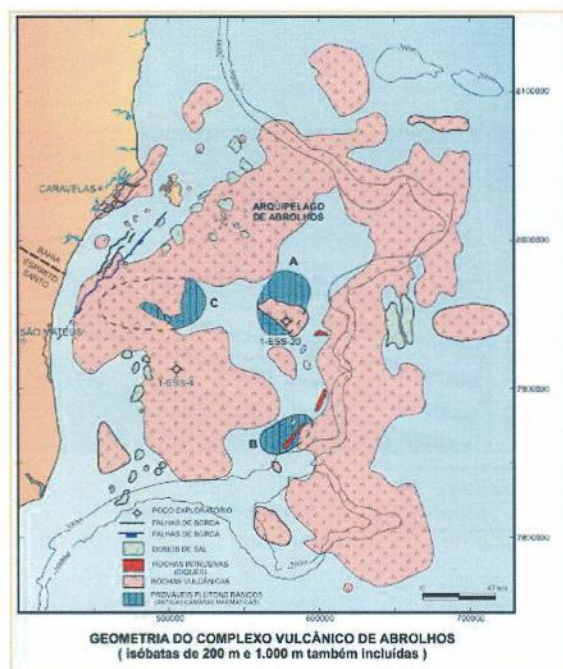


Figura 7: Modelo para o arcabouço tectono-magmático da região do Complexo Vulcânico de Abrolhos. Fonte: Sobreira e França, 2006.



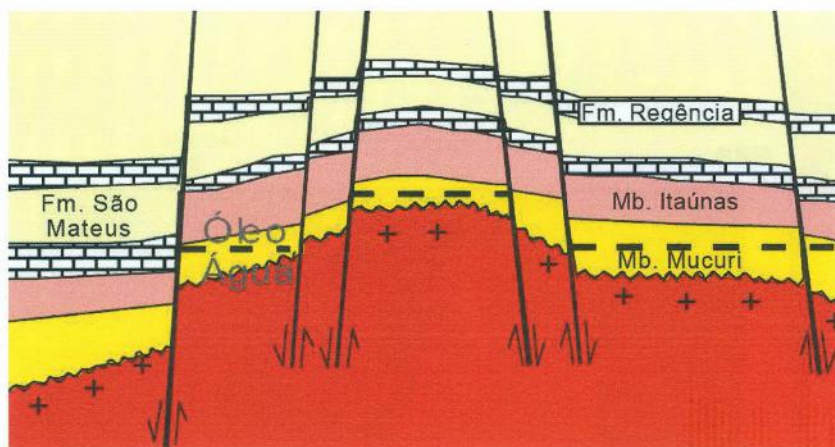


Figura 8: Esquerda: Seção Strike no campo de Rio Itaúnas. Direita: Em amarelo, a área de Ocorrência do Play Mucuri. FONTE: Petrobrás, Marília Rodrigues de Castro, ANP.

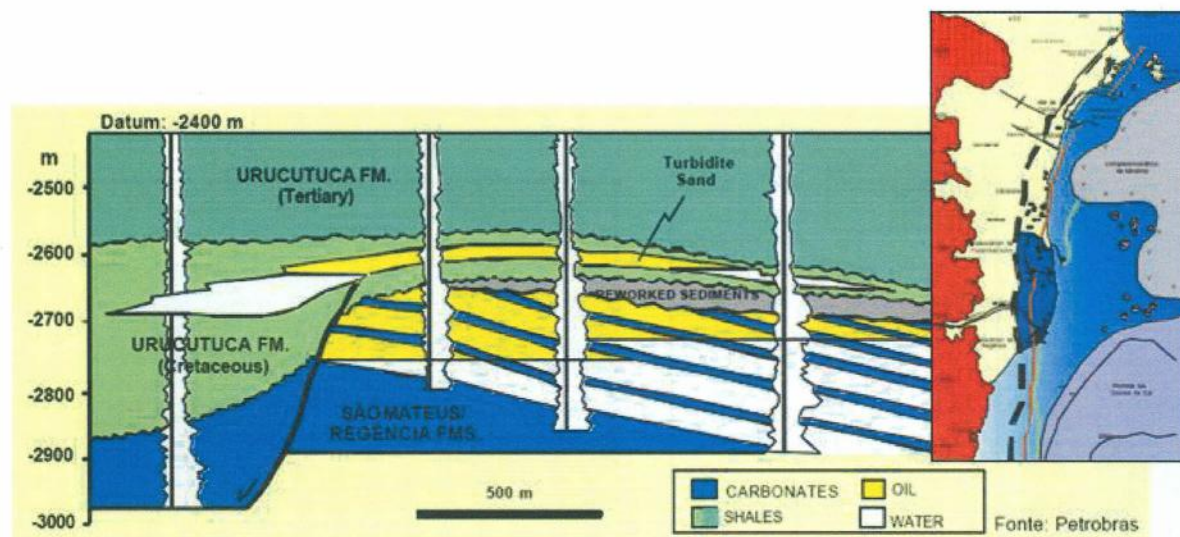


Figura 9: Esquerda: Representação esquemática do Campo de Cação. No canto direito superior: Área de ocorrência do Play Barra Nova. FONTE: Petrobrás, Marília Rodrigues de Castro, ANP.

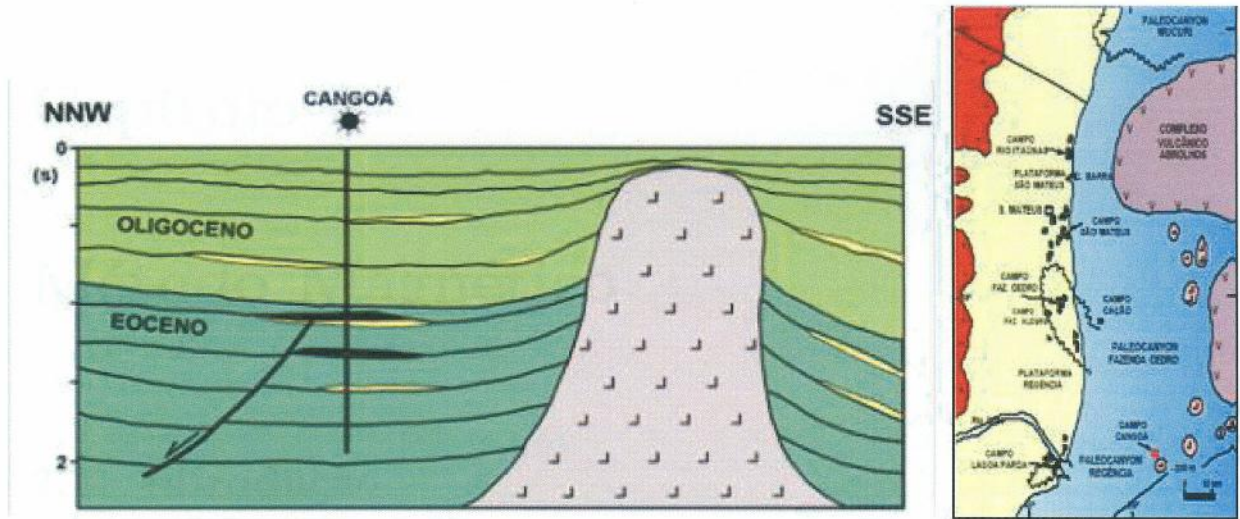


Figura 10: Campo de Cangoá. FONTE: Petrobrás, Marília Rodrigues de Castro, ANP.

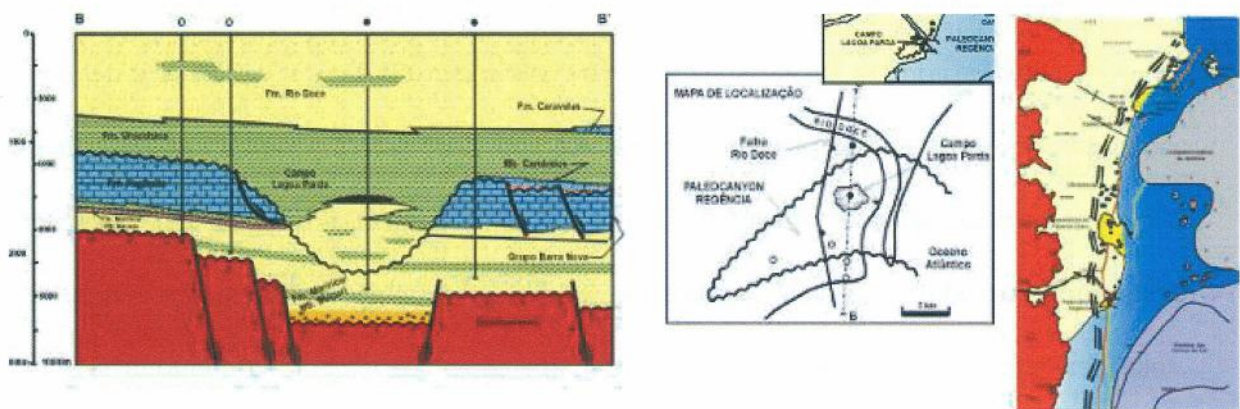


Figura 11: Campo de Lagoa Parada. FONTE: Petrobrás, Marília Rodrigues de Castro, ANP.



## Capítulo 2

# Método Magnético

### 2.1 Introdução

O fundamento básico do método magnético de prospecção é o mapeamento de anomalias magnéticas causadas pela distribuição irregular de rochas magnetizadas em subsuperfície. Tais anomalias devem ser interpretadas como pequenas variações na intensidade do campo magnético terrestre. Neste ponto inicial não se pode deixar de notar uma certa semelhança com o método gravimétrico, pois, ambos estão baseados no mapeamento passivo de anomalias em campos naturais da Terra. Entretanto, apesar desta comparação óbvia, o método magnético requer mais atenção na interpretação, pois, ao contrário do campo gravitacional, que sempre tem direção radial, o campo magnético terrestre tem direção variável, sendo horizontal no equador e perpendicular nos pólos magnéticos, que não coincidem com os pólos geográficos. Deve-se, também, ser destacado que levantamentos magnéticos estão sujeitos a mais variações do que os gravitacionais. Entre os ruídos destacam-se: latitude, altitude de vôo, direção do vôo e variações diurnas. De certo modo estas dificuldades adicionais são contrabalançadas pelo fato de que magnetômetros são mais baratos, estáveis e de fácil operação quando comparados aos acelerômetros utilizados em medidas gravimétricas.



A unidade mais utilizada em levantamentos magnéticos é chamada de gamma, ou nanotesla (o tesla é a unidade SI para campo magnético). Valores típicos para o campo magnético terrestre são da ordem de 50000 gammas, ao passo que anomalias típicas de interesse para a indústria petrolífera são da ordem de 1 a 10 gammas. Ou seja, magnetômetros devem ter sensibilidade mínima de 1/50000.

Sabe-se que as anomalias produzidas por rochas podem ser associadas, tipicamente, com a quantidade de magnetita presente nestas rochas. Obviamente existem outros materiais magnéticos, mas nenhum presente em quantidades tão significativas quanto a magnetita. A classificação mais freqüente divide as rochas em básicas, com baixo teor de sílica e alta susceptibilidade magnética e em ácidas, com alto teor de sílica e baixa susceptibilidade. De modo geral as rochas sedimentares têm susceptibilidade muito baixa, o que leva a associação de medidas magnéticas com feições do embasamento ou com presença de rochas intrusivas básicas.

Boas referências para este capítulo são: (TELFORD et al. 1990), (GOMES 2006) e (JACKSON 1998)

## 2.2 Princípios Básicos

Fenômenos magnéticos são conhecidos pela humanidade desde a antiguidade. Apesar deste contato bastante antigo, levou-se muito tempo até o estabelecimento preciso das leis básicas que regem o magnetismo clássico<sup>1</sup>. Mesmo nos dias atuais, certos comportamentos magnéticos são, ainda, objeto de intenso estudo.

Sabe-se que fenômenos elétricos e magnéticos são manifestações de uma mesma força fundamental, entretanto, há uma diferença fundamental entre campos elétricos e magnéticos, pois estes últimos não podem ser atribuídos à existência de cargas (monopo-

---

<sup>1</sup>Entenda-se clássico como não quântico!

los) magnéticas livres. A entidade básica no tratamento do magnetismo é o (momento de) dipolo magnético. A partir do dipolo magnético podemos definir o fluxo (ou indução) magnética  $\vec{B}$  que define a direção e sentido preferenciais para o alinhamento de dipolos magnéticos.

Este trabalho não se concentrará no estudo de como determinados materiais apresentam, ou não, magnetismo e também não discutirá o estudo da reação de materiais na presença de campos magnéticos.

O eletromagnetismo clássico teve seu apogeu no século XIX quando Maxwell escreveu as quatro equações que sintetizavam todos os fenômenos elétricos e magnéticos até então conhecidos. Com o advento destas equações, que ainda hoje têm importância fundamental na ciência, a física, pela primeira vez teve contato com o conceito de unificação, pois, as equações de Maxwell, não só sintetizam a eletricidade e o magnetismo, mas, também, a ótica que passa a ser entendida como um fenômeno ondulatório. As equações de Maxwell, escritas em unidades SI, são:

1. Lei de Gauss:  $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ . Estabelece que campos elétricos são gerados por distribuições de carga.
2.  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$  É a versão para campos magnéticos da lei de Gauss, o significado mais importante desta lei é a inexistência de monopolos magnéticos.
3. Lei de Faraday:  $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ . Campos Magnéticos variáveis no tempo originam campos elétricos.
4. Lei de Ampère:  $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ . Correntes e campos elétricos variáveis no tempo originam campos magnéticos.

Aplicando-se o rotacional às leis de Faraday e de Ampère pode-se demonstrar que, no vácuo, os campos elétrico e magnético obedecem às seguintes equações de onda:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Ou seja, no vácuo, as equações de Maxwell predizem que ondas eletromagnéticas se propagam como ondas, tendo como velocidade  $v = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$  que é exatamente o valor da velocidade da luz ( $3 \cdot 10^8$  m/s). Visto de outra forma, a conclusão óbvia é que a luz é uma onda eletromagnética! Nas aplicações usuais de magnetismo é feita uma distinção entre indução magnética ( $\vec{B}$ ) e intensidade de campo magnético ( $\vec{H}$ ), por vezes chamado de campo aplicado. A outra grandeza relevante é a magnetização. Pode-se imaginar que um corpo sempre pode ser dividido em pequenos volumes, cada um contendo um dipolo magnético, de modo que a magnetização total será:

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{m}_i$$

onde  $V$  é o volume do corpo em questão.

### 2.2.1 Tipos de Magnetização

Uma classificação rudimentar dos materiais tomando-se como base suas propriedades magnéticas tenta classificá-los em função da resposta à um campo aplicado. Escreve-se:

$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

onde  $\chi$  é a susceptibilidade magnética. Esta grandeza é adimensional, mas sua magnitude depende do sistema de unidades utilizado. Nos casos mais simples  $\chi$  é um escalar, mas materiais complexos podem ser modelados permitindo-se que  $\chi$  seja, por exemplo, uma



função de  $\vec{H}$  ou então uma matriz, de modo que a susceptibilidade seja anisotrópica. De acordo com a resposta ao campo  $\vec{H}$  tem-se:

- Diamagnetismo- Ocorre quando a susceptibilidade é negativa, ou seja, o material se magnetiza na direção oposta à do campo aplicado. Neste caso a magnetização costuma ter baixa intensidade.
- Paramagnetismo- Ao contrário do diamagnetismo, a susceptibilidade é positiva.
- Ferromagnetismo- Acontece quando um corpo apresenta magnetização espontânea, isto é, mesmo na ausência de um campo externo. Um material ferromagnético pode sofrer uma transição de fase para um paramagnético desde que seja aquecido até uma determinada temperatura, chamada de temperatura de Curie.

Como já foi dito, muitos materiais podem apresentar magnetização mesmo na ausência de um campo aplicado. A este tipo de magnetização dá-se o nome de magnetização natural ou remanente. Há uma série de processos que podem levar a este resultado, os mais importantes sendo:

- Natural- Ocorrendo espontaneamente na natureza.
- Térmica- Resultado do resfriamento de um material até uma temperatura abaixo da temperatura de Curie na presença de campo magnético.
- Isotérmica- Adquirida durante um rápido intervalo de tempo após a aplicação de um intenso campo magnético mantendo-se a temperatura constante.
- Química- Adquirida durante a nucleação ou crescimento de grãos magnéticos em temperaturas abaixo da de Curie na presença de um campo ambiental.

## 2.3 Propriedades Magnéticas de Rochas

A grandeza básica definindo as propriedades magnéticas de um material é a susceptibilidade. Uma primeira classificação de materiais em função de suas propriedades magnéticas requer, obrigatoriamente, a quantificação de sua susceptibilidade. Pode-se dizer com segurança que a susceptibilidade está para o método magnético assim como a densidade para o método gravitacional.

Rochas que têm grandes concentrações de materiais ferro ou ferrimagnéticos apresentam naturalmente as maiores susceptibilidades. Portanto, rochas básicas ou ultrabásicas têm as maiores susceptibilidades, rochas ácidas ou metamórficas têm susceptibilidades intermediárias e rochas sedimentares têm, normalmente, susceptibilidades bastante baixas. É natural que a susceptibilidade de rochas metamórficas dependa em grande parte da rocha a partir da qual ela tenha sido formada.

Susceptibilidades variam em função de uma grande diversidade de fatores que não sejam apenas a composição mineralógica. Elas dependem, por exemplo, do alinhamento e da forma dos grãos que formam a rocha. Caso exista uma direção preferencial de alinhamento de grãos a susceptibilidade será altamente anisotrópica e isto deve ser levado em conta nas medidas. Interessante observar que a ocorrência deste tipo de anisotropia pode revelar bastante sobre o ambiente em que se passou a diagênese.

## 2.4 O Campo Geomagnético

Como foi dito na introdução, o objetivo dos levantamentos magnetométricos é mapear anomalias magnéticas que possam fornecer informações úteis sobre a área de interesse. Como consequência, tais mapeamentos têm caráter eminentemente regional e local, não tendo interesse em estudar o campo magnético terrestre em seu aspecto global.

Rocha ou mineral	$\chi$
<i>Sedimentares</i>	
Calcário	10 a 3000
Arenito	0 a 21000
Folhelho	60 a 18600
<i>Metamórficas</i>	
Gnaisse	100 a 25000
<i>Ígneas</i>	
Granito	50000
Gabro	1000 a 90000
Basalto	500 a 180000
<i>Minerais</i>	
Gelo (diamagnético)	-9
Quartzo (diamagnético)	-15
Magnetita	70000 a $2 \cdot 10^7$

Tabela 1: Susceptibilidade de rochas e minerais em unidades SI (TELFORD et al. 1990)

A aplicação do método magnético prescinde do conhecimento do campo geomagnético, de modo que seja possível separar as contribuições das anomalias regionais do campo magnético terrestre principal.

Mais uma vez deve-se enfatizar que a grandeza fundamental para se caracterizar a anomalia magnética causada por determinado tipo de rocha é sua susceptibilidade magnética, quanto maior ela for, maior a anomalia causada. Grosso modo pode-se ordenar as rochas mais comuns em ordem crescente de susceptibilidade: Sedimentares, Metamórficas, ígneas ácidas e ígneas básicas.

A teoria mais aceita para explicar a origem do campo magnético principal da Terra está baseada na noção de que correntes elétricas causadas pelo movimento de materiais ionizados presentes no núcleo são responsáveis pelo campo. A rotação da Terra aceleraria grandes quantidades de ferro e níquel presentes no núcleo que, por conta deste movimento gerariam correntes elétricas, levando o núcleo a atuar como um gigantesco dipolo magnético. Sabe-se que as posições dos pólos magnéticos não coincidem com os pólos geográficos e que, ao longo do tempo, ocorre uma movimentação apreciável dos pólos



magnéticos, chegando a ocorrer uma inversão em determinadas épocas. No momento não há explicação consensual para as razões deste movimento, apesar dele poder ser mapeado com razoável precisão. Para se mapear o campo paleomagnético utilizam-se registros de datação de rochas ígneas para se conhecer o campo à época.

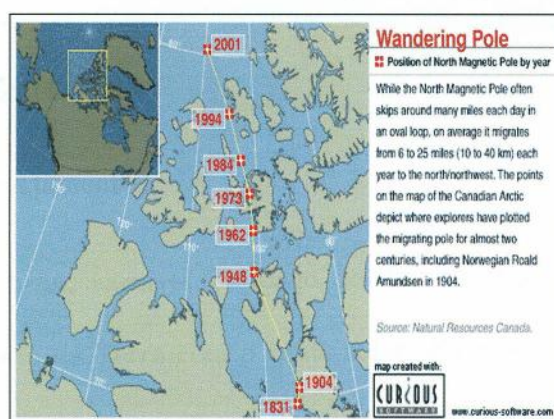


Figura 12: Movimentação do polo norte magnético ao longo do tempo. Em (GOMES 2006)

Como já foi dito, o principal objetivo da magnetometria aplicada à prospecção geofísica é mapear anomalias magnéticas que reflitam alguma estrutura geológica presente na região investigada. Uma das principais dificuldades neste mapeamento é o fato de que o campo magnético terrestre, ao contrário do gravitacional, não é constante. De fato, tanto sua intensidade quanto sua direção variam em escalas que vão dos milisegundos até os milênios. Para se obter uma correta caracterização do campo anômalo é necessário conhecer o campo magnético principal da Terra para que ele possa ser subtraído do campo medido e o resultado seja interpretado como causado unicamente por inhomogeneidades crustais. O processo de eliminar dos dados magnéticos todas as contribuições de que não sejam causadas por pela anomalia que se pretende estudar é chamado de redução. Desde o século XIX sabe-se que campos potenciais causados por fontes com simetria esférica podem ser descritos por meio de expansões em harmônicos esféricos. Por meio destas expansões é possível separar as frações do campo que tem origem interna das que tem origem externa.

A fonte externa principal é o vento solar e existem dois tipos de variação principais, uma diurna que é causada pela rotação da Terra envolta neste vento, alternando as regiões que estão mais ou menos expostas ao Sol e uma outra que é a decorrente da existência de tempestades solares. Já as fontes internas tem sua origem no núcleo terrestre.

### 2.4.1 Fontes Externas

Divididas em duas componentes:

- Componente diurna, variável ao longo do dia, resultado da interação do campo magnético próprio da Terra com o vento solar. Esta interação é variável por conta da rotação da Terra. Apesar de variável esta componente é previsível.
- Tempestades magnéticas, resultado de picos na atividade solar. Têm intensidade mais elevada que a componente diurna e são bem menos previsíveis.

### 2.4.2 Fontes Internas

Cerca de 80-90% do campo magnético terrestre pode ser atribuído a um dipolo magnético inclinado localizado no centro da Terra. Este é o chamado campo dipolar. O restante do campo geomagnético está confinado na parte externa do núcleo. Já foram observadas inversões na polaridade do campo dipolar em escalas de tempo que podem variar de milhares a milhões de anos.

Como dito anteriormente, a teoria usualmente aceita explica o campo dipolar como sendo originado pelo movimento de cargas elétricas no núcleo externo (líquido) da Terra. Existem fortes indícios que suportam esta teoria, obtidos com base em estudos sísmicos. O movimento de cargas seria possibilitado pela composição do núcleo terrestre, Ferro e Níquel, que são bons condutores. O núcleo líquido se moveria de forma bastante complexa



por conta de variações térmicas e/ou químicas. Provavelmente variações regionais do campo magnético sejam devidas a mudanças nestas correntes nucleares.

### 2.4.3 Campo Magnético Principal da Terra

Em cada ponto da superfície terrestre o campo magnético pode ser definido em termos de suas componentes vertical e horizontal. Caso não haja anomalias regionais, a medida deveria sempre indicar a direção do campo magnético principal (de origem nuclear). Ocorre que esta direção não tem motivo algum para coincidir com meridianos geográficos e nem para ser horizontal. Desta forma são necessárias três medidas para caracterizar corretamente o campo: a magnitude, a inclinação (ou mergulho) com a horizontal e a declinação, ou seja, o ângulo que o campo faz com o Norte geográfico. Obviamente ambas as representações (componentes vertical e horizontal ou magnitude, inclinação e declinação) são equivalentes, podendo ser pensadas como sistemas de coordenadas, cada uma sendo mais apropriada em determinado tipo de problema.

Uma maneira usual de representar medidas do campo geomagnético é através de mapas de declinação, inclinação ou magnitude constantes. Tais mapas são chamados de mapas isomagnéticos. Em seu aspectos mais geral, tais mapas são insensíveis a variações geológicas na superfície, uma vez que a maior parte do campo terrestre é gerada no núcleo. Por isso o aspecto global de tais mapas se assemelha ao de um dipolo. Os pólos magnéticos são pontos onde a inclinação é de noventa graus e não coincidem com os pólos geográficos.

Através de uma expansão em harmônicos esféricos do potencial magnético pode-se separar o campo geomagnético nas componentes geradas no núcleo e nas geradas na crosta. Tem-se então,

$$V = R_t \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{R_t}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)) P_n^m(\theta)$$



sendo  $\phi$  a longitude,  $\theta$  a colatitude,  $P_n^m(\theta)$  um polinômio normalizado de Legendre,  $R_t$  o raio da Terra e  $g_n^m$  e  $h_n^m$  os coeficientes de Gauss, que devem ser calculados diretamente por medidas do campo magnético terrestre.

Com os coeficientes de Gauss pode-se calcular o espectro de potência do campo:

$$R_n = (n + 1) \sum_{m=0}^n [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2]^{1/2}$$

A parte do espectro com  $n < 14$  tem origem abaixo da descontinuidade de Gutenberg (núcleo/manto), para  $n > 14$  as fontes se encontram nos primeiros 100 km da crosta. Bastaria então calcular  $g_n^m$  e  $h_n^m$  para  $m = n = 14$ , obtendo o campo do núcleo e subtrair o resultado da medida total para se ter a contribuição da crosta. Obviamente este procedimento é válido apenas quando todas as demais variações já tenham sido tratadas.

O campo principal da terra (IGRF- *International Geomagnetic Reference Field*) é um modelo para o campo geomagnético que inclui coeficientes até 10, acrescido de termos que buscam compensar a variação secular. A cada cinco anos o IGRF é atualizado para compensar as variações seculares. A seguir estão ilustrados dois exemplos do IGRF. Pode-se notar as diferenças que existem entre cada versão.

## 2.5 Aquisição

Atualmente o processo de aquisição de dados magnéticos é feito na maior parte das vezes em conjunção com levantamentos sísmicos (realizados por navios sismográficos) ou em levantamentos aéreos dedicados (levantamento aeromagnético). Em ambos os casos o levantamento é executado de modo que se tenham medidas dispostas sobre uma malha regular cobrindo a área de interesse. Obviamente as linhas podem ser mais densas em sub-regiões que necessitem de maior cobertura. Quando se contrata um levantamento deve-se especificar a cobertura requerida e diversos parâmetros que controlem a qualidade

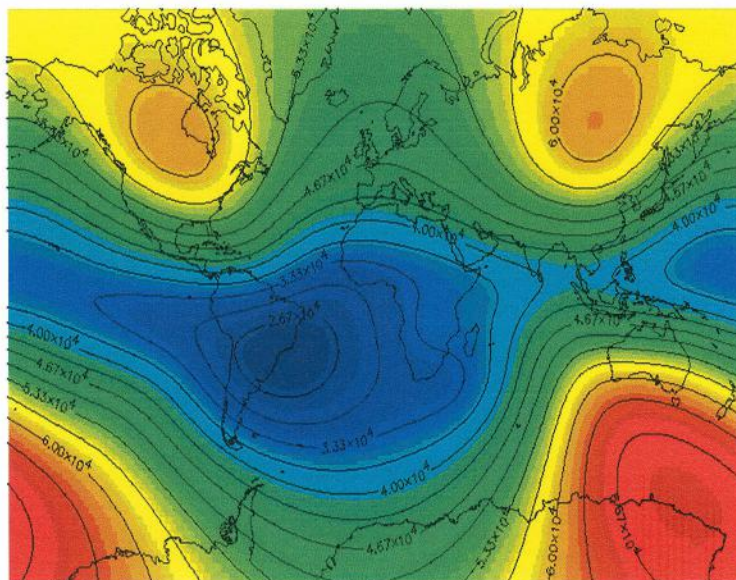


Figura 13: IGRF em 1950. Retirado de (GOMES 2006)

do levantamento, de modo a permitir, por exemplo, uma correta cartografia e se evitar levantamentos em dias não propícios, como no caso de tempestades solares.

Normalmente os aviões são equipados com um magnetômetro de prótons que mede o valor da intensidade do vetor campo magnético terrestre total. Este vetor é a soma do campo magnético principal da terra (IGRF- International Geomagnetic Reference Field) com a perturbação causada por alguma anomalia magnética local.

Como explicado no tópico anterior, o IGRF é um modelo matemático definido em termos da expansão de harmônicos esféricos do campo magnético terrestre, sendo recalculado a cada cinco anos com base em dados fornecidos por observatórios espalhados em todo o mundo, desta forma seu valor é conhecido para cada ponto da superfície terrestre. Este valor é então subtraído do valor medido para se obter um valor que, após uma série de correções fornece o valor da anomalia. Considera-se que as anomalias sejam causadas por fontes rasas na litosfera.

O valor do campo anômalo é devido a duas magnetizações de origens distintas: a



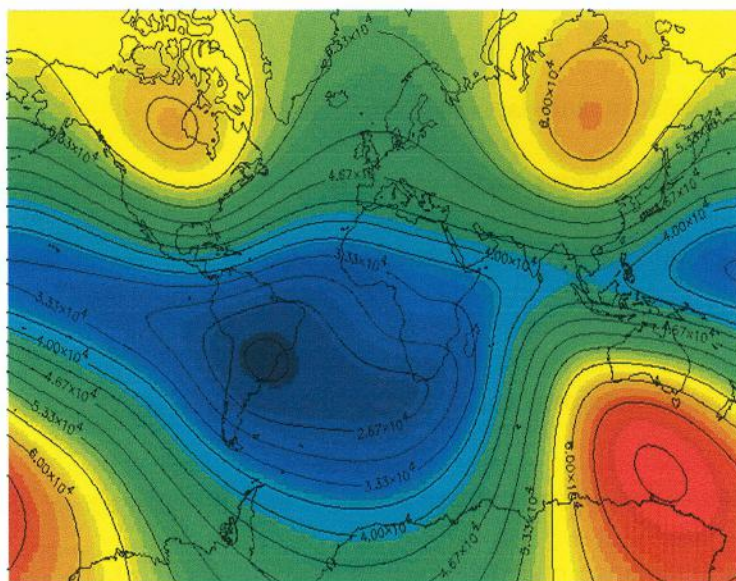


Figura 14: IGRF em 2000. Retirado de (GOMES 2006)

remanescente e a induzida. A remanescente é o resultado da história geológica da rocha, refletindo o campo magnético passado, mais especificamente, no caso do basalto, o que estava presente no momento em que a rocha sofreu transição para-ferromagnética. Já a magnetização induzida depende do campo magnético atual e da susceptibilidade das rochas.

Durante a aquisição é importante tomar cuidado com alguns fatores que podem influenciar na leitura dos aparelhos, causando ruídos que devem ser eliminados para uma correta interpretação dos dados: Cercas, linhas de energia, tempestades magnéticas, muros com rochas magnéticas, tubos e cabos subterrâneos.

Caso a área de interesse não seja muito extensa, pode-se recorrer a uma aquisição terrestre utilizando-se magnetômetros portáteis. Existe ainda a possibilidade de se equipar um navio sismográfico com um magnetômetro.



## 2.6 Interpretação

Uma vez adquiridos os dados são realizados alguns procedimentos tais como a remoção de efeitos indesejáveis e a aplicação de filtros específicos que devem realçar determinadas características do terreno. Podemos citar a redução ao pólo e a aplicação de filtros.

Uma possível sequência de tratamento de dados aeromagnéticos é a que segue:

1. *Gridagem*. Nesta etapa é definida uma malha regular (*grid*) cobrindo a superfície da região estudada. Esta malha é necessária pois o computador não trabalha com variáveis contínuas, sendo necessária a introdução de uma discretização. A precisão desejada é obtida com a aproximação ou afastamento das linhas do *grid*. É importante salientar que nesta etapa também costuma ser definido o sistema de coordenadas geográficas utilizado.
2. Pré-processamento, que pode ter várias etapas, como o cálculo de derivadas e a extração da componente vertical.
3. Adição de perfis para atenuação de ruído de fundo. Tais perfis devem ser previamente conhecidos para a região.
4. Filtragem e determinação de um limiar de aceitação para as anomalias de interesse.
5. Análise dos perfis para identificar anomalias.
6. Comparação dos perfis obtidos com perfis sintéticos, obtidos a partir de modelos previamente concebidos.

Ao se interpretar um mapa ou perfil magnético deve-se ter em mente que, por conta da natureza dipolar do campo magnético, uma anomalia pode ter a forma de um pólo

positivo, de um pólo negativo ou de um dipolo. Um corpo magnetizável terá uma magnetização induzida pelo campo magnético terrestre. Como a magnetização é uma grandeza vetorial, a anomalia magnética será o resultado da soma de três vetores: O do campo magnético terrestre, o da magnetização remanente (se houver !) e o da magnetização induzida.

Uma área de pesquisa bastante ativa tanto para magnetometria quanto gravimetria é a inversão. Seu objetivo é, partindo de perfis de campo, obter modelos geológicos confiáveis. Apesar de ser um método matematicamente mal posto, pois tem solução não única, uma série de algoritmos foi desenvolvida e resultados reais daí derivados.

Dado que rochas sedimentares não provocam anomalias normalmente perceptíveis para os magnetômetros utilizados, a principal aplicação da magnetometria na geofísica exploratória está em poder desvendar grandes feições estruturais que modelam a bacia, bem como mapear importantes intrusões ígneas, como diques ou soleiras, que, de algum modo possam ter provocado algum rearranjo estrutural importante na bacia. Comumente em regiões de bacias sedimentares pode haver certa semelhança entre dados gravimétricos e magnetométricos, mas as anomalias magnéticas são mais numerosas e de maior magnitude que as gravimétricas. Neste ponto cabe ressaltar que a visualização sísmica de camadas abaixo de rochas ígneas (soleiras, *sills*, por exemplo) fica bastante prejudicada, por conta do grande contraste de impedância entre estas e as rochas sedimentares, contraste este que se traduz em grandes perdas da energia gerada pela fonte sísmica. Nestes casos a possibilidade de se utilizar um método potencial para visualizar melhor a região deve ser seriamente considerada.

A interpretação de dados magnéticos é, por diversas vezes, puramente qualitativa por conta da natureza bastante complexa, difusa (de fontes múltiplas) e errática das anomalias vistas em mapas. Todavia não se deve crer que o método se limita a fornecer



conclusões qualitativas, existem também métodos para obter informações quantitativas a partir de dados magnéticos. Como exemplo pode-se citar a deconvolução de Euler, empregada no cálculo da profundidade de anomalias.

### 2.6.1 Deconvolução de Euler

Talvez uma das informações mais importantes que devem ser extraídas de levantamentos magnéticos seja a profundidade das anomalias. Desde a década de 80 uma das técnicas mais utilizadas é a deconvolução de Euler, que foi desenvolvida com o intuito de convolver (colapsar) dados magnéticos a uma fonte pontual a uma determinada profundidade. O método trata diretamente dos dados magnéticos e não é necessário que se faça nenhuma suposição de ordem geológica para aplicá-lo. Ou seja, ganha-se uma enorme vantagem do ponto de vista interpretativo, uma vez que o resultado da rotina de cálculo não carrega consigo nenhum vício de modelos geológicos pré-concebidos. Tem-se então uma forma de avaliar criticamente interpretações geológicas sobre uma área de interesse, especialmente no que tange às características estruturais.

O método de Euler se utiliza do campo magnético total

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} - z_0 \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T) \quad (1)$$

onde  $x_0$ ,  $y_0$  e  $z_0$  são as coordenadas da fonte magnética cuja intensidade total do campo  $T$  e o valor regional são medidos em um ponto  $(x, y, z)$ .  $N$  é o grau de homogeneidade da equação de Euler e em aplicações magnetométricas é conhecido como índice estrutural.

Atualmente o método de Euler já está incorporado em vários *softwares* comerciais e tem sido constantemente utilizado tanto em obras de engenharia (localização de dutos, fundações etc.) quanto na determinação de características geológicas regionais.

Grosso modo estimativas de profundidade são obtidas pela solução recursiva da



equação de Euler quando medida em uma série de pontos. Consegue-se desta forma um sistema com número de equações maior que o número de incógnitas, sistema este que será resolvido por um método de mínimos quadrados.

## Capítulo 3

### Estudo de Caso

#### 3.1 Contexto Histórico

Neste capítulo será apresentado um breve resumo e uma discussão do artigo “Arcabouço Tectônico da Bacia do Espírito Santo, como interpretado de dados magnéticos” de Gunter Karl Waldemar Selch (SELCH 1971).

Desde a década de 50 a Petrobras esteve comprometida com levantamentos gravimagnéticos das bacias sedimentares brasileiras. Em virtude da qualidade e utilidade dos dados levantados, resolveu-se, em 1967, iniciar um levantamento aeromagnetométrico completo da plataforma continental brasileira. Este levantamento, abrangendo quase toda a plataforma, foi concluído em 1970. O objetivo deste capítulo é fazer uma breve discussão da aplicação dos dados deste levantamento à região da bacia Bahia Sul/Espírito Santo.

#### 3.2 Descrição do Levantamento

##### 3.2.1 Dados Gerais

O levantamento foi executado pela extinta firma alemã Prakla entre novembro de 1968 e janeiro de 1969, cobrindo a área limitada ao norte pela cidade de Belmonte e ao sul pela

foz do rio Doce. A cobertura foi feita com perfis orientados na direção Leste-Oeste, da cota batimétrica 200 m até o continente. Os perfis principais foram espaçados de 4 km até a cota batimétrica de 50 m. Adicionalmente foram estendidos grupos de quatro perfis na direção leste espaçados de 20 km. Na direção Norte-Sul foram levantados perfis para controle do levantamento. A extensão total do levantamento foi de 23.063 km.

Interessante notar que à época não existia o sistema GPS (*Global Positioning System*) de localização por satélite, de modo que a localização e marcação das coordenadas do vôo teve de ser feita baseada num sistema via rádio desenvolvido pela Prakla. Como resultado, o erro médio final cometido foi da ordem de 75 m.

Abaixo alguns outros dados do levantamento:

- Altitude de vôo: 700m acima do nível do mar.
- Gradiente vertical do campo:  $3\gamma/100m$ .
- Medições magnéticas: magnetômetros de precessão de prótons com precisão de  $1\gamma$ .

Todos os dados levantados foram corrigidos para se compensar a variação diurna do campo magnético. Após alguns ajustes os dados foram organizados de forma a refletir anomalias e não mais simplesmente magnitudes do campo magnético. As anomalias são definidas como a diferença entre o valor medido e o valor do campo regional. O resultado obtido pode ser visto na figura 17.

### 3.3 Interpretação dos Dados

Sempre que se faz interpretação de dados magnéticos é necessário ter conhecimento prévio do valor (médio!) do campo magnético terrestre na área de interesse. Como foi visto no capítulo anterior, tais dados estão disponíveis para a comunidade internacional através do IGRF. No caso da magnetometria aplicada à exploração de hidrocarbonetos, raramente



se observam anomalias maiores que um décimo da intensidade total do campo magnético. Na área mapeada os valores médios utilizados foram: 26.000  $\gamma$ , inclinação de 22° S e 20° de declinação.

### 3.3.1 Métodos de Interpretação

Foram utilizados dois métodos de interpretação, o numérico e o gráfico. No método numérico usa-se, por exemplo, a análise harmônica para estudar as ondulações do embasamento ou um ajuste por mínimos quadrados para estudar anomalias isoladas. A principal vantagem de se utilizar métodos numéricos de interpretação é a eliminação da subjetividade introduzida pelo intérprete. Obtem-se sempre os mesmos resultados para um mesmo conjunto de dados de entrada.

Quando se quer estudar anomalias isoladas pode-se recorrer ao método gráfico de interpretação de perfis. Já foram catalogados vários efeitos que se espera observar quando causados pelas distintas anomalias. Ao contrário do método numérico, o método gráfico de análise de perfis sofre bastante influência do intérprete dos dados.

#### Interpretação Qualitativa

Esta costuma ser a primeira fase de análise de qualquer levantamento feito empregando-se algum método potencial. Na figura 18 estão expostos os resultados obtidos com esta técnica. A área do levantamento pôde ser dividida em províncias de acordo com o caráter das anomalias ali presentes. Há uma região em que as anomalias têm maior magnitude e outra com magnitude menor. Na mesma figura pode-se ver o alinhamento dos eixos das anomalias, o que sugere a presença de uma falha.

Já na figura 18B é mostrado uma outra maneira de se interpretar qualitativamente os dados. Alinhando-se os eixos das anomalias pode-se conseguir uma indicação de falha

que, entretanto, não pode ter seu rejeito estimado por este método.

### Interpretação Quantitativa

Criam-se modelos sintéticos de corpos magnetizados e a partir daí são obtidos perfis. Com base nestes perfis são feitas comparações com os dados reais para avaliar qual dos modelos sintéticos melhor descreve as anomalias realmente registradas. Obviamente a grande limitação deste método está na impossibilidade de descrever adequadamente corpos magnetizados reais em termos das figuras geométricas extremamente simplificadas utilizadas nos modelos sintéticos. Além das figuras geométricas serem extremamente simples, adotam-se outras generalizações, como supor, por exemplo, que a extensão vertical para baixo é infinita ou que a extensão ao longo da direção *strike* é infinita também. Em contrapartida, utilizando-se tais modelos consegue-se realizar um menor número de aproximações nos cálculos, o que pode ser vantajoso. Notar que não se deve confundir aproximações matemáticas com aproximações feitas durante a fase de modelagem. Mesmo modelos extremamente simples podem precisar de matemática bastantes sofisticada para descrevê-los adequadamente.

Na figura 19 estão ilustrados os modelos sintéticos usados e as anomalias resultantes para uma inclinação de  $-22^{\circ}$ . Notar que os modelos usados são prismas bidimensionais, ou seja, sua extensão ao longo da direção perpendicular ao desenho é infinita. Como dito no parágrafo anterior, a maior ressalva a este tipo de abordagem é a simplicidade das formas geométricas utilizadas no modelo sintético. Por conta disto, essa modelagem deve ser usada apenas no tratamento de corpos de grande extensão ao longo da direção *strike* ou para baixo.



### 3.3.2 Análise de Magnetização

Analisou-se a magnetização dos corpos apenas tomando-se a diferença entre o mínimo e o máximo de cada anomalia. Os valores obtidos são magnetizações aparentes, correspondentes aos contrastes de magnetização dos corpos e das rochas encaixantes.

Foi calculado um valor médio para a magnetização de 28 perfis sobre as falhas, o resultado sendo  $13,5\gamma$ , num campo de  $26.000\gamma$  isto corresponde a uma susceptibilidade de  $520 \times 10^{-6}$  unidades cgs. Tal valor se encontra de acordo com o esperado para gnaiss e pode, portanto, ser tomado como representativo do embasamento Pré-Cambriano.

Na figura 20 está um histograma que relaciona o número de corpos encontrado a cada faixa de magnetização, em intervalos de  $10\gamma$ . Neste histograma não estão representados os corpos com magnetização maior do que  $200\gamma$ . Em todo o levantamento foram encontrados apenas dois corpos com magnetização bem alta, um com  $880\gamma$  e outro com  $620\gamma$ .

Por fim resolveu-se dividir os corpos magnetizados em três grandes grupos, como mostrado na tabela 3.3.2.

Grupo	Intervalo ( $\gamma$ )	Média ( $\gamma$ )	$\chi(10^{-6}cgs)$
1	13,5–50	32,4	1,240
2	50–110	78,5	3,020
3	> 110	204,2	7,850

Tabela 2: Divisão de corpos de acordo com sua magnetização e susceptibilidade (SELCH 1971).

Obviamente, não se pode deduzir a litologia tendo como base apenas a susceptibilidade, entretanto, ela pode servir de guia. Propõe-se, então, a seguinte classificação:

- Grupo 1– tais anomalias seriam possíveis mudanças litológicas dentro do cristalino Pré-Cambriano (corpos ácidos). Provavelmente as profundidades dos topos destes corpos são as profundidades do embasamento.



- Grupo 2- Estas anomalias seriam causadas por corpos mais básicos.
- Grupo3- Anomalias causadas por corpos básicos e ultra-básicos.

Deve se considerar a possibilidade de que as profundidades dos corpos dos grupos 2 e 3 não sejam as profundidades do embasamento, mas sim de intrusões nos sedimentos. Quanto menor a profundidade maior seria esta possibilidade.

### 3.4 Esboço Estrutural do Embasamento

Ao final do processo foi obtido uma interpretação para o embasamento cristalino da bacia, figura 21. Como pode ser visto, não foi possível individualizar corpos magnetizados, mas as províncias foram divididas de acordo com sua faixa de intensidade de magnetização. Notar que cada província está classificada de acordo com a predominância de determinada magnetização, o que não quer dizer que não possam ocorrer manifestações isoladas de corpos de magnetização fora da faixa.

Corpos com magnetização fora da faixa têm profundidade normalmente grande, o que permite supor ausência de rochas intrusivas rasas. Existem exceções no quadrângulo A3 e B3. No caso da intrusão de diabásio em A3, ela foi encontrada pelo poço 2-CST-1-BA a uma profundidade de 900m. Como resultados finais a interpretação revela seis áreas de grande espessura sedimentar:

- Bacia do Jequitinhonha
- Fossa profunda já estudada pelo poço 1-BAS-2
- Baixo de Mucuri(A2/A3) com forma provável de semi-gráben.
- Áreas sul e leste de Abrolhos
- Baixo em B1 cuja parte sul está em águas profundas

- Foz do rio Doce

Junto à foz do rio Doce pôde ser identificado um elemento estrutural bastante marcante, uma falha de grande rejeito na borda leste. Esta falha foi identificada pela aeromagnetometria como tendo uma extensão de quase 150 km. Na região compreendida entre esta falha e uma outra falha lateral, ocorrem domos de sal. Apenas pelo mapa aeromagnético (que aponta anomalias de pequena amplitude) a presença do sal não foi conclusiva, assim como outras áreas onde ocorrem domos salinos não tiveram sua presença notada em termos de anomalias.

Os dois altos apontados pela magnetometria na região leste da bacia como tendo tendência magnética básica também foram apontados pela sísmica como altos estruturais do Terciário. A interpretação aeromagnética foi ainda corroborada pela perfuração do poço 1-ESS-4, que encontrou basalto a 1200m de profundidade.

Este trabalho, apesar de antigo e de utilizar métodos à época modernos de interpretação e análise de dados aeromagnéticos conseguiu reproduzir com razoável precisão o arcabouço tectono-estrutural da bacia do Espírito Santo. Este tipo de trabalho exemplifica bem o valor da método magnetométrico como ferramenta para o estudo de bacias sedimentares objetivando a exploração de hidrocarbonetos.

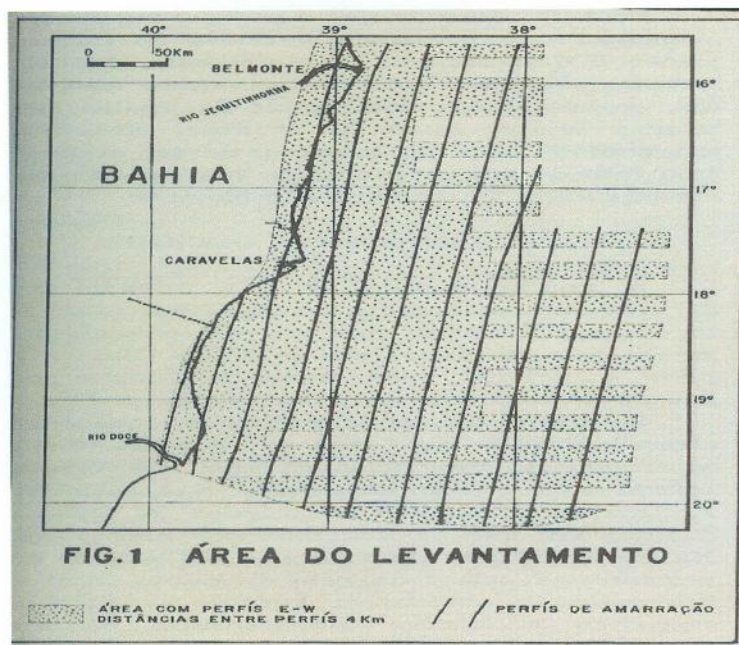


Figura 15: Área do levantamento, de Belmonte até a foz do rio Doce (SELCH 1971).



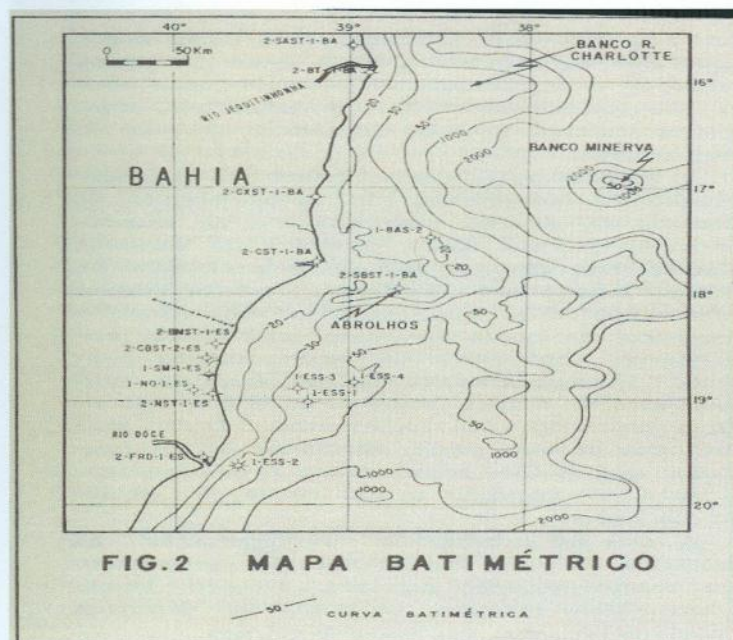


Figura 16: Mapa batimétrico da região do levantamento (SELCH 1971).

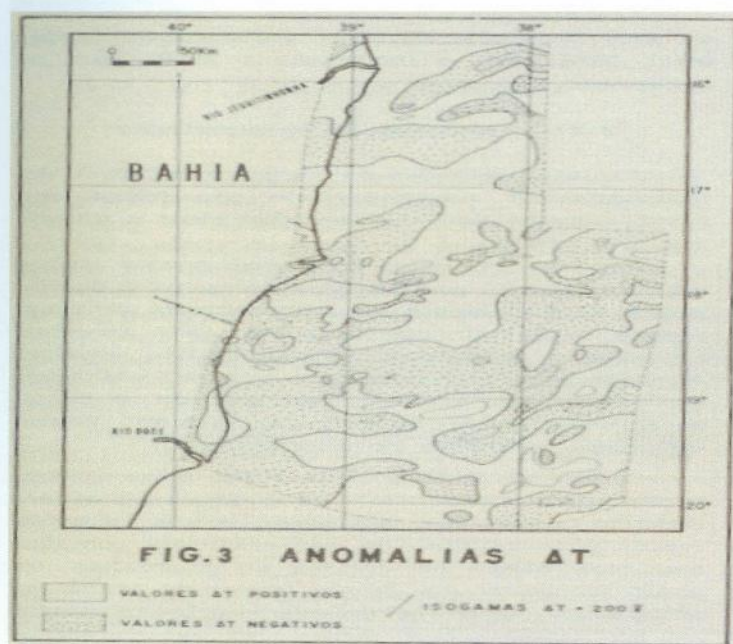


Figura 17: Anomalias do campo total como diferença entre valor medido e valor do campo regional ( $\Delta T$ ) e mapa de isogamas. (SELCH 1971).



Figura 18: Princípios da interpretação qualitativa. Separação em províncias, de acordo com o comportamento das anomalias e alinhamento dos eixos das anomalias, indicando uma possível falha (SELCH 1971).



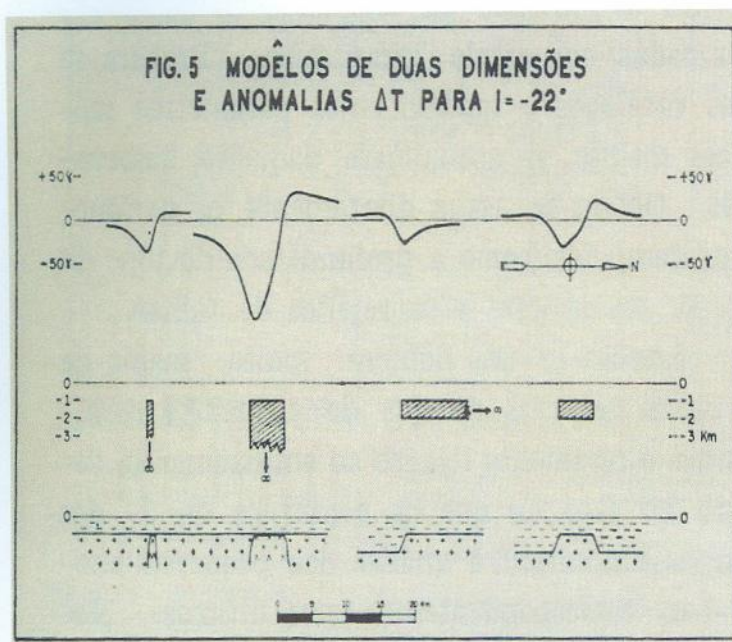


Figura 19: Anomalias causadas por modelos sintéticos para inclinação de  $-22^\circ$  (SELCH 1971).

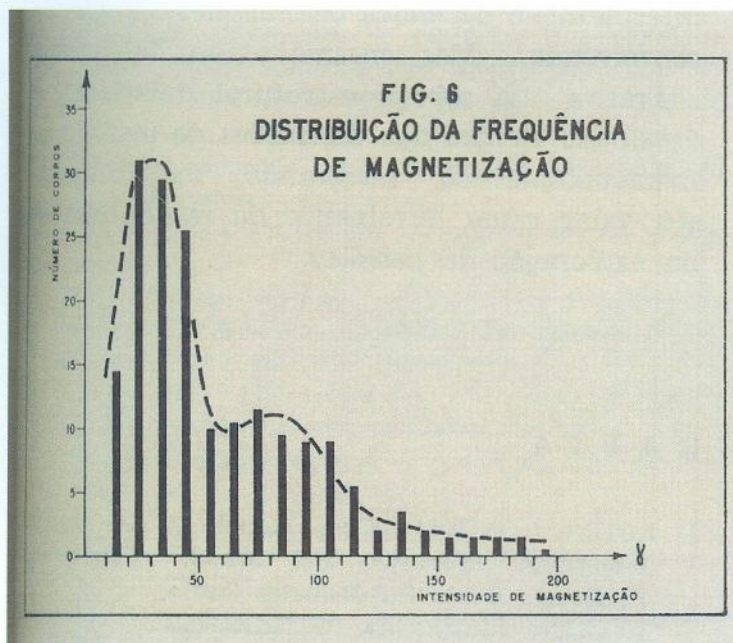


Figura 20: Histograma relacionando o número de corpos encontrados e os valores de magnetização (SELCH 1971).

## Referências Bibliográficas

ALMEIDA, F. As Ilhas de Itaipua e Itaipua  
Anais da Academia Brasileira de Ciências

ALMEIDA, F. et al. Geologia  
brasileira com o das Américas  
n. 3, p. 125, 1955

ASMUS, H. e  
Brazileiro

BIASSUSI, A.

BIZZI, L. A.  
SIG. (S.I.)

CHANG, H. M.  
Tectonophy

CORDANI, U.  
ton tectôno  
ploração de

COSMO, C.  
AAPG Sp

GOMES, B. S.  
2006.

GUERRA, M. C.  
fluência de  
de Ouro Preto

JACKSON, J.

LIMA, V. A.  
Geociência

MILANI, E.  
resultado

MORIANI, J.  
et al. (P.  
S.I.) C

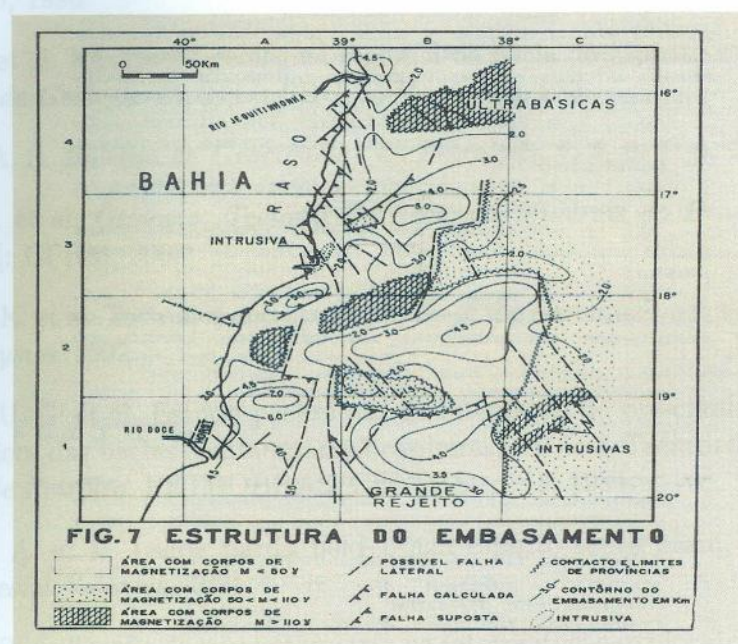


Figura 21: Resultado final da interpretação (SELCH 1971).



## 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.l.]: 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.l.]: CPRM, 2003.
- 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 parada field-brazil espírito santo basin, southeaster brazil. *AAPG Special Volumes*, 1991.
- GOMES, B. S. Aplicação de magnetometria na interpretação exploratória. PETROBRAS, 2006.
- 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.
- JACKSON, J. D. *Classical Electrodynamics*. 3. ed. [S.l.]: Ed. John Wiley & Sons, 1998.
- LIMA, V.; AURICH, N. Bacia do espírito santo - arcabouço estrutural. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, v. 4, n. 1, p. 14, 1990.
- MILANI, E. J. et al. Petróleo na margem continental brasileira: Geologia, exploração, resultados e perspectivas. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 18, n. 3, 2000.
- MORIAHK, 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.l.]: CPRM, 2003.

- 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.
- SELCH, G. K. W. Arcabouço tectônico da bacia do espírito santo, como interpretado de dados magnéticos. In: *Congresso Brasileiro de Geologia 25*. [S.l.]: SBG, 1971. v. 3, p. 227.
- 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. *FUNDACAO 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.l.]: Revista Brasileira de Geociências **16** (4), 1986. p. 357.
- TELFORD, W. et al. *Applied Geophysics*. 2. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 1990.
- VIEIRA, R. et al. Bacias do espírito santo e mucuri. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, v. 8, n. 1, p. 191, 1994.