

OBSERVAÇÕES SOBRE A CARTA ESTRATIGRÁFICA E A EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR DAS BACIAS DE SERGIPE E ALAGOAS

OBSERVATIONS ON THE STRATIGRAPHIC CHART AND THE TECTONIC-SEDIMENTARY EVOLUTION OF THE SERGIPE AND ALAGOAS BASINS

OBSERVACIONES SOBRE LA CARTA ESTRATIGRÁFICA Y LA EVOLUCIÓN TECTONO-SEDIMENTARIA DE LAS CUENCAS DE SERGIPE Y ALAGOAS

*Webster U. Mohriak¹
Marcelo Bassetto¹
Ines S. Vieira¹*

RESUMO

Objetiva-se, aqui, discutir a carta estratigráfica das bacias de Sergipe e Alagoas, considerando aspectos tectônicos, utilizando-se como base a análise megarregional de uma malha sísmica bastante ampla, integração com dados gravimétricos, magnéticos, além de analogias com outras bacias sedimentares. Na primeira parte, discutem-se a evolução tectono-sedimentar e as principais discordâncias marcadas na carta estratigráfica; na segunda, discute-se a possível ocorrência de halocinese em águas profundas das bacias de Sergipe e Alagoas, analisando-se modelos conceituais e analogias com outras bacias sedimentares. Finalmente, apresenta-se proposição de carta tectono-estratigráfica incorporando as modificações discutidas no texto. (Originais recebidos em 15.10.95.)

ABSTRACT

The objective of this paper is to discuss the stratigraphic chart of the Sergipe and Alagoas basins, considering tectonic aspects. For this purpose, a mega-regional analysis of quite a wide seismic network, integrated with gravitational and magnetic data, as well as analogies with other sedimentary basins, is used. In the first part, the tectonic-sedimentary evolution and the principal unconformities shown on the stratigraphic chart are discussed; in the second part, the possible occurrence of halokinesis in deep waters in the Sergipe and Alagoas basins is discussed, analyzing conceptual models and analogies with other sedimentary basins. Finally, a proposed tectono stratigraphic chart is shown, which includes the modifications discussed. (Expanded abstract available at the end of the paper.)

RESUMEN

Se objetiva, aquí, discutir la carta estratigráfica de las cuencas de Sergipe y Alagoas, considerando aspectos tectónicos. Para ello, se utilizaron: el análisis megarregional de una red sísmica bastante amplia, integración con datos gravimétricos, magnéticos, además de analogías con otras cuencas sedimentarias. En la primera parte, se discuten la evolución tectono-sedimentaria y las principales discordancias marcadas en la carta estratigráfica; en la segunda parte, se discute la posible ocurrencia de halocinesis en aguas profundas de las cuencas de Sergipe y Alagoas, analizándose modelos conceptuales y analogías con otras cuencas sedimentarias. Finalmente, se presenta una proposición de carta tectono-estratigráfica incluyendo las modificaciones discutidas.

¹ E&P/GEINOF – Avenida República do Chile nº 65, Centro, CEP 20035-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
e-mail: webmohr@petrobras.com.br

1. INTRODUÇÃO

No volume 8/1 do Boletim de Geociências da PETROBRAS, está contida uma compilação das cartas estratigráficas de todas as bacias sedimentares brasileiras. Nas revisões, atualizadas até 1995, há mudanças nas versões anteriores das colunas estratigráficas dessas bacias. Com a publicação dessas cartas – em que se registram e integram resultados de análises bioestratigráficas, sedimentológicas e geocronológicas –, imenso acervo de dados poderá ser mais bem avaliado em análises comparativas. Isto resultará em contínuo aprimoramento e reavaliações dos conceitos tectono-estratigráficos fundamentais na análise de bacias sedimentares.

Apresentam-se, aqui, sugestões para a carta estratigráfica das bacias de Sergipe e Alagoas. Foram incorporadas interpretações mais atualizadas e abrangentes, levando-se em conta processos formadores de bacias sedimentares, tectônica extensional de fase *rift* – principalmente de tectônica de sal. As principais discordâncias regionais são, também, correlacionadas a eventos tectônicos, englobando-se no arcabouço estrutural alguns elementos de geologia da seção pré-cambriana a paleozóica das bacias. Novos conceitos de formação de margens passivas e vulcanismo são discutidos, com abordagem integrada de algumas linhas de resolução profunda adquiridas na margem continental brasileira, cuja interpretação distingue a região de águas profundas e ultraprofundas como fronteira exploratória, com características geológicas distintas das observadas na plataforma continental e talude.

2. INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA DAS BACIAS DE SERGIPE E ALAGOAS

Embora haja muitos estudos sobre o sistema de *rifts* do nordeste brasileiro, são poucos os integrados, abrangendo a região da plataforma continental e águas profundas. Dentre os trabalhos regionais com análise de bacias na margem nordeste, podem-se destacar os de Ojeda e Fujita (1972) e o de Falkenheim *et al.* (1986), com atenção especial para a região emersa e a plataforma continental adjacentes às bacias de Sergipe e Alagoas.

Existem, também, vários estudos em que se dá ênfase à geologia de petróleo das bacias da região nordeste, especialmente ao histórico da exploração. São exemplos os de Ponte *et al.* (1980), Lana (1987), Aquino e Lana (1989), Bacocoli *et al.* (1991), Castellani (1991) e Lana (1993). Outros autores trabalharam sobre aspectos estratigráficos e estruturais, como Van der Ven (1987), Cainelli (1987) e Koutsoukos *et al.* (1991).

Em alguns estudos regionais, analisaram-se modelos tectônicos na região de águas profundas das bacias do nordeste, principalmente na de Jacuípe (Wanderley Filho e Graddi, 1993) e Sergipe-Alagoas (Pontes *et al.* 1991). Reporta-se, aí, a grande complexidade estrutural e estratigráfica das bacias do interior e da margem continental do nordeste brasileiro, com múltiplas interpretações.

Em trabalhos em que se faz revisão geológica, apontam-se alguns problemas não resolvidos na interligação entre os *rifts* abortados do continente (Recôncavo, Tucano e Jatobá), com as bacias de Jacuípe, Sergipe e Alagoas. Destacam-se os de Ussami *et al.* (1986), Castro Jr. (1987), Milani e Davison (1988), Davison (1988), Chang *et al.* (1992) e Matos (1992).

Foram elaboradas, também, várias dissertações e teses sobre a evolução sedimentar das bacias do interior e da margem continental, geralmente com dados mais restritos à região de águas rasas. Os de Lana (1987), Milani (1987), Castro Jr. (1987) e Guimarães (1988) estão entre os mais importantes. Cainelli (1992) realizou amplo estudo regional, abordando aspectos estratigráficos da Formação Calumbi, em águas profundas das bacias de Sergipe e Alagoas. Chagas *et al.* (1993) apresentaram uma análise estratigráfica e estrutural da seção *rift* das bacias de Sergipe e Alagoas na parte emersa e na plataforma rasa.

Chang *et al.* (1992) discutiram a evolução geológica dos *rifts* abortados dentro do contexto megarregional da formação da margem continental brasileira. Salientaram que as diferentes interpretações de modelos crustais para a região nordeste deveriam ser avaliadas utilizando-se métodos que requerem avanços tecnológicos, incluindo a aquisição e processamento de linhas sísmicas com resolução profunda, além de uma integração com métodos potenciais, o que permitiria a melhor caracterização da arquitetura do *rift* em águas profundas. Comparações com bacias da margem africana e melhor detalhamento geocronológico dos eventos tectônicos são também necessários para a análise da evolução tectono-sedimentar das bacias da margem continental do nordeste brasileiro.

3. ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS E EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR

As seqüências deposicionais na carta estratigráfica das bacias de Sergipe e Alagoas (Feijó, 1994) foram individualizadas com base em discordâncias de caráter regional, definidas a partir de interpretação sísmica ou sugeridas por interrupções de conteúdo bioestratigráfico ou litológico. Embora discordâncias regionais não correspondam a linhas de tempo, pode-se determinar, aproximadamente, o tempo geológico a elas associado, identificando o intervalo de tempo correspondente ao intervalo entre as idades mais nova e mais antiga das camadas sedimentares abaixo e acima da discordância, respectivamente. Segundo esse critério, marcaram-se algumas discordâncias regionais, caracterizadas por ausência de expressiva seção estratigráfica. Dentre estas, destacam-se:

- 1) eoligocena/neo-eocena;
- 2) médio-eocena a eococena;
- 3) eopaleocena/neo-maastrichtiana;
- 4) santoniana-coniaciana/turoniana;
- 5) intra-neocomiana (andares Aratu e Rio da Serra);
- 6) eocretácea/ neo-jurássica;
- 7) permiana/carbonífera;
- 8) carbonífera/cambriana;
- 9) cambriana/pré-cambriana.

Estas discordâncias marcam importantes eventos tectônicos. A seguir, discute-se sua correlação com eventos megaregionais no contexto da evolução da margem continental.

A discordância (9) caracteriza o final de um ciclo orogênico entre o Pré-cambriano Superior e o Paleozóico, marcado por convergência litosférica entre os crátons do São Francisco e Angola-Kasai (Neves *et al.* 1977). Nesse evento, importantes falhamentos de empurrão são registrados nos lados brasileiro e africano, com cavalgamentos com vergência para norte (direção de Alagoas) e para sul (direção da Bahia). Há, também, intrusão de batólitos graníticos sin- a tardi- tectônicos (Neves *et al.* 1977). O registro sedimentar desse ciclo tectônico inclui a Formação Estância, compreendendo rochas siliciclásticas e carbonáticas regionalmente metamorfizadas no Pré-cambriano Superior (Radambrasil, 1983), e originalmente depositadas sobre rochas ígneas e metamórficas envolvidas na orogenia do Brasileiro. Para as bacias de Sergipe e Alagoas, consideram-se as rochas da Formação Estância, como pertencentes ao embasamento econômico, sobre o qual depositaram-se as rochas das formações Batinga, Aracaré, Candeeiro e Bananeiras, que englobam parte dos períodos Paleozóico e Mesozóico.

A discordância (8) marca a passagem de uma subsidência em bacia do tipo *foreland* para uma bacia intracratônica (*interior sag*) com registro de deposição em ambiente glacial, conforme indicado por tilitos e varvitos da Formação Batinga, depositados no Carbonífero Superior (entre 350 e 250 M.a.), sobre uma discordância eocarbonífera (Radambrasil, 1983; Cruz, 1994).

A discordância (7) é associada a um novo período de subsidência em bacia intracratônica, com registro de sedimentação em ambiente desértico, conforme indicado por seixos estriados e nódulos de sílex, estratificações microcruzadas, entre outros (Radambrasil, 1983). A Formação Aracaré, identificada em cerca de 50 poços das bacias de Sergipe e Alagoas, atingindo espessuras máximas da ordem de 200 m (Cruz, 1994), é equivalente à Formação Santa Brígida da Bacia de Tucano, que tem atribuição de idade permiana (Radambrasil, 1983).

A discordância (6) marca o início dos processos de separação entre as placas sul-americana e africana, na latitude das bacias do nordeste brasileiro. Nas bacias do sudeste, essa discordância é marcada por importante magmatismo toleítico, correspondente à efusão de lavas basálticas da Formação Serra Geral e das vulcânicas que constituem o assoalho das bacias de Pelotas, Santos e Campos (Misuzaki *et al.* 1988). A Formação Candeeiros foi depositada em ambiente fluvial, e a Bananeiras, equivalente temporal em ambiente lacustrino, compõe-se de folhelhos, argilitos e siltitos avermelhados, com intercalação de arenitos e carbonatos. Essa seqüência estratigráfica, de idade jurássica superior a cretácea inferior, repousa em discordância angular sobre os estratos paleozóicos e pré-cambrianos, caracterizando um dos mais importantes eventos tectônicos associados à formação dos *rifts* precursores da implantação da margem continental. Acima da Formação Bananeiras, depositam-se arenitos fluviais e eólicos da Formação Serraria, que gradam verticalmente para os clásticos finos da Formação Barra de Itiúba. A Formação Serraria e a parte basal da Formação Barra de Itiúba são também incluídas na seção pré-*rift* das bacias de Sergipe e

Alagoas, embora haja correntes de interpretação que atribuam a essas unidades sedimentares aos primeiros pulsos extensionais da ruptura do Gondwana (A. Aragão, informação verbal, 1994).

A discordância (5), de extrema importância na avaliação exploratória da margem continental, marca notável incremento na taxa de estiramento litosférico, resultando em grandes falhamentos sintéticos nas bacias marginais do nordeste brasileiro – por exemplo, a falha mestre da Bacia de Jacuípe em águas profundas e a Falha de Vaza-Barris, no Baixo de Mosqueiro. Essas falhas, com grande atividade no Neocomiano e Barremiano, mostram-se localmente afetadas por reativações tectônicas que chegam até o Aptiano e Albiano, quebrando blocos de sedimentos anteriormente depositados. Pode-se supor, para as bacias de Sergipe e Alagoas, a ocorrência de duas fases de extensão litosférica gerando uma seqüência *rift* de idade neocomiana/barremiana, e outra mais jovem, de idade aptiana. Reativações locais dessas falhas podem atingir estratos ainda mais jovens (Albiano a Santoniano), como acontece ao longo da Falha de Vaza-Barris no Baixo de Mosqueiro. Os estratos da fase *rift* principal (em particular os de idade neocomiana e barremiana) são incluídos nas formações Barra de Itiúba, Penedo, Rio Pitanga, Morro do Chaves, Coqueiro Seco e Ponta Verde. A recorrência de atividade tectônica até o Aptiano e Albiano contrasta marcadamente com a evolução das bacias do sudeste, que apresentam uma atividade de *rift* predominantemente restrita à seção pré-sal (Dias *et al.* 1987).

Na parte superior da coluna estratigráfica, as cartas das bacias de Sergipe e Alagoas registram, sobrepondo-se aos sedimentos da fase *rift*, a ocorrência de evaporitos, carbonatos e siliciclásticos, do Aptiano (formações Muribeca e Maceió), carbonatos e terrígenos do Albiano (formações Riachuelo e Cotinguiba), e uma seção predominantemente siliciclástica na Formação Calumbi. A passagem dos estratos da fase *rift* para a seção pós-sal pode ser de difícil interpretação e ficar despercebida em linhas sísmicas que atravessam blocos de *rift* separados dos estratos albianos a santonianos por uma cicatriz de evacuação de sal ao longo da discordância da base do sal. Linhas sísmicas de boa qualidade indicam que, embora extremamente sutis e com interpretação alternativa de que sejam associadas a difrações de *canyons* e reflexões múltiplas de outros horizontes (Rabelo, informação verbal, 1994), algumas estruturas presentes em linhas sísmicas, imageadas como pacotes de refletores mergulhantes para o continente, correspondem a blocos de *rift* basculados por falhas sintéticas. Acima desses blocos distinguem-se pacotes com mergulho semelhante, mas provavelmente, constituídos por sedimentos de idade aptiana a albiana, descolados do *rift* por falhas gravitacionais (halocinéticas) que descolam em discordância ou interface caracterizada por cisalhamento basal sintético e antitético (Mohriak, 1995a).

A discordância (4) corresponde a expressivo refletor de ocorrência regional nas bacias de Sergipe e Alagoas (base da Formação Calumbi), geralmente separando estratos aptianos a cenomanianos de estratos santonianos, campanianos e maastrichtianos (Santos, informação verbal, 1993). Essa discordância marca um evento regional importante nas bacias marginais, simultâneo ao magmatismo nas bacias do sudeste, principalmente, na Bacia de Santos (Mohriak *et al.* 1990). Há registro de atividade magmática também na margem continental do nordeste, com magmatismo de ácido a alcalino na Bacia de Pernambuco-Paraíba, com idades em torno de 90 M.a. a 100 M.a. (Radambrasil, 1983). Os estratos de idade aptiana a cenomaniana são marcados por grandes variações de taxa de sedimentação em depocentros locais, provavelmente por estarem afetados por reativação de falhas do *rift* e/ou por tectônica de sal. Os sedimentos acima da discordância da base da Formação Calumbi apresentam movimentação bem menos expressiva. Essa notável discordância também deve apresentar caráter tectônico e marcar um rearranjo de placas no Atlântico Sul (Rabinowitz e LaBreque, 1979; Pereira, 1992).

As discordâncias (3) e (2) marcam importantes eventos regionais nas bacias marginais, destacando-se o notável magmatismo de idade paleocena a eocena nas bacias da margem sudeste, principalmente na região de Cabo Frio (bacias de Campos e Santos, Mohriak *et al.* 1990), e na região de Abrolhos (Cordani e Blazekovic, 1970), na Bacia do Espírito Santo. Esse magmatismo é também coincidente com um notável incremento de aporte sedimentar nas bacias de Campos e Espírito Santo. Em escala megaregional, há também concomitância com um dos mais importantes eventos tectônicos nos Andes, associados à Orogenia Incaica, que resultou em eventos magmáticos e compressionais com máxima atividade no Eoceno (Noble *et al.* 1990).

A discordância (1) marca, nas bacias do nordeste, importante fase de corte de *canyons* – facilmente identificáveis nas seções sísmicas regionais. Nas bacias do sudeste, esse intervalo está associado a um notável incremento na taxa de aporte clástico, possivelmente relacionado ao contínuo soerguimento da Serra do Mar no Terciário Médio a Superior, alimentando a plataforma continental com terrígenos grosseiros (Bacoccoli e Aranha, 1984).

4. FEIÇÕES REGIONAIS DAS BACIAS DE SERGIPE E ALAGOAS

Apresentam-se, aqui, indicações sísmicas de que várias outras discordâncias regionais devem também ser registradas no intervalo de tempo entre o Albiano e o Neocomiano, conforme interpretação com base na integração de dados de poços e sísmica. Discutem-se dois eventos principais: a discordância do Albiano Inferior/Aptiano e a próxima à base do sal, para as quais sugere-se uma associação com fenômenos crustais de soerguimento e erosão de blocos junto à quebra de plataforma e na região de águas profundas. Em alguns trabalhos anteriores, também cogitou-se que essas discordâncias apresentam expressão regional nas bacias de Sergipe e Alagoas (Schaller, 1969; Ojeda e Fujita, 1972; Chang *et al.* 1992; Chagas *et al.* 1993). Na figura 1 (modificada de Ponte *et al.* 1980), são apresentadas duas seções regionais desde o continente até a plataforma continental em Sergipe e Alagoas. Observa-se, no mapa estrutural, que os depocentros sedimentares apresentam diferenças fundamentais entre a porção alagoana – caracterizada por um *rift* estreito e alongado segundo a linha de costa, com reduzida espessura de sedimentos de fase termal – e, na porção sergipana, caracterizada por uma sedimentação mais ampla, controlada por falhas extensionais normais e por uma proporção relativamente maior de sedimentos pós-*rift*.

Na parte inferior da figura 1, apresentam-se seções geológicas esquemáticas ao longo das distintas porções das bacias de Sergipe e Alagoas. Destaca-se que:

- os blocos de *rift* são controlados por grandes falhas sintéticas normais;
- o embasamento aprofunda-se na direção do mar, mas localmente há inversão dessa tendência de mergulho, gerando altos internos nas bacias;
- alguns dos blocos basculados são afetados por uma discordância regional de grande expressão, ativa entre o Neocomiano e o Aptiano, sobre a qual depositaram-se os sedimentos progradantes da fase termal;
- os sedimentos clásticos aptianos aumentam em espessura na direção da região de águas profundas por reativação de falhas da fase *rift*, que localmente controlam também a deposição albiana;
- camadas evaporíticas não são observadas nas porções mais distais das seções. Ressalve-se, entretanto, que ambas as seções são baseadas em dados relativamente antigos, e estão restritas à região plataformal, sem atingir o limite distal dos blocos de *rift*, reduzindo, portanto, o foco de interpretação. Ampliando-se a visualização do sistema de *rifts* para a região de águas profundas, e utilizando-se linhas com maior penetração sísmica, é possível interpretar-se estilos estruturais que contrastam com o que se observa na região da plataforma continental e talude, como será discutido a seguir.

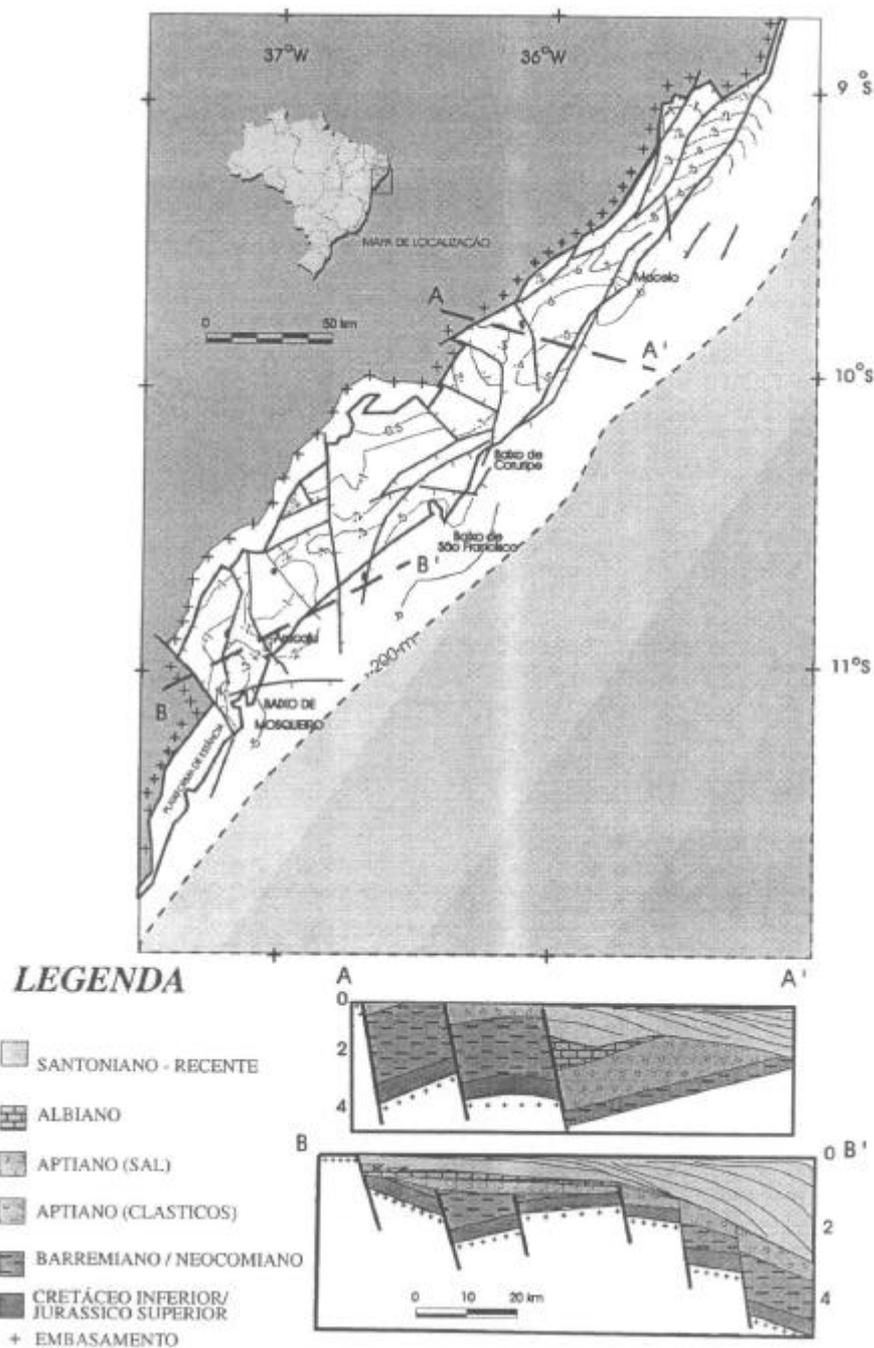


Fig. 1 - Mapas de localização (detalhe) e estrutural ao nível do embasamento, com as principais feições regionais das bacias de Sergipe e Alagoas (modificado de Ponte *et al.* 1980). Na parte inferior, mostram-se seções esquemáticas ao longo das porções alagoana e sergipana da bacia, desde o limite com o Pré-cambriano até a plataforma continental limitada pela batimetria de 200 m.

Fig. 1 - Location map (detailed) and structural map at basement level, with the principal regional features of the Sergipe and Alagoas basins (modified after Ponte *et al.* 1980). In the lower part, diagrammatic sections along the Alagoas and Sergipe sections of the basin are shown, from the Precambrian limit to the continental shelf, using the 200 m hydrographic chart.

Na figura 2a apresenta-se mapa regional de anomalia Bouguer da região Nordeste do Brasil, englobando o sistema de *rifts* continentais (Recôncavo – Tucano - Jatobá) e o sistema de *rifts* da margem continental (Bacia de Sergipe-Alagoas).

Na figura 2b (com base em Falkenhein, 1986, e modificada de Bisol, 1992), apresenta-se mapa regional das bacias de Sergipe e Alagoas, ilustrando as principais feições estruturais (arcabouço definido pelas falhas da fase *rift*) e a localização de algumas linhas sísmicas regionais e alguns compartimentos estruturais, destacando-se o Baixo de Mosqueiro, onde serão discutidos alguns perfis de levantamentos sísmicos que compõem o *transect* na direção *dip* D-1, e a região a nordeste da Falha de Coruripe, com a localização de um trecho de uma linha sísmica *strike*, S-1. Observa-se, nesse mapa, que as grandes falhas da fase *rift*, de direção aproximada N-S, estão associadas a um sistema de falhas de direção aproximada E-W, resultando em vários compartimentos estruturais, particularmente:

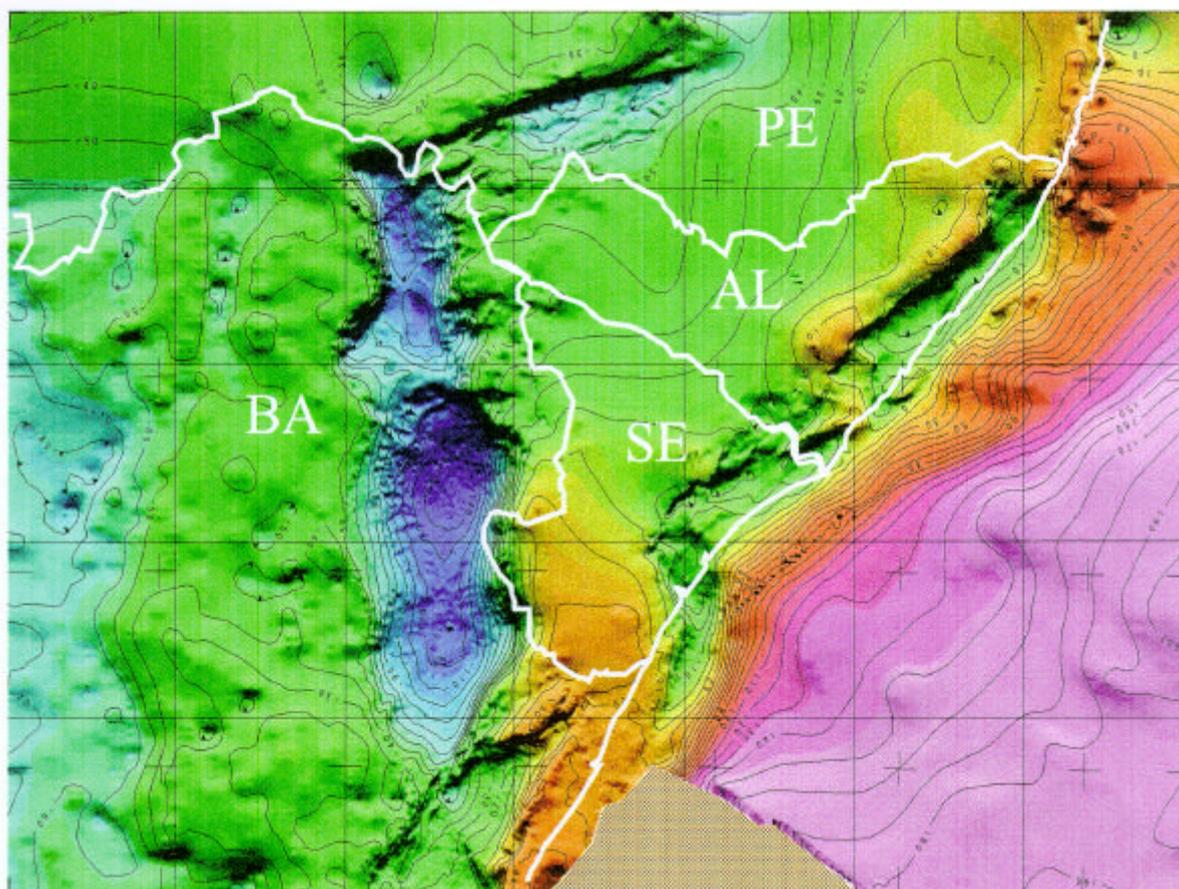


Fig. 2a - Mapa regional de anomalia Bouguer da região nordeste do Brasil.

Fig. 2a - Regional Bouguer anomaly map of the Northeast Brazil.

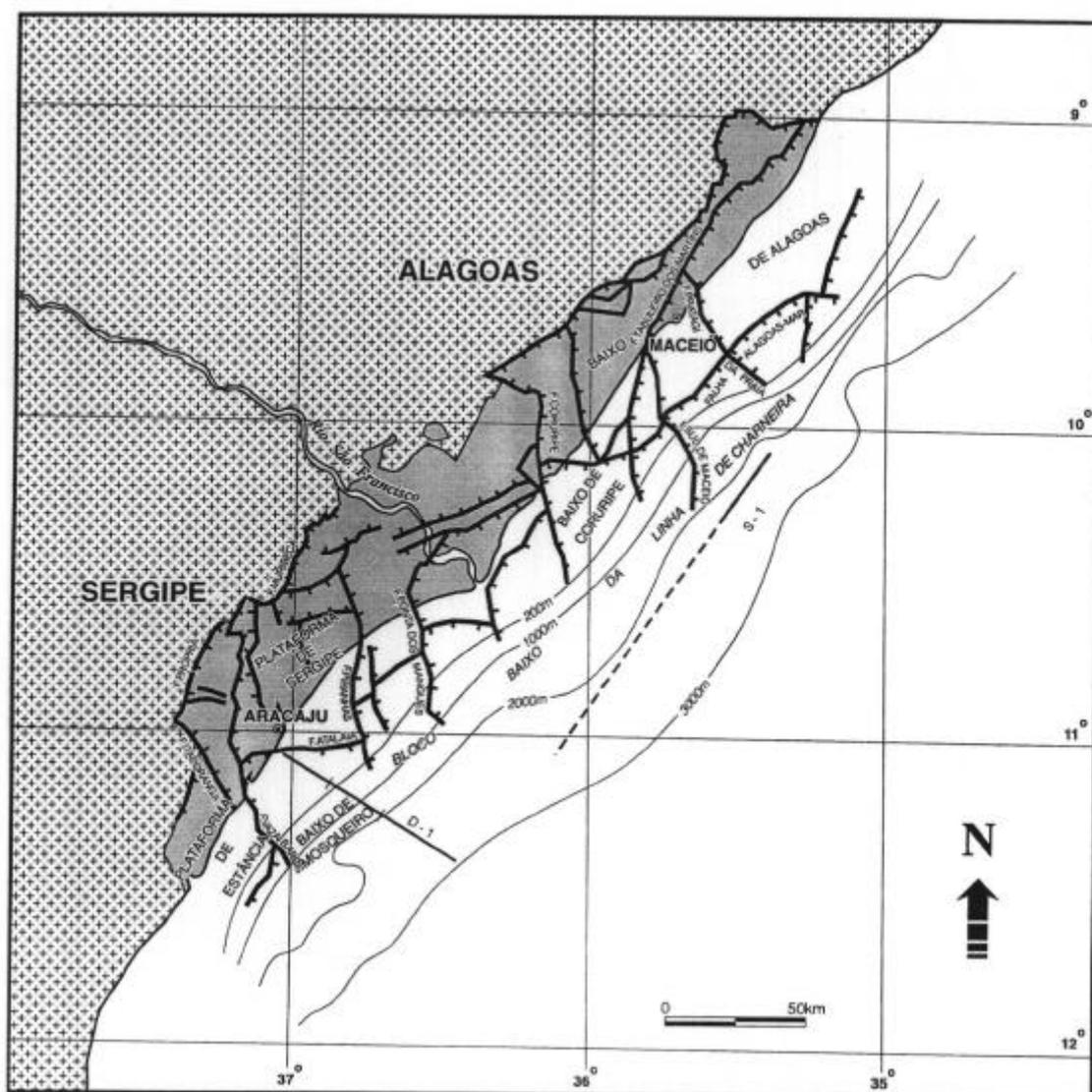


Fig. 2b - Mapa de arcabouço tectônico com grandes feições regionais (compartimentação estrutural dos blocos delimitados por falhas da fase *rift*) das bacias de Sergipe e Alagoas, com localização de perfis sísmicos discutidos no texto. (Modificado de Bisol, 1992).

Fig. 2b - Map of the tectonic framework with large regional features (structural division of the blocks marked out by rift-phase faults) of the Sergipe and Alagoas basins, with the location of the seismic profiles discussed in the text. (Modified after Bisol, 1992).

1. o Baixo de Mosqueiro (a sudeste de Aracaju);
2. o Baixo de São Francisco, a leste da foz do rio São Francisco e da Falha de Ponta dos Mangues;
3. o Baixo de Coruripe, a nordeste da foz do rio São Francisco.

Na figura 3 (modificada de Bisol, 1992), apresenta-se uma visão regional do comportamento do *rift* no Baixo de Mosqueiro, por meio de um *transect* de direção NW-SE (fig. 2), que se estende a partir da plataforma continental e avança na direção da região de águas profundas. Esse *transect* tem como base uma composição de seções sísmicas regionais na plataforma de Sergipe, ilustrando com grande clareza o estilo estrutural de blocos basculados por falhas sintéticas, ativas durante a fase *rift*, resultando em escalonamento sistemático em direção ao mar, e aprofundamento do embasamento na direção do continente. Um segundo estilo estrutural, associado à halocinese, pode ser observado na plataforma rasa, onde há registro de notáveis diápiros de sal e falhas lítricas com descolamento na base dos evaporitos. Observa-se, também, um terceiro estilo estrutural, caracterizado por grandes falhamentos extensionais com descolamento no Cretáceo Superior a Terciário Inferior. Esse estilo é marcado por feições compressoriais (falhas reversas, dobras e anticlinais) resultantes de processos de compensação das falhas geradas por

escorregamentos gravitacionais, que podem ser observadas na direção da região de águas profundas (figs. 2 e 3). Mostram-se dois poços na linha sísmica (fig. 3): o A, que atravessou espessa seção de halita na plataforma continental, e o B, em que se constatou total ausência de evaporitos na região de águas profundas.

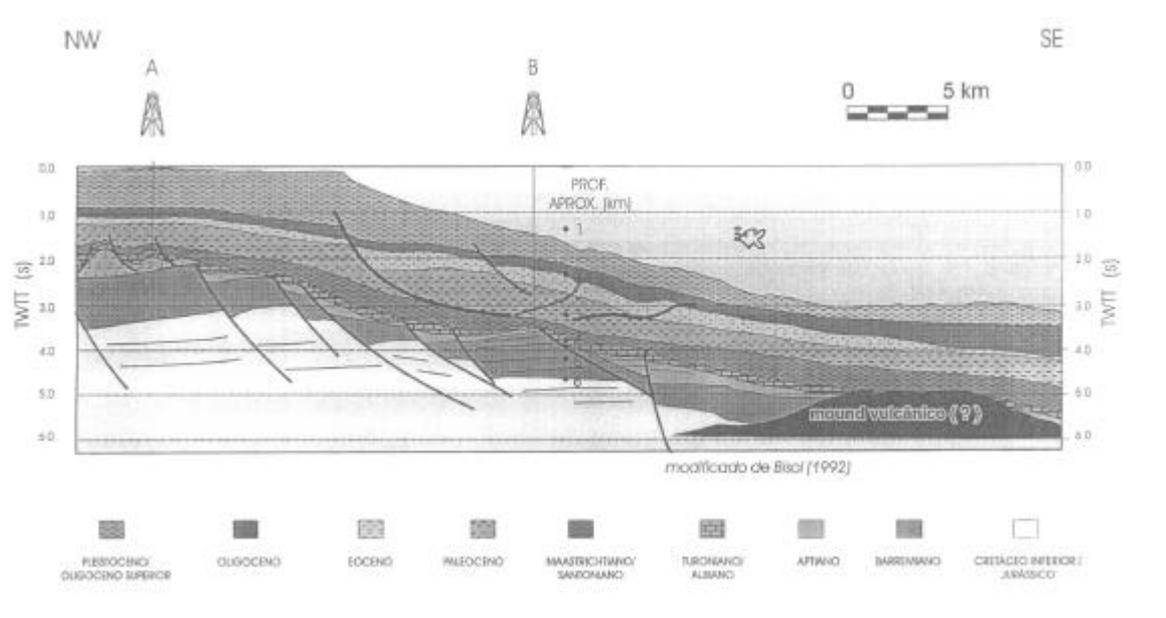


Fig. 3 - *Transect D-1 na direção dip da Bacia de Sergipe-Alagoas, com base em seções sísmicas regionais (ver localização na figura 2) entre a plataforma continental e a porção distal do Baixo de Mosqueiro (modificado de Bisol, 1992). O poço A, na plataforma continental, atravessou espessa seção de halita de idade Alagoas, e o poço B, na direção de águas profundas, registrou ausência de evaporitos entre a seção rift e a discordância da base da Formação Calumbi. Em águas profundas, ocorre uma feição do tipo mound, possivelmente localizada próxima da transição entre as crostas continental e oceânica.*

Fig. 3 - *Transect D-1 in the dip direction of the Sergipe-Alagoas Basin, based on regional seismic sections (see location in figure 2), between the continental shelf and the distal portion of the Baixo de Mosqueiro (modified after Bisol, 1992). Drill hole A, on the continental shelf, crossed a thick section of halite of Alagoas age, and drill hole B, in the deep water direction, recorded an absence of evaporites between the rift section and the unconformity at the base of the Calumbi Formation. In deep water, a mound-type feature occurs, possibly located close to the transition between continental and ocean crusts.*

Na região de águas ainda mais profundas (porção SE da figura 3), ocorrem feições do tipo *mound*, localizadas adjacentes ao provável contato entre as crostas continental e oceânica. Essas feições positivas apresentam ocorrência regional na Bacia de Sergipe, e têm sido interpretadas como rochas vulcânicas e intrusivas ígneas (Pontes *et al.* 1991; Bisol, 1992). Essa possibilidade é bastante plausível, se levados em conta caráter sísmico, relações de contato com as rochas sedimentares encaixantes e analogias com corpos magmáticos intrusivos e extrusivos, que ocorrem na região de águas profundas da margem continental em diversas bacias sedimentares da região leste e nordeste, notadamente ao longo de zonas de fraturas e alinhamentos magnéticos (Bisol, 1992; Pontes *et al.* 1991; Feijó, 1994). Entretanto, feições semelhantes a esses *mounds* ocorrem em águas profundas de outras margens continentais do tipo Atlântico. Possivelmente, são constituídas por rochas sedimentares argilosas, carbonáticas, evaporíticas, e mesmo por bancos recifais (Poag, 1982; Keen e Potter, 1995).

A distinção entre intrusões ígneas e feições estruturais, relacionadas a sedimentos diapirizados, requer estudos de análise tectônica integrados a ferramentas geofísicas. Em várias bacias, a ocorrência de intrusivas ígneas é normalmente associada à forte resposta de anomalia magnética e gravimétrica, como, por exemplo, na região do *Great Stone Dome*, na costa leste americana (Sheridan, 1975), cuja anomalia magnética e gravimétrica, associada à intrusão ígnea, foi confirmada por perfuração realizada por companhias de petróleo.

Feições intrusivas de composição ígnea também ocorrem na margem continental do nordeste do Brasil, com assinatura sísmica, característica aliada à anomalia gravimétrica e magnética. Na figura 4, mostra-se uma linha sísmica regional na Bacia de Sergipe-Alagoas, ao norte do *transect D-1*, mostrado na figura 2. Observa-se, nessa linha, uma feição

diapírica próxima à extremidade SE. A integração de diversas ferramentas, incluindo sísmica profunda, gravimetria e magnetometria, claramente identifica essa feição como um *plug* vulcânico cuja raiz atravessa a crosta inferior e penetra no manto superior (Mohriak e Rabelo, 1994). Entretanto, conforme se discute a seguir, são possíveis outras alternativas para as feições diapíricas que, embora assemelhando-se a cones vulcânicos, apresentam notáveis características geofísicas distintas das observadas em feições do tipo ilustrado na figura 4, e que podem estar associadas à tectônica gravitacional e/ou halocinese (Mohriak, 1995b). Desde o início da tectônica de sal, é notória a dificuldade de diferenciação entre corpos vulcânicos e almofadas/diápiros de sal (De Golyer, 1925). Em várias bacias sedimentares, diápiros de sal perfurantes podem resultar em feições notavelmente semelhantes a rochas ígneas intrusivas. Mas, na realidade, muitas dessas feições diapíricas podem eventualmente corresponder a estruturas formadas em províncias halocinéticas do talude continental, conforme observado em outras margens passivas, como as do Canadá e Estados Unidos (Mohriak, 1995a).

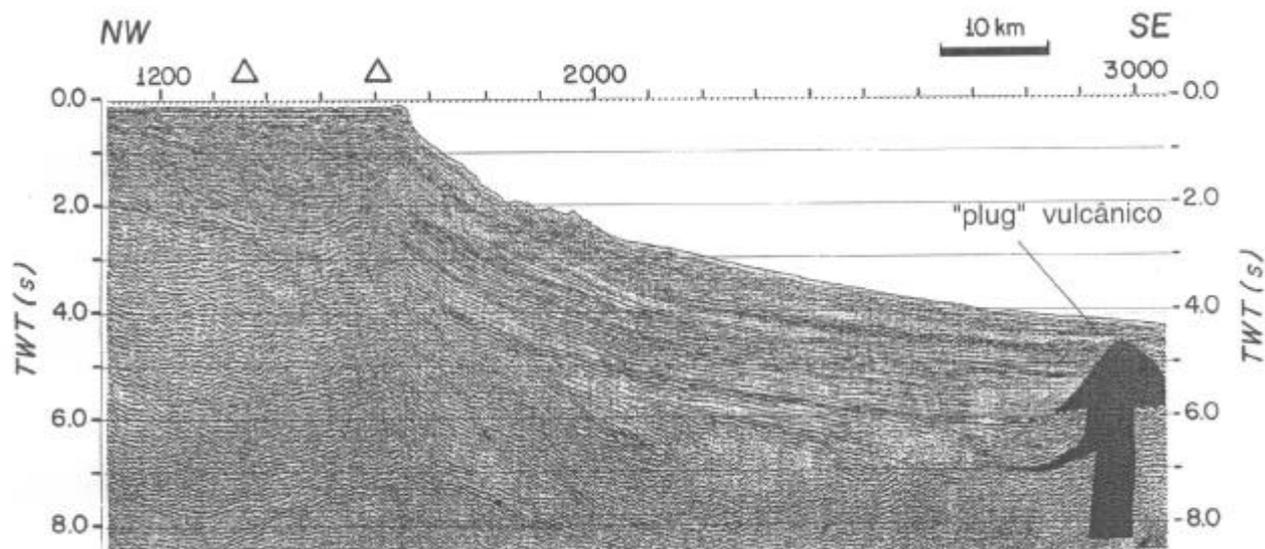


Fig. 4 - Linha sísmica regional profunda na região de Sergipe-Alagoas, paralela ao perfil D-1 (fig. 2), mostrando a ocorrência de *plug* vulcânico no alinhamento com a zona de fratura de Sergipe. (Modificado de Pontes *et al.* 1991).

Fig. 4 - Regional deep seismic line in the Sergipe-Alagoas region, parallel to profile D-1 (fig. 2), showing the occurrence of a volcanic plug on the alignment with the Sergipe fracture zone. (Modified after Pontes *et al.* 1991).

A composição de seções sísmicas na porção das bacias de Sergipe e Alagoas (fig. 3) ilustra com bastante clareza feições de rotação de blocos de *rift* após a deposição do sal, além da notável erosão (tardia ou pós-cinemática em relação à deposição das seqüências albo-cenomanianas), que resultou no dissecamento de parte da seqüência superior da fase *rift* e da seção albiana a turoniana sotoposta à discordância da base da Formação Calumbi. Embora haja questionamentos quanto ao modelo de soerguimento e erosão da seção pós-sal (Oliveira, comunicação verbal, 1993), esse fenômeno, provavelmente posterior à formação de crosta oceânica, foi sugerido em vários trabalhos anteriores (Ojeda e Fugita, 1972; Ojeda, 1982) e, aparentemente, é similar às feições tectônicas observadas no Mar do Norte (Stewart e Coward, 1995). Ressalta-se, entretanto, que tais eventos não apresentam qualquer analogia em ordem de magnitude com os eventos tectônicos pós-*rift* que ocorrem nas bacias do sudeste (Campos e Santos, principalmente). Atribui-se esse soerguimento e erosão na região de águas profundas das bacias de Sergipe e Alagoas a uma atividade tectônica pós-aptiana, relacionada a causas profundas na crosta, e localmente concomitante à reativação de grandes falhas (ex. Falha de Vaza-Barris). Este soerguimento teria resultado em notável perda da seção estratigráfica depositada entre a fase inicial do *rift* (Neocomiano/Barremiano) e a fase final do segundo estágio de *rift*, que inclui a seção transicional aptiana e a base da seção marinha carbonática de idade albiana inferior.

A ocorrência de importantes discordâncias afetando a seqüência *rift*, não registradas na carta estratigráfica de Feijó (1994), mas presentes em outras colunas (Chagas *et al.* 1993), pode resultar em notável redução de espessura da seção sedimentar de idade pré-aptiana, particularmente, na região de águas profundas (Mohriak e Rabelo, 1994). A

interpretação de blocos de *rift* erodidos é fundamental para avaliar a evolução tectono-sedimentar da margem nordeste do Brasil, com implicações também para a margem conjugada africana (Mohriak *et al.* 1995b).

A visualização de feições de *rift* em região de águas profundas nas bacias de Sergipe e Alagoas fica bastante prejudicada em linhas registradas até 5 ou 6 s TWT devido à reduzida penetração do sinal sísmico, que perde resolução ainda na seção sedimentar de fase termal (Mohriak *et al.* 1993). É possível otimizar a interpretação da arquitetura crustal da bacia utilizando, simultaneamente, linhas de resolução profunda e outras ferramentas exploratórias, incluindo os dados potenciais. A compatibilização dos dados obtidos por diferentes métodos geofísicos com modelos conceituais que possam ser comparados aos análogos de outras bacias permite uma seleção mais adequada de hipóteses de trabalho durante os procedimentos de análise de bacia.

Nas bacias de Sergipe e Alagoas, podem-se considerar duas hipóteses principais para a extensão do *rift* na direção de águas profundas:

1. embasamento profundo (em torno de 8 a 9 s) em tempo duplo (Pontes *et al.* 1991), com aumento de espessura dos sedimentos pré-evaporíticos em direção a águas profundas;
2. embasamento ascendente em direção à águas profundas, com grande redução de espessura de sedimentos pré-sal, e com os blocos de *rift* controlados por falhas que descolam em refletor profundo, próximo à base da crosta (Mohriak e Rabelo, 1994; Mohriak *et al.* 1995b). A segunda interpretação implica na rotação no sentido anti-horário dos blocos de *rift* e subida do embasamento na direção do talude e da região de águas profundas, com grande erosão da parte distal do *hanging-wall* das grandes falhas sintéticas, à semelhança do que se tem observado em várias bacias sedimentares onde há levantamentos de sísmica profunda, como na margem da Ibéria, Mar do Norte, costa leste do Canadá (Mohriak e Rabelo, 1994; Mohriak *et al.* 1995b).

De acordo com essa segunda linha de interpretação, o embasamento pré-cambriano, os estratos pré-*rift* e a seqüência estratigráfica associada à fase *rift* não se estenderiam indefinidamente até a região de acreção de crosta oceânica caracterizada pela paleocadeia meso-atlântica. Aparentemente, o segmento da margem continental da região nordeste brasileira é delimitado, na área de transição entre crosta continental estirada e crosta oceânica de idade mais antiga, por uma cunha de refletores mergulhantes na direção do oceano. Propõe-se, para essa seqüência, – anteriormente interpretada como sedimentos da fase *rift* (Pontes *et al.* 1991) –, uma associação com rochas vulcano-sedimentares do tipo *seaward-dipping reflectors* ou SDR (Hinz, 1981), caracterizando margem vulcânica na transição para crosta oceânica (Mohriak e Rabelo, 1994; Mohriak *et al.* 1995b).

Deve-se ressaltar, entretanto, que algumas linhas sísmicas mostram feições que poderiam sugerir prolongamento de rochas sedimentares da fase *rift* até os *plugs* vulcânicos em águas profundas (Santos, informação verbal, 1994). Efetivamente, há várias feições sísmicas de geometria semelhantes aos sedimentos depositados durante episódios de progradação deltaica, bem como a blocos de *rift* controlados por falhas antitéticas (Chagas, informação verbal, 1993). Na região de águas profundas da fronteira entre as bacias de Jacuípe e Sergipe, alguns dados de métodos potenciais (em particular, o mapa de sinal analítico, como será discutido mais adiante) parecem indicar espessamento da seção sedimentar sotoposta à discordância da base da Formação Calumbi, evidenciado por pronunciado aprofundamento das fontes magnéticas nas regiões a nordeste e sudeste do prolongamento da Zona de Fratura de Sergipe (Gomes, informação verbal, 1994).

Várias evidências apontam para maior consistência na interpretação de que essas cunhas, imageadas em seções sísmicas como um feixe de refletores divergentes mergulhantes em direção ao mar, são formadas por extravasamento de material vulcânico durante a implantação de crosta oceânica (Mohriak e Rabelo, 1994; Mohriak *et al.* 1995b), à semelhança de feições análogas em várias bacias de margem passiva (Hinz, 1981; Mutter *et al.* 1982; Keen e Potter, 1995), que têm sido sistematicamente interpretadas como cunhas vulcânicas associadas ao modelo de *seaward-dipping reflectors* – SDR. Essa interpretação também pode ser estendida a outros segmentos da margem continental brasileira, onde feições análogas apresentam interpretações alternativas radicalmente diferentes (Mohriak *et al.* 1995a).

5. TECTÔNICA DE SAL

Nas cartas estratigráficas das bacias marginais do leste e sudeste brasileiro (volume 8 do Boletim de Geociências), indica-se a presença de evaporitos (principalmente halita e anidrita) na região da Bacia de Alagoas até a Bacia de

Santos, à exceção da Bacia de Jacuípe. As cartas sugerem halocinese em todas as bacias ao sul de Camamu, por representação gráfica universalmente aceita de uma coluna diapírica, com raiz nas camadas autóctones, e estendendo-se até as camadas mais jovens, afetadas estratigráfica e estruturalmente por tectônica de sal. De acordo com esta representação, nas regiões de águas profundas a halocinese é importante como tectônica modificadora da evolução tectono-sedimentar das camadas pós-aptianas. A formação de almofadas e diápiros de sal implica em falta de seção estratigráfica na coluna sedimentar, sendo mesmo possível, em algumas situações, a total ausência de estratos de idade albiã a terciária, como se verifica em poços perfurados junto a diápiros de sal nas bacias de Santos, Campos e Espírito Santo.

A não-representação desse tipo de feição nas bacias de Sergipe e Alagoas vincula-se à interpretação de ausência de quaisquer feições relacionáveis à tectônica de sal em águas profundas (C. Cainelli, informação verbal, 1993).

Efetivamente, as estruturas halocinéticas clássicas como as observadas na plataforma continental das bacias de Campos e Santos (que ocorrem principalmente em bacias de margem passiva com camadas de sal pouco afetadas por tectonismo pós-sal), assim como a típica província de domos de sal em águas profundas, praticamente não estão presentes nas bacias da margem nordeste.

A sedimentação nas bacias de Sergipe e Alagoas foi grandemente influenciada por controle tectônico bastante diverso do que se observa nas bacias do sudeste. Na Bacia de Jacuípe, a ruptura da crosta continental foi extremamente assimétrica, com a maior parte do *rift* original e da seção evaporítica aptiana sendo carregada para o lado africano durante a separação dos continentes (Szatmari, informação verbal, 1993). Nas bacias de Sergipe e Alagoas, além de a quantidade original de sal estar restrita à região de plataforma e ser possivelmente inferior às das bacias do sudeste (Santos, informação verbal, 1994), há evidências de grandes reativações pós-aptianas erodindo e mobilizando a camada evaporítica remanescente, que deve ter sofrido modificações substanciais alterando estruturas originais e sua assinatura sísmica (Mohriak, 1995a).

O modelo conceitual mais aceito para a acumulação de evaporitos em águas rasas nas bacias de Sergipe e Alagoas advoga fluxo de água salgada proveniente de um mar aberto -(posicionado mais a leste) para lagunas restritas localizadas na região mais continental, onde a evaporação resultou na deposição de camadas de sal e anidrita contemporaneamente à deposição de rocha siliclástica em direção ao golfo (Barros, informação verbal, 1993). Essa variação de fácies deposicional, de evaporitos para areias e folhelhos mais distais está representada nas colunas estratigráficas das bacias de Sergipe e Alagoas (Feijó, 1994). Os evaporitos aparecem isolados dentro de um sistema siliclástico. Esse tipo de ambiente sedimentar corresponde a um modelo de *sabkha* que ocorre em diversos níveis estratigráficos em várias bacias sedimentares no mundo todo (Eoceno da Bacia de Sirte na Líbia, Palagi, informação verbal, 1994), e corresponde a um modelo clássico de deposição de ciclos de sais solúveis em ambientes evaporíticos (Hite, 1970). Como se pretende relatar a seguir, esse modelo, desenvolvido antes da grande evolução dos conceitos de tectônica de sal nos anos 80 e 90, não é diretamente adaptável às províncias evaporíticas de margem continental do tipo Atlântico.

Na figura 5, vê-se o modelo clássico de deposição evaporítica em lagunas proximais, de ocorrência restrita a uma faixa costeira, adjacente a um mar aberto (Hite, 1970). O influxo de água salina, proveniente de um golfo marinho, resulta em evaporação e acumulação de uma série de sais dentro de uma seqüência evaporítica padrão (Hite, 1970; Carvalho, 1987). Para as bacias de Sergipe e Alagoas, entretanto, há indicações de que esse modelo pode não ser o mais aplicável – salvo para os evaporitos da fase Paripueira (Ojeda, informação verbal, 1995), pois, há evidências sísmicas de ocorrência de tectônica de sal em águas profundas, atingindo até regiões próximas do limite crustal (Mohriak, 1995b).

Há pesquisadores que atribuem possíveis feições halocinéticas em águas profundas a blocos de *rift* basculados, escorregados e perfurados por intrusivas ígneas (Santos, informação verbal, 1994), a intrusões e extrusões vulcânicas, e mesmo a difrações causadas por *canyons* pretéritos e recentes (Rabelo, informação verbal, 1993). Em várias bacias sedimentares (particularmente no Golfo do México), a interpretação de bloco de embasamento ou bloco de *rift* basculado tem sido proposta (e confirmada por poços do *Deep Sea Drilling Project*) para feições bastante semelhantes a diápiros (Weimer, informação verbal, 1995).

Por outro lado, comprovou-se a ocorrência de tectônica de sal na região de plataforma das bacias de Sergipe e Alagoas, dado que vários poços perfuraram camadas de evaporitos que atingem espessuras de dezenas até centenas

de metros (poço A no Baixo de Mosqueiro, fig. 3). A compatibilização da ocorrência de sal na plataforma com a ausência de evaporitos nos poços de águas profundas (poço B, fig. 3) pode ser explicada por argumentos tectônicos e não puramente estratigráficos, o que implicaria:

1. deposição de evaporitos em regiões atualmente sob batimetrias muito elevadas;
2. que camadas evaporíticas originalmente depositadas em determinadas regiões foram posteriormente mobilizadas ou erodidas.

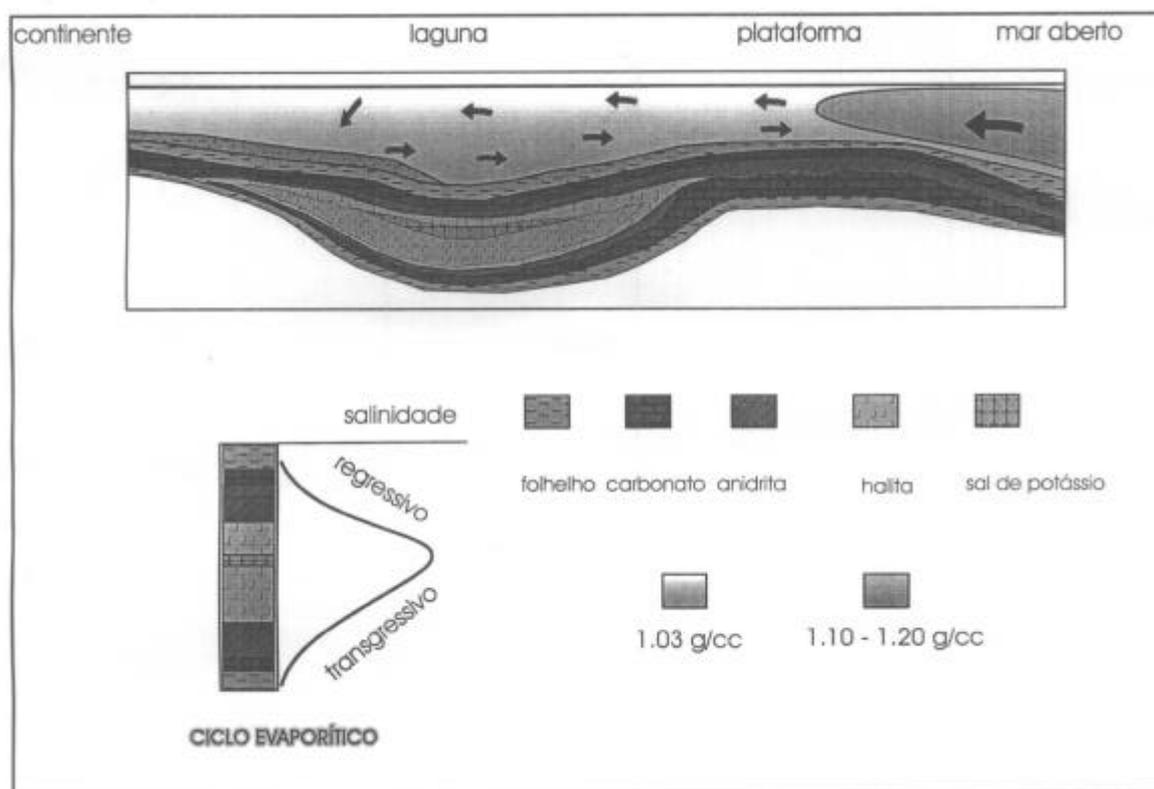


Fig. 5 - Modelo esquemático de deposição evaporítica. (Modificado de Hite, 1970 e Carvalho, 1987).

Fig. 5 - Diagrammatic model of the evaporite deposit. (Modified after Hite, 1970 and Carvalho, 1987).

A seguir, demonstram-se evidências de halocinese e erosão pós-sal em vários compartimentos das bacias de Sergipe e Alagoas, que deverão ser registradas nas cartas estratigráficas.

Ao se observar a figura 6 (modificada de Bisol, 1992), nota-se claramente a ocorrência de notável discordância na base do sal, erodindo os estratos superiores da seqüência *rift* na direção da bacia.

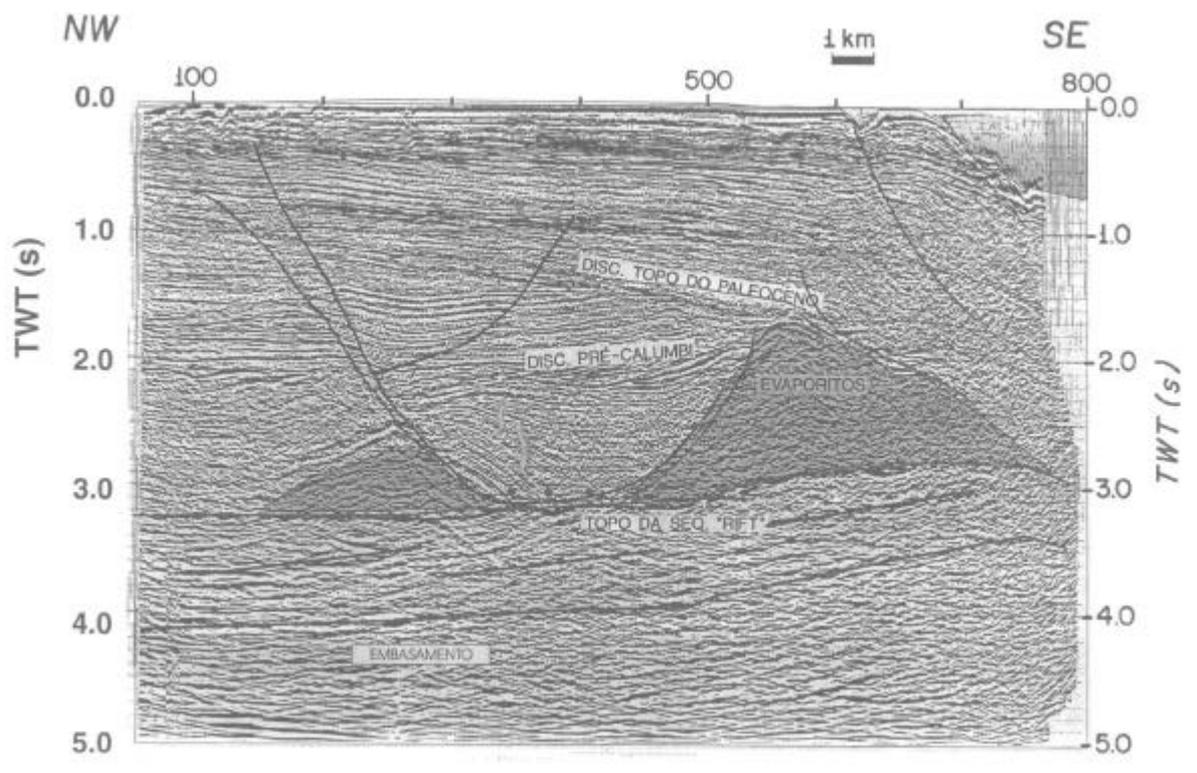


Fig. 6 - Linha sísmica nas bacias de Sergipe e Alagoas (região do Baixo de Mosqueiro), mostrando discordâncias na base do sal, junto à base da Formação Calumbi, e próximo ao topo do Paleoceno. (Modificado de Bisol, 1992).

Fig. 6 - Seismic line in Sergipe and Alagoas basins (Baixo do Mosqueiro region), showing unconformities at the base of the salt, near the base of the Calumbi Formation, and close to the top of the Paleocene. (Modified after Bisol, 1992).

Nota-se, também, a ocorrência de grandes discordâncias angulares na base da Formação Calumbi (Santoniano/Turoniano), e próximas ao topo do Paleoceno. A seção mostra a grande importância da tectônica de sal na caracterização das seqüências estratigráficas: um poço perfurado no PT 550 atravessaria a seção eocena e penetraria quase diretamente nos evaporitos aptianos. Entre os PTs 300 e 500, também deve haver falta de seção estratigráfica devido ao descolamento de camadas por fluxo e fuga de sal por cisalhamento basal antitético. Isto resulta em cicatriz ao longo do plano de falha entre os dois diápiros, à semelhança de feições na região de Cabo Frio, entre as bacias de Campos e Santos, e também no Golfo do México (Mohriak, 1994; Mohriak, 1995b). A caracterização desse tipo de halocinese deve ser registrada na coluna estratigráfica das bacias de Sergipe e Alagoas, com a representação de um diápiro atingindo até o Terciário, à semelhança de outras bacias marginais da margem leste brasileira.

Outro fato notável nas bacias de Sergipe e Alagoas é o grande basculamento da base do sal na direção do continente, com rotação de blocos no sentido anti-horário devido à atuação de grandes falhas sintéticas que afetam o embasamento. Na figura 7, ilustra-se esse controle pela Falha de Vaza-Barris, no Baixo de Mosqueiro. Seu depocentro é caracterizado por peculiar halocinese, relacionada, aparentemente, a uma sobrecarga sedimentar que expulsou os evaporitos dos pontos mais profundos dos *grabens*, à semelhança do que ocorre em situações análogas no Mar do Norte (Jackson, informação verbal, 1995).

Esta reativação tectônica por falhas que envolvem o embasamento resultou em acentuada rotação conjunta dos blocos de *rift* e da base do sal no sentido anti-horário (fig. 3). Esse fator pode, eventualmente, controlar a ocorrência de tectônica de sal nas porções mais proximais das bacias, formando diápiros em faixa restrita à região de plataforma (Lana, informação verbal, 1993).

Entretanto, a possível ocorrência de evaporitos próximo do limite de crosta (Mohriak, 1995a) poderia sugerir deposição de sal, estendendo-se desde a plataforma até a região de águas profundas, com a presença de um alto regional junto à quebra de plataforma, formado após a deposição dos evaporitos de idade aptiana. A ausência de sal nos poços perfurados na região de águas profundas (em particular o poço B, fig. 3), teria uma causa tectônica e não estratigráfica.

Há várias objeções à hipótese de tectônica de sal em águas profundas nas bacias de Sergipe e Alagoas. Destacam-se as principais:

- os evaporitos são relativamente "bem-comportados" em águas rasas, sem estruturas complexas mesmo em situações em que grande espessura de sal foi constatada;
- nos poços perfurados em águas profundas que atravessaram a seção pré-albiana, não foi constatada presença de evaporitos acima da seção *rift*;
- possíveis evidências de feições halocinéticas estão geralmente associadas a cortes de *canyons* atuais e pretéritos, resultando em difrações sísmicas, que se propagam como hipérbolos que podem apresentar grande semelhança com falhas lítricas;
- a maior parte dos possíveis diápiros em águas profundas está especialmente relacionada a zonas de fraturas e atividade vulcânica;
- algumas anomalias gravimétricas e magnéticas, posicionadas nas adjacências de alguns dos supostos domos de sal, são mais sugestivas de rochas ígneas;
- regionalmente, essas feições parecem ocorrer junto à zona de transição entre crosta continental e crosta oceânica;
- problema de espaço físico necessário para gerar diápiros de sal, uma vez que grande parte dos blocos de *rift* estão substancialmente erodidos em águas profundas por uma discordância de idade pós-sal.

À semelhança da figura 3, na figura 7 mostra-se o basculamento da base do sal na direção do continente e a aparente ausência de diapirismo além da quebra de plataforma. Entretanto, com base em novos dados de sísmica com resolução profunda nas bacias do nordeste brasileiro (Mohriak *et al.* 1993; Mohriak, 1995a), é possível supor que, embora haja notável coincidência com zonas de fraturas e alinhamentos magnéticos e gravimétricos, algumas feições em águas profundas das bacias de Sergipe e Alagoas poderiam estar associadas não apenas a *plugs* vulcânicos, mas também a diápiros de sal (Mohriak, 1995b). Esta suposição, se comprovada por perfuração, caracterizaria a ocorrência de evaporitos até o limite com as cunhas de *seaward-dipping reflectors*, e implicaria numa mudança radical de modelos estratigráficos utilizados na interpretação da evolução tectono-sedimentar das bacias da margem nordeste brasileira, com importantes implicações também para as bacias da margem africana. A coincidência entre feições diapíricas e arcos de anomalias magnéticas juntas ao limite crustal também tem sido constatada em diversas outras bacias de margem continental, particularmente no Canadá (Keen, informação verbal, 1995).

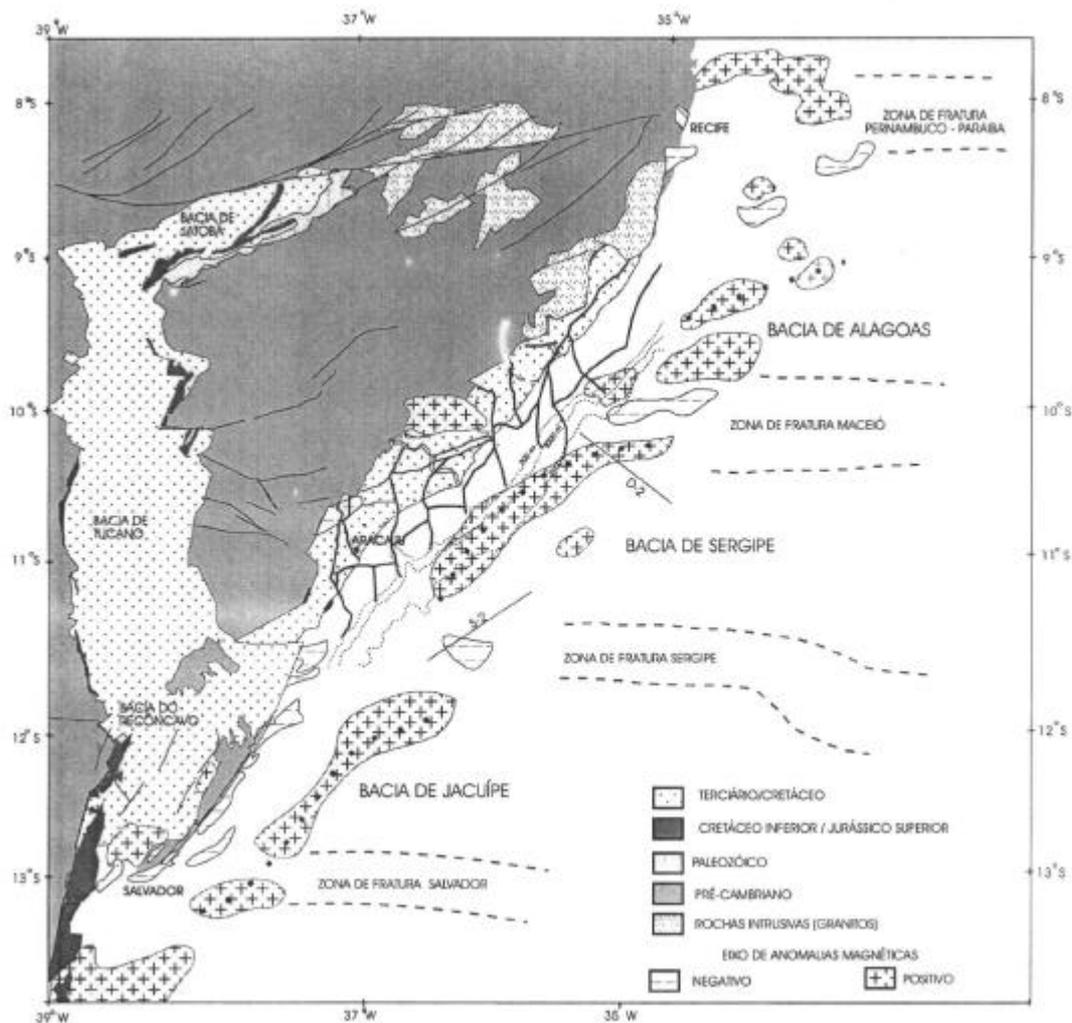


Fig. 8 - Mapa tectônico simplificado da região nordeste, mostrando *trends* de anomalia magnética positiva na região de águas profundas e zonas de fraturas (modificados de Ojeda e Fujita, 1972; Ponte *et al.* 1980; Moraes e Liandrat, 1987). A linha profunda S-2 localiza-se no prolongamento da zona de fratura de Sergipe, e a D-2 ao sul da zona de fratura de Maceió.

Fig. 8 - Simplified tectonic map of the northeastern region, showing positive magnetic anomaly trends in the deep-water areas and fracture zones (modified after Ojeda and Fujita, 1972; Ponte *et al.* 1980; Moraes and Liandrat, 1987). The deep seismic line S-2 is located along the prolongation of the Sergipe fracture zone, and the deep seismic line D-2 is located to the south of the Maceió fracture zone.

Entretanto, com a análise dos dados sísmicos, é possível supor que essa anomalia tenha origem relacionada a fenômenos mais profundos (Mohriak e Rabelo, 1994), marcando a transição de crosta continental para uma região com ocorrência de *seaward-dipping reflectors* adjacente à crosta oceânica, à semelhança das interpretações mais recentes para a anomalia magnética da costa leste dos Estados Unidos e Canadá (Keen e Potter, 1995), com vários exemplos análogos em outras bacias de margens continentais passivas (margem da Groenlândia, Larsen e Jakobsdóttir, 1988).

Na figura 9, mostra-se o mapa de sinal analítico (derivado do mapa de campo magnético total) da região nordeste brasileira, englobando parte da plataforma continental, desde a Bacia de Jacuípe, ao sul, até as bacias de Sergipe e Alagoas, mais ao norte.

Observa-se, nesse mapa, a ocorrência de várias anomalias positivas (sombreado escuro) que, em escala regional, se alinham por um eixo de direção E-W. Esta direção corresponde ao prolongamento das zonas de fraturas oceânicas

(notadamente as zonas de fraturas de Sergipe e Maceió), e regiões com suaves variações do campo magnético, que correspondem a depocentros sedimentares. Podem-se destacar, nas figuras 8 e 9, as zonas de fratura de Sergipe e Maceió, cujo prolongamento, a oeste (na direção da plataforma continental), é atravessado por algumas linhas sísmicas de resolução profunda que caracterizam notáveis edifícios vulcânicos (Pontes *et al.* 1991; Mohriak e Rabelo, 1994).

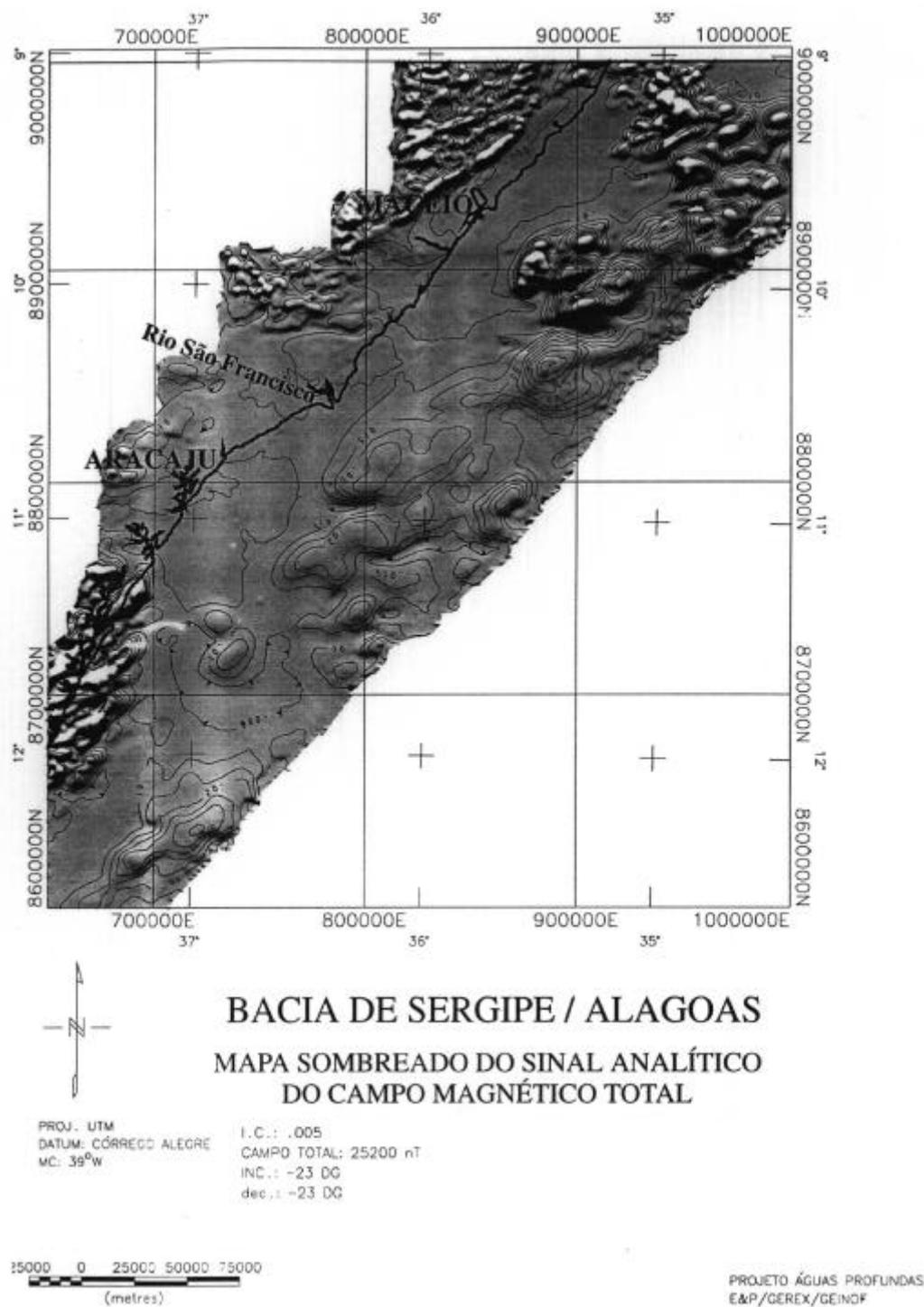


Fig. 9 - Mapa de sinal analítico da região nordeste brasileira, abrangendo a região de águas profundas das bacias de Jacuípe, Sergipe e Alagoas.

Fig. 9 - Analytic signal map of the northeastern region of Brazil, covering the deep-water area of the Jacuípe, Sergipe and Alagoas basins.

Além da caracterização das estruturas vulcânicas associadas às zonas de fraturas (Pontes *et al.* 1991; Bisol, 1992), a integração dos estudos geológicos na região de águas profundas evidenciou feição bastante peculiar a leste do rio Real. Essa feição apresenta características gravimétricas e magnetométricas sugestivas de vulcanismo, mas pode-se

associar o baixo adjacente ao Alto do Rio Real a uma espessa seção de estratos sedimentares originalmente depositados subhorizontalmente, atualmente rotacionados e provavelmente acavalados por falhas de empurrão (Mohriak, 1995b). Essas feições têm sido objeto de algumas interpretações alternativas, notadamente por possíveis associações com blocos de *rift* basculados (Cainelli, 1992), recifes, *horsts*, escorregamentos de blocos de sedimentos da fase *rift* devido a intrusivas vulcânicas (Santos, informação verbal, 1994), e sedimentos vulcanoclásticos provenientes do cone vulcânico adjacente (Rabelo, informação verbal, 1993). Entretanto, devido a analogias com algumas feições do Golfo do México, essas feições podem também corresponder a sedimentos pós-aptianos envolvidos em zonas dobradas por tectônica gravitacional (Mohriak, 1995b).

Várias estruturas positivas do tipo *mound* observadas nas linhas sísmicas da região de águas profundas das bacias de Sergipe e Alagoas têm sido objeto de estudos tectônicos recentes, integrando métodos gravimétricos, magnéticos, sísmicos e estruturais (Mohriak e Rabelo, 1994; Mohriak, 1995a; Mohriak, 1995b). Sugere-se que os dois membros extremos da interpretação dessas feições correspondam a diápiros de sal e a *plugs* vulcânicos, cuja associação geométrica e genética tem sido motivo de discussões conceituais desde os primeiros estudos de tectônica de sal (De Golyer, 1925). A seguir, discutem-se essas interpretações alternativas para algumas feições das bacias de Sergipe e Alagoas, utilizando-se perfis sísmicos regionais com resolução profunda, além de correlações e analogias com outras bacias sedimentares da margem brasileira.

Na figura 10, encontra-se trecho de linha sísmica *strike*, localizada na região sul da Bacia de Sergipe (fig. 7). A seção mostra uma feição positiva, em forma de *mound* ou *plug*, caracterizada por *onlap* dos sedimentos depositados durante a fase termal de subsidência. Na figura 11, representa-se um trecho de linha sísmica profunda na região a nordeste do ixo de Coruripe (fig. 7), e mostra-se também uma feição positiva assemelhando-se a um *plug*, caracterizado por *onlap* sedimentar e por indicações de soerguimento de camadas anteriormente depositadas.

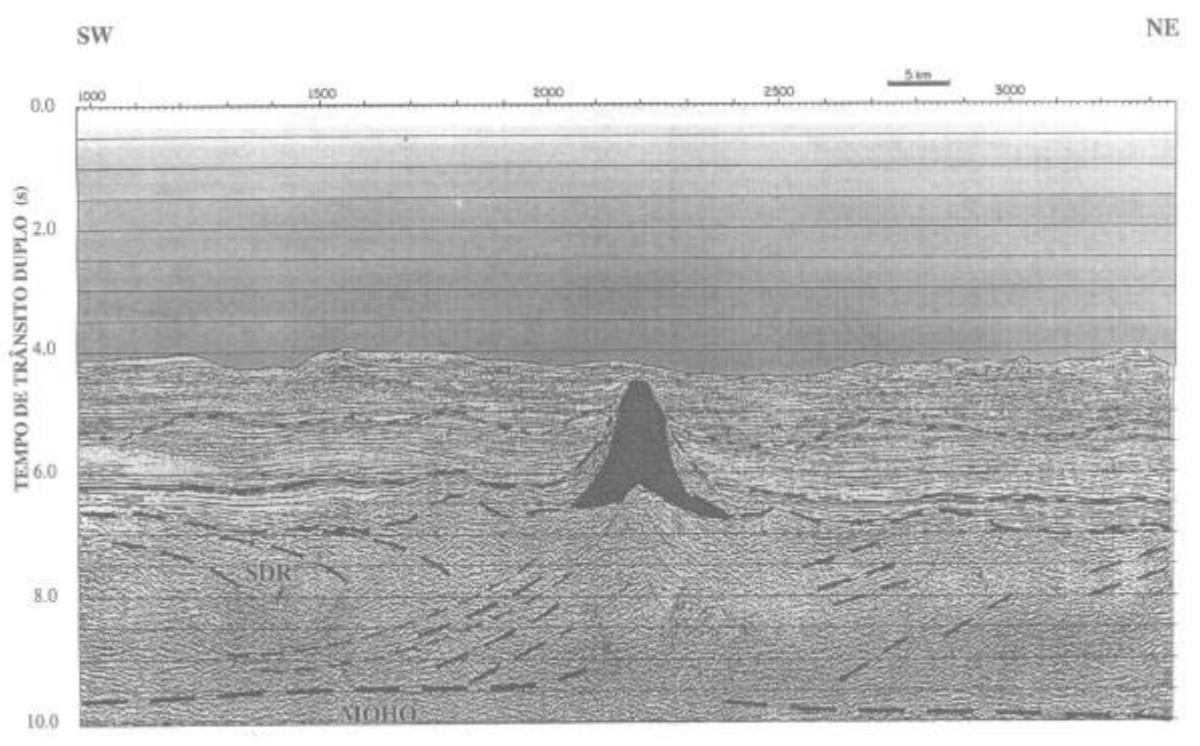


Fig. 10 - Linha sísmica S-2 nas bacias de Sergipe e Alagoas mostrando *plug* vulcânico ao longo de zona de fratura, com rompimento do Moho.

Fig. 10 - Seismic line S-2 in Sergipe and Alagoas basins showing the volcanic plug along the fracture zone, with Moho rupture.

Sugere-se que a distinção fundamental entre as duas feições possa ser analisada pela investigação da arquitetura crustal profunda: em algumas linhas, é possível visualizar-se uma ruptura do Moho sísmico abaixo de *plugs* vulcânicos associados a zonas de fratura (ex. linha *strike* S-2, a leste do Alto do Rio Real, Mohriak e Rabelo, 1994).

Segundo essa interpretação, os refletores observados com fortes mergulhos para SW e NE não correspondem a sedimentos da fase *rift* (como anteriormente interpretados), mas a refletores intracrustais próximos da base da crosta, situados em região muito próxima do limite com crosta oceânica (Mohriak *et al.* 1995b).

Em outras linhas de águas profundas (fig. 11), feições que a primeira vista seriam muito semelhantes não mostram tal tipo de estrutura. Elementos estruturais e estratigráficos comumente associados à tectônica de sal permitem aventar a hipótese de que esses diápiros possam ser causados por halocinese em região muito próxima a uma zona de transição crustal, como na figura 11 (Mohriak, 1995a). Deve-se salientar que antigas interpretações de diápiros de sal nas bacias de Sergipe e Alagoas foram radicalmente modificadas com a perfuração dos poços em águas profundas (Lana, 1993). Esses poços não constataram evaporitos anteriormente previstos (Lana, *op. cit.*), e mostraram que as falhas envolvendo o embasamento rotacionam os sedimentos da fase *rift* e adquirem comportamento extremamente semelhante a falhamentos halocinéticos.

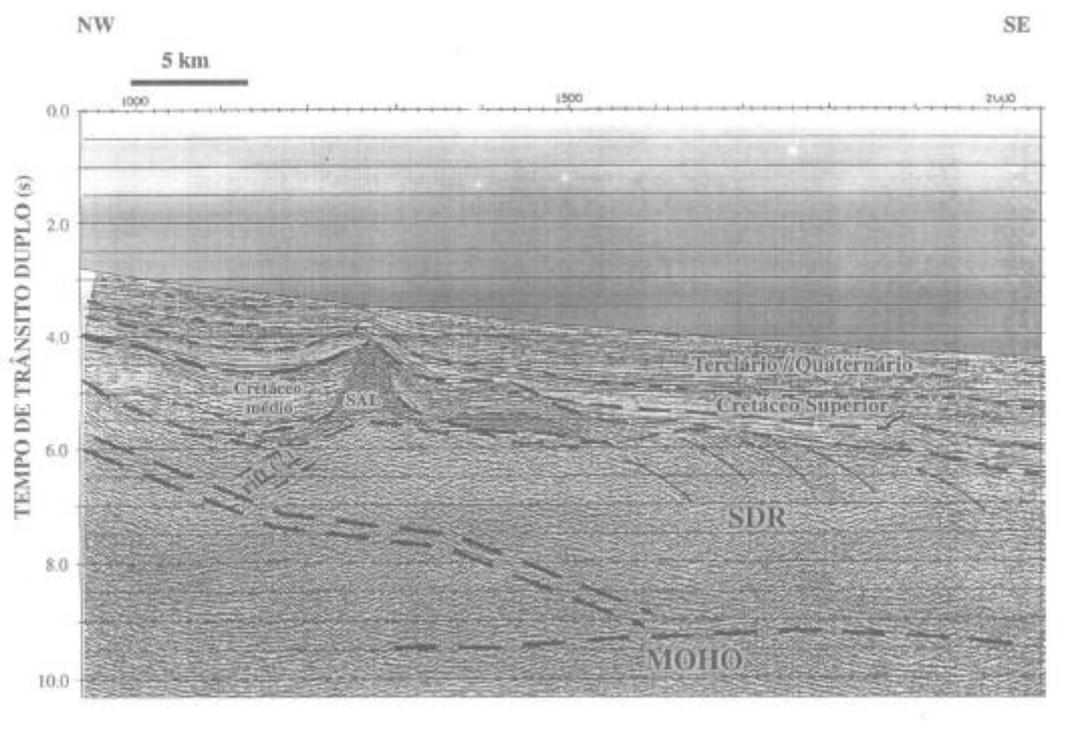


Fig. 11 - Linha sísmica D-2 mostrando feição diapírica com possível interpretação de sal. A feição ocorre junto ao limite de crosta definido por ocorrência de *seaward-dipping reflectors*, acima de uma provável zona de cisalhamento que descola próximo do Moho sísmico, rotacionando blocos de sedimentos de fase *rift*.

Fig. 11 - *Seismic line D-2 showing a diapiric feature with possible interpretations as salt. The feature occurs at the crustal limit defined by the occurrence of seaward dipping reflectors, above a probable shear zone which detaches off close to the seismic Moho rotating the rift-phase sedimentary blocks.*

A partir da constatação de ausência de sal nos poços de águas profundas, as feições com geometria de *mound* foram, desde então, interpretadas como intrusivas vulcânicas (Lana, *op. cit.*), embora haja questionamentos devido a uma certa incompatibilidade entre as interpretações oriundas de mapeamento sísmico (Castellani, 1991), e as oriundas da integração de dados de métodos potenciais.

Estes últimos sugerem que algumas das feições poderiam corresponder a altos do embasamento pré-cambriano (Moraes e Liandrat, 1987). Mesmo ao final da década de 80, havia a proposição de várias interpretações alternativas para feições do tipo *mound* observadas nas bacias de Sergipe e Alagoas, incluindo altos de embasamento, *horsts* formados por blocos de *rift* basculados, diápiros de sal, pináculos de recife, crescimento de carbonatos, entre outros. Para a maior parte das feições prevaleceu a interpretação de intrusiva vulcânica devido ao aparente alinhamento com anomalias magnéticas de direção E-W e à proximidade com outras feições que mostram grande semelhança com rochas intrusivas ígneas (Santos, informação verbal, 1995).

Várias inferências de halocinese para a feição apresentada na figura 11 advêm de estudos de análise de bacias em escala megaregional, principalmente quando integrados a métodos potenciais e análises comparativas com tectônica de sal em outras bacias evaporíticas. Nota-se que a extremidade oeste da linha sísmica profunda é marcada por uma anomalia gravimétrica Bouguer negativa em relação ao limite crustal mais a leste. Outras feições diapíricas que também ocorrem na região da linha sísmica D-2, com características que poderiam sugerir a presença de corpos vulcânicos (Castellani, 1991), na realidade, não apresentam respostas gravimétricas e magnéticas compatíveis.

Observaram-se, na região da linha D-2, várias feições relacionadas à tectônica extensional que estão associadas aos *mounds*, com características estratigráficas e estruturais de acordo com modelos análogos estabelecidos para diápiros de sal do Golfo do México (Worral e Snelson, 1989), Mar do Norte (Trusheim, 1960), costa leste dos Estados Unidos (Dillon *et al.* 1982), e Bacia de Santos (Vieira, 1993).

A feição diapírica em discussão (fig. 11), aparentemente, aflora no fundo do mar, conforme sugerido na linha sísmica *strike* S-1 (localização na fig. 2). Essa linha sísmica é mostrada sem interpretação na figura 12, e com possível interpretação de intrusiva vulcânica na figura 13 (Bisol, 1992). O relevo positivo dessa feição no fundo do mar parece sugerir composição vulcânica para o *plug* da linha *dip* D-2 (E.M. Ribeiro, informação verbal, 1993), à semelhança de outras feições que afloram na porção alagoana das bacias de Sergipe e Alagoas (Lana, 1993). Entretanto, o relevo positivo no fundo do mar não é uma indicação unívoca de intrusão ígnea, pois há situações envolvendo evaporitos onde *cap-rocks* foram eficientes para prevenir a dissolução de sal subaflorante no fundo do mar (línguas de sal da Escarpa de Sigsbee no Golfo do México, Wu *et al.* 1990).

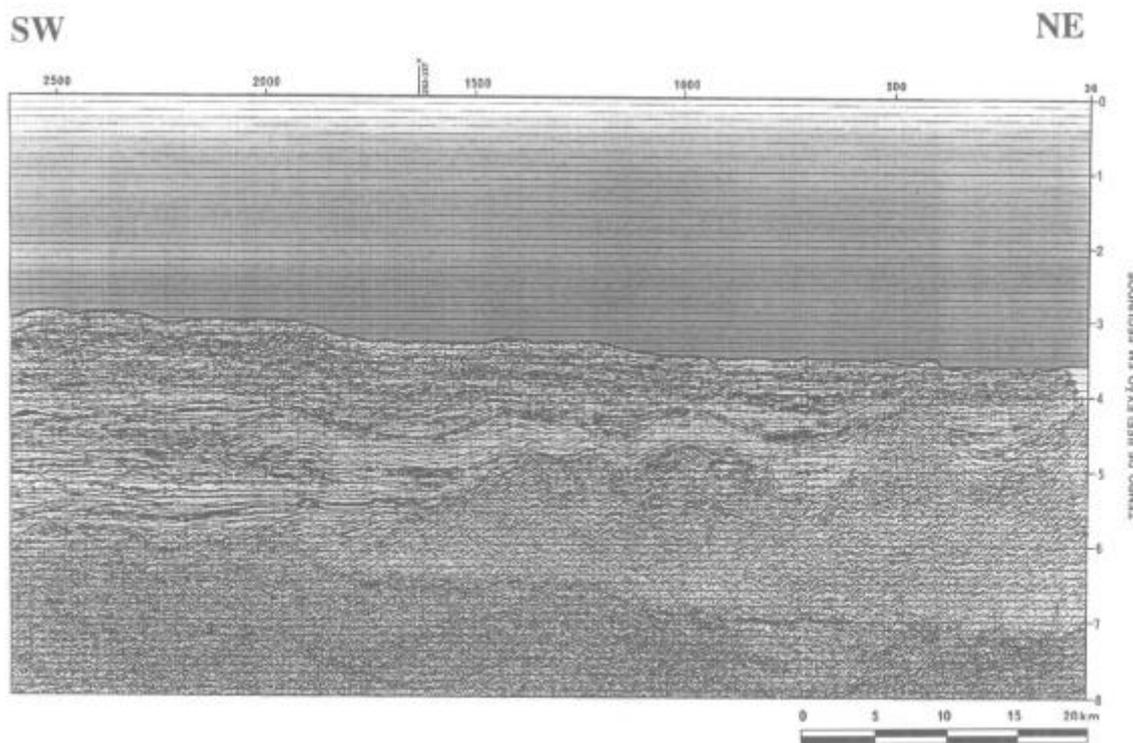


Fig. 12 - Linha sísmica S-1 nas bacias de Sergipe e Alagoas (Baixo de Cururipe) que cruza com a feição diapírica da linha D-2 próximo do PT 500, onde há uma feição positiva que aparentemente subaflora no fundo do mar.

Fig. 12 - Seismic line S-1 in Sergipe and Alagoas basins (Cururipe Low) which crossed the diapiric feature of line D-2 close to PT 500, where there is a positive feature which apparently outcrops on the sea bed.

Embora raros na literatura geológica, há alguns exemplos dessa situação de sal aflorante também em bacias brasileiras. A interpretação de *plug* vulcânico, como mostrado na figura 13 (Bisol, 1992), apesar de ser considerada possível dentro do contexto de vulcanismo da margem continental do nordeste, pode ser contraposta à possível interpretação de tectônica de sal com base em integração de diversos métodos geofísicos e modelos geológicos. Essa interpretação, que apresenta uma linha sísmica atravessando a mesma feição geológica, é sugerida na figura 11. Para essa estrutura, interpreta-se a presença de um diápiro de sal com crescimento ascendente (*upbuilding*), afetando as camadas mais recentes, chegando a criar um relevo positivo no fundo do mar.

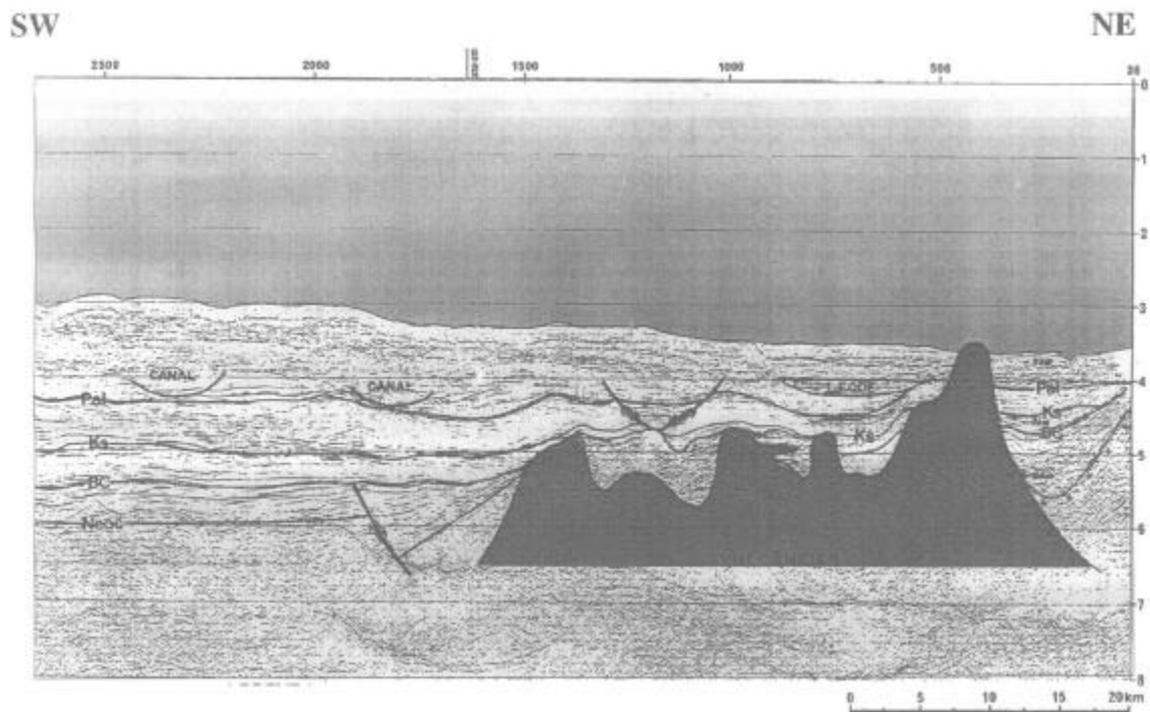


Fig. 13- Linha sísmica S-1 interpretada. Embora exista a possível interpretação de composição vulcânica para essa feição (Bisol, 1992), a integração com a linha de resolução profunda D-2 e com métodos potenciais sugere interpretação alternativa de diápiro de sal perfurante, subaflorante no fundo do mar.

Fig. 13 - Interpretation of seismic line S-1. Although there is a possible interpretation for this feature as a volcanic composition (Bisol, 1992), the integration with the deep resolution line D-2 and potential methods suggests an alternative interpretation as a diapir of intruding salt, outcropping on the sea bed.

Na figura 14 (modificada de Bisol, 1992), estabelece-se um elo de comparação com uma linha sísmica regional na Bacia do Espírito Santo, onde também é imageada uma feição positiva subaflorante no fundo do mar, comparável às que ocorrem nas bacias de Sergipe e Alagoas. Embora a feição diapírica da figura 12 tenha sido originalmente interpretada como caracterizando intrusão ígnea (Bisol, 1992), há notável semelhança de estilos estruturais com a figura 14, para a qual foi sugerida interpretação de diápiros de sal (Bisol, 1992). Há fortes evidências de que a maior parte das feições diapíricas em águas profundas da Bacia do Espírito Santo corresponda a diápiros de sal (fig. 15), embora essas feições ocorram em região de alto gravimétrico, conforme sugerido em mapas de anomalia Bouguer (Gomes, informação verbal, 1994). É necessário salientar que há várias evidências de que algumas construções positivas com geometria de diápiros de sal na Bacia do Espírito Santo possam corresponder a *plugs* vulcânicos, na região de Abrolhos, e mesmo na linha sísmica mostrada na figura 14 (Abdalla, informação verbal, 1995). Alguns dos poços perfurados na Bacia do Espírito Santo, com interpretação sísmica de estratos sedimentares e diápiros de sal, resultaram na perfuração de intrusivas e extrusivas vulcânicas (Abrahão, informação verbal, 1995).

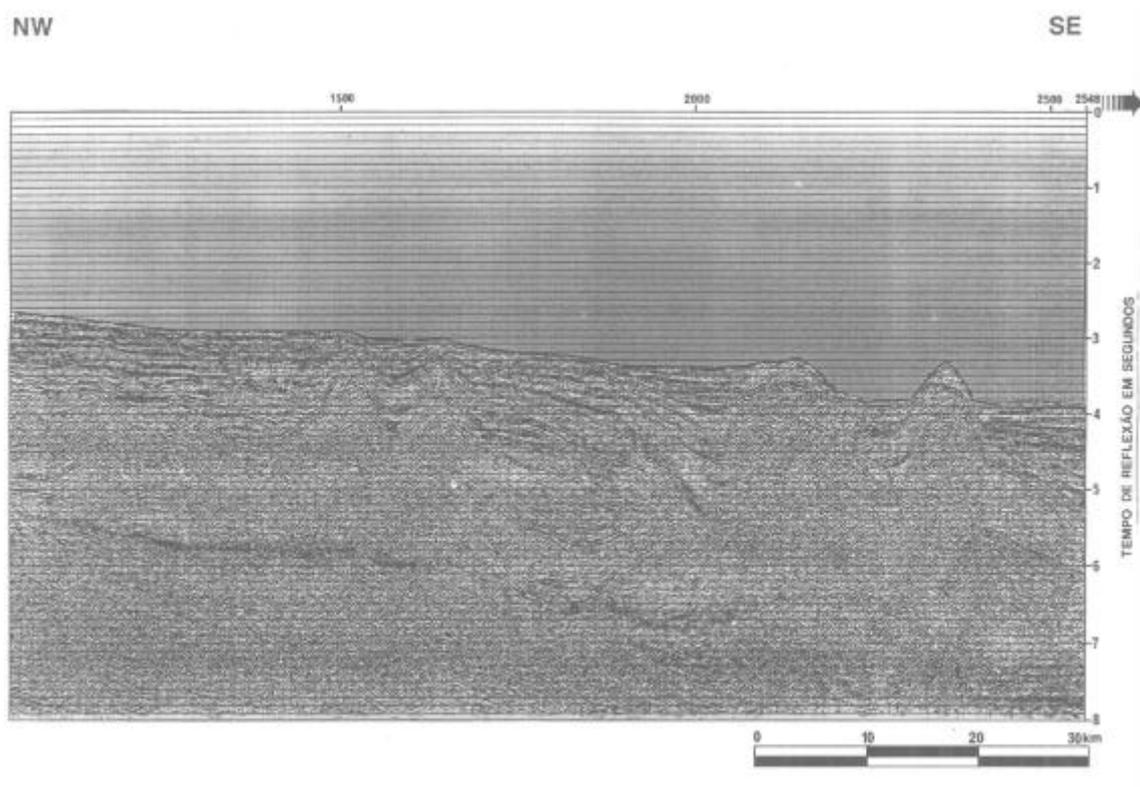


Fig. 14 - Linha sísmica D-3 (Bacia do Espírito Santo), mostrando feições diapíricas na região de águas profundas.
Fig. 14 - Seismic line D-3 (Espírito Santo Basin), showing diapiric features in the deep-water area.

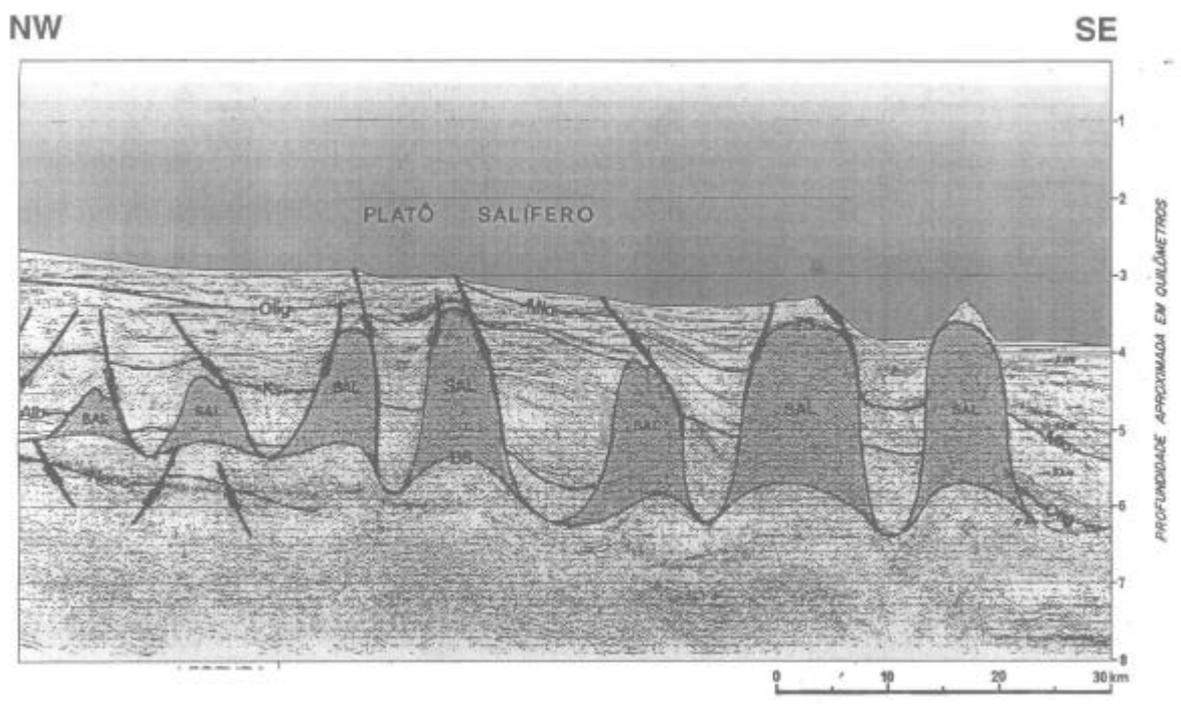


Fig. 15 - Interpretação da linha sísmica D-3 (Bisol, 1992) mostrando notável província de domos de sal que aumentam progressivamente no grau de diapirização, à medida que se aproximam do limite entre as crostas continental e oceânica.
Fig. 15 - Interpretation of seismic line D-3 (Bisol, 1992) showing a notable salt dome province which increases progressively in the degree of "diapirization" as it comes closer to the limit between the continental and oceanic crusts.

A caracterização de ampla província de diápiros de sal em águas profundas, abrangendo desde a Bacia de Santos até as de Sergipe e Alagoas, é balizada pela presença de várias estruturas normalmente associadas à tectônica de sal, como sinclinais periféricos, minibacias, falhas lítricas sintéticas e antitéticas, discordâncias no topo da seção *rift*, descolamentos na base da seção evaporítica, crescimento de seção junto a planos de falhas normais, *roll-overs* e *turtle-backs*, truncamentos erosionais de camadas pós-sal, *onlap* e *offlap* de refletores junto a flancos de diápiros, assimetria da construção diapírica e das camadas adjacentes, além do caráter sísmico das reflexões internas dos diápiros.

Na figura 16 (modificada de Vieira, 1993), apresenta-se uma comparação entre o diápiro amostrado pela linha profunda D-2 com diápiros de sal presentes na Bacia de Santos. Ilustram-se feições estratigráficas e estruturais de um diápiro de sal em águas profundas, junto ao limite crustal da Bacia de Santos. A transição entre as crostas continental e oceânica, nessa região da bacia, é caracterizada pela ocorrência de cunhas de refletores mergulhantes na direção do mar (*seaward-dipping reflectors*), em situação tectônica possivelmente equivalente à situação da linha sísmica mostrada na figura 11.

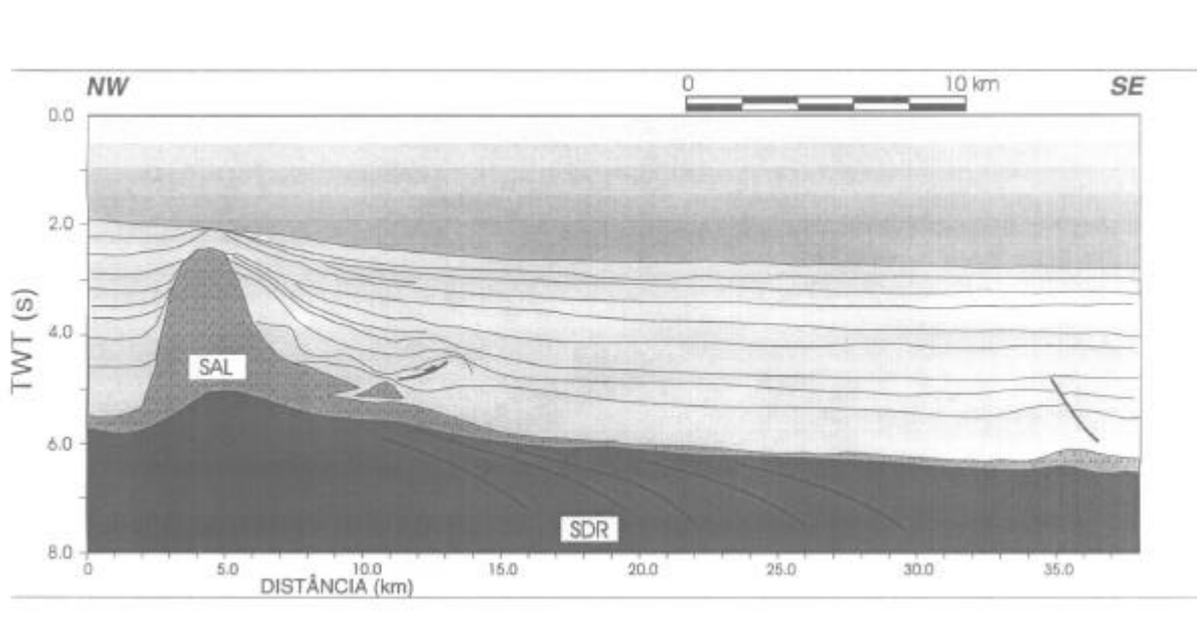


Fig. 16 - Interpretação da linha sísmica D-4 na Bacia de Santos, mostrando diápiro de sal caracterizado por assimetria geométrica nas bacias periféricas, e suaves arqueamentos dos estratos devido a processos extensionais afetando a sobrecarga sedimentar de idade pós-aptiana e diapirismo por crescimento ascendente. A seção evaporítica e os estratos pós-sal, movimentando-se na direção do oceano por espalhamento gravitacional, originaram estruturas peculiares assimétricas, próximo ao limite crustal definido por cunhas de *seaward-dipping reflectors*, originando também feições compressoriais caracterizadas por pequenas falhas de empurrão. Compare com a seção sísmica interpretada para a região de águas profundas das bacias de Sergipe e Alagoas (fig. 12).

Fig. 16 - Interpretation of seismic line D-4 at Santos Basin, showing a salt diapir typified by geometric asymmetry in the peripheral basins and gentle arching of the strata due to stretching processes affecting the post-Aptian sedimentary surcharge and “diapirization” by ascending growth. The evaporite section and the post-salt strata, moving towards the ocean by gravity spreading, gave rise to peculiar asymmetric structures, close to the crustal limit defined by wedges of *seaward-dipping reflectors*, also giving rise to compression features typified by small thrust faults. Compare with the interpreted seismic section for deep-water area of the Sergipe and Alagoas basins (fig. 12).

Observa-se, também, que há notável assimetria da construção diapírica, com uma minibacia – do lado o continente – bem mais desenvolvida por ampliação do espaço de sedimentação. Do lado oceânico, as camadas sedimentares estão movimentadas na direção da bacia, com suaves dobramentos e arqueamentos de refletores. À semelhança da região dos diápiros presentes em águas profundas da Bacia do Espírito Santo (fig. 15), essa porção da Bacia de Santos encontra-se em região de alto gravimétrico no mapa de anomalia Bouguer. Infere-se que o dado gravimétrico esteja respondendo mais a estruturas profundas da crosta e manto do que aos diápiros rasos ou subaflorantes. Para as bacias de Sergipe e Alagoas, pode-se também propor a possibilidade de que os dados de métodos potenciais estejam muito mais relacionados a feições profundas do que às mais superficiais delineadas na sísmica.

6. IMPLICAÇÕES TECTÔNICAS

Muitas feições geológicas presentes na região de águas profundas das bacias do nordeste brasileiro apresentam características estruturais que podem levar a diferentes interpretações, particularmente como blocos de *rift* basculados, recifes, altos de embasamento, *plugs* vulcânicos, e mesmo artefatos de processamento (Rabelo, informação verbal, 1993). Algumas dessas feições estão aparentemente associadas à atividade vulcânica durante a formação de crosta oceânica; outras ocorrem ao longo do prolongamento de zonas de fraturas.

Por outro lado, em algumas estruturas em águas profundas nas bacias de Sergipe e Alagoas (na região da linha sísmica profunda D-2) existem notáveis evidências de tectônica de sal. Há várias situações em que se podem interpretar feições clássicas de tectônica de sal, como diapirismo por crescimento ascendente e descendente, falhas lítricas, *roll-overs*, cascos de tartaruga, cisalhamento basal sintético e antitético, minibacias e falhas de empurrão. Essas feições, interpretadas em um contexto regional, têm significado geológico e tectônico muito maior do que o de sua área de ocorrência, além de profunda implicação em termos de gênese de evaporitos e exploração (Woodbury *et al.* 1980). A ocorrência de tectônica de sal em regiões próximas ao limite crustal implica numa bacia evaporítica até regiões de maior extensão litosférica, e não restrita a baixos localizados junto às grandes falhas proximais.

Essa interpretação pode também ser aplicada às bacias conjugadas da margem africana, onde a falta de camadas de sal nos poços perfurados em águas rasas pode não ser indicativa de absoluta ausência de deposição evaporítica em águas profundas. Na margem conjugada africana (Guiné Equatorial e Camarões), a ausência de sal em poços perfurados na plataforma pode levar a uma interpretação de que algumas feições estruturais complexas são geneticamente relacionadas a sucessivas fases de rifteamento e formação de *nappes* descolados do embasamento (Turner, 1995). Essas feições, em última análise, poderiam ser condicionadas por tectônica de sal anterior ao fluxo sedimentar. Essa constatação só poderá ser feita quando a interpretação se estender para regiões de águas mais profundas, próximas às do contato crustal.

7. CONCLUSÕES

Apresenta-se uma contribuição ao estudo geológico das bacias de Sergipe e Alagoas, que embora tenham sido objeto de intensa investigação, ainda apresentam diversos problemas tectônicos no contexto de ruptura do Gondwana. Dentre essas feições, destacam-se: (1) o notável relacionamento entre as grandes discordâncias regionais e eventos tectônicos de primeira ordem; (2) a provável ocorrência de soerguimento e erosão de blocos de *rift* por discordâncias regionais posicionadas no tempo entre o Neocomiano e a seção salífera, e entre o Aptiano e o Albiano Inferior; e (3) a provável ocorrência de tectônica de sal em águas profundas das bacias de Sergipe e Alagoas. As modificações propostas estão incluídas na carta tectono-estratigráfica da figura 17.

A caracterização de feições megaregionais e a interpretação geológica são otimizadas pela integração de linhas sísmicas profundas, métodos potenciais e analogias tectônicas com outras bacias. Na região de águas profundas das bacias de Sergipe e Alagoas, caracterizou-se grande feição magnética formando segmentos de um arco megaregional, anteriormente interpretado como associado a altos de rochas pré-cambrianas. Defende-se, aqui, que a anomalia magnética da margem nordeste corresponda a uma feição muito mais profunda e de significado tectônico bastante diverso do que era anteriormente interpretado, representando, portanto, uma transição entre uma porção de crosta continental, com reduzida espessura de *rift* e a crosta oceânica, precedida por cunhas de SDR. Esse processo geodinâmico resultou na formação de cunhas de material ígneo tipo SDR durante a implantação de crosta oceânica.

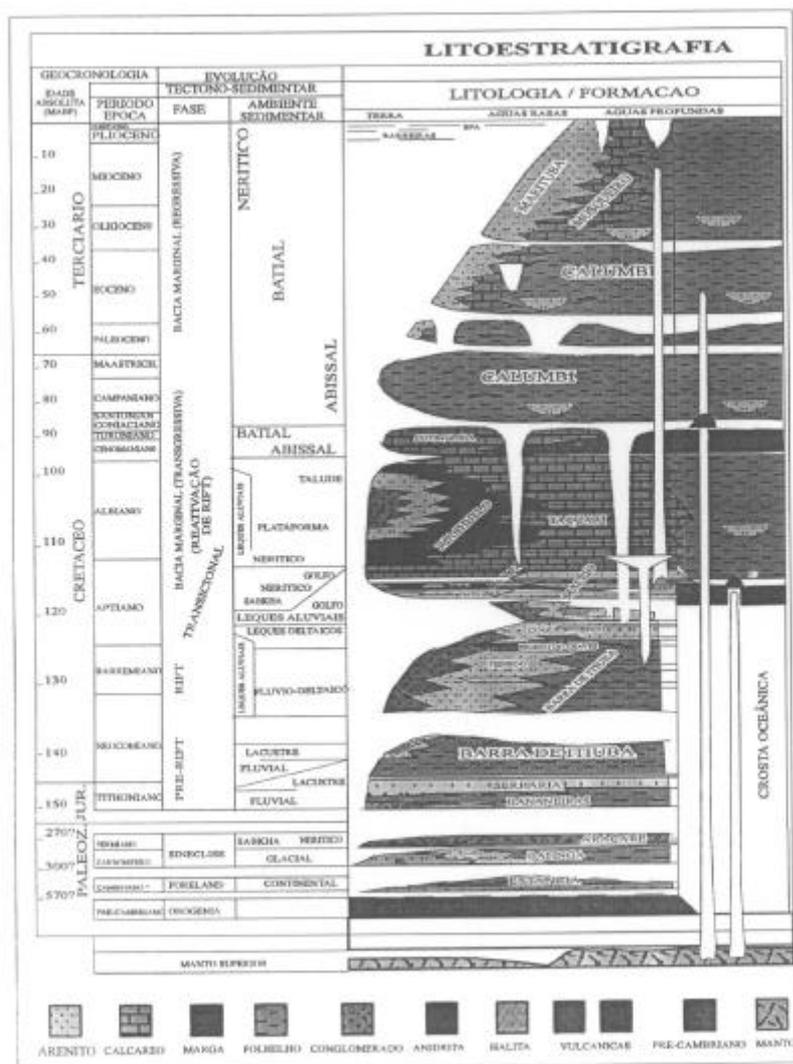
A aquisição, processamento e interpretação de diversas linhas sísmicas regionais nas bacias de Sergipe e Alagoas, quando restritos aos primeiros 5 ou 6 segundos de tempo duplo, pode resultar em visualização parcial das camadas mais jovens da seqüência sedimentar, restringindo a interpretação ao rastreamento de cortes de *canyons* ou outras feições geológicas na região de águas profundas, a leste da anomalia magnética da costa nordeste do Brasil. Embora haja diversas linhas sísmicas com possíveis indicações de *rift* espesso subjacentes a essas feições, desde Alagoas até Jacuípe, a análise regional das linhas de resolução profunda sugere que a leste da anomalia magnética de águas profundas a perfuração de poços provavelmente atravessaria uma seção sedimentar exclusivamente pós-evaporítica (fig. 17). Abaixo da seção sedimentar depositada na fase termal de subsidência, ocorreriam cunhas de *seaward-dipping reflectors*, diretamente assentadas sobre o embasamento, com poucas indicações de fragmentos da seção *rift*. As rochas associadas aos SDR seriam constituídas predominantemente por rochas vulcânicas e vulcanoclásticas formadas durante a implantação de um centro de espalhamento oceânico. O embasamento ígneo, em região de crosta

oceânica, seria constituído por rochas básicas que se estenderiam até o manto superior, segundo um modelo clássico que incluiria uma seção de basaltos depositados subaérea a subaquosamente, lavas almofadadas, diques verticais, gabros e peridotitos.

Na carta tectono-estratigráfica de Sergipe (fig. 17), é possível expressar a erosão dos blocos de *rift* em águas profundas – notadamente na região próxima ao contato com as rochas vulcânicas no limite entre as crostas continental e oceânica –, com a ausência de seção stratigráfica entre os sedimentos aptianos a neocomianos. Na coluna stratigráfica proposta, o *rift* não se estende até a região de águas profundas. Acredita-se que as camadas sedimentares mais antigas correspondam a sedimentos pós-*rift* depositados sobre rochas ígneas extrusivas e intrusivas associadas a *seaward-dipping reflectors* transicionados para uma crosta oceânica pura, de idade mais jovem do que o Aptiano. A coluna tectono-estratigráfica da figura 17 também mostra possíveis cortes de *canyons* localizados em águas profundas, posicionados sobre uma crosta ígnea com quase total ausência de sedimentos da fase *rift*.

Há várias evidências sísmicas, gravimétricas e magnéticas indicando a presença de vulcânicas na região de águas profundas, formando principalmente *plugs* ao longo de alinhamentos de zonas de fraturas. Entretanto, não há evidências concretas de qualquer evento vulcânico em crosta continental atingindo o Mioceno, como ilustrado na carta de Sergipe (Feijó, 1994). Na realidade, há poucas evidências de vulcanismo intracontinental nas bacias de Sergipe e Alagoas (Senna, informação verbal, 1993), exceto amostras de calha com fragmentos de rochas vulcânicas (Brito, informação pessoal, 1994). Embora haja notável semelhança de geometria com *plugs* vulcânicos, há diversas indicações de possível ocorrência de halocinese em águas profundas. Algumas feições stratigráficas e estruturais, comumente associadas à tectônica de sal em outras bacias evaporíticas, também ocorrem em Sergipe e Alagoas, sugerindo, em determinadas porções, uma bacia evaporítica estendendo-se até o limite crustal.

Mesmo levando-se em consideração que nos poços de águas profundas na Bacia de Sergipe não foram constatados evaporitos, deve-se salientar que há comprovadamente a ocorrência de halocinese (com características peculiares, se comparada às bacias de Campos e Santos) em várias áreas localizadas da plataforma continental de Sergipe e Alagoas, inclusive com formação de diápiros perfurantes. Os poucos poços que efetivamente atravessaram a seção aptiana e onde não foram constatados evaporitos devem ser entendidos dentro de um contexto tectônico que diferencie a margem nordeste da sudeste. Nas bacias de Santos e Campos, as camadas de sal depositaram-se após a quase total extinção da atividade tectônica de fase *rift*, ao mesmo tempo que em Sergipe e Alagoas houve pulsos da reativação tectônica que resultou no soerguimento, erosão e mobilização dos estratos evaporíticos. A ausência de sal nos poços de águas profundas das bacias de Sergipe e Alagoas deve-se ao fato de que, dos quatro poços perfurados em batimetria superior a 400 m, dois restringiram-se à seção pós-aptiana. Nenhum dos demais foi posicionado em situação favorável à constatação de seção evaporítica da seqüência aptiana. Um foi perfurado próximo a uma linha de charneira, atravessando apenas um relicto de sedimentos da fase *rift*, parcialmente erodido no bloco alto. O outro foi perfurado na porção elevada de um bloco afetado por erosão pós-sal, não tendo sido registrado qualquer sedimento de idade aptiana entre as seções neocomiana/ barremiana e albiana. A interpretação de tectônica de sal em águas profundas, embora conceitual por não se ter comprovação direta pela amostragem por poços, é fortemente sugerida por diversos elementos stratigráficos e estruturais comumente relacionados à tectônica de sal em outras bacias evaporíticas, notadamente as da margem sudeste do Brasil, do Golfo do México e do Mar do Norte.



W. U. MOHRBAK, 1995 / MODIFICADO DE SESEA E F.J.FEIO, 1994

Fig. 17 - Coluna tectono-estratigráfica da Bacia de Sergipe, incorporando modificações sugeridas no texto.
Fig. 17 - Tectonic-stratigraphic column of the Sergipe Basin, incorporating the modifications suggested in the text.

AGRADECIMENTOS

Aos técnicos da E&P (sede e distritos de Aracaju e Salvador) que contribuíram com proveitosas discussões sobre a evolução tectono-sedimentar das bacias de Jacuípe, Sergipe e Alagoas. Aos técnicos do SESEA, pela leitura do texto preliminar e várias sugestões. Aos geólogos César Cainelli, pela revisão crítica, Hamilton Rangel pela revisão final, e Sergio Michelucci pelo incentivo e apoio gerencial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, G. S., LANA, M. C. Exploração da Bacia de Sergipe-Alagoas. In: SEMINÁRIO DE INTERPRETAÇÃO EXPLORATÓRIA, 1., 1989, Rio de Janeiro. *Trabalhos técnicos...* Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEPEX, 1989. 409 p. p. 97-104.

BACOCOLI, G. ARANHA, L.G.F. *Evolução estrutural fanerozóica do Brasil meridional*. Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEPEX, 1984. 153 p. (Relatório interno).

- BACOCOLI, G., LINS, A. J. R., FRANZ, E. P., GOMES, F. A. F., AQUINO, G. S., FERNANDES, G. J. F., LANA, M. C. CAMPOS, O. A. J., SILVA, P. C. R., SOUZA, S. M. *O futuro da exploração de petróleo na Bacia de Sergipe-Alagoas*. Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEPEX, 1991. 2 v. (Relatório interno).
- BISOL, D.L. *Atlas de seções sísmicas das bacias sedimentares brasileiras*. Vol.1- Bacias marítimas da costa leste. Relatório Interno PETROBRAS/DEPEX/CENPES, 1992. Não publicado.
- BOILLOT, G., MOUGENOT, D., GIRARDEAU, J., WINTERER, E. L. Rifting processes on the West Galicia margin, Spain. In: TANKARD, A. J., BALKWILL, H. R. (Ed.). *Extensional tectonics and stratigraphy of the north atlantic margins*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1989. p. 311-331. (AAPG. Memoir, 46).
- CAINELLI, C. Histórico e evidências da presença de regime transtensional/transpessoal na Bacia de Sergipe/Alagoas. In: SEMINÁRIO DE TECTÔNICA DA PETROBRAS, 1., 1987. Rio de Janeiro. *Tectos...* Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEPEX, 1989. p. 311-331.
- CAINELLI, C. *Sequence stratigraphy, canyons, and gravity mass-flow deposits in the Piacabuçu Formation, Sergipe-Alagoas basin, Brazil*. Austin: University of Texas at Austin, 1992. 233 f. Tese (Doutorado).
- CAMPOS, C. W. M., PONTE, F. C., MIURA, K. Geology of the brazilian continental margin. In: BURK, C. A., DRAKE, C. L. (Ed.). *The geology of the continental margins*. New York: Springer-Verlag, 1974. p. 447-461.
- CARVALHO, R.S. *Sedimentação evaporítica. Seminário sobre rifts intracontinentais*, 1987, Rio de Janeiro. Trabalhos apresentados... Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEPEX, 1987. 304 p. p. 52-57.
- CASTELLANI, R. T. *Bacia Sergipe-Alagoas: porção marítima alagoana avaliação atual e novas fronteiras*. Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEPEX. DINORD. SESEA, 1991. 11 p. (Relatório interno).
- CASTRO JR., A. C. M. The northeastern Brazil and Gabon basins: a double rifting system associated with multiple crustal detachment surfaces. *Tectonics*, Washington, v. 6, p. 727-738, 1987.
- CHAGAS, L. S., CHIOSSI, D. S. N., CERQUEIRA, R. M., HANSI JR., G. P., MARQUES, G., LISBOA, G. *Evolução tectono-sedimentar do rift da Bacia de Sergipe-Alagoas e novas perspectivas exploratórias*. Aracaju: PETROBRAS. DNEST. SERINT., 1993. 76 p. (Relatório interno).
- CHANG, H. K., KOWSMANN, R. O., FIGUEIREDO, A. M. F., BENDER, A. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil rift systems: an overview. *Tectonophysics*, Amsterdam, v. 213, p. 97-138, 1992.
- CORDANI, U. G., BLAZEKOVIC, A. Idades radiométricas das rochas vulcânicas dos Arolhos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 24., 1970, Brasília. *Anais ... Brasília: Sociedade Brasileira de Geologia*, 1970. 416 p. p. 265-270.
- CORDANI, U. G., NEVES, B. B. B., FUCK, R. A., PORTO, R., TOMAZ FILHO, A., CUNHA, F. M. B. *Estudo preliminar da integração do Pre-Cambriano com eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras*. Rio de Janeiro: PETROBRAS. CENPES, 1984. 70 p. (Ciência Técnica Petróleo. Exploração de Petróleo, n. 15).
- CRUZ, F. E. G. *Análise estratigráfica das formações Batinga, Aracaré e Candeeiro, Bacia de Sergipe-Alagoas*. Aracaju: PETROBRAS. DENEST. DIREX. SELAG, 1994. 24 f. (Relatório interno).
- DAVISON, I. Comment on "The northeastern Brazil and Gabon basin: a double rifting system associated with multiple crustal detachment surfaces". *Tectonics*, Washington, v. 7, n. 6, p. 1385-1394, 1988.
- DE GOLYER, E. Origin of north american salt domes. *American Association of Petroleum Geologists. Bulletin*, Tulsa, v. 9, p. 831-874, 1925.
- DIAS, J. L., VIEIRA, J. C., CATTO, A. J., OLIVEIRA, J. Q., GUAZELLI, W., TRINDADE, L.A. F., KOWSMANN, R. O., KIANG, C. H., MELLO, U. T., MIZUZAKI, A. M. P., MOURA, J. A. *Estudo regional da Formação Lagoa Feia*. Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEPEX, 1987. 143 p. (Relatório interno).
- DILLON, W.P. *et al*, 1982. Growth faulting and salt diapirism: *Their relationship and control in the Carolina Trough, Eastern North America*. In: WATKINS, J.S. and DRAKE, C.L., (ED.), *Studies in Continental margin geology*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1982., p. 21-46. (AAPG). Memoir, 46).

- FALKENHEIN, F.U.H. *et al.* *Projeto Sergipe-Alagoas*. [s.n.t.]. Relatório interno. PETROBRAS/DEPEX, Rio de Janeiro, 1986 Não publicado.
- FEIJÓ, F. J. Bacias de Sergipe e Alagoas. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 149-161, 1994.
- GUIMARÃES, P. T. M. *Basin analysis and structural development of the Sergipe-Alagoas Basin, Brazil*. Austin: University of Texas, 1988. 171 f. Tese (Doutorado).
- HITE, R. Shelf carbonate sedimentation controlled by salinity in the paradox basin, southeast Utah. In: SYMPOSIUM ON SALT, 3., Cleveland, 1969. *Symposium on salt*. Cleveland: Northern Ohio Geological Society, 1969. v. 1, p. 47-66.
- KEEN, C. E., VOOGD, B. The continental-ocean boundary at the rifted margin off eastern Canada: new results from deep seismic reflection studies. *Tectonics*, Washington, v. 7, p. 107-124, 1988.
- KEEN, C. E., POTTER, D. P. The transition from volcanic to a non-volcanic rifted margin of eastern Canada. *Tectonics*, Washington, v. 14., n. 2, p. 359-371, 1995.
- KOUTSOUKOS, E. A. M., MELLO, M. R., AZAMBUJA FILHO, N. C., HART, M. B., MAXWELL, J. R. The Upper Aptian-Albian succession of the Sergipe Basin, Brazil: an integrated paleoenvironmental assesment. *American Association of Petroleum Geologists. Bulletin*, Tulsa, v. 75, n. 3, p. 479-498, 1991.
- LANA, M. C. Rifting na Bacia de Sergipe-Alagoas, Brasil. In: SEMINÁRIO DE TECTÔNICA DA PETROBRAS, 1., 1987, Rio de Janeiro. *Tectos ...* Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1987. p. 290-310.
- LANA, M. C. *Potencial petrolífero e exploração em águas profundas na Bacia de Sergipe-Alagoas*. Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEPEX. DINORD. SESEA, 1993. 36 p. (Relatório interno).
- LARSEN, H. C., JAKOBSDÓTTIR, S. Distribution, crustal properties and significance of seawards-dipping sub-basement reflectors off E Greenland. In: MORTON, A. C., PARSON, L. M. (Ed.). *Early tertiary volcanism and the opening of the NE Atlantic*. Oxford : Blackwell Scientific, 1988. p. 95-114. (Geological Society of London. Special Publication, 39).
- LASE STUDY GROUP. Deep structure of the US East Coast passive margin from large aperture seismic experiments (LASE). *Marine and Petroleum Geology*, Oxford, v. 3, p. 234-242, 1986.
- LEYDEN, R. Salt distribution and crustal models for the eastern Brazilian margin. *Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 48, p. 159-242, 1976.
- MATOS, R. M. D. The northeastern Brazilian rift system. *Tectonics*, Washington, v. 11, n. 4, p. 766-791, 1992.
- MELLO, M. R., MOHRIAK, W. U., KOUTSOUKOS, E. A. M., BACOCOLI, G. Selected petroleum systems in Brazil. In: MAGOON, L. B., DOW, W. G. (Ed.). *The petroleum systems*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994. p. 499-512. (American Association of Petroleum Geologists, Memoir 60).
- MILANI, E. J. *Aspectos da evolução tectônica das bacias do Recôncavo e Tucano Sul, Bahia, Brasil*. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1987. 61 p. (Ciência Técnica Petróleo. Seção Exploração de Petróleo, v. 18).
- MILANI, E. J., DAVISON, I. Basement control and transfer tectonics in the Recôncavo-Tucano-Jatobá rift, northeast Brazil. *Tectonophysics*, Amsterdam, v. 154, p. 47-70, 1988.
- MIZUSAKI, A. M. P., THOMAZ FILHO, A., VALENÇA, J. G. Volcano-sedimentary sequence of Neocomian age in Campos Basin (Brazil). *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 18, p. 247-251, 1988.
- MOHRIAK, W. U., BARROS, M. C., A. Z., FUGITA, A. Magmatismo e tectonismo cenozóicos da região do Cabo Frio, RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., Natal, 1990. *Anais ...* Natal: Sociedade Brasileira de Geologia, 1990. v. 6, p. 2873-2885.
- MOHRIAK, W. U., BARROS, M. C., RABELO, J. H. L., MATOS, R. D. Deep seismic survey of brazilian passive basins: the northern and northeastern regions. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. CONGRESSO INTERNACIONAL, 3., 1993, Rio de Janeiro. *Resumos expandidos ...* Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 1993. v. 2, p. 1134-1139.

- MOHRIAK, W. U., RABELO, J. H. L. Sísmica profunda nas bacias marginais brasileiras: integração megaregional e resultados preliminares em Sergipe-Alagoas e Jacuípe. In: SEMINÁRIO DE INTERPRETAÇÃO EXPLORATÓRIA, 2., 1994, Rio de Janeiro. *Trabalhos técnicos ...* Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1994, p. 246-251.
- MOHRIAK, W. U. Elusive salt tectonics in the deep water region of the Sergipe-Alagoas basin: evidence from deep seismic reflection profiles. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 4., 1955a, Rio de Janeiro. *Expanded abstracts ...* Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 1955a. v.1, p. 51-54.
- MOHRIAK, W. U. Salt tectonics structural styles: contrasts and similarities between the South Atlantic and Gulf of Mexico. In: SOCIETY OF ECONOMIC PALEONTOLOGISTS AND MINERALOGISTS FOUNDATION. GULF COAST SECTION, 16., 1995, Houston. *Salt, sediment and hydrocarbons*. Austin: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Foundation. Gulf Coast Section, 1995b. 308 p. p. 77-191.
- MOHRIAK, W. U., BASSETO, M., VIEIRA, I. S. Deep seismic constrains on the crustal architecture of sedimentary basins in the Brazilian margin: tectonic and exploratory implications. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 5., 1995, Gramado. *Boletim de resumos expandidos...* Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995a. 445 p. p. 246-248.
- MOHRIAK, W. U., RABELO, J. H. L., MATOS, R. D., BARROS, M. C. Deep seismic reflection profiling of sedimentary basin offshore Brazil: geological objectives and preliminary results in the Sergipe Basin. *Journal of Geodynamics*, Oxford, v. 20, p. 515-539, 1995b.
- MORAES, R. A. V., LIANDRAT, E. Interpretação do embasamento magnético: Projeto Maragoji/Canavieiras. In: SEMINÁRIO DE TECTÔNICA DA PETROBRAS, 1., 1987, Rio de Janeiro. *Tectos I...* Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEPEX, 1987. p. 344-355.
- MUTTER, J. C., TALWANI, M., STOFFA, P. L. Origin of seaward-dipping reflectors in oceanic crust off the Norwegian margin by "subaerial sea-floor spreading". *Geology*, Boulder, v. 10, p. 353-357, 1982.
- NEVES, B.B.B., SIAL, A. N., ALBUQUERQUE, J. P. T. Vergência centrífuga residual no sistema de dobramentos sergipanos. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 7, p. 902-114, 1977.
- NOBLE, D. C., McKEE, E. H. MOURIER, T., MEGARD, F. Cenozoic stratigraphy, magmatic activity, compressive deformation, and uplift in northern Peru. *Geological Society of America. Bulletin*, Boulder, v. 102, p. 1105-1113, 1990.
- OJEDA, H. A. O. Structural framework, stratigraphy, and evolution of Brazilian marginal basin. *American Association of Petroleum Geologists. Bulletin*, Tulsa, v. 66, p. 732-749, 1982.
- OJEDA, H. A. O., FUJITA, A. M. *Bacia Sergipe/Alagoas: tectônica, evolução tectosedimentar e perspectivas petrolíferas*. Rio de Janeiro : PETROBRAS. DEPEX, 1972. 63 p. (Relatório interno).
- OJEDA, H. A. O., FUJITA, A. M. Bacia Sergipe/Alagoas: geologia regional e perspectivas petrolíferas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. *Anais ...* Porto Alegre : Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. v. 1, p. 137-158.
- PEREIRA, M. 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 PETROBRAS, Rio de Janeiro, v. 6, n. 3/4, p. 171-176, 1992.
- POAG, C. W. Stratigraphic reference section for Georges Bank Basin: depositional model for New England passive margin. *American Association of Petroleum Geologists . Bulletin*, Tulsa, v. 66, n. 8, p. 1021-1041, 1982.
- PONTE, F. C., FONSECA, J. R., CAROZZI, A. V. Petroleum habitats in the Mesozoic-Cenozoic of the continental margin of Brazil. In: MIAL, D. A. (Ed.) *Facts and principles of world petroleum occurrence*. Calgary : Canadian Society of Petroleum Geologists, 1980. p. 857-886. (Canadian Society of Petroleum Geologists. Memoir 6).
- PONTES, C. E. S., CASTRO, F. C. C., RODRIGUES, J. J. G., ALVES, R. R. P., CASTELLANI, R. T., SANTOS, S. F., MONIS, M. B. Reconhecimento tectônico e estratigráfico da bacia Sergipe-Alagoas em águas profundas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 2., 1991, Salvador. *Boletim de resumos expandidos*. Salvador: Sociedade Brasileira de Geofísica, 1991. v. 2 p. 638-643.

- RABINOVITZ, P. D., LABREQUE, J. The Mesozoic South Atlantic Ocean and evolution of its continental margins. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v. 84, n. B11, p. 5973-6002, 1979.
- RADAMBRASIL. *Projeto Radambrasil: folhas 2 C-24/25, Aracaju/Recife*. Rio de Janeiro :MME, 1983. 855 p. (Levantamento de recursos naturais, v. 30).
- SCHALLER, H. Revisão estratigráfica da Bacia de Sergipe/Alagoas. *Boletim Técnico da PETROBRAS*, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 21-86, 1969.
- SCHALLER, H., DAUZACKER, M. V. *Tectônica gravitacional e sua aplicação na exploração de hidrocarbonetos*. Boletim Técnico da PETROBRAS, v. 12, n. 1, p. 21-86, 1969.
- SHERIDAN, R. E. Dome structure, Atlantic outer continental shelf east of Delaware: preliminary geophysical report. *American Association of Petroleum Geologists. Bulletin*, Tulsa, v. 59, p. 1203-1211, 1975.
- STEWART, S. A., COWARD, M. P. Synthesis of salts tectonics in the southern North Sea, UK. *Marine and Petroleum Geologists*, Oxford, v. 12, n. 5, p. 457-475, 1995.
- TRUSHEIM, F. Mechanism of salt migration in northern Germany. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Tulsa, v. 44, n. 9, p. 1519-1540, 1960.
- TURNER, J. P. Gravity-driven structures and rift basin evolution: Rio Muni Basin, offshore Equatorial West Africa. *American Association of Petroleum Geologists. Bulletin*, Tulsa, v. 79, n. 8, p. 1138-1158, 1995.
- USSAMI, N., KARNER, G. D., BOTT, M. H. P. Crustal detachment during South Atlantic rifting and formation of Tucano-Gabon basin system. *Nature*, London, v. 322, p. 629-632, 1986.
- VAN der VEN, P. H. Estilos estruturais na Bacia de Sergipe e Alagoas. In: SEMINÁRIO DE TECTÔNICA DA PETROBRAS, 1., Rio de Janeiro, 1987. *Tectos I*. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1987. p. 332-343.
- VENDEVILLE, B., COBBOLD, P. R. How normal faulting and sedimentation interact to procedure listric fault profiles and stratigraphic wedges. *Journal of Structural Geology*, Oxford, v. 10, n. 7, p. 649-659, 1988.
- VIEIRA, I. S. *Geologia estrutural do platô de São Paulo*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1993. 104 p. Dissertação (Mestrado).
- WANDERLEY FILHO, J. R., GRADDI, J. C. S. V. *Projeto Jacuípe*. Salvador: PETROBRAS.DEXBA. DIREX. SEMAR., 1993 29 f. (Relatório interno).
- WOODBURY, H.O., MURRAY, I. B., OSBORNE, R. E. Diapirs and their relation to hydrocarbon accumulations. In:MIALL, ANDREW D. (Ed.). *Facts and principles of world petroleum occurrence*. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1980. 1003 p.p. 119-142. (Canadian Society of Petroleum Geologists. Memoir, 6).
- WU, S., BALLY, A. W., CRAMEZ, C. Allochthonous salt, structure and stratigraphy of the north-eastern Gulf of Mexico: part II structure. *Marine and Petroleum Geology*, Oxford, v. 7, p. 334-370, 1990.

EXPANDED ABSTRACT

The breakup of Gondwana in the Mesozoic probably started in the southern portion of the South American plate, and propagated towards the north, beginning in the Late Jurassic and probably climaxing in the Late Cretaceous with the final separation of Africa and South America along transform faults in the equatorial rift zone. The northeastern region of Brazil is characterized by a series of intracontinental rifts and passive margin sedimentary basins, some with the most complete stratigraphic columns of the South Atlantic rift basins. Volcanism was voluminous in the southern margin of Brazil (Espírito Santo, Campos, Santos and Pelotas basins), but almost absent during the Neocomian rift phase of the intracontinental rifts in the northeastern region (e.g., Tucano and Recôncavo basins), allowing sampling of several tectono-stratigraphic sequences above the Precambrian basement.

Results of intensive drilling in the Sergipe-Alagoas Basin indicates that the stratigraphic column may be divided into 4 main sequences: pre-rift, rift, transitional and drift. Several regional unconformities can be characterized, some of them extending into the deep-water region:

- (1) eo-oligocene/neo-ocene;*
- (2) middle/eo-eocene;*
- (3) eo-paleocene/neo-maastrichtian;*
- (4) santonian-coniacian/turonian;*
- (5) intra-neocomian (Aratu/Rio da Serra stages);*
- (6) eo-cretaceous/neo-jurassic;*
- (7) permian/carboniferous;*
- (8) carboniferous/cambrian and*
- (9) cambrian/pre-cambrian.*

These unconformities, rather than simply registering variations of the eustatic sealevel, bear important tectonic implications.

Pre-rift sedimentary layers (Paleozoic to Upper Jurassic sequences) outcrop onland and form a thin veneer (100 - 300 m) above the Precambrian basement in the subsurface. Syn-rift strata (Neocomian to Barremian sequences) are mainly composed of siliciclastic rocks deposited in fluvio-lacustrine environments. First marine incursions in the basin resulted in local deposition of Aptian evaporites, which are separated from the rift-phase sediments by a major regional angular unconformity. Thermal phase sediments are predominantly shallow to deep water siliclastics, but include widespread deposition of limestones in the Albian, and local carbonate platforms from Turonian to Recent. The deep-water region is characterized by uplift and rotation of rift blocks, which are affected by major erosional episodes, and by several volcanic intrusions that affect the sedimentary layers up to the Tertiary. The boundary with oceanic crust is marked by thick wedges of seaward-dipping reflectors which are probably composed of volcanic layers formed during inception of the mid-ocean spreading ridge.

One of the models for the evaporite layers observed in the shallow-water regions of the Sergipe-Alagoas basins evokes salt deposition in restricted lagoons during the Aptian, controlled by depositional troughs originally formed along basinward-dipping faults, near the present-day coastline. These troughs were subsequently affected by a westward tilt of the basement during thermal subsidence, resulting in concentration of salt diapirs along a narrow belt sub-parallel to the coastline, and absence of diapirs in the slope and deep basin. However, regional seismic interpretation in the northeastern margin of Brazil suggests that although the salt province is comparatively narrower than in the southeastern margin, salt tectonics might be interpreted as far as the crustal limit of the basin. Several features with a moundlike geometry that are observed in regional seismic profiles in the deep-water region of the Sergipe and Alagoas basins have had alternative interpretations as basement highs, volcanic plugs, tilted rift blocks, reefs, salt diapirs, transpression along fracture zones, or even correspond to diffractions caused by canyons in the upper stratigraphic sequences. End-member hypotheses for specific structures (particularly salt diapirs and igneous intrusions) may be tested by different methodologies, and compared with analog examples from other sedimentary basins worldwide. There is plenty of evidence for volcanic plugs in the deep water region of the Sergipe/Alagoas Basin, particularly because of the potential methods interpretation, but nonetheless, there are some seismic indications that deep-water salt diapirism is a valid working hypothesis for some of these features.