



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

João Victor Garcia de Lima

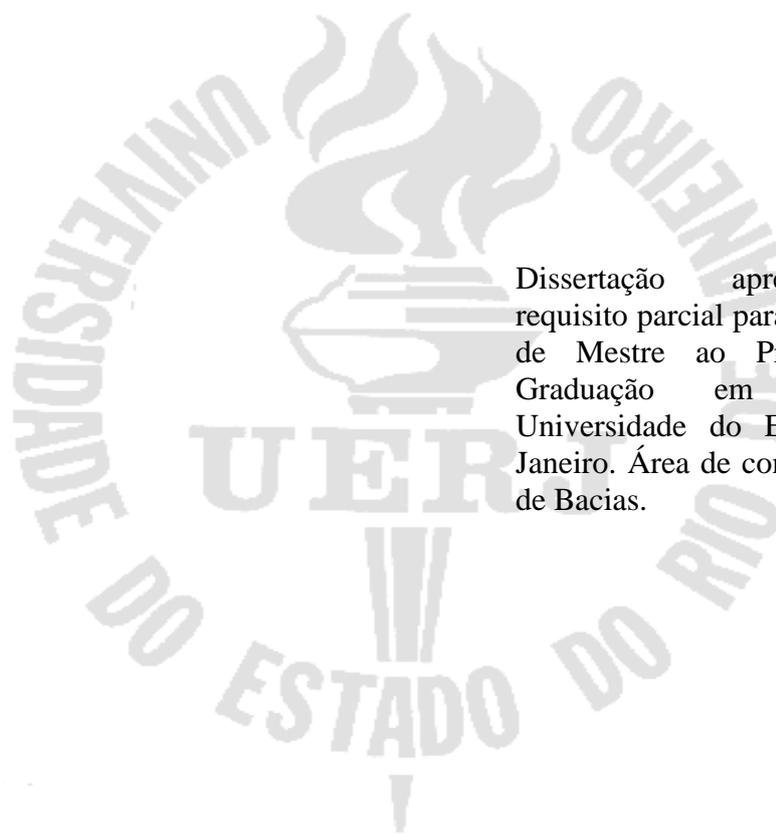
**Análise regional geofísica e geológica das estruturas profundas na
Bacia de Santos**

Rio de Janeiro

2013

João Victor Garcia de Lima

Análise regional geofísica e geológica das estruturas profundas na Bacia de Santos



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias.

Orientador: Prof. Dr. Webster Mohriak

Rio de Janeiro

2013

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

L732 Lima, João Victor Garcia de.
Análise regional geofísica e geológica das estruturas profundas na Bacia de Santos / João Victor Garcia de Lima. – 2013.
112f. : il.

Orientador: Webster Ueipass Mohriak.
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.
Bibliografia.

1. Geologia estrutural – Santos, Bacia de (SP) - Teses. 2. Bacias sedimentares - Teses. 3. Geofísica – Santos Bacia de (SP) - Teses. I. Mohriak, Webster Ueipass. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. III. Título.

CDU 551.243(815.6)

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese.

Assinatura

Data

João Victor Garcia de Lima

Análise regional geofísica e geológica das estruturas profundas na Bacia de Santos

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias.

Aprovado em 27 de março de 2013.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Webster Mohriak
Faculdade de Geologia (UERJ)

Prof. Dr. Miguel Mane
Faculdade de Geologia (UERJ)

Prof. Dr. Mauro Geraldês
Faculdade de Geologia (UERJ)

Rio de Janeiro

2013

AGRADECIMENTOS

A Deus que sempre esteve ao meu lado provendo-me as oportunidades de crescimento na vida tanto profissionalmente quanto pessoal.

A minha família que me apoiou desde sempre.

Ao meu grande amigo de geofísica e de vida, Alex Peçanha.

Ao professor, Webster Mohriak que me orientou ao longo de todo o projeto.

A Manoela Lopes pela co-orientação que vai além desse projeto.

Aos professores, Mauro Andrade (ON), Adalberto da Silva (UFF), Cleverson Gizan (UFF), Sidney Mello (UFF), Christian Gorini (Paris VI) e Marcia Maia (IUEM), por terem aberto portas de suma importância na minha vida acadêmica e profissional.

A Shell, em especial ao time de Exploração que acreditou e acredita no meu potencial apoiando esse projeto, em especial a geofísica Holly Hunter que me ensinou toda a metodologia de modelagem usada nesse projeto.

A todos que de maneiras específicas contribuíram para esse momento.

E ao 42.

Fiz um acordo de coexistência pacífica com o tempo:

Nem ele me persegue, nem eu fujo dele.

Um dia a gente se encontra.

Mário Lago

RESUMO

LIMA, J. V. G. *Análise regional geofísica e geológica das estruturas profundas na Bacia de Santos*. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Na maioria das situações relacionadas aos estudos da Terra, um método geofísico não é suficiente para chegar a uma conclusão de uma questão específica, já que o mesmo é passivo de ambiguidades ou incertezas na interpretação. Para tal, se faz necessário que um ou mais métodos sejam integrados, gerando uma resposta que se aproxime do modelo real e com confiabilidade para que a mesma metodologia possa ser aplicada em outros casos similares, otimizando a utilização conjunta dos métodos. Partindo desse ponto o presente trabalho sugere a realização de uma Modelagem Gravimétrica 2-D, auxiliada por dados sísmicos e de poços, visando o mapeamento das estruturas profundas da bacia de Santos. O conhecimento sobre as mesmas é de grande importância para estudos tectônicos para reconstrução histórica da bacia que servem de parâmetro de entrada nos estudos de modelagem visando reconstruir os processos de geração, migração e acumulação de hidrocarbonetos.

Palavras-chave: Integração. Modelagem gravimétrica 2D. Bacia de Santos. Embasamento. Seção sedimentar.

ABSTRACT

LIMA, J. V. G. *Geophysical and geological Regional analysis of deep structures in Santos Basin*. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Considering most scenarios relative to Earth studies, using a geophysical method of problem solving alone is inefficient considering the inherent ambiguities or uncertainties within interpretations. Therefore, it is necessary to integrate one or more methods when generating real Earth approximation responses with such reliability that the same methodology can be applied to similar cases, further optimizing results. This project suggest the implementation of 2D Gravity Modeling, incorporating seismic and well data, to generate map of the basement characterization of the northern part of the Santos Basin. Knowledge of crustal formations is essential as an input parameter for basin analysis in understanding tectonic activity with special considerations to historical reconstruction processes of generation, migration and accumulation of hydrocarbons.

Keywords: Integration. 2D Gravity modeling. Santos basin. Basement. Sedimentary section.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Mapa das Bacias Sedimentares Brasileiras.....	14
Figura 2	Localização e limites da Bacia de Santos.....	16
Figura 3 -	(A) Esquema da estruturação do interior da Terra apresentando camadas (B) e suas respectivas velocidades de propagação das ondas sísmicas S e P (C) e as variações do gradiente geotérmico.....	19
Figura 4 -	Exemplo de crosta continental afinada em região de margem passiva	20
Figura 5 -	Esquema da evolução do grau de conhecimento e das interpretações alternativas das estruturas profundas na Bacia de Santos.....	22
Figura 6 -	Esquema de uma aquisição sísmica e seu imageamento.....	23
Figura 7 -	Esquema de um poço sendo perfurado.....	24
Figura 8 -	Mapa Global da Anomalia Free-air Derivada de Satélite.....	25
Figura 9 -	Supercontinente Gondwana e Laurásia antes da Ruptura.....	29
Figura 10 -	Mapa Global dos Limites Tectônicos Atuais no Oceano Atlântico.....	30
Figura 11 -	Reconstrução da abertura do Atlântico Sul, do Eo-Cretáceo (130 Ma) ao Campaniano (80 Ma), mostrando a configuração dos continentes, os polos de rotação e os vetores de movimentos das placas.....	31
Figura 12 -	Extensão litosférica simétrica.....	33
Figura 13 -	Extensão litosférica assimétrica.....	34
Figura 14 -	Extensão litosférica com a presença de manto exumado.....	35
Figura 15 -	Mostra o conjunto de mapas derivados da interação de dados aéreos, terrestres, marinhos e de satélite (batimetria e gravimetria) na Margem Continental Brasileira. (A) apresenta o mapa batimétrico da margem continental brasileira / (B) apresenta o mapa de anomalias free-air / (C) o mapa de anomalias Bouguer.....	36
Figura 16 -	Evolução geotectônica de uma bacia rifte.....	37
Figura 17 -	Estrutura crustal da Bacia de Santos	38
Figura 18 -	Áreas dos derrames vulcânicos do pré-rifte.....	39
Figura 19 -	Deposição dos Sedimentos da fase sin-rifte.....	40
Figura 20 -	Reconstruções paleogeográfica do barremiano ao neo-aptiano, mostrando as principais fases tectônicas e a abrangência da sedimentação marinha no Oceano Atlântico Sul.....	42

Figura 21 - Contato entre crosta continental e oceânica ao longo da Zona de Fratura do Rio Grande e a sequência Evaporítica restrita à Bacia de Santos.....	43
Figura 22 - Representação dos diápios de Sal e imageamento inferior nas camadas abaixo	44
Figura 23 - Limites evaporíticos aptianos na Bacias de Santos, Campos e Espírito Santo	44
Figura 24 - Seções sísmicas profundas ao longo da Bacia de Santos (acima) e offshore Namíbia (abaixo), mostrando a distribuição dos sedimentos pós-rifte e as vulcânicas relacionadas à abertura continental.....	45
Figura 25 - Seções sísmicas na Bacia de Santos mostrando as principais sequencias sedimentares.....	47
Figura 26 - Seção geológica das bacias meso-cenozoíca, ao longo da Margem Leste Brasileira.....	48
Figura 27 - Seção geológica representativa da Bacia de Santos.....	48
Figura 28 - Carta estratigráfica da Bacia de Santos.....	49
Figura 29 - Mapa com a localização de todos os dados selecionados para o projeto....	51
Figura 30 - Gravidade observada e anomalias Free-air, Bouguer e isostática residual para um modelo de transição da área continental e oceânica realçando a equivalência das anomalias Free-air e Bouguer em áreas oceânicas.....	52
Figura 31 - Mapa de anomalia gravimétrica ar-livre evidenciando as principais feições da bacia de Santos.....	54
Figura 32 - Esquema das faixas gravimétricas ao longo de um perfil que vai do domínio d'gua rasas para águas profundas.....	56
Figura 33 - Mapa de anomalia gravimétrica ar-livre evidenciando as principais feições da bacia de Santos com a localização das linhas sísmicas do projeto.....	58
Figura 34 - Linha sísmica 0239-0366 juntamente com sua interpretação e perfil gravimétrico Free-Air sobre a linha.....	59
Figura 35 - Linha sísmica 0239-0367 juntamente com sua interpretação e perfil gravimétrico Free-Air sobre a linha.....	60
Figura 36 - Linha sísmica 0222-0125 juntamente com sua interpretação e perfil gravimétrico Free-Air sobre a linha.....	61
Figura 37 - Linha sísmica 0248-0108 juntamente com sua interpretação e perfil gravimétrico Free-Air sobre a linha.....	62

Figura 38 - Linha sísmica 0248-0106 juntamente com sua interpretação e perfil gravimétrico Free-Air sobre a linha.....	63
Figura 39 - Principais características geomorfológicas do fundo marinho na linha 0239-366, representando as linhas dip.....	64
Figura 40 - Diferenças na qualidade de imageamento entre as camadas Rifte e Pós-Rifte devido ao sal.....	65
Figura 41 - A grande camada de sal filtra o sinal sísmico, gerando perda de qualidade do imageamento nas estruturas subjacentes.....	66
Figura 42 - Presença de diápiros de sal autoctone e sal alóctone.....	66
Figura 43 - Embasamento na área proximal da bacia.....	67
Figura 44 - Embasamento na área distal da bacia com a presença de estruturas vulcânicas.....	67
Figura 45 - Principais características geomorfológicas do fundo marinho na linha 0248-108 / 0248-116, representando as linhas strike.....	68
Figura 46 - Diferenças na qualidade de imageamento entre as camadas Rifte e Pós-Rifte devido ao sal.....	69
Figura 47 - Representação do limite do sal ao sul da bacia de Santos e a subida do embasamento.....	70
Figura 48 - Localização das linhas sísmicas sobre as faixas gravimétricas.....	70
Figura 49 - Exemplo da orientação de um bloco dentro do GMS-YS. A direção X representa a direção do perfil a ser modelado. Y representa a direção de strike do bloco, que pode variar em relação a X. A extensão do bloco em Y pode ser infinita ou limitada em qualquer ponto.....	71
Figura 50 - Intervalos de densidade por tipo de rocha.....	72
Figura 51 - Perfis composto representando as diferentes fases tectônicas.....	73
Figura 52 - Modelos crustais de Airy (a) e Pratt (b).....	74
Figura 53 - Exemplo de modelo criado a partir da importação dos horizontes migrados e com a adição da profundidade isostática derivada do modelo de Airy....	76
Figura 54 - Exemplificação da estimativa da profundidade da Moho por análise do comprimento de onda.....	76
Figura 55 - Linha sísmica 0239-0366 juntamente com sua interpretação das estruturas rasas e profundas e com o modelo gravimétrico inicial.....	78

Figura 56 - Linha sísmica 0239-0367 juntamente com sua interpretação das estruturas rasas e profundas e com o modelo gravimétrico inicial.....	79
Figura 57 - Linha sísmica 0222-0125 juntamente com sua interpretação das estruturas rasas e profundas e com o modelo gravimétrico inicial.....	80
Figura 58 - Linha sísmica 0248-0108 juntamente com sua interpretação das estruturas rasas e profundas e com o modelo gravimétrico inicial.....	81
Figura 59 - Linha sísmica 0248-0106 juntamente com sua interpretação das estruturas rasas e profundas e com o modelo gravimétrico inicial.....	82
Figura 60 - Modelo gravimétrico da linha 0239-0366 com a diferenciação dos tipos de crostas e das principais estruturas relacionadas as zonas gravimétricas.....	84
Figura 61 - Modelo gravimétrico da linha 0239-0367 com a diferenciação dos tipos de crostas e das principais estruturas relacionadas as zonas gravimétricas.....	85
Figura 62 - Modelo gravimétrico da linha 0222-0125 com a diferenciação dos tipos de crostas e das principais estruturas relacionadas as zonas gravimétricas.....	86
Figura 63 - Modelo gravimétrico da linha 0248-0108 com a diferenciação dos tipos de crostas e das principais estruturas relacionadas as zonas gravimétricas.....	87
Figura 64 - Modelo gravimétrico da linha 0248-0116 com a diferenciação dos tipos de crostas e das principais estruturas relacionadas as zonas gravimétricas.....	88
Figura 65 - Mapa de Anomalia Geoidal derivado da altimetria de satélite (Sandwell e Smith, 1997). Traçado das zonas de fratura de Santa Helena (ZFSH), Vitória-Trindade (ZFVT), Martim Vaz (ZFMV) e de 24°S (ZF24°) e dos sistemas de zonas de fratura do Rio de Janeiro (SZFRJ) e de Rio Grande (SZFRG).....	89
Figura 66 - Mapa de Anomalia Free-Air e perfis geológicos com a localização do poço DSP356 na região da dorsal de São Paulo.....	90
Figura 67 - Mapa representativo dos diferentes domínios crustais na região da bacia de Santos e Pelotas.....	91
Figura 68 - Figuras retiradas de Zalán et. al 2011 mostrando interpretação de manto exumado nas linhas sísmicas profundas.....	92
Figura 69 - Modelo gravimétrico final 0239-0366 com a distribuição de densidades....	93
Figura 70 - Modelo gravimétrico final 0239-0366 com a indicação das estruturas rasas e profundas.....	94
Figura 71 - Modelo gravimétrico final 0239-0367 com a distribuição de densidades.....	95

Figura 72 - Modelo gravimétrico final 0239-0366 com a indicação das estruturas rasas e profundas.....	96
Figura 73 - Modelo gravimétrico final 0222-0125 com a distribuição de densidades.....	97
Figura 74 - Modelo gravimétrico final 0222-0125 com a indicação das estruturas rasas e profundas.....	98
Figura 75 - Modelo gravimétrico final 0248-0108 com a distribuição de densidades....	99
Figura 76 - Modelo gravimétrico final 0248-0108 com a indicação das estruturas rasas e profundas.....	100
Figura 77 - Modelo gravimétrico final 0248-0116 com a distribuição de densidades....	101
Figura 78 - Modelo gravimétrico final 0248-0116 com a indicação das estruturas rasas e profundas.....	102
Figura 79 - Possíveis grabens (em preto) formados anteriormente ao rifteamento.....	103
Figura 80 - Possível presença de manto exumado na linha 0239-366.....	104
Figura 81 - Extrapolação da Interpretação das linhas no contexto regional.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Resumo dos Principais Métodos Geofísicos.....	14
Tabela 2 -	Divisão das Bacias pertencentes à Margem Continental Brasileira.....	33

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO.....	13
1	ÁREA DE ESTUDO.....	15
2	OS MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	19
2.1	O Interior da Terra e suas Características Físicas.....	20
2.2	Aplicabilidades e Escolha dos Métodos Geofísicos.....	23
3	METODOLOGIA.....	29
4	GEOLOGIA REGIONAL DA BACIA DE SANTOS.....	31
4.1	Gênese do Oceano Atlântico Sul.....	31
4.2	Evolução Tectono-estratigráfica da Bacia de Santos.....	39
5	DADOS SELECIONADOS.....	51
6	TRATAMENTO E DISCUSSÃO DOS DADOS.....	54
6.1	Avaliações do Mapa Gravimétrico Regional.....	54
6.2	Interpretação dos Dados Sísmicos.....	59
6.3	Geração dos Modelos Gravimétricos.....	73
6.4	Discussão Sobre os Resultados dos Modelos Gravimétricos.....	85
	CONCLUSÃO.....	106
	REFERÊNCIAS.....	108

INTRODUÇÃO

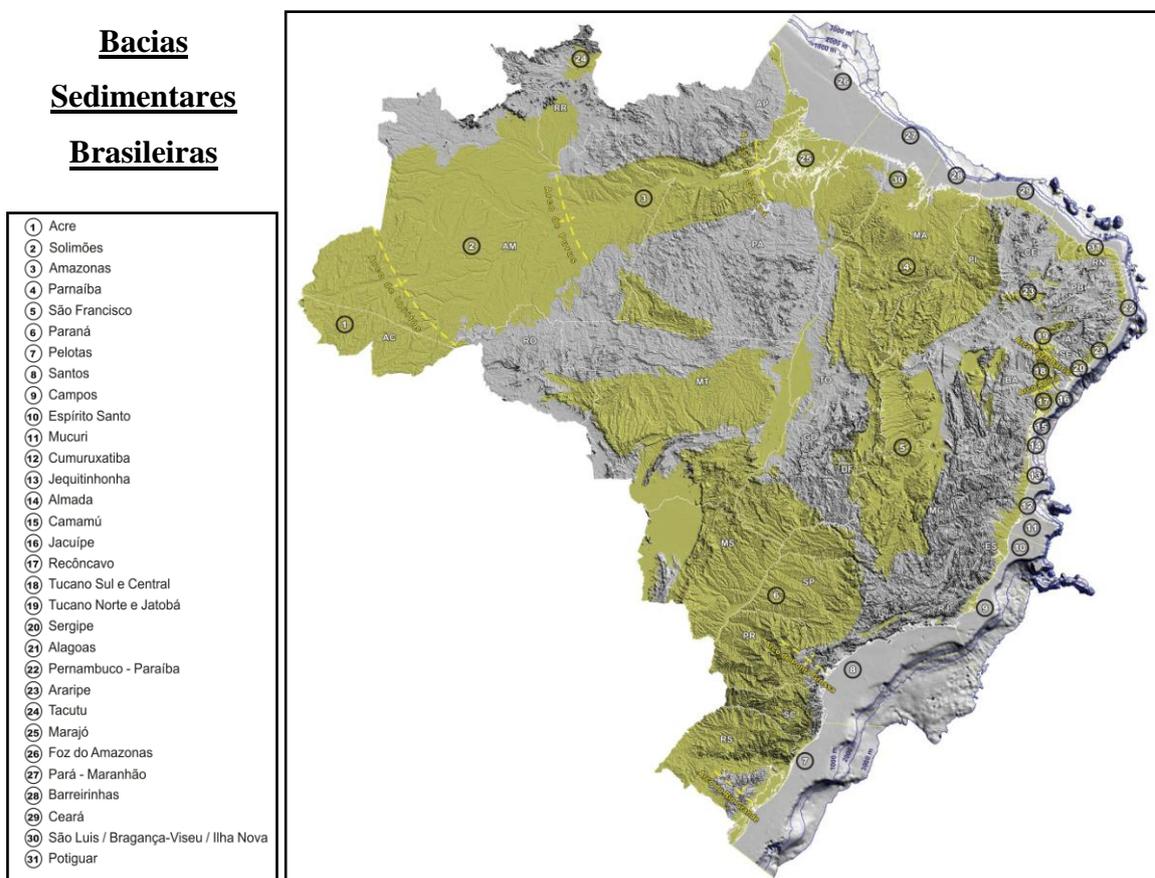
O mundo como conhecemos, tem sua história antiga e moderna marcada por constantes mudanças, muitas vezes baseadas em grandes descobertas científicas que mudaram o rumo da sociedade. O petróleo tem papel principal nessa evolução, no qual registros históricos apontam que há 4000 a.C os povos da Mesopotâmia e do Egito já o utilizavam através de exsudações e afloramentos frequentes no Oriente Médio e regiões próximas; e em 347 a.C os chineses já perfuravam poços, usando hastes de bambu. Todavia, com o aumento da utilização desse bem tão valioso e fundamental para a evolução tecnológica mundial, a necessidade do entendimento sobre seus processos de criação e armazenamento no interior da Terra foi e é à consequência direta, levando assim o foco dos estudos para as bacias sedimentares.

As bacias sedimentares estão presentes em todos os continentes e nos registros geológicos desde os primórdios da evolução da Terra, sendo os locais nos quais os recursos econômicos derivados da deposição de material fóssil pretérito são gerados e armazenados. Dentro desse cenário, o Brasil destaca-se mundialmente (Figura 1), com cerca de 31 bacias sedimentares com potencialmente produtoras de hidrocarbonetos que ao longo dos anos inúmeros trabalhos concebidos por instituições acadêmicas e grandes petroleiras foram e são realizados nessas bacias partindo-se de uma escala regional para uma escala de reservatório.

Quando se fala em estudos de escala regional, o conhecimento sobre a estruturação das bacias sedimentares é de grande importância, pois seu entendimento é utilizado em estudos tectônicos para a reconstrução histórica da bacia, com o intuito de entender os processos de formação e de evolução das mesmas. Esses estudos caracterizam os parâmetros de entrada para as modelagens numéricas, visando reconstruir os processos de geração, migração e acumulação de hidrocarbonetos. Todos esses estudos auxiliam nas decisões de âmbito exploratório a serem tomadas com o melhor embasamento possível, diminuindo as incertezas e aumentando as chances de sucesso. Esse entendimento só foi possível através de grandes coletas de dados de natureza diversas, em sua maioria em levantamentos geofísicos e geológicos que, conseqüentemente, levaram a questionamentos sobre os aspectos gerais destas bacias, sustentando assim, trabalhos futuros.

Contudo, na maioria das situações relacionadas aos estudos da Terra, um método geofísico não é suficiente para chegar a uma conclusão de uma questão específica, já que o mesmo é passivo de ambiguidades ou incertezas na interpretação (KEAREY, 2009). Para tal, se faz necessário que um ou mais métodos sejam integrados, gerando uma resposta que se aproxime do modelo real e com confiabilidade para que a mesma metodologia possa ser aplicada em outros casos similares, otimizando a utilização conjunta dos métodos e para que se possa ter um alto conhecimento alinhado ao custo.

Figura 1 - Mapa das bacias sedimentares brasileiras



Fonte: Boletim de Geociências da Petrobras, 2007

De acordo com Araújo (2005), diferentes estratégias podem ser aplicadas quando há disponível uma grande quantidade de dados de natureza diferentes, sejam eles provenientes de estudos geofísicos ou geológicos. Uma estratégia seria a criação de um modelo para cada parâmetro e então, a realização da interpretação dos diferentes modelos de forma independente; neste caso, a integração ocorreria apenas na etapa final.

Outra solução seria a geração de um modelo derivado da inversão conjunta de todos os diferentes grupos de dados; neste caso, a integração começaria a partir dos dados iniciais e continuaria, progressivamente e interativamente, nos processos de inversão e interpretação.

A partir desse cenário, o presente trabalho sugere a aplicação de uma metodologia que envolve a integração de estudos geofísicos, principalmente, e geológicos, com o intuito de resolver um problema de natureza regional e de suma importância para o entendimento do aspecto estrutural de uma bacia sedimentar. No caso, foi realizada uma modelagem gravimétrica 2-D, auxiliada por dados sísmicos e de poços provenientes de campanhas realizadas na região, visando o mapeamento e caracterização das estruturas profundas na Bacia de Santos e sustentando ou não os modelos já existentes.

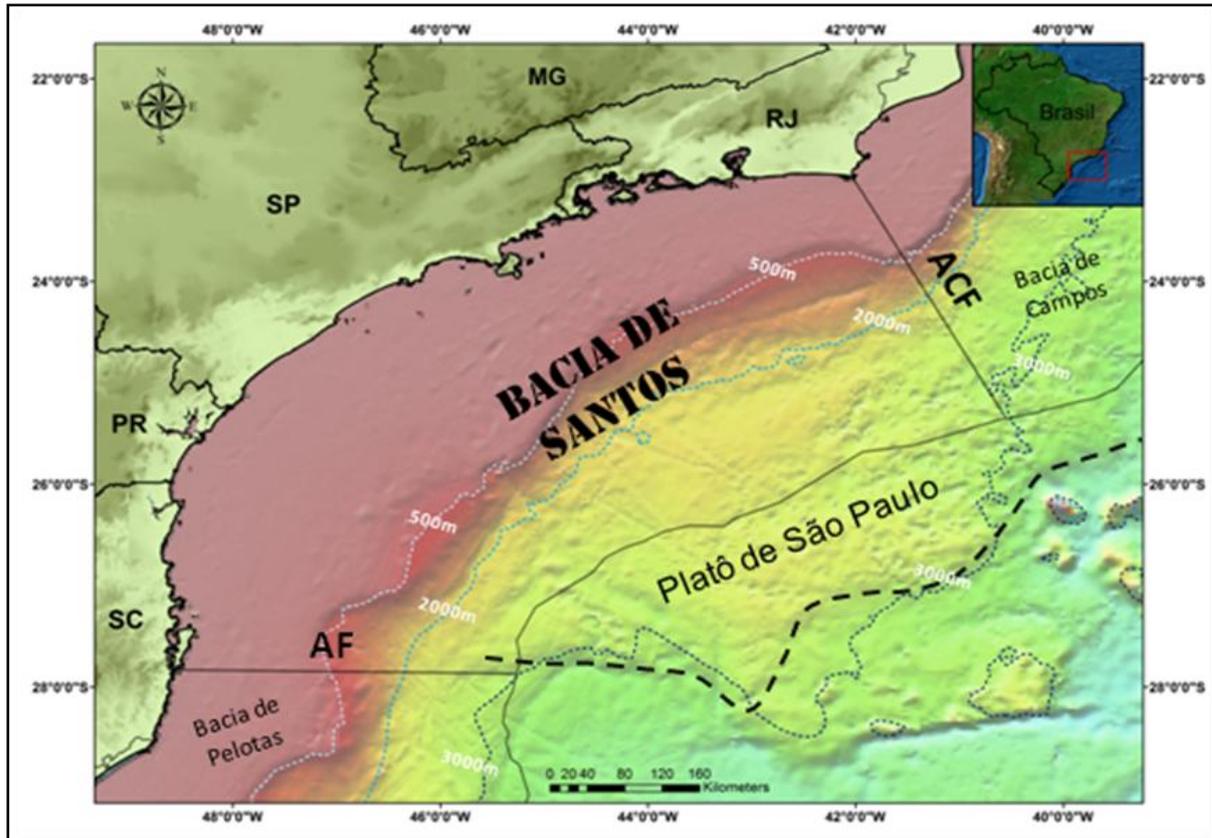
Trabalhos anteriores, como De Mio (2005) justificam a integração como a melhor metodologia a ser aplicada para entendimento regional na Bacia de Santos. Isso se deve, especificamente, pois a mesma apresenta uma espessa seção evaporítica de idade aptiana que ocasiona uma baixa qualidade no imageamento sísmico abaixo da mesma, fato que por si só abre uma série de discussões sobre os aspectos crustais e da fase rifte desta bacia.

1 ÁREA DE ESTUDO

Localizada na margem atlântica brasileira encontra-se a Bacia de Santos (Figura 2), geologicamente delimitada ao Norte pela Bacia de Campos (Alto de Cabo Frio) e ao Sul pela Bacia de Pelotas (Alto de Florianópolis), apresentando uma área total aproximada de 350.000 km² e batimétria máxima de 3000m, abrangendo os litorais dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina (PEREIRA, 1986).

Essencialmente marinha, a Bacia de Santos compreende uma das maiores depressões do embasamento na costa brasileira com uma espessura sedimentar da ordem de 7 - 10 km nos maiores depocentros (PEREIRA e MACEDO, 1990). Morfologicamente ela se diferencia das demais bacias da margem sudeste brasileira por apresentar uma área com dimensão de cerca de 1000 km de comprimento e 300 km largura aproximadamente, compreendendo a área ao sul da cadeia Vitória-Trindade até a Dorsal de São Paulo, denominada Platô de São Paulo (Figura 2).

Figura 2 - Localização e limites da Bacia de Santos



AF = Alto de Florianópolis **ACF** = Alto de Cabo Frio — = Limites Offshore da Bacia de Santos

Fonte: Autor

A feição do Platô de São Paulo pode ser definida por uma acentuada diminuição no gradiente batimétrico, tendo início no pé do talude continental, em torno das profundidades de 1600 a 2900 m, e terminando no sopé continental, em torno das isóbatas de 3000 e 3300 (PALMA, 1984). Esse relevo é marcado pela intensa deformação halocinética, expressa na batimetria como irregularidades deprimidas no fundo do mar (MOHRIAK, 2003) sendo explicada mais a frente.

Do ponto de vista do potencial petrolífero, a Bacia de Santos constitui uma importante frente exploratória devido às importantes descobertas relacionadas a grandes campos de gás nas décadas de 80 e 90 e aos reservatórios do pré-sal recentemente. Estes fatos, aliados à existência de prováveis *plays* exploratórios em toda seção estratigráfica, explicam o interesse demonstrado por empresas e instituições governamentais, reforçando assim importância desta bacia no contexto exploratório nacional.

2 OS MÉTODOS GEOFÍSICOS – ESCOLHA E DESCRIÇÃO

Antigos pensadores dividiam o universo em duas partes: o céu, acima, e o inferno, embaixo. O céu era transparente e cheio de luz, e eles poderiam enxergar diretamente suas estrelas e seus planetas vagantes. O solo era opaco, um inacessível mundo inferior da escuridão, fechado para os olhos humanos.

Frank Press et al. (2006)

A Geofísica, como definida pela maioria dos autores, é a ciência que estuda de forma indireta a Terra através dos princípios físicos, possibilitando uma melhor compreensão da estrutura, composição e dinâmica do planeta.

Essa grande ciência abrange diferentes tipos de investigação em diferentes escalas, porém para fins desse trabalho, serão somente focados os métodos que utilizam medidas em superfície ou próximo a ela (levantamentos geofísicos) com o intuito de revelar as propriedades do interior da Terra, que variam verticalmente e lateralmente (KEARY, 2009).

Podem-se dividir esses métodos em dois grupos, sendo o primeiro relacionado aos que fazem uso dos sinais naturais da Terra, e o segundo que envolvem a aplicação de energia gerada artificialmente. Independente dessa classificação, cada método mede uma propriedade física específica (Tabela 1), sendo sua aplicabilidade relacionada diretamente a esse fato.

Tabela 1- Resumo dos principais métodos geofísicos.

<i>Método</i>	<i>Parâmetro Medido</i>	<i>Propriedade Física</i>
Sísmico	Tempo de percurso de ondas sísmicas refletidas / refratadas	Densidade e módulos elásticos
Gravitacional	Varição espacial da força do campo gravitacional da Terra	Densidade
Magnético	Varição espacial da força do campo geomagnético	Suscetibilidade Magnética
Resistividade	Resistência Elétrica da Terra	Condutividade Elétrica
Polarização Induzida	Voltagens de polarização ou resistência dependente da frequência	Capacitância Elétrica
Potencial Espontâneo	Potenciais Elétricos	Condutividade Elétrica
Eletromagnético	Resposta à radiações eletromagnéticas	Condutividade e Indutância Elétrica
Radar	Tempo de percurso de pulsos de radar refletidos	Constante Dielétrica
Radioativo	Radioatividade	Propriedades Radioativas
Geotérmico	Propagação do calor	Fluxo Térmico

Fonte: Modificada de Keary, 2009.

2.1 O Interior da Terra e suas Características Físicas

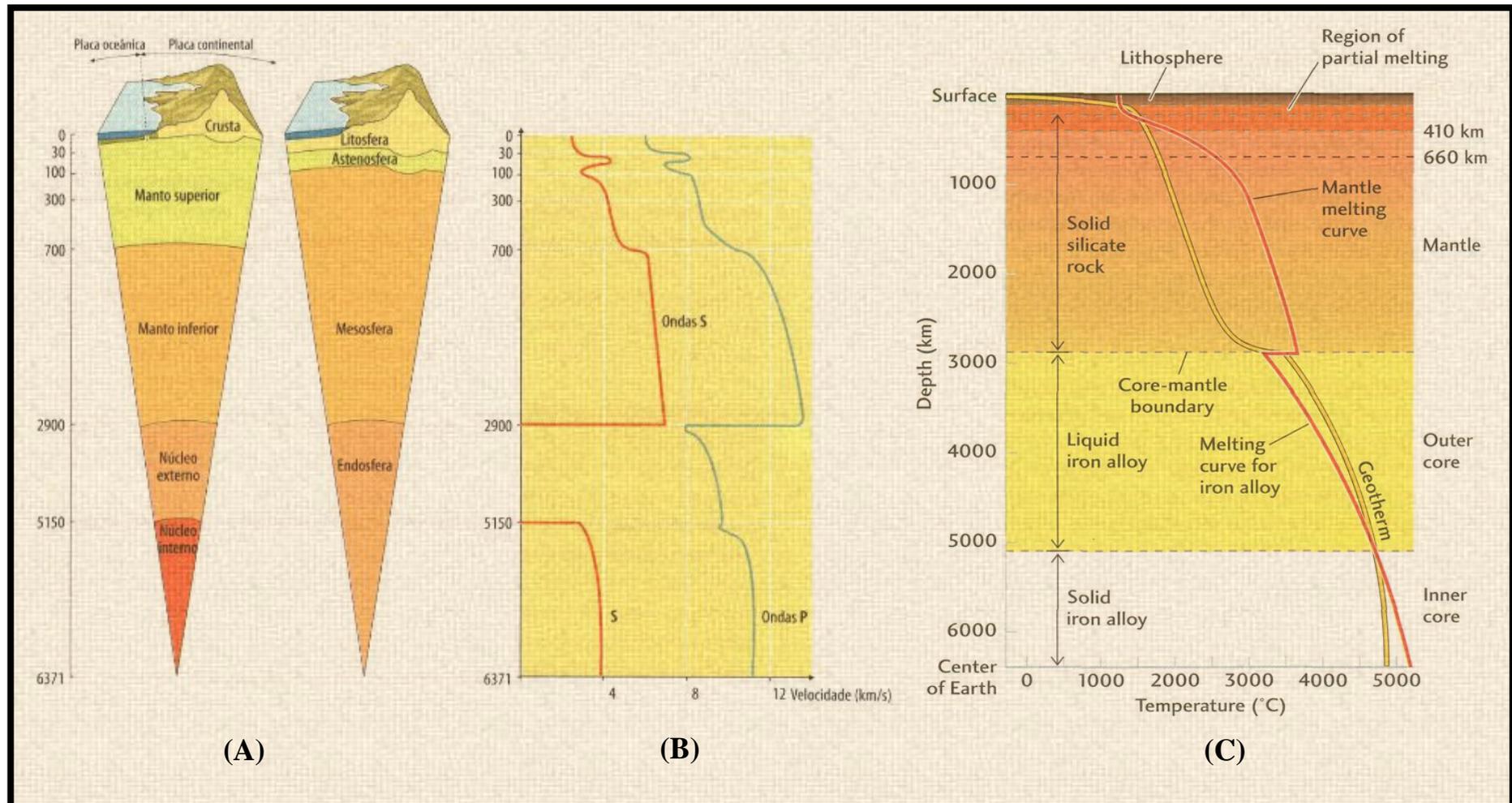
Partindo do conceito básico sobre os métodos Geofísicos, fica claro que para visar o melhor entendimento do alvo, se faz necessário uma análise inicial, quando possível, na qual serão identificadas as propriedades físicas presentes e seus conteúdos de resposta para o mesmo, no qual conseqüentemente seja feita a melhor escolha do método ou conjunto de métodos a serem utilizados. Sendo assim, esse sub-tópico irá abordar as principais características do interior da Terra, que é foco do trabalho.

O grau de conhecimento atual do interior da Terra é dado através dos estudos geofísicos diversos em investigações rasas e através da propagação das ondas sísmicas (Figura 3.2), das lavas vulcânicas e da composição de meteoritos para entendimento da composição das estruturas mais profundas (Keary, 2009). A utilização de poços é naturalmente a melhor forma de investigação que retrata a geologia em sub-superfície, porém é limitado pela profundidade e pelo alto custo.

Através desses estudos, foi estipulada uma distância entre a superfície até a camada mais interna da Terra em aproximadamente 6.370 km, sendo essa grande estrutura dividida em três porções principais (Figura 3), partindo da mais profunda para mais rasa, por suas características reológicas (Figura 3.1): a porção rígida denominada Litosfera, a porção com comportamento dúctil denominada Astenosfera, a porção com comportamento rígido, novamente, denominada mesosfera e por último a Endosfera, apresentando na sua porção superior um comportamento fluido e na inferior um comportamento dúctil (PRESS et al, 2006).

Um ponto interessante dentro das características físicas do interior da Terra é o grau geotérmico (Figura 3.3), no qual todos os cálculos estimam que ocorra aumento da temperatura com a profundidade, mas a taxa de aumento da temperatura reduz-se com a profundidade. Se o gradiente de 20-30 °C/100 km observado perto da superfície fosse constante, implicaria num núcleo totalmente fundido com temperaturas extremamente elevadas, na ordem das dezenas de milhares de graus, ao contrário do que se prevê pelos estudos de sismologia.

Figura 3 - (A) Esquema estruturação do interior da Terra apresentando suas camadas (B) e suas respectivas velocidades de propagação das ondas sísmicas S e P (C) e as variações do gradiente geotérmico.



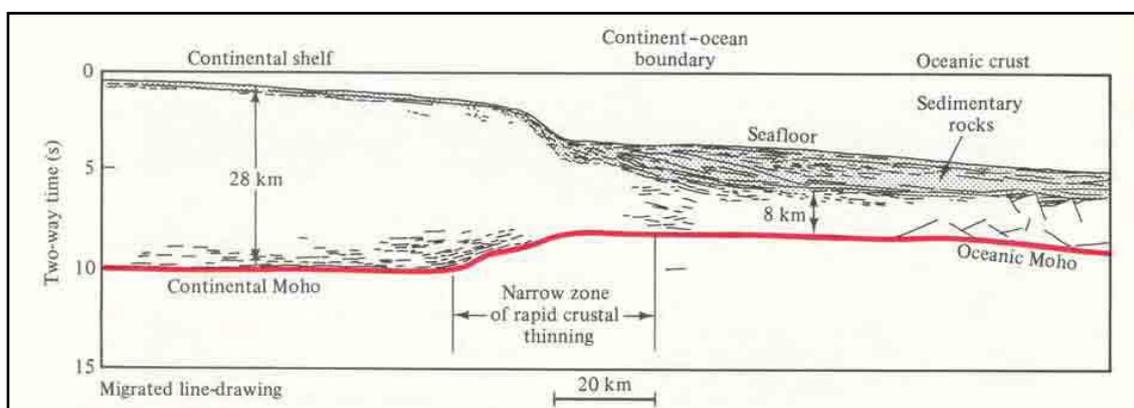
Fonte: Modificada Press et al. 2006

Todavia, é na Crosta, aproximadamente 2% do volume terrestre considerando-se uma espessura média de 30 km, que estão concentrados as maiores quantidades de estudos de natureza geológica e geofísica, pois nela são encontrados os recursos minerais e energéticos que estão ao alcance do homem, além de possuir a maior variabilidade em termos composicionais. A crosta é dividida em diferentes tipos, mas num contexto geral podemos destacar dois como os mais importantes, que seriam: crosta continental e crosta oceânica (Press et al. 2006).

A crosta continental é composta de rochas félsicas a ultramáficas, tendo composição média granodiorítica e espessura média entre 30 e 40 km nas regiões tectonicamente estáveis (crátons), e entre 60 a 80 km nas grandes cadeias montanhosas como os Himalaias e os Andes. As rochas mais antigas possuem até 4.2 Ga e existem rochas novas ainda em formação. Já a crosta oceânica possui espessura média de entre 7 – 15 km e uma composição basáltica, onde as rochas mais antigas são datadas de 200 Ma, tendo sua origem em regiões das dorsais mesoceânicas ativas em muitos casos.

A crosta de uma maneira geral apresenta baixos valores de densidades (em torno de 2,67- 2,9 g/cm³) sendo sua contribuição para o campo gravimétrico total relativamente pequeno e apresentando contrastes de densidade sutis. Porém de acordo com De Mio (2005), quando se considera a anomalia residual observa-se uma grande variação de espessuras entre áreas cratônicas, áreas de bacias marginais e áreas com crosta oceânica. Estas variações produzem anomalias gravimétricas bastantes expressivas devido às variações na profundidade do manto e da diferença de composição entre essas duas grandes estruturas. (Figura 4), sendo esse evento físico, denominado descontinuidade de Mohorovicic ou Moho.

Figura 4 - Exemplo de crosta continental afinada em região de margem passiva.



Fonte: Modificado de Allen e Allen, 1990

2.2 Aplicabilidades e Escolha dos Métodos Geofísicos

Ao longo dos anos, estudos com diferentes métodos geofísicos definiram o valor da sua aplicabilidade em inúmeros casos relacionados a corpos em sub-superfície, gerando assim uma cultura para utilização ou não desses métodos. Somando-se a isso, esses estudos provaram que a integração entre os mesmos é fundamental para alcançar o melhor resultado possível.

O sub-tópico anterior passou o entendimento em escala macro da estruturação do interior da Terra, na qual a composição, a profundidade, a pressão e a temperatura são cruciais para definição física do meio, dentre outros fatores. Na maioria dos estudos geofísicos é a variação local, denominada anomalia geofísica, segundo um parâmetro mensurável relativo a algum valor natural de função, que é de interesse principal (KEARY, 2009).

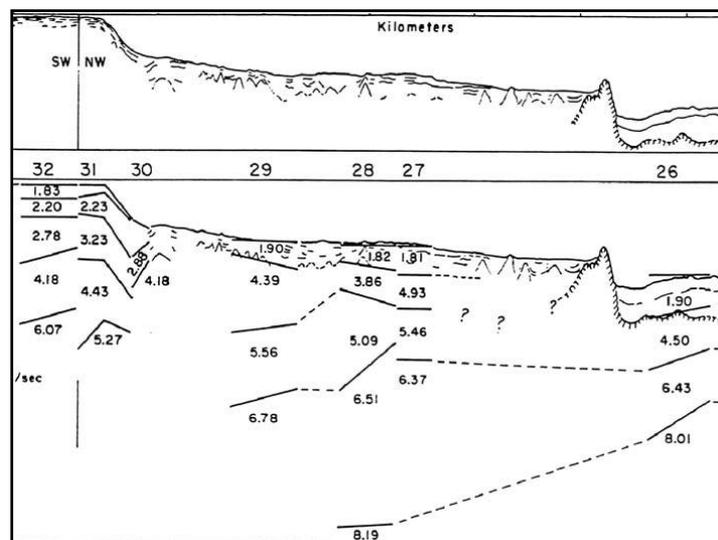
Para fins desse trabalho, cujo objetivo é mapeamento e caracterização da crostas e das estruturas subjacentes, serão focados os métodos geofísicos que tenham sensibilidade para tal. Partindo de uma análise inicial bibliográfica de trabalhos realizados em diferentes bacias, foi constatado que as utilizações da sísmica, dos dados de poços exploratórios e dos métodos potenciais foram e são extensivamente aplicados com os mesmos fins propostos. Meisling et al. (2001) e Karner (2000) apontam que quando há precariedade do imageamento do embasamento por parte do imageamento sísmico, as análises dos métodos potenciais podem suprir essa deficiência.

Se voltarmos especificamente para a Bacia de Santos, devemos destacar os trabalhos de Chang e Kowsmann, 1984; Chang et al., 1992; De Mio, 2005; Guimarães et al., 1982; Kumar et al., 2012; Leyden et al., 1971; Zalan et al., 2011 e que integraram dados provenientes de levantamentos sísmicos e potenciais; como importantes fontes bibliográficas.

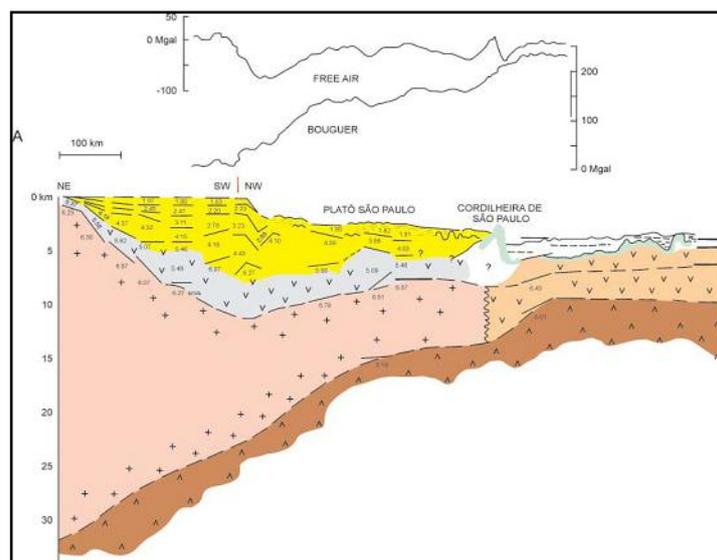
É importante observar que os trabalhos citados, foram desenvolvidos com o conhecimento e tecnologia da época, que ao longo dos anos sofreram modificações, melhorando o imageamento e levando assim ao aumento sobre o grau de conhecimento da crosta (Figura 5).

Figura 5 - Esquema da evolução e interpretação alternativa das estruturas profundas na Bacia de Santos.

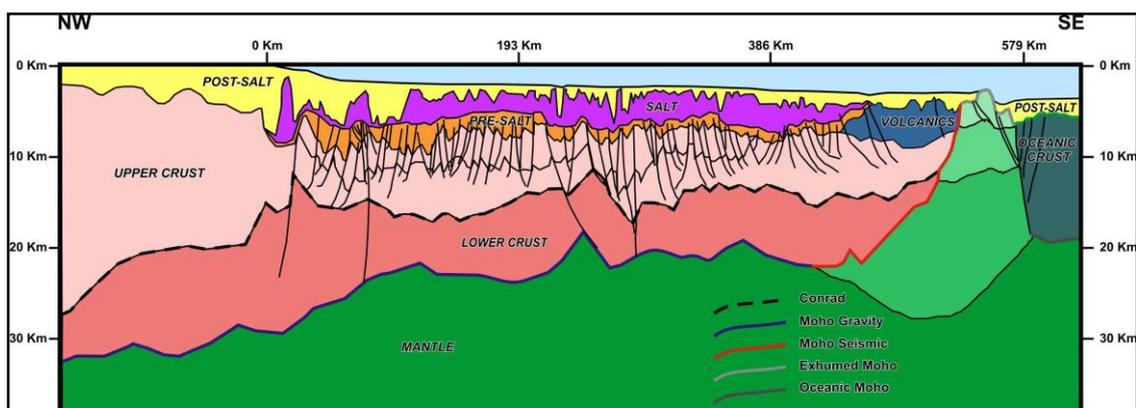
Leyden et al 1971



Chang et al 1992



Zalán et al 2011



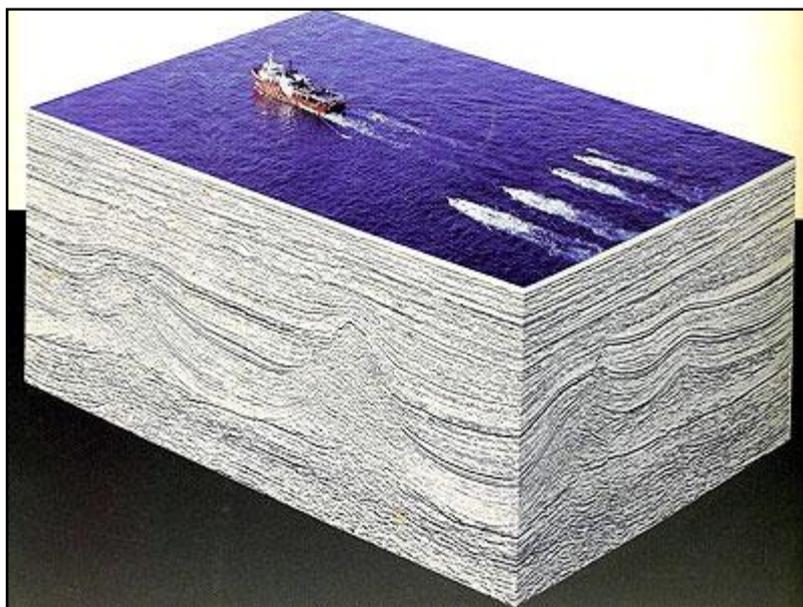
Fonte: Leyden et al. (1971), Chang et al. (1992) e Zalán et al (2011)

A seguir será passado um breve resumo da metodologia dos métodos que foram utilizados no trabalho, descrevendo as vantagens e desvantagens na utilização dos mesmos.

Método Sísmico:

De longe, é o método geofísico mais utilizado e que apresentou uma grande evolução nas últimas décadas. Tal método é tão apreciado pela sua capacidade de gerar, através de reflexões ou refrações de pulsos sísmicos, emitidos ou naturais, imagens que se aproximam da verdadeira geometria em sub-superfície, fornecendo resultados bastante satisfatórios na identificação de formações geológicas, especialmente nos casos estratificados (Figura 6).

Figura 6 - Esquema de uma aquisição sísmica e seu imageamento.



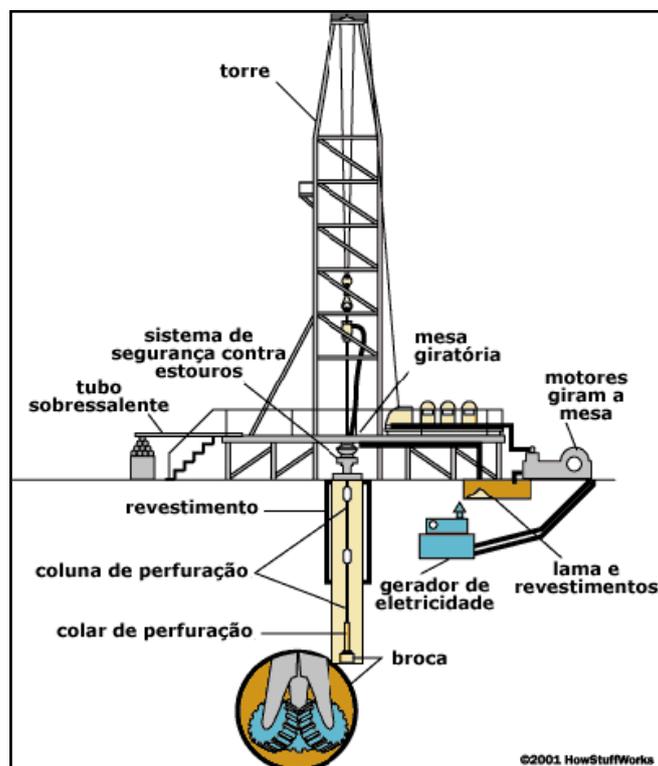
Fonte: www.Unicamp.com.br

Porém, problemas são notados ao longo da aplicação do método, causados por interferências diretas na imagem gerada e por consequência na interpretação dos dados sísmicos. Estas limitações podem ser derivadas de vários fatores, onde os mais importantes são: perda de sinal em profundidade, imageamento abaixo de camadas de sal ou basaltos e baixa resolução vertical. Estes obstáculos podem ser superados com o aperfeiçoamento de metodologias de aquisição e processamento, que consequentemente eleva o preço, ou com a utilização de outros métodos geofísicos complementares.

Dados de Poços:

Talvez seja a melhor forma de retratar os corpos em sub-superfície, pois através deles pode-se fazer uma avaliação direta (testemunhos e amostra de calha) ou indireta (perfil de poço), diferenciando tipos de materiais e ambientes deposicionais, e estimar variações nas características físicas como resistividade, densidade, porosidade, velocidade de propagação de ondas, argilosidade do meio, mineralógica, dentre outros (Figura 7).

Figura 7 - Esquema de um poço sendo perfurado



Fonte: www.Unicamp.com.br

Assim, o método apresenta uma grande resolução vertical, diferentemente da sísmica, mas uma baixa resolução horizontal. Por isso, este método, sempre que possível, é amarrado com a sísmica, já que os dois em conjunto retiraram do dado uma boa estimativa de continuidade lateral e vertical. Entretanto, esta amarração nem sempre é tão trivial, sendo necessário um estudo geoestatístico.

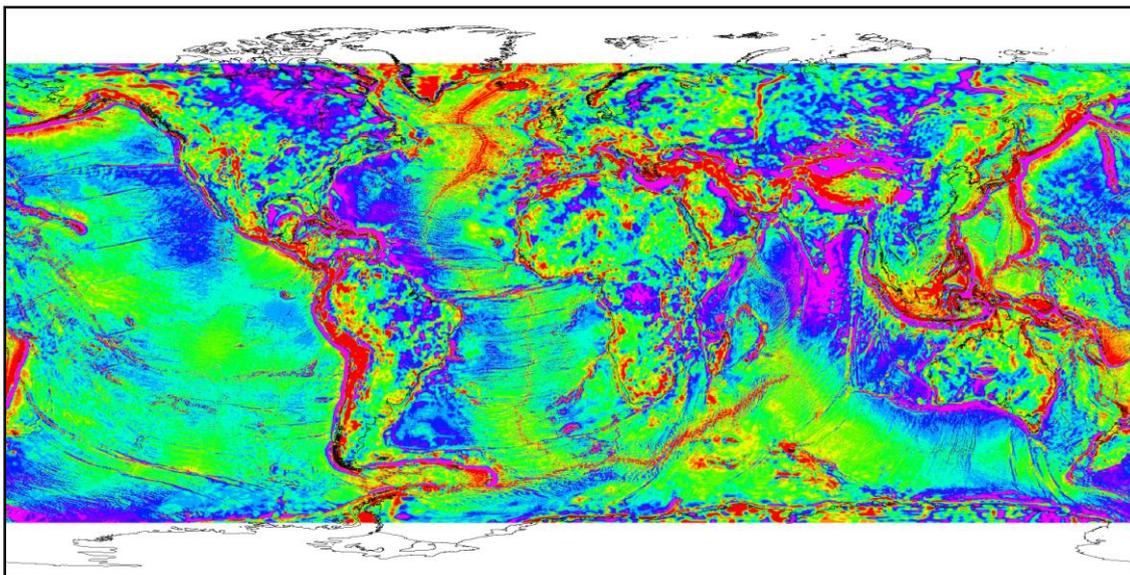
O alto preço da avaliação de poço é o fator predominante que impede que a mesma seja realizada em grande escala sendo quase sempre feita nas fases posteriores aos estudos geofísicos de superfície.

Método Gravimétrico:

Considerado um dos métodos geofísicos mais antigos, utilizado inicialmente na prospecção mineral (TELFORD et al. 1990), baseia-se na variação do campo gravitacional da Terra causadas por diferenças de densidade dos corpos em sub-superfície (KEARY, 2009).

Abrangendo desde escalas micro até escalas macro, esse método possibilita o entendimento do arcabouço tectônico-estrutural em nível crustal (DE MIO, 2005) e das principais feições regionais, tais como depocentros, calhas, províncias magmáticas, domos salinos, entre outras. Como todo método, o gravimétrico também apresenta limitações, dentre elas podemos destacar a grande influência das respostas de corpos basálticos e evaporíticos, que acabam mascarando outros corpos e a perda de resolução em profundidade devido à superposição das respostas gravimétricas.

Figura 8 - Mapa global da anomalia free-air derivada de satélite.



Fonte: Centre for Geodynamics, Geological Survey of Norway

Um dos grandes atrativos é seu custo relativamente baixo se comparado a outros métodos, no que diz respeito à cobertura de extensas áreas nas bacias sedimentares (Figura 8). Por tal motivo, desde a segunda metade do século passado em diante tem sido utilizado na indústria petrolífera, sendo quase sempre um método primário no conhecimento de uma bacia, principalmente através de modelagens.

Em suma, a modelagem gravimétrica pode ser realizada em perfis 2D, 2,5D e em mapas 3D através de métodos interativos de tentativa e erro ou por procedimentos automáticos ambos com o objetivo de reproduzir a geometria e resposta gravimetria dos corpos em sub-superfície (CASTRO, 2005). Basicamente existem dois tipos de modelagem, no qual o fator diferenciador entre elas será a técnica empregada.

Modelagem Direta: Através de um processo de tentativa e erro, onde as densidades e formas geométricas das fontes são assumidas e o valor de gravidade é calculado e comparado ao observado. Os parâmetros do modelo são alterados até que a anomalia calculada a partir dele seja ajustada satisfatoriamente aos dados observados.

Modelagem Inversa: Denominada também de Inversão Gravimétrica, esse tipo de modelagem se baseia no fato da resposta gravimétrica ser conhecida, na qual as densidades ou a geometria são incógnitas que deverão ser determinadas automaticamente por procedimentos estatísticos. Informações a priori são em muitos casos necessárias para a redução do número de soluções possíveis que tornam o modelo geologicamente coerente. A modelagem inversa oferece algumas vantagens sobre a modelagem direta, pois suas características intrínsecas garantem estimativas da resolução dos parâmetros do modelo, da não unicidade, e a redução no tempo requerido para a interpretação dos dados.

Castro (2005) sinaliza que um problema adicional da modelagem gravimétrica é o fato do campo gravitacional ser aditivo, tornando o campo total resultante do somatório dos efeitos gravitacionais das fontes presentes na região, desde a superfície até o manto superior. Sendo assim, os efeitos de fontes profundas podem ser satisfatoriamente atenuados através de filtros de separação regional-residual antes de se aplicar a modelagem gravimétrica.

Independente da escolha da modelagem direta ou inversa, problemas baseados em dados geofísicos estarão sujeitos à ambiguidade interpretativa inerente ao método, o que nos retorna a teoria da não unicidade descrita por Keary (2009), no qual para dada curva de dados observados admitem-se infinitas soluções ou vários modelos que representam a distribuição litológica e estrutural em sub-superfície, dentre as quais, muitas não são geologicamente possíveis (De Mio, 2005).

Portanto, podemos observar que todos os métodos apresentam vantagens e limitações, o que justifica o uso integrado dos mesmos para a obtenção das melhores respostas relacionadas à geologia, seja ela local ou regional. Sendo assim, o próximo tópico irá descrever a metodologia que será utilizada levando em consideração a capacidade de cada método quando aplicada a área de estudo.

3 METODOLOGIA

Usualmente, estudos sobre a estruturação profunda das bacias sedimentares são realizados nas etapas iniciais de exploração das mesmas, no qual o objetivo é uma rápida *overview* em escala regional visando a caracterização da bacia em foco. Da mesma forma, a metodologia aplicada ao projeto se baseia em uma linha cronológica ideal, no intuito de proporcionar ao estudo o tempo hábil para que ele seja concluído com seus objetivos centrais alcançados, tendo a metodologia descrita na literatura e utilizado pelas empresas como o cronograma de trabalho básico.

1- Entendimento da área de estudo e dos conjuntos de dados geofísicos a serem utilizados.

Essa fase se baseia na leitura de bibliografias referentes ao projeto, sendo na sua grande maioria relacionada a Bacia de Santos, porém contendo também análogos de outras bacias de âmbito nacional e mundial, principalmente bacias de margens continentais divergentes (bacias rifte). De uma forma geral, os capítulos 5 e 6 estão descritos baseados no conhecimento adquirido nessa fase, porém a leitura bibliográfica para o melhor entendimento é realizada ao longo de todo o projeto. Além disso, nessa fase são selecionados os dados utilizados no projeto, sendo o conhecimento da área de estudo fundamental para a escolha dos mesmos, baseados no objetivo do trabalho.

2- Tratamento e Interpretação dos dados

Fase totalmente dedicada às interpretações necessárias para atingir o objetivo proposto. Para tal, seguem os pontos desta fase, dividido pelos diferentes conjuntos de dados.

- **Avaliação dos mapas regionais estruturais e gravimétricos:** Avaliação dos mapas regionais públicos com a síntese dos principais aspectos da bacia de Santos e criação de mapas através da utilização de dados públicos sobre a área de estudo e adjacentes. Para a geração específica dos mapas, a utilização da suíte Oasis Montaj 7.2 (Geosoft Inc.) como programa para tratamento de dados gravimétrico e batimétrico foi selecionada, devido a sua versatilidade no tratamento de dados, em especial dos provenientes dos métodos potenciais, na geração de mapas e manipulação dos sistemas de coordenadas e na integração de diferentes bancos de dados.
- **Interpretação dos dados sísmicos e poços:** Interpretação sísmica das feições mais importantes para o projeto (Fundo Marinho / Topo do Sal / Base do Sal / Crosta Continental e Oceânica) utilizando as linhas sísmicas selecionadas, quando possível com a correlação aos dados de poços. Diferentemente da fase anterior, o software SMT Kingdom e Fugro LCT foram escolhidos para tratamento de dados sísmicos e para interpretação sísmica, baseado na sua capacidade de integração na etapa seguinte. O *output* será a estimativa das dimensões dos corpos rasos e uma primeira aproximação dos corpos profundos para a geração dos modelos gravimétricos.
- **Geração do modelo Gravimétrico:** Tendo como *input* os dados provenientes da interpretação sísmica e dos poços, essa fase tem como objetivo a geração dos modelos gravimétrico 2D para cada linha do projeto seguida dos ajustes necessários. Esses ajustes são realizados com o intuito que o sinal gravimétrico calculado (modelo) se aproxime ao máximo do medido, proveniente de aquisições (Satélite / Navio). Como já existe um conhecimento sobre os corpos rasos (pequeno comprimento de onda), é esperado que as mudanças significativas sejam feitas somente nos corpos profundos (grande comprimento de onda), relacionadas as heterogeneidades na crosta e no manto.

Por último são apresentadas às considerações finais nas quais os resultados alcançados, através das etapas anteriormente descritas, são comparados com os resultados propostos por outros trabalhos realizados na área, com o intuito de validar o resultado final.

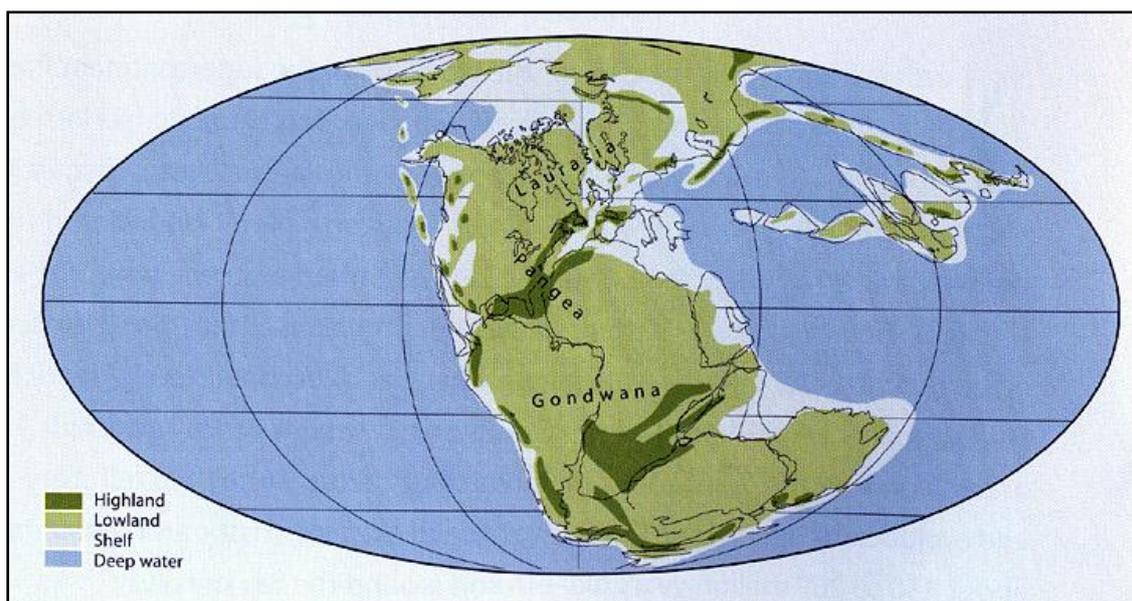
4 GEOLOGIA REGIONAL DA BACIA DE SANTOS

4.1 Gênese do Oceano Atlântico Sul

Para entender a formação e evolução da Bacia de Santos, pertencente ao grupo das bacias da margem continental brasileira, se faz necessário compreender o contexto geológico na qual esta bacia sedimentar está inserida.

Partindo desse princípio é preciso voltar ao evento de ruptura do supercontinente Gondwana (Figura 9), que atualmente correspondente aos continentes do Hemisfério Sul (Antártica, América do Sul, África e Oceania), oriundo da separação do Pangeia há aproximadamente 200 Ma no Jurássico Superior (PRESS et al. 2006) formado ao sul pelo Gondwana e ao norte pelo supercontinente da Laurásia, a América do Norte e Eurásia (Europa e Ásia) (Figura 8).

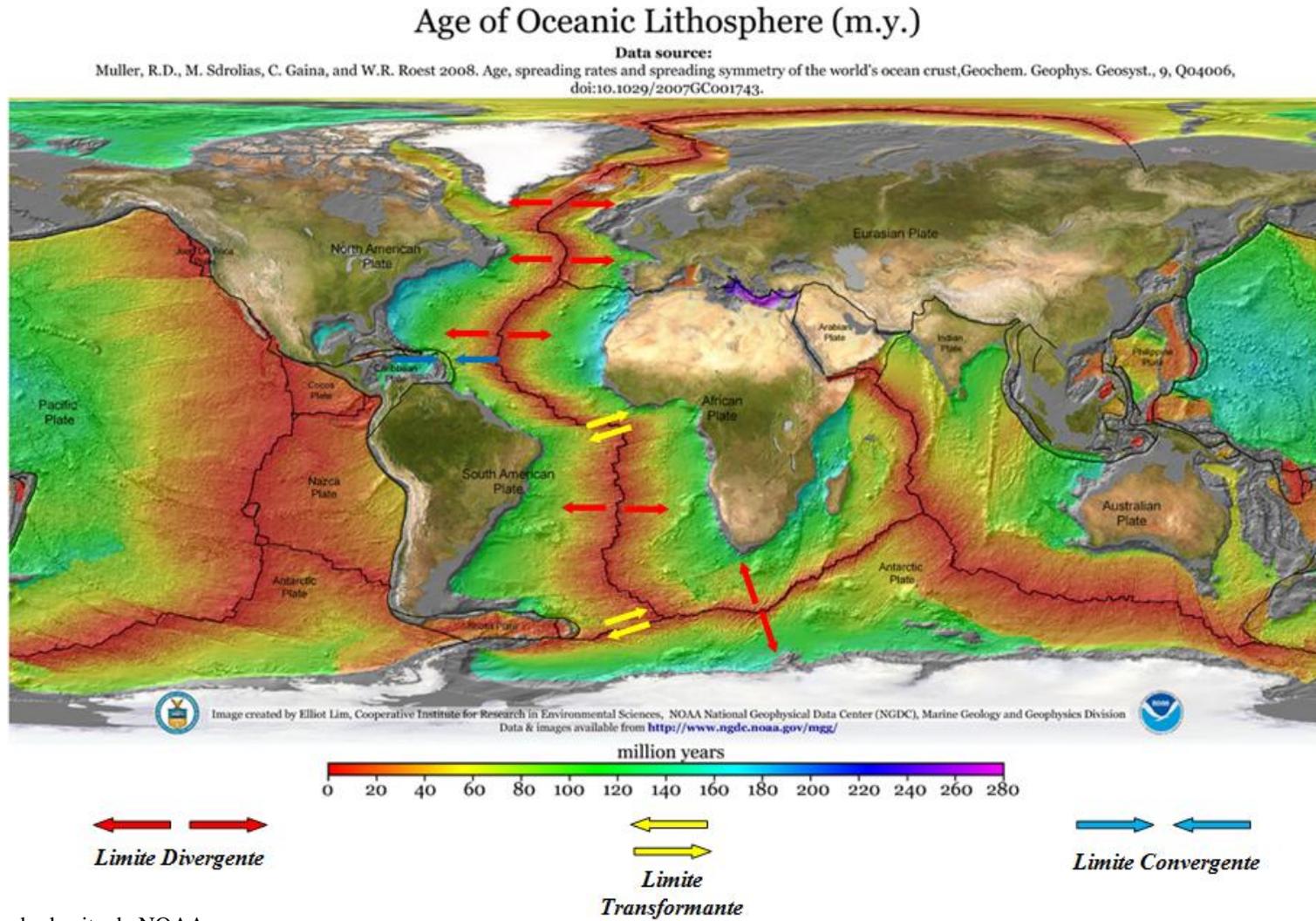
Figura 9- Supercontinente Gondwana e Laurásia antes da Ruptura (www.nrcan.gc.ca)



Fonte: www.nrcan.gc.ca

A ruptura do supercontinente Gondwana, ocorrido no Neocomiano (Cretáceo Inferior) a aproximadamente 135 milhões de anos foi controlado por movimentações tectônicas presentes até hoje com algumas diferenciações (Figura 10), gerando a separação entre os continentes Americano e Africano através do mecanismo de rifteteamento. Essa separação é apontada como responsável pela gênese do Oceano Atlântico Sul.

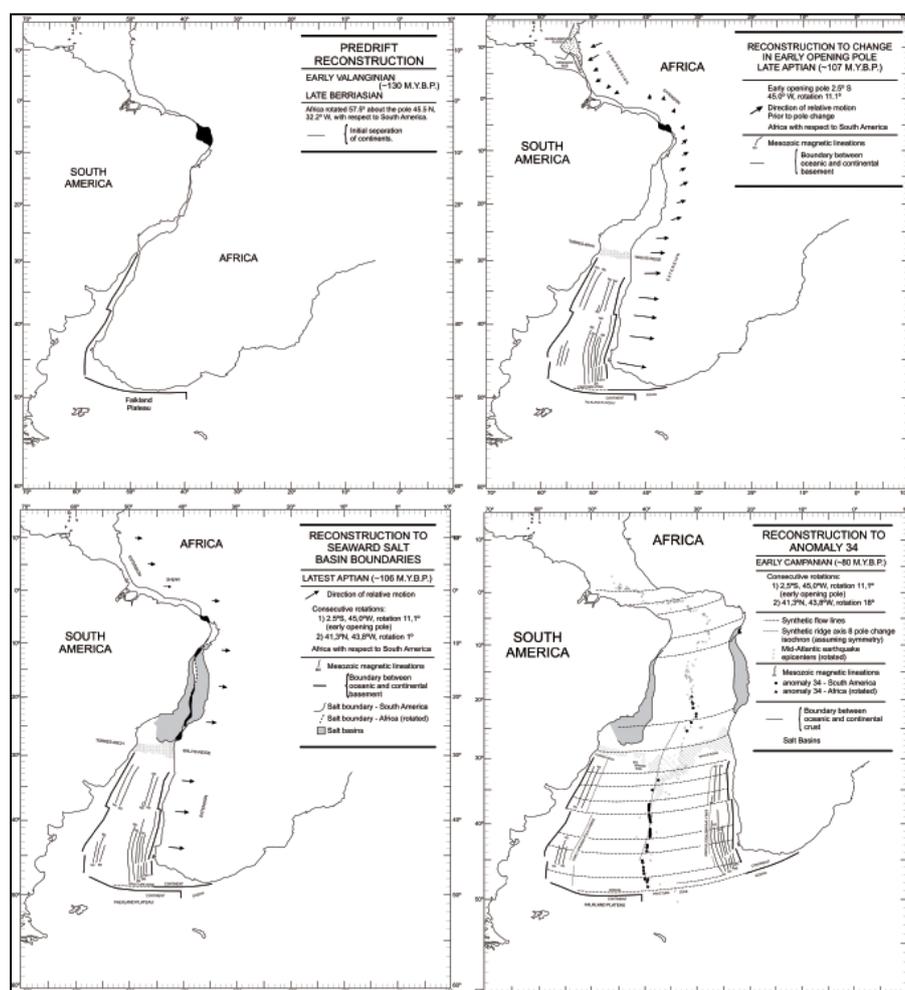
Figura 10 - Mapa global dos limites tectônicos atuais no Oceano Atlântico.



Fonte: Modificado do site da NOAA

De uma maneira geral, esse grande evento afetou inicialmente as atuais margens continentais sul-sudoeste africana e sul-americana (Figura 11), e posteriormente as margens norte-nordeste da América do sul e oeste da África (ALVES, 2002). Ainda de acordo com Alves (2002), o Oceano Atlântico Central está relacionado à ruptura das atuais margens continentais leste da América do Norte e Central, noroeste da África e sudoeste da Europa. No caso do Atlântico Norte, essa ruptura está relacionada às atuais margens nordeste da América do Norte, margem sudoeste e sudeste da Groenlândia e noroeste da Europa.

Figura 11 - Reconstrução da abertura do Atlântico Sul, do Eo-Cretáceo (130 Ma) ao Campaniano (80 Ma), mostrando a configuração dos continentes, os polos de rotação e os vetores de movimentos das placas.



Fonte: Rabinowitz e LaBrecque, 1979

Voltando o foco para a margem brasileira (tabela 2), Alves (2002) apresenta diferentes padrões tectônicos estruturais ao longo da margem brasileira, na qual são definidos dois regimes para esse grande evento, anteriormente constatados pelo trabalho clássico de Ponte e Asmus (1978).

O primeiro está relacionado à margem equatorial afetada por um padrão complexo de deformação com transpressões locais decorrentes de movimentações strike-slip entre as placas litosféricas, indicando assim uma movimentação transcorrente nos estágios iniciais do desenvolvimento das bacias, e posteriormente por movimentações divergentes (Figura 15).

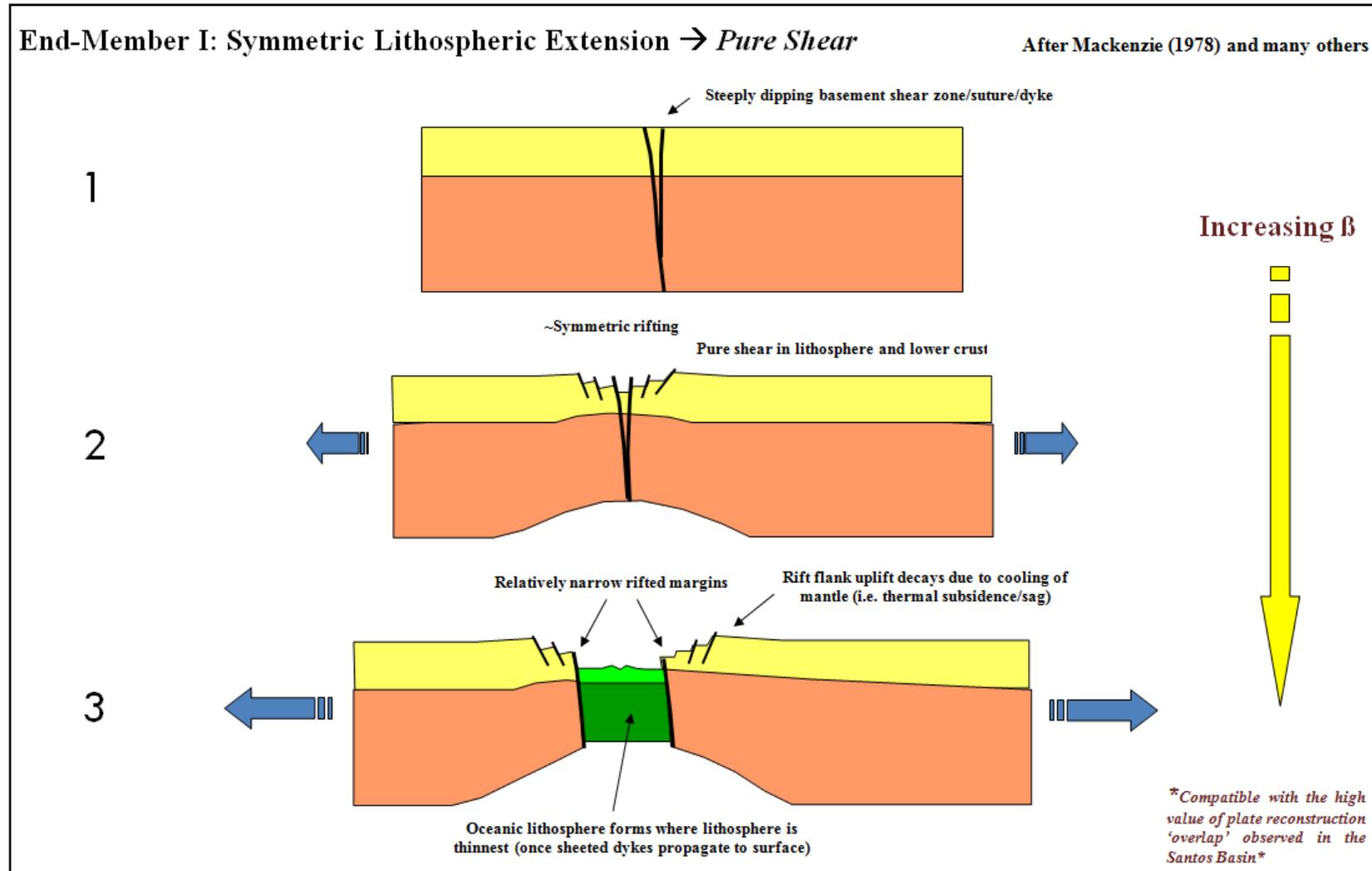
O segundo regime está relacionado tanto à margem sudeste quanto a margem Nordeste-Sudeste (Figura 15), hoje conhecida como margem leste brasileira (Papaterra, 2010). Ambas as margens ao sul da primeira, apresentando padrão distensivo, caracterizando uma movimentação divergente (Figura 15).

Todavia, diferentes modelos e interpretações têm sido propostos para explicar o evento que desencadeou a criação e evolução da Margem Continental brasileira, porém de uma maneira geral há três abordagens clássicas (PAPATERRA, 2010): (i) domeamento térmico ou intumescência do manto (Figura 12) como causa do afinamento crustal (ASMUS e BAISCH, 1983), (ii) processos de estiramento litosférico como precursores da abertura (Figura 13), tendo as anomalias termais papel secundário (CHANG et al, 1992); e (iii) processos mistos com diferentes taxas de estiramento ao longo da próto-margem (WHITE e MACKENZIE, 1989). Além disso, trabalhos recentes como Pinvidic e Manatschal (2009) e Zalán et al. (2011) sugerem a possibilidade de manto exumado em pontos da margem resultantes dessa abertura (Figura 14).

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o quão tanto o modelo gerado se aproximada dos modelos já existentes, já que o conhecimento do processo de formação de uma bacia sedimentar é fundamental para o entendimento dos aspectos estruturais das mesmas, facilitando assim as interpretações necessárias.

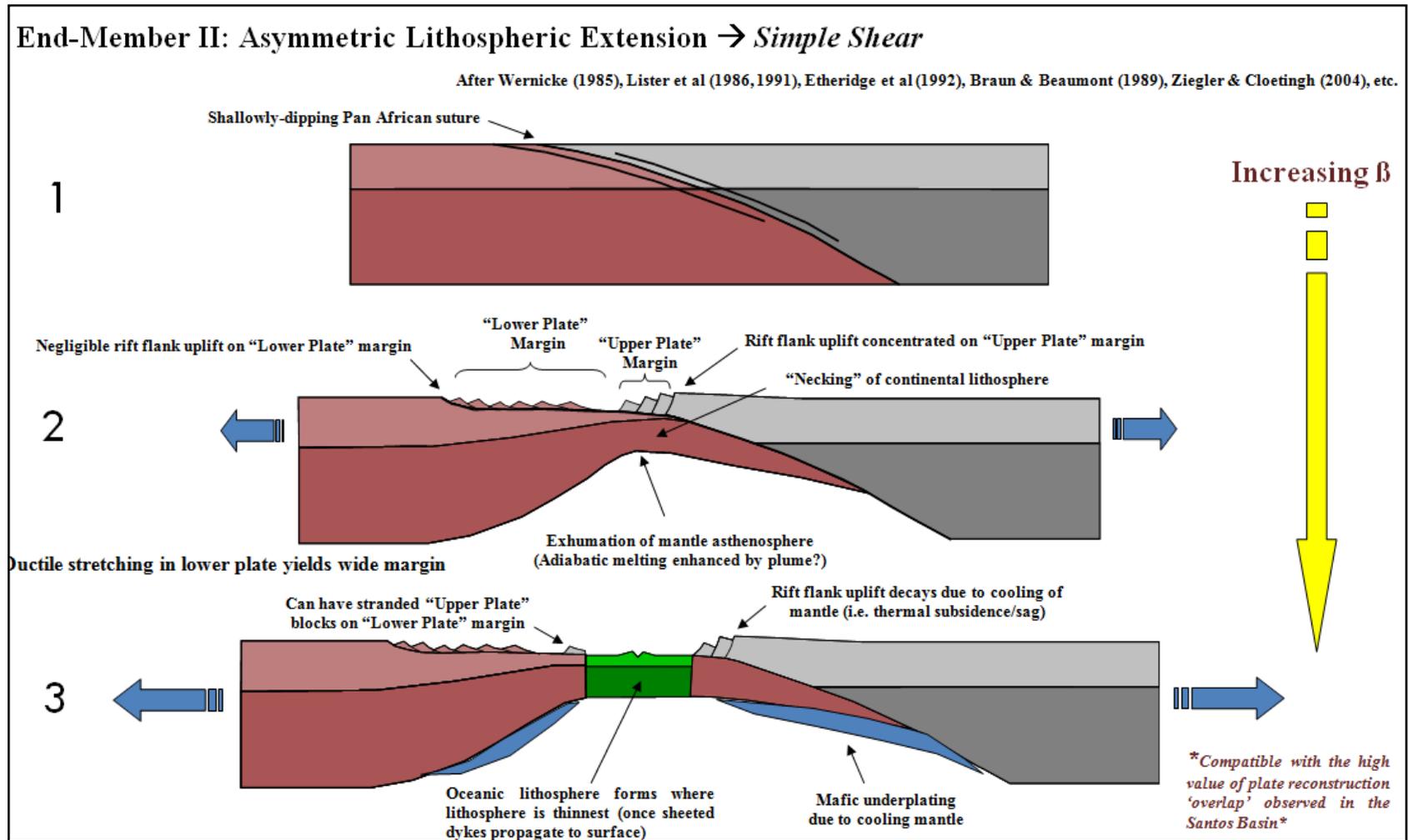
Partindo desse ponto, a seguir três figuras, apresentando uma síntese dos modelos de abertura mais aceitos para margens do tipo rifte, sendo o primeiro relacionado a uma distensão litosférica simétrica, o segundo relacionado a uma assimétrica e o terceiro com a presença de manto exumado. De uma forma geral, é possível observar que a geometria final de cada modelo é diretamente relacionada ao tipo de abertura e que com o passar das décadas a complexidade em volta dos mesmos é aumentada devido à evolução das técnicas de imageamento geofísico, o que proporciona maior entendimento sobre as bacias e suas origens.

Figura 12 - Extensão litosférica simétrica.



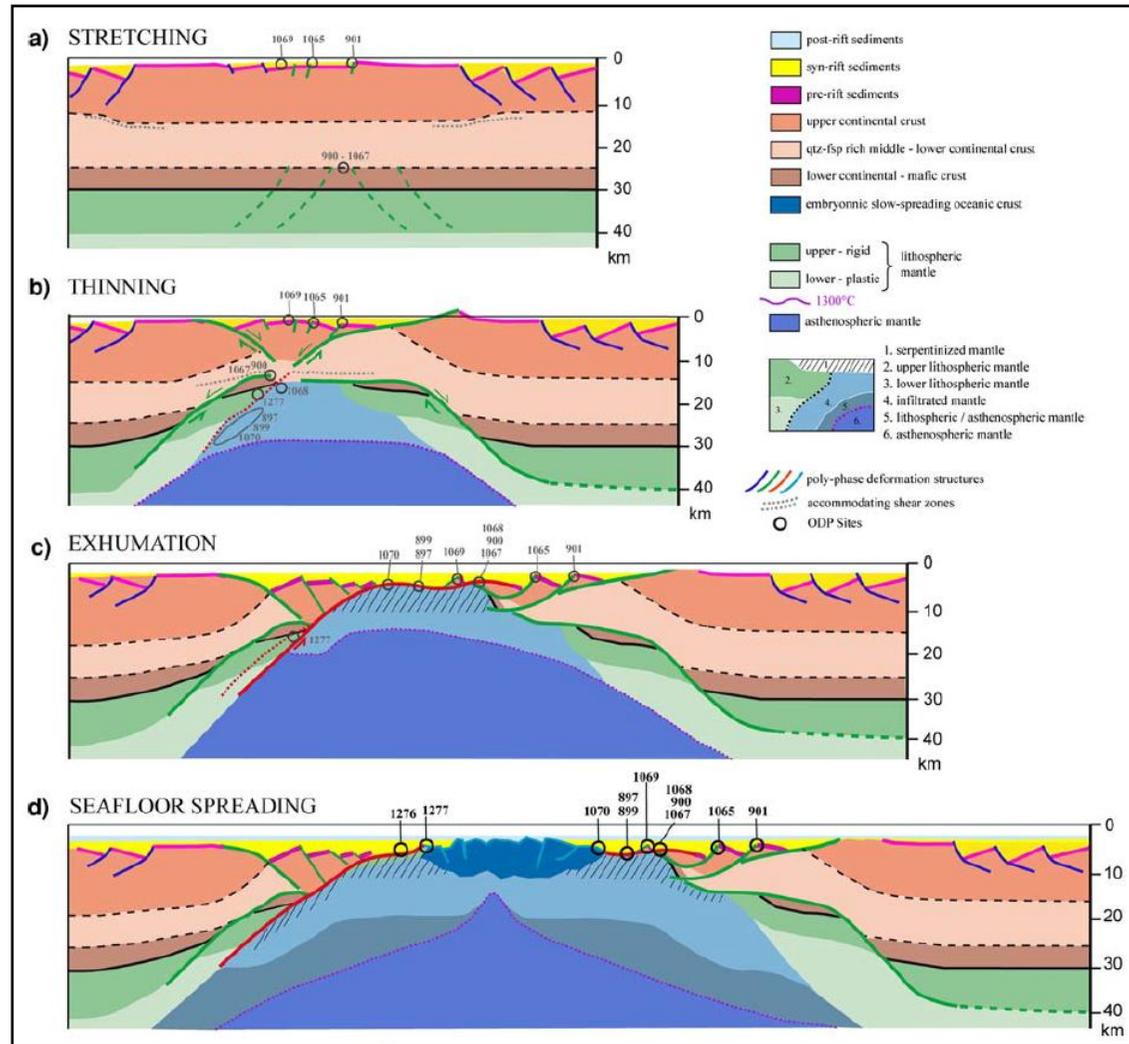
Fonte: Luke A. Jensen e Jon P. Teasdale - AAPG Conference, 2009

Figura 13 - Extensão litosférica assimétrica.



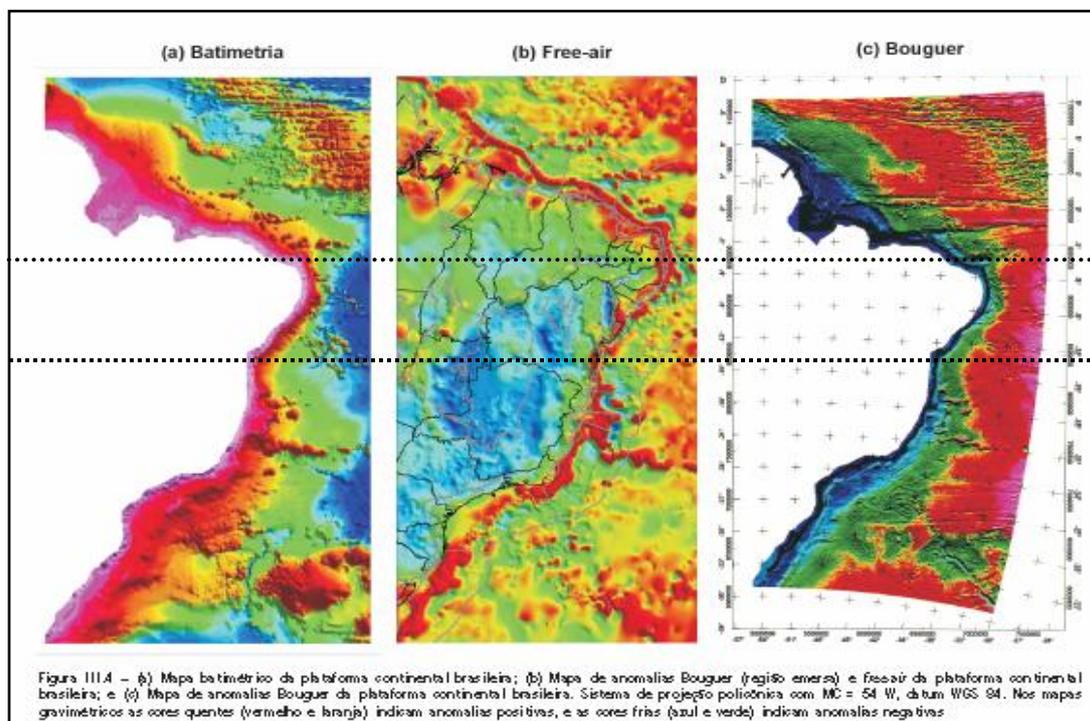
Fonte: Luke A. Jensen e Jon P. Teasdale - AAPG Conference, 2009

Figura 14: Extensão litosférica com a presença de manto exumado.



Fonte: Pinvidic e Manatschal, 2009

Figura 15 - Mostra o conjunto de mapas derivados da interação de dados aéreos, terrestres, marinhos e de satélite (batimetria e gravimetria) na Margem Continental Brasileira. (A) apresenta o mapa batimétrico da margem continental brasileira / (B) apresenta o mapa de anomalias *free-air* / (C) o mapa de anomalias Bouguer.



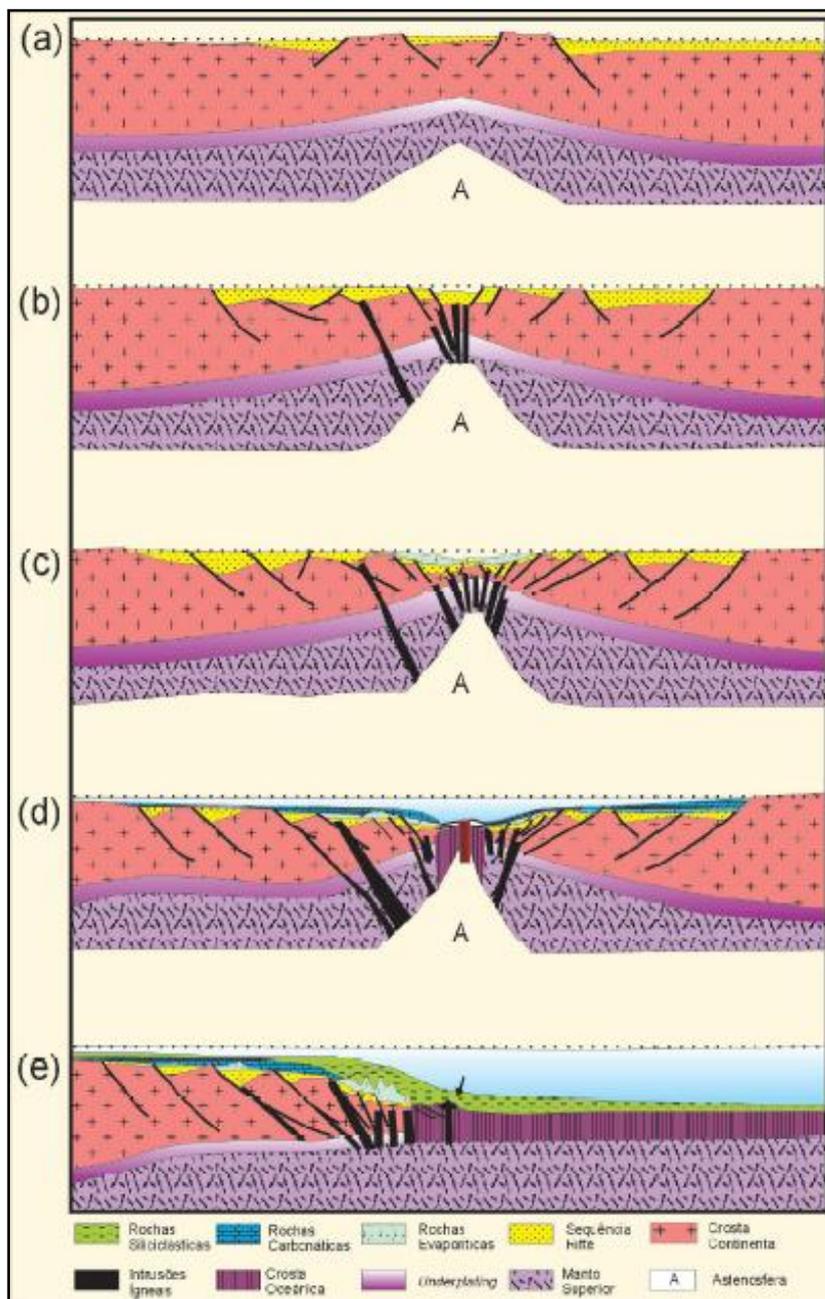
Fonte: Modificado Bizzi, 2003

Partindo desse ponto, esse tópico irá destacar as principais fases relacionadas ao movimento tectônico de separação dos continentes americano e africano (Figura 10) em conjunto com a descrição dos tipos dos ambientes sedimentares que predominaram ao longo de cada fase exclusivamente na Bacia de Santos e áreas adjacentes por se tratar do foco do estudo.

4.2 Evolução Tectono-estratigráfica da Bacia de Santos

A Bacia Sedimentar de Santos é definida por quatro estágios (Figura 16) associados às diferentes fases tectônicas que atuaram ao longo de sua evolução (ASMUS e PONTE, 1973; ASMUS, 1982; PEREIRA e MACEDO, 1990; PEREIRA e FEIJÓ, 1994; CAINELLI e MOHRIAK, 1999), na qual Chang et al. (1992) credita a um sistema geológico de Riftes denominado Sistema de Riftes do Leste Brasileiro, sendo elas: (a) pré-rifte; (b) sin-rifte; (c) transicional; (d/e) pós-rifte.

Figura 16 - Evolução geotectônica de uma bacia Rifte representada pelas letras a, b, c, d, e



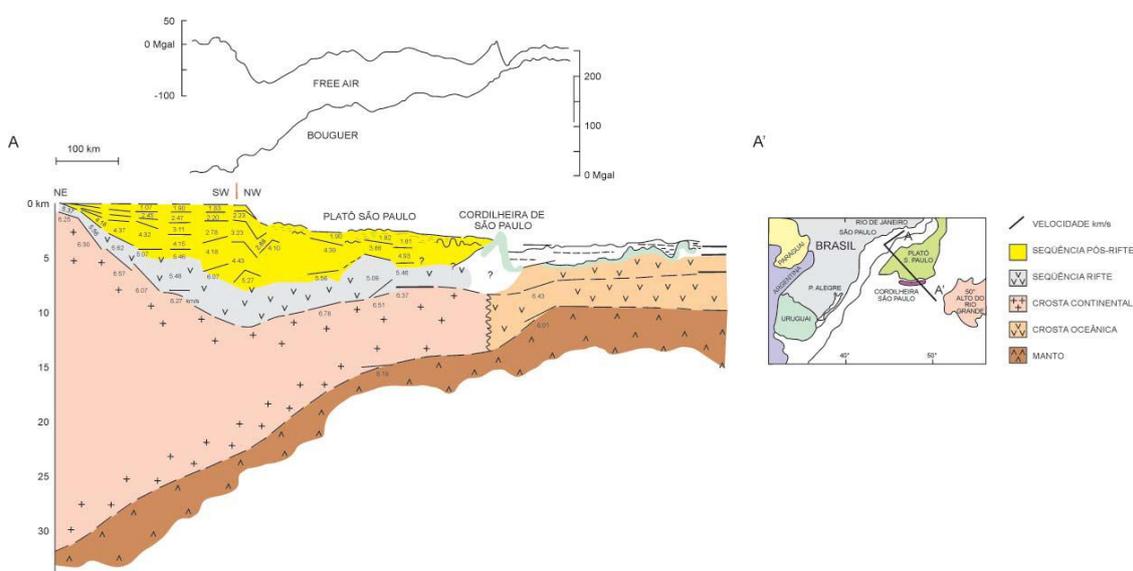
Fonte: Cainelli e Mohriak, 1999

Em termos sedimentares, Chang *et al.* (1992) apresenta cinco megasseqüências que seriam: continental, transicional evaporítica, plataforma carbonática rasa, marinha transgressiva e marinha regressiva, na qual as duas últimas são relacionadas a ciclos eustáticos de margem passiva (PAPATERRA, 2010). De uma maneira geral, elas representam os clássicos paleoambientes “do Continente”, “do Lago”, “do Golfo” e “do Mar” (PONTE e ASMUS, 1978).

Embasamento

De acordo com Pereira e Macedo (1990), o embasamento aflorante na área continental se projeta para leste mergulhando para o oceano a partir dos estados de Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro, sendo o mesmo cortado por sistemas de falhas transcorrentes e compressionais com direção predominante NE-SW. Na parte rasa da Bacia de Santos o embasamento é caracterizado como cristalino formado por granitos e gnaisses de idade pré-cambriana, aflorantes na região dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, composto predominantemente pelas rochas do Cinturão Orogenético da Ribeira. Acredita-se que a porção mais profunda seja composta de crosta continental estirada (transicional) relativa ao mesmo cinturão até a passagem para crosta oceânica.

Figura 17 - Estrutura crustal da Bacia de Santos.



Fonte: Chang et al., 1992

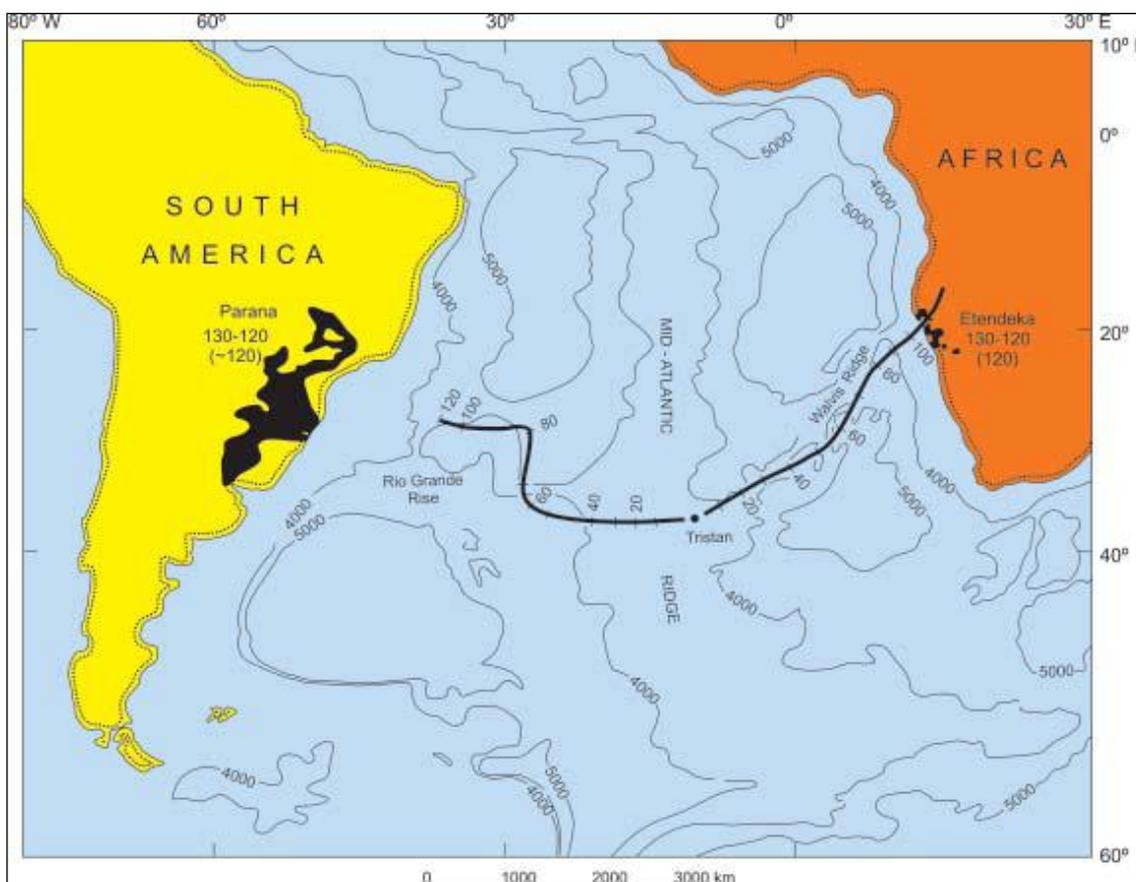
Os limites exatos da passagem entre a crosta continental e oceânica ainda são alvos de muitos estudos. Chang e Kowsmann (1984) inferiram o limite da base da crosta usando o trabalho de modelagem gravimétrica realizado por Guimarães (1982). Ambos os trabalhos sugeriram que o embasamento na bacia apresenta duas mudanças significativas no seu gradiente de afinamento (Figura 15). A primeira mudança foi denominada Charneira de Santos (PEREIRA, 1986) e está relacionada à faixa onde a crosta continental apresenta efetivamente seu afinamento em direção ao mar (Figura 17). À segunda localiza-se na zona na qual a crosta passa a apresentar um menor

afinamento relativo desde a área correspondente ao Platô de São Paulo até a região da dorsal de São Paulo (Figura 17).

Fase Pré-Rifte

A denominada fase Pré-Rifte, é caracterizada por derrames basálticos Eocretáceos (Formação Camboriú) que ocorreu ao longo de toda bacia (Figura 18), sendo sobrejacentes ao embasamento e subjacentes ao preenchimento sedimentar posterior. Este evento é correlacionado, por vários autores, aos derrames Serra Geral (Bacia do Paraná) que está ligado aos derrames Entendeka (África), cujo vulcanismo basáltico apresenta idades entre 119 a 147 Ma, com seu clímax entre 130 e 120 Ma (Figura 16). Esse derramamento constitui o chamado embasamento econômico que está presente nas bacias de: Pelotas, Santos, Campos e Espírito Santo (CAINELLI e MOHRIAK, 1999).

Figura 18 - Áreas dos derrames vulcânicos do Pré-Rifte.



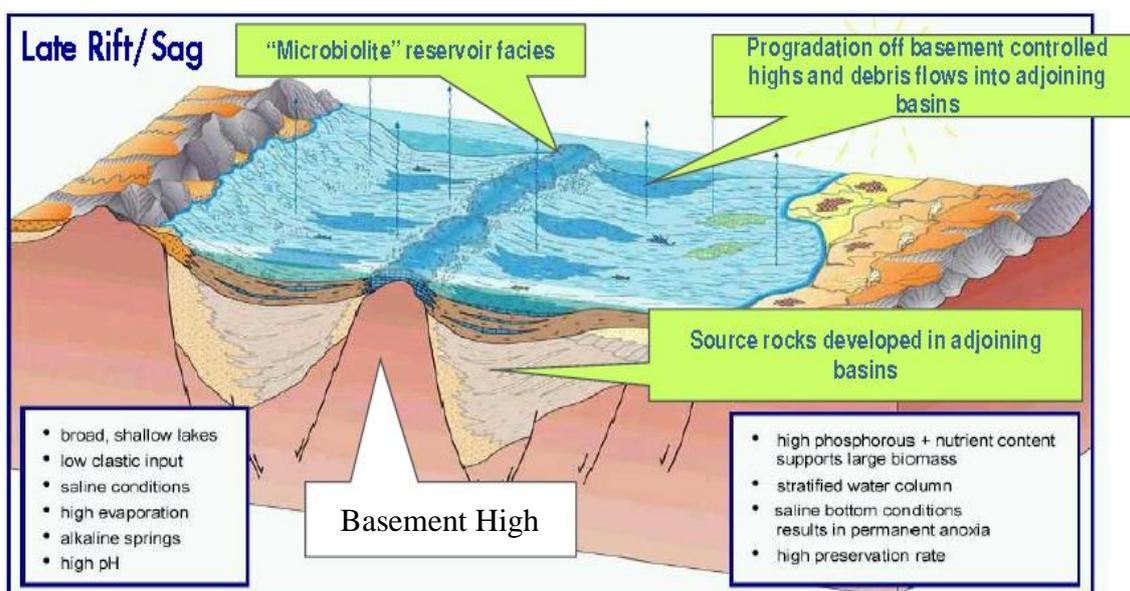
Fonte: White e McKenzie, 1989

Fase Sinrifte

Fase inicial de abertura e separação entre os continentes, representada pela Formação Guaratiba, denominada por alguns autores como Megassequência Continental (CHANG *et al.* 1992), instalada após um período de magmatismo intenso e apresentando uma larga depressão denominada “depressão Afro-Brasileira” (CHANG *et al.* 1992).

Inicialmente, foi instalado um sistema fluvial (Figura 19), mas ainda com presença de vulcanismo. Tal sistema é caracterizado pela deposição de sedimentos terrígenos de idade Neojurássica próprios de depósitos fluviais, como arenitos e folhelhos escuros, e por materiais mais grossos associados a leques aluviais. Papaterra (2010) aponta que pequenas quantidades de evaporitos foram depositadas localmente, em ambiente de “playa-lake”, e arenitos de origem eólica também são comuns nessa sequência. Após a deposição inicial, ocorreu uma distensão crustal acelerada (Figura 20), gerando uma série de meio-grábens ao longo de toda margem Leste (Figura 19) no Neocomiano (Papaterra, 2010), formando lagos profundo e apresentando basicamente uma deposição flúvio lacustre e por clásticos vulcânicos derivados de vulcanismo ativo, porém decrescente, acumulados nos baixo estruturais (Figura 19). Como resultado dessa constante sedimentação os lagos tornaram-se progressivamente mais rasos.

Figura 19 - Deposição dos sedimentos da fase Sinrifte (Modificada Gibbs *et al.* 2003).



Fonte: (Modificada Gibbs *et al.* 2003)

Sobreposto a esses sedimentos, foram depositados coquinas composta em sua grande maioria por bibálvios e ostracodes (PAPATERRA, 2010) formando “plays” petrolíferos bastante incomuns no registro geológico e de difícil entendimento, mas de grande produtividade quando encontrados na fase rifte ou sinrifte da margem leste brasileira e na margem oeste africana (NOGUEIRA, 2003).

Por último, sedimentos carbonáticos, não marinhos, de idade Barremianas, compostos em sua maioria por microbiólitos e estromatólitos e associados a “build-up” acumulados em altos estruturais (Figura 19), formam a denominada seção “Sag”. Essas sequências são ricas em matéria orgânica representativa dos períodos de nível de lago raso com aumento gradual da salinidade atingindo níveis típicos da água do mar hipersalinos.

Nós últimos anos, com a evolução dos métodos geofísicos e com a perfuração de poços exploratórios profundos, a fase sinrifte vem sendo melhor compreendida e atualmente é alvo da indústria de petróleo, na qual já foram encontrados reservatórios de hidrocarbonetos de ótima qualidade e em quantidade denominados Reservatórios do Pré-Sal (Estrela, 2008).

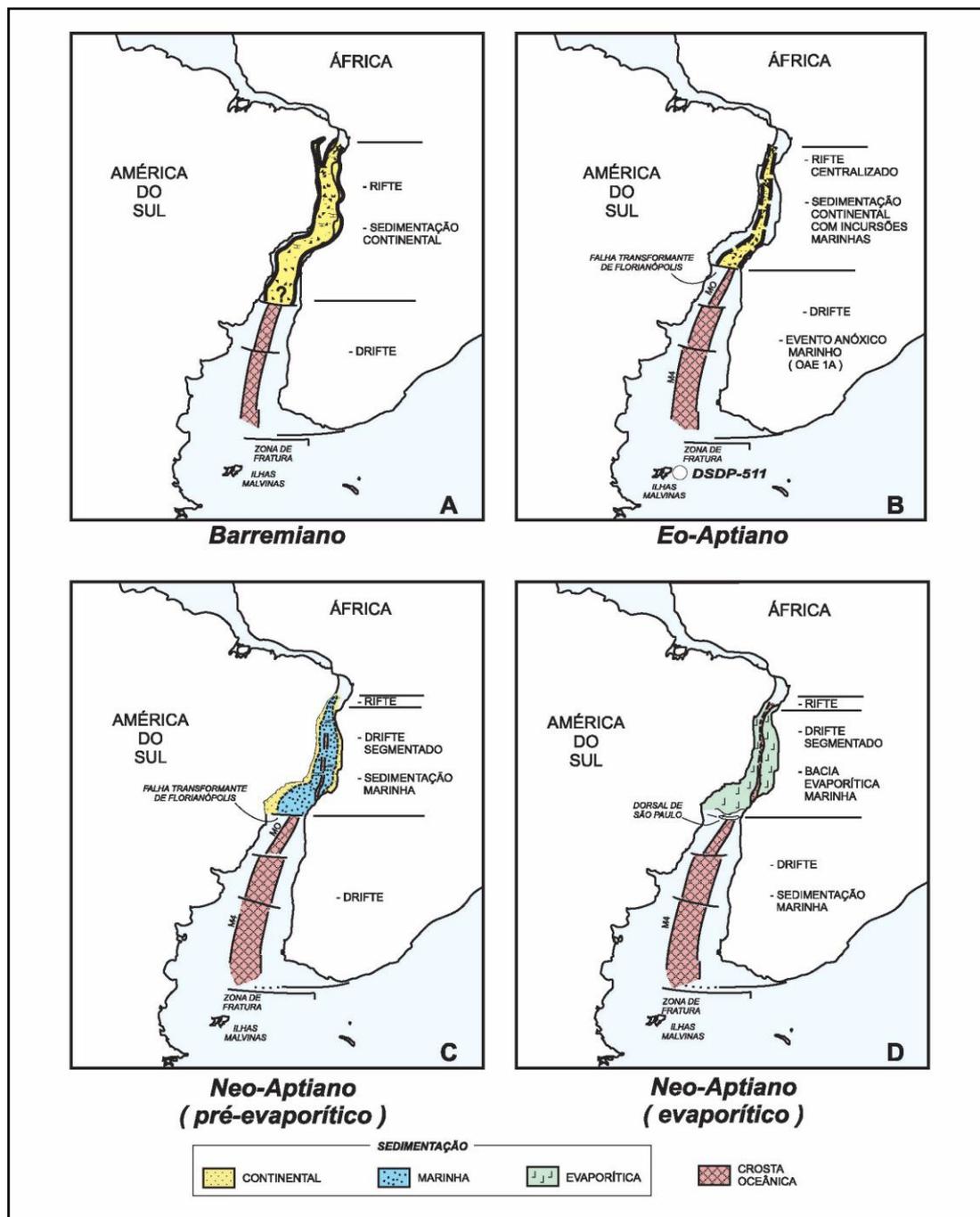
Fase Transicional

Sobreposta à sequência da fase Sinrifte encontram-se os depósitos de idade aptiana, depositados em ambiente marinho restrito há aproximadamente 115 Ma (Figura 20), marcada pela discordância angular “break-up” (discordância Pré-Alagoas) representada na Carta Estratigráfica da Bacia de Santos pelo Andar Alagoas.

Nesta fase ocorre o término do estiramento litosférico e rifteamento da crosta continental, cessando a atividade de grande parte das falhas envolvendo o embasamento. Inicialmente são mapeados sedimentos carbonáticos com transição para um ambiente de alta salinidade formando uma espessa deposição de sedimentos evaporíticos, em sua grande maioria formada por anidrita e halita, compondo denominada a Formação Ariri.

A origem desses sedimentos salíferos, de acordo com Pereira et al. (1986), está relacionada às primeiras incursões marinhas ao longo do rifte costeiro vindo do sul para o norte, porém há questionamentos recentes.

Figura 20 - Reconstruções paleogeográfica do barremiano ao neo-aptiano, mostrando as principais fases tectônicas e a abrangência da sedimentação marinha no Oceano Atlântico Sul.

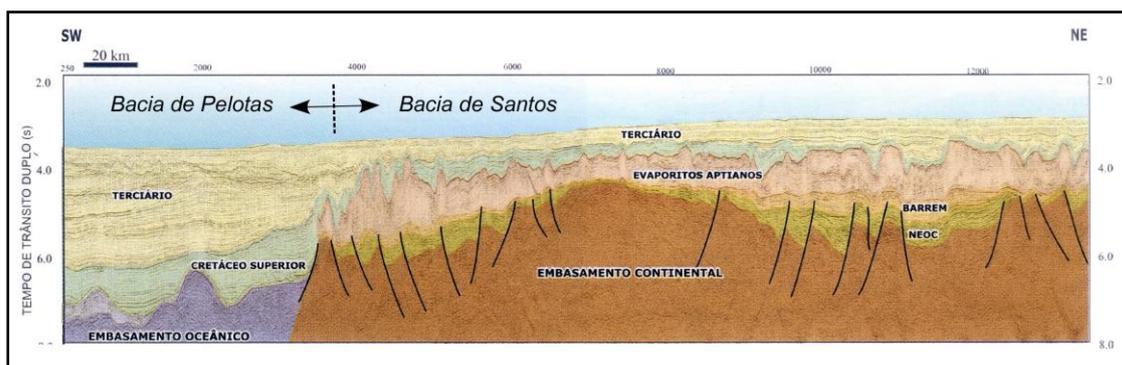


Fonte: Dias, 2005

Anteriormente, Leyden et al. (1976) descreveram que as grandes concentrações de sal foram oriundas das águas alcalinas das emanções vulcânicas. Ainda de acordo

com Leyden et al. (1976) o Alto de Florianópolis, aos elementos químicos presentes nesta imensa bacia evaporítica, foram favorecidos por fontes de águas alcalinas sul da Bacia de Santos, serviu como barreira topográfica para incursões marinhas vindas do sul levando assim a geração de um ambiente de golfo com altas concentrações de sal.

Figura 21 - Contato entre crosta continental e oceânica ao longo da Zona de Fratura do Rio Grande e a sequência Evaporítica restrita à Bacia de Santos.



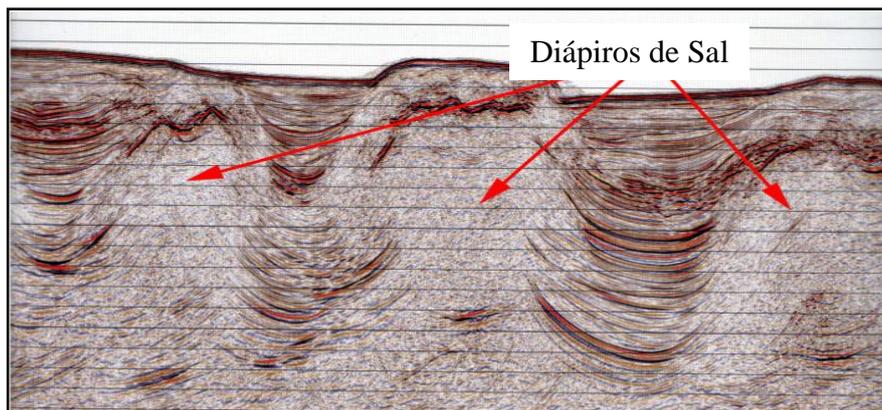
Fonte: Mohriak, 2008

Esta grande camada de Sal, que hoje é um desafio para as geociências, sofreu grande deformação ao longo do tempo, sendo denominada de halocinese (Tectônica do Sal), gerando por consequência diferentes estruturas de sal. Essas deformações foram causadas pelo acúmulo de carga sedimentar juntamente com o basculamento de toda a bacia na fase pós-rifte (Figura 22).

Além da sua particularidade estrutural, o sal apresenta uma velocidade de propagação da onda sísmica sensivelmente mais alta do que nos sedimentos vizinhos (em torno de 4500m/s), atuando como uma lente que distorce a imagem sísmica, dificultando a interpretação dos eventos que estão abaixo dela (Figura 22). Isso se deve pela característica elástica e por apresentar porosidade próxima a zero além da alta condutividade térmica, fato que desempenha um importante papel no controle de geração, maturação e formação de trapas para hidrocarbonetos.

Independente da origem, a bacia de Santos apresenta a maior concentração de sedimentos evaporíticos quando comparada a outras bacias da margem brasileira / africana, podendo em alguns lugares alcançar a ordem de 3 km de espessura.

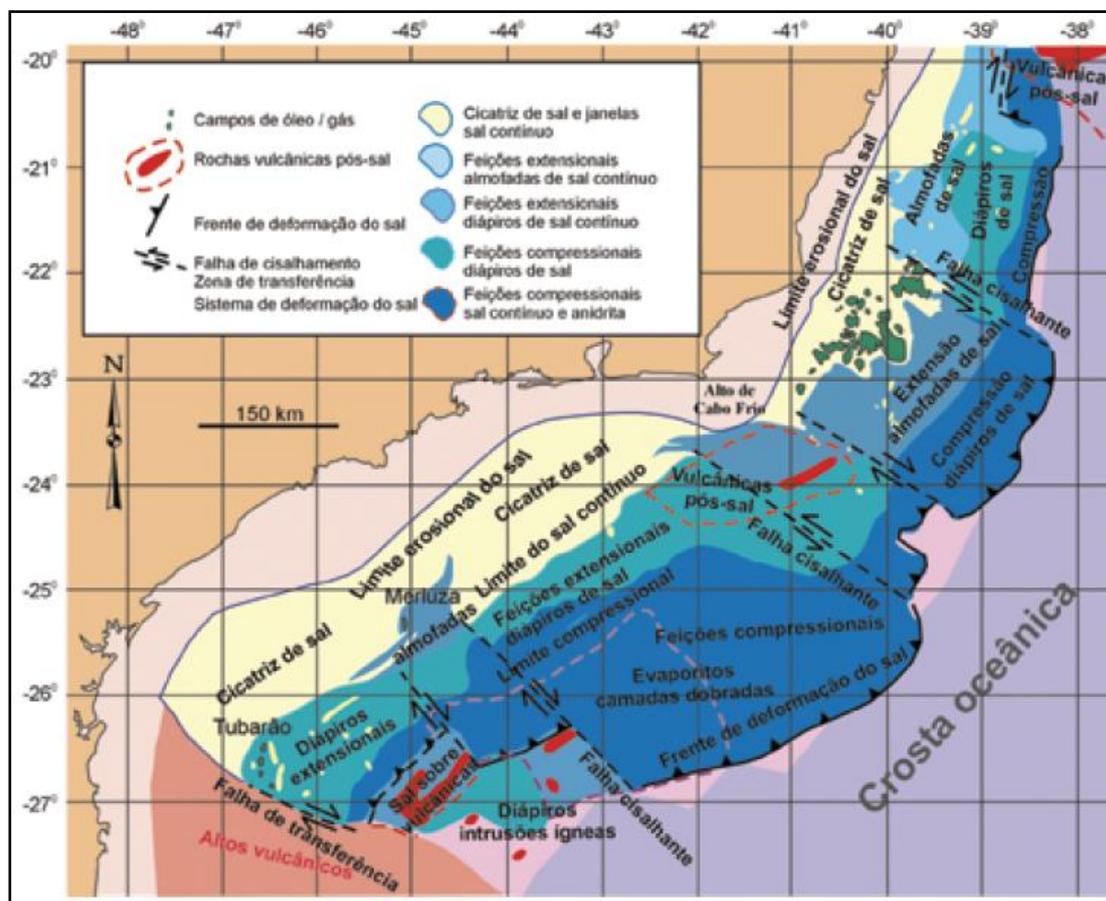
Figura 22 - Representação dos diápios de Sal e imageamento inferior nas camadas abaixo



Fonte: Autor

Chang *et al.* (1992) e Meisling (1992) apresentam os limites evaporíticos proximais sobre a linha de chaneira Aptiana de Santos, possuindo amplitude de 300 km sobre o Platô de São Paulo sendo sobrejacente em sua grande maioria por crosta continental segmentada pelo rifte. O limite em direção ao mar coincide com o possível limite entre as crostas oceânica e continental (Figura 23).

Figura 23 - Limites evaporíticos aptianos na Bacias de Santos, Campos e Espírito Santo.

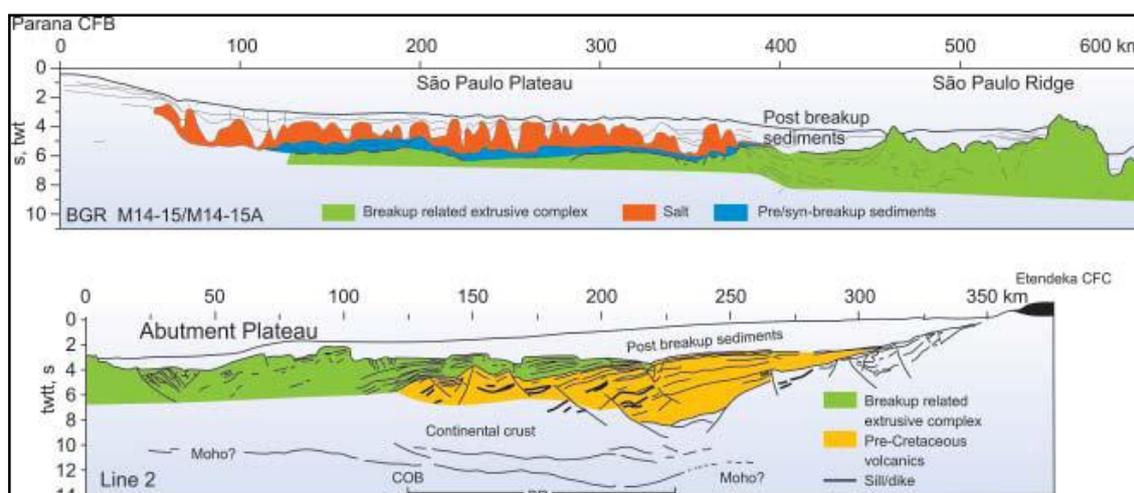


Fonte: Meisling, 1992.

Fase Pós-Rifte

Com o final da fase transicional ocorreu a separação efetiva dos continentes Americano e Africano, com o aparecimento da Cadeia Meso-Atlântica e a abertura definitiva do ambiente restrito para o mar, tendo como consequência direta a geração de Crosta Oceânica. O rompimento da crosta continental na Bacia de Santos se deu de maneira assimétrica em relação ao novo oceano (PEREIRA *et al.* 1986), este fato deve-se pela crosta não ter se rompido na região mediana entre a América do Sul e a África, e sim próxima à costa africana, que como consequência fez com a maioria dos depósitos evaporíticos ficassem anexados ao continente sul-americano naquela latitude Gamboa *et al.* (2008). A melhor forma de evidenciar o rompimento assimétrico é através do Platô de São Paulo, que é resultado direto e comporta enormes volumes de sal (Figura 24).

Figura 24 - Seções sísmicas profundas ao longo da Bacia de Santos (acima) e offshore Namíbia (abaixo), mostrando a distribuição dos sedimentos pós-rifte e as vulcânicas relacionadas à abertura continental.



Fonte: Gladzenko et al. 1997

Como consequência direta, temos o início da geração de crosta oceânica e o desenvolvimento de uma ampla plataforma continental carbonática durante o Albiano (aproximadamente 112 Ma) em situações de águas rasas e calcilutitos em águas profundas (PAPATERRA, 2010). Segundo Pereira *et al.* (1986), durante o período de deposição dos carbonatos, foram iniciados os processos de escorregamentos gravitacionais sobre o sal, dando início à halocinese na bacia, formando estruturas de casco de tartaruga, diápiros de sal, muralhas de sal e sal alóctone (Figura 24).

Além disso, é possível observar a presença de uma grande falha lítrica que se estende desde na porção central da bacia de Santos até o extremo SW da Bacia de Campos denominada “Falha de Cabo Frio”, no qual estudos, como Szatmari *et al.* 1994 e Moriak *et al.* 1995, concluíram trata-se de uma falha com origem mais provável relacionada ao escape de sal para a região de águas mais profundas, criando um gap estratigráfico do carbonatos albianos e, ao mesmo tempo, abrindo espaço para o avanço das cunhas siliciclásticas prográdantes do Cretáceo Superior. Com o decorrer do tempo, novas seqüências sedimentares foram se sobrepondo, destacando-se (Figura 25):

Neoalbino e Turoniano: Duas seqüências transgressivas preencheram a bacia, afogando a plataforma continental Carbonática.

Neocretácio: Nesse momento ocorreram três grandes episódios prográdantes que preencheram a bacia, levando a linha de costa a um significativo recuo. Este período é correlacionado a intrusões de rochas alcalinas na área (ALMEIDA, 1983). Com tendência de subida relativa do nível do mar ao longo das bacias costeiras brasileiras no Meso e Neocretácio, a Bacia de Santos compensou esta tendência através do soerguimento da área fonte e o grande aporte sedimentar.

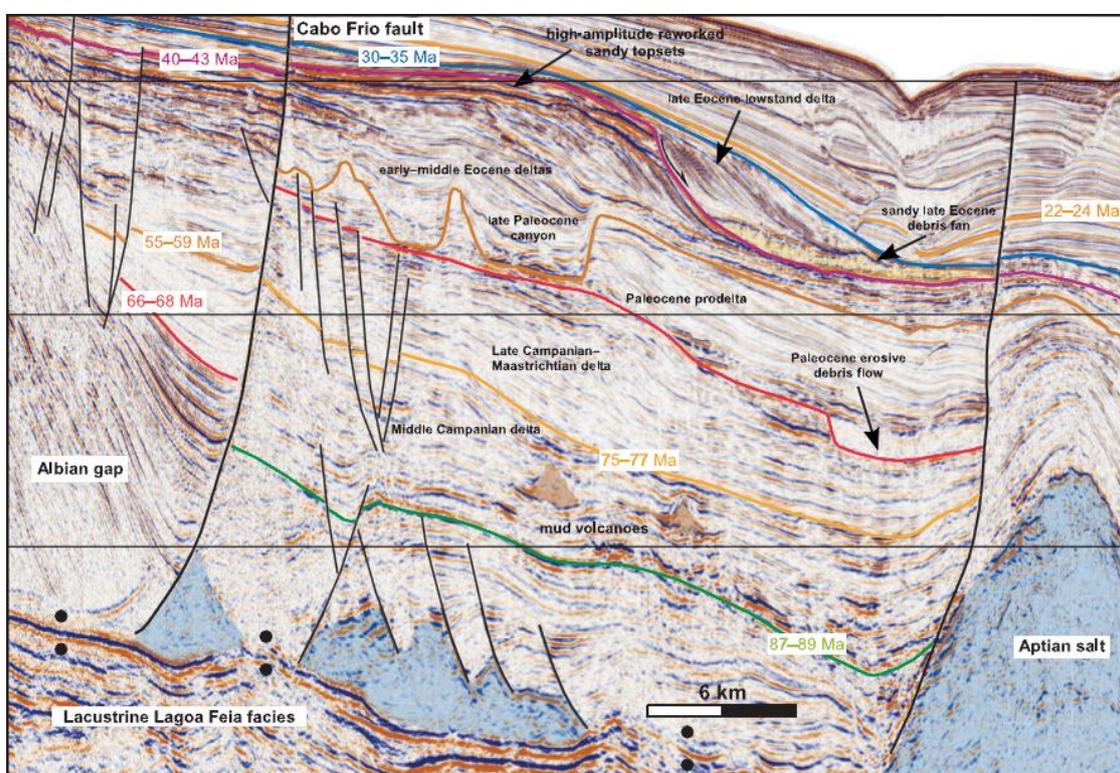
Cretáceo Superior: É marcada por ampla discordância regional que está ligada a superfície de erosão do Japi na área continental, que de acordo com Almeida (1976), foi responsável pelo nivelamento de várias intrusões vulcânicas alcalinas na área continentais adjacentes a bacia no Neocretácio.

Terciário: De acordo com Pereira *et al.* (1986), os depósitos são marcados por duas seqüências prográdacionais. No entanto, elas são constituídas de sedimentos bem mais finos do que as do Cretáceo Superior, pois os sedimentos mais grosseiros teriam sido capturados pela drenagem do Rio Paraíba do Sul, que hoje deságua na Bacia de Campos. Razão a qual o Terciário na Bacia de Campos é mais expressivo do que na Bacia de Santos. Existem evidências que a parte norte da Bacia de Santos e na Bacia de Campos houve vulcanismo básico nesta época, podendo ser relacionados aos pulsos distensivos na região (PEREIRA *et al.* 1986).

Terciário-Quaternário: Nesta fase de transição ocorreram novas movimentações de blocos no Cinturão Ribeira que de acordo com Pereira (*et al.* 1986) deformaram sedimentos nas bacias continentais nela encaixada (Resende e Taubaté). Esta sísmica é bastante ativa até hoje nas áreas adjacentes a Bacia de Santos, mostrando assim uma movimentação tectônica ainda atuante.

Em resumo, estas sequências da fase pós-rifte constituem o denominado pós-sal, onde depósitos típicos de ambiente de mar aberto e de origem continental são encontrados ao longo da bacia (Figura 25).

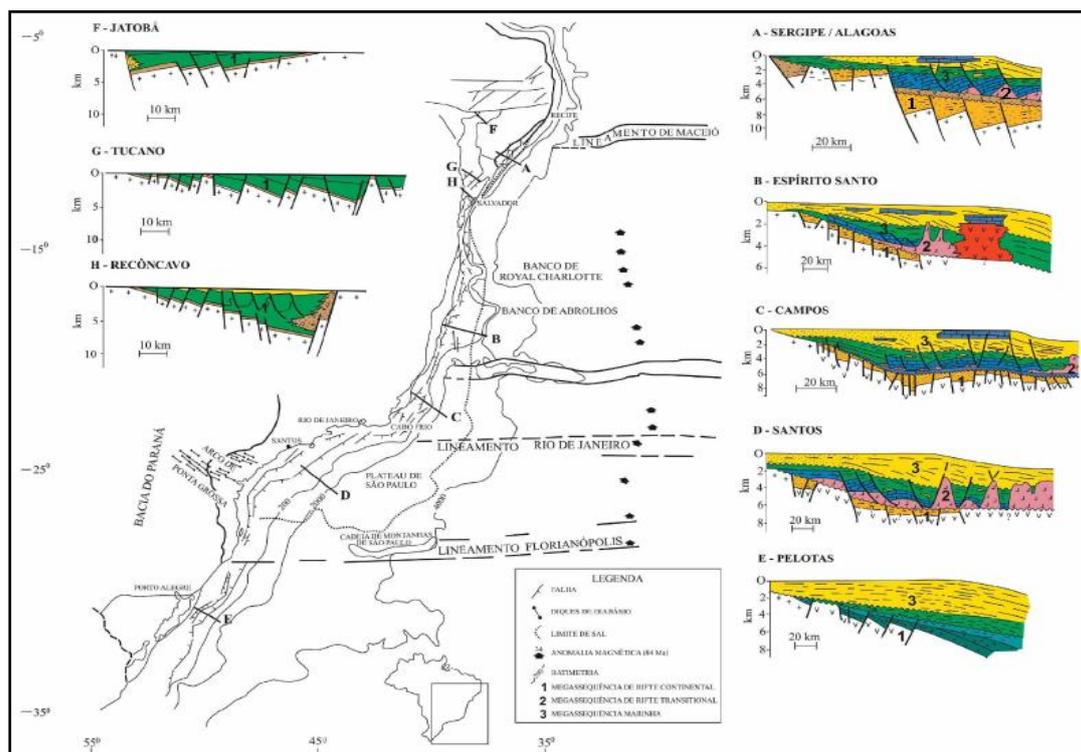
Figura 25: Seções sísmicas na Bacia de Santos mostrando as principais sequencias sedimentares.



Fonte: Modica e Brush, 2007.

É válido comentar que os tipos de tectonismo e sedimentação são bem similares nesse grupo de bacias (margem passiva), porém as mesmas foram sujeitas a irregularidade devido aos efeitos de heterogeneidades e descontinuidades, além de anomalias térmicas crustais que impuseram fortes alterações na evolução de cada segmento da margem (Figura 26).

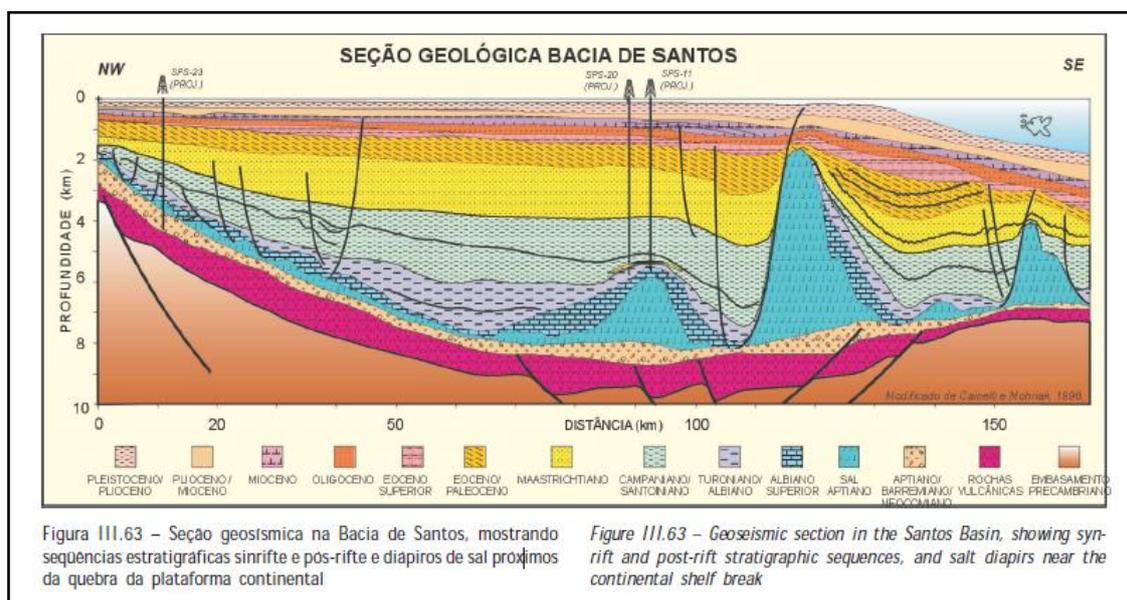
Figura 26 - Seção Geológica das bacias meso-cenozoica, ao longo da Margem Leste Brasileira.



Fonte: Chang *et al.* 1992

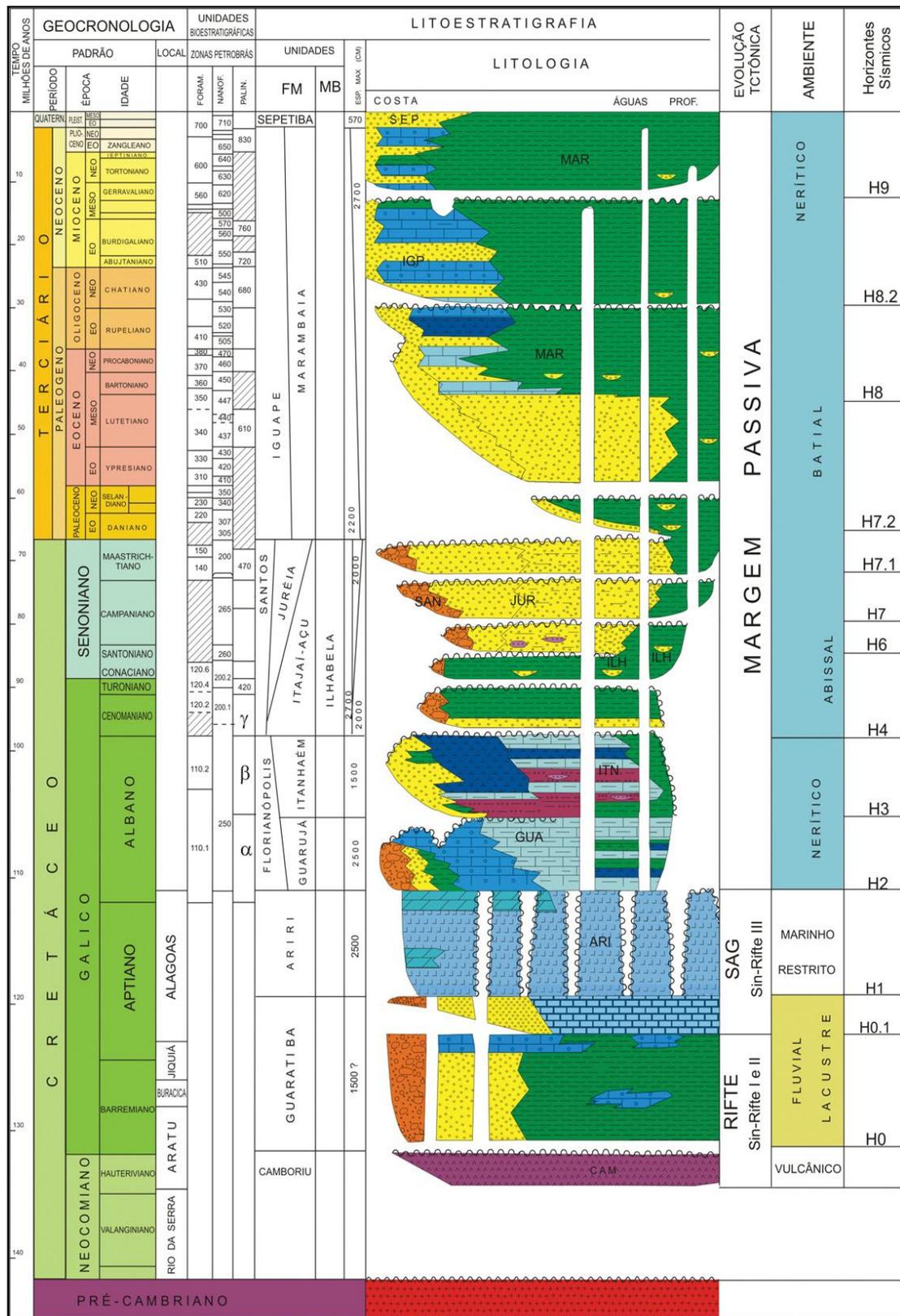
A seguir uma seção dip (Figura 27), que mostra as três megassequências, com suas correspondentes deposições sedimentares e o embasamento da Bacia de Santos, e a carta estratigráfica da bacia (Figura 28), apresentando as principais fases tectono-sedimentar.

Figura 27 - Seção geológica representativa da Bacia de Santos.



Fonte: Mohriak, 2003

Figura 28 - Carta estratigráfica da Bacia de Santos.



Fonte: Pereira e Feijó, 1994