

O desenvolvimento da margem rifteada vulcânica albiana no Nordeste brasileiro e seu perfil para a geração de petróleo

The evolution of the Albian volcanic rifted margin in the Northeast of Brazil and its potential for oil generation

José Maurício Caixeta | Delzio de Lima Machado Junior | Talles Souza Ferreira | Marco Antonio Thoaldo Romeiro

resumo

Este trabalho apresenta uma interpretação sobre o setor oriental das bacias do Nordeste brasileiro, onde ocorreu intenso estiramento crustal, associado a profuso vulcanismo intraplaca de idade eoalbiana. Discute-se a ocorrência de novos depocentros, decorrente desse estágio tectônico, com potencial para gerar e conter petróleo. O progresso da exploração de petróleo, mar adentro, nas bacias da margem leste brasileira gerou um acervo sísmico de reflexão de longo alcance, com registros que possibilitam imageamento da crosta até 30km de profundidade. A interpretação sísmica associada a dados de poços exploratórios permitiu identificar novas estruturas crustais, entre elas riftes eoalbianos na porção distal mais a leste das bacias do Nordeste brasileiro. Tal conjunto de dados permitiu, ainda, a visualização da geometria da crosta continental profunda sob essas bacias, as estruturas internas e a zona de transição crosta continental/oceânica. Nesse contexto, destaca-se a ocorrência de crosta continental hiperdistendida, sob uma ampla área subsidente, com depocentros que se estendem até cerca de 200km além do limite crustal até agora admitido. Ainda através de seções sísmicas, foram interpretadas duas

interfaces notáveis – crosta superior/inferior e o limite crosta/manto. O contraste reológico distinto entre crosta continental superior e inferior reflete domínios rúptil e dúctil e determina, sobretudo, a zona de ocorrência e a natureza de falhas – planares ou lítricas, de alto ou baixo ângulo, bem como blocos falhados ou rotacionados. Já o horizonte dúctil caracteriza o topo da crosta inferior, para onde convergem as superfícies de descolamento das grandes falhas, que para baixo desaparece. O limite crosta continental–oceânica delimita a área de ocorrências dos novos depocentros, presumivelmente novas áreas geradoras de petróleo. Isso se confirmou com a perfuração dos poços exploratórios em águas profundas na Bacia de Sergipe, que permitiu reconhecer também eventos ígneos associados à fase *sag* do rifte albiano (c.a. 104 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$), além da descoberta de óleo e gás em reservatórios do Cretáceo Superior. Assim, a presente associação mostrou-se bastante animadora: novo *play* exploratório ligado às depressões tectônicas já pode ser rastreado na margem nordeste brasileira e nas bacias da margem conjugada do lado africano, com perspectivas de descobertas de acumulações de petróleo líquido e gás.

Palavras-chave: limite crosta continental | crosta oceânica | rifte albiano | crosta continental hiperdistendida

abstract

In this article, an interpretation is given to the easternmost portion of Northeastern Brazilian basins, where intense crustal extension occurred, associated with profuse intra plate volcanic activity in the early Albian period. The occurrence of new depocenters, arising from this tectonic stage and having the potential to generate exploration in the basins along the Eastern Brazilian coast resulted in acquisition of extensive seismic reflection data with records that enable crust imaging as deep as 30km. The interpretation of this dataset, associated with data from the exploratory wells, has enabled the identification of new crustal structures, among which are the early Albian rifts in the distal portion east of the Northeastern Brazilian basins. This set of data also permits the visualization of the geometry of the deep continental crust under these basins, their internal structures and the continental/oceanic crustal transition zone. In this context, the prominent feature is the occurrence of the hyper-extended continental crust, under a wide-ranging subsidence area, with depocenters that extend to around 200km beyond the presently recognized crustal limit. The seismic sections also interpreted two notable interfaces – the upper/lower crust and the crust/mantle border. The distinct rheological contrast between the upper and lower continental crusts reflects brittle and ductile deformation patterns and determines, principally, the zone of the occurrence and the nature of the faults – planar or listric, wide or narrow angle, as well as faulted or rotated blocks. The ductile horizon, however, characterizes the top of the lower crust, where the surfaces of the large fault displacements converge. They disappear lower down. The continental–oceanic border crust delimits the area of the new depocenters, presumably new oil generating areas. This has been confirmed by the drilling of exploratory wells in the deep waters of the Sergipe Basin, which also permitted the recognition of igneous events associated with the sag phase of the Albian rift (c.a. 104 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$), in addition to the discovery of oil and gas in the Upper Cretaceous reservoirs. Accordingly, this association is seen to be highly encouraging: a new exploratory play connected with the tectonic depressions can already be tracked in the north-eastern Brazilian coast and in the coastal basins connected to the

african side, with prospects for the discovery of accumulations of oil and gas.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: *continental and oceanic crust boundary | Albian rifted margin | hyper-extended continental crust*

introdução

A compreensão do Albiano (113,0–100,5 Ma) da margem leste brasileira reflete os estudos de sedimentação carbonática, repleta de *mudstones*, margas de águas profundas e barras de *grainstones* em plataformas rasas e resulta, sobretudo, do conhecimento adquirido com a perfuração de poços de petróleo nas bacias de Campos, Santos e Espírito Santo. Porém, neste trabalho, o estudo desse andar destaca o efeito do tectonismo na margem nordeste brasileira, ligado ao último estágio de evolução das bacias costeiras no limiar da formação do Atlântico Sul.

Durante o Albiano, as bacias costeiras, principalmente das regiões Sul e Sudeste, já apresentavam condições marinhas francas, com margem passiva (tipo drifte) desenvolvida nas porções proximais, onde claramente a sessão carbonática se sobrepõe à sequência evaporítica de idade aptiana. Esta, por sua vez, está assentada em discordância sobre a sequência clástica da fase rifte precoce (barremiana), na maioria das vezes contendo basaltos do vulcanismo Paraná-Etendeka como embasamento.

Com a migração natural da atividade exploratória mar adentro e a aquisição sísmica de boa qualidade, com registro até 30km (ou 12s), foi possível visualizar o limite crosta–manto, a passagem crosta continental–oceânica, além de identificar os sistemas de riftes mais novos. Estes se distinguem dos riftes precedentes, mais proximais, pela localização distal e por serem preenchidos, em sua quase totalidade, por sequências vulcânicas em áreas de crosta continental hiperdistendida, formados na iminência da ruptura continental.

Até agora não havia evidência, além da Bacia de Pelotas (Stica *et al.*, 2014), de magmatismo exclusivamente vinculado à fase rifte nas bacias costeiras brasileiras. Esse estágio de desenvolvimento,

tão comum em bacias desse tipo mundo afora, ainda não havia sido reportado, sugerindo a falta de um importante estágio de evolução tectônica e um entendimento incompleto sobre a história das mesmas. Riftes de evolução completa – gerados a partir do estiramento crustal, culminando com formação de crosta oceânica e separação de placas – ainda não haviam sido caracterizados na margem brasileira.

Neste sentido, a principal abordagem aqui feita é a documentação e argumentação da existência de um sistema de riftes vulcânicos marginal (*volcanic rifted margin*), situado nas bacias costeiras do Nordeste brasileiro em áreas até agora desconhecidas. Estes riftes distais têm como principais características sucederem os proximais e apresentarem profusão de vulcanismo. São, portanto, novos depocentros, que podem conter sedimentos clásticos em áreas ainda inexploradas que representam o estágio derradeiro de evolução tectônica das bacias costeiras, com histórias termomecânicas ainda por estudar. Foram interpretados ao longo da margem leste hoje submersa, desde o litoral da Bahia até Pernambuco, situados na faixa externa das bacias, mas que afloram na região costeira ao sul de Recife.

Assim, o substrato para os riftes albianos é composto, em parte, por rochas de seqüências adjacentes e imediatamente inferiores na cronoestratigrafia local, de idade neoptiana (Andar Alagoas), e pelo embasamento regional.

área de estudo e métodos empregados

A área de estudo se estende pelas bacias sedimentares de Jequitinhonha, Almada, Camamu, Jacuípe, Sergipe, Alagoas e Pernambuco–Paraíba, situadas entre as cidades de Ilhéus, no sul da Bahia e Recife, como limite norte (fig. 1a). Nesta porção, o embasamento regional é formado pelo Cráton do São Francisco e suas faixas móveis marginais. A estratégia aplicada considera a assinatura do mapa gravimétrico residual, sísmica 3D e sísmica 2D de longo alcance, tanto vertical como longitudinalmente (linhas 2D do levantamento Ion-GXT). O traçado das zonas de fraturas oceânicas serviu para balizar a posição das margens africana e brasileira. Após isso, procedeu-se à eliminação dos limites do assoalho oceânico na tentativa de justapor as margens conjugadas de acordo com Manatschal (2004), Huisman e Beaumont (2011) e Aslanian e

Moulin (2013), empregando-se o programa GPlates (Sandwell et al., 2014) (fig. 1b).

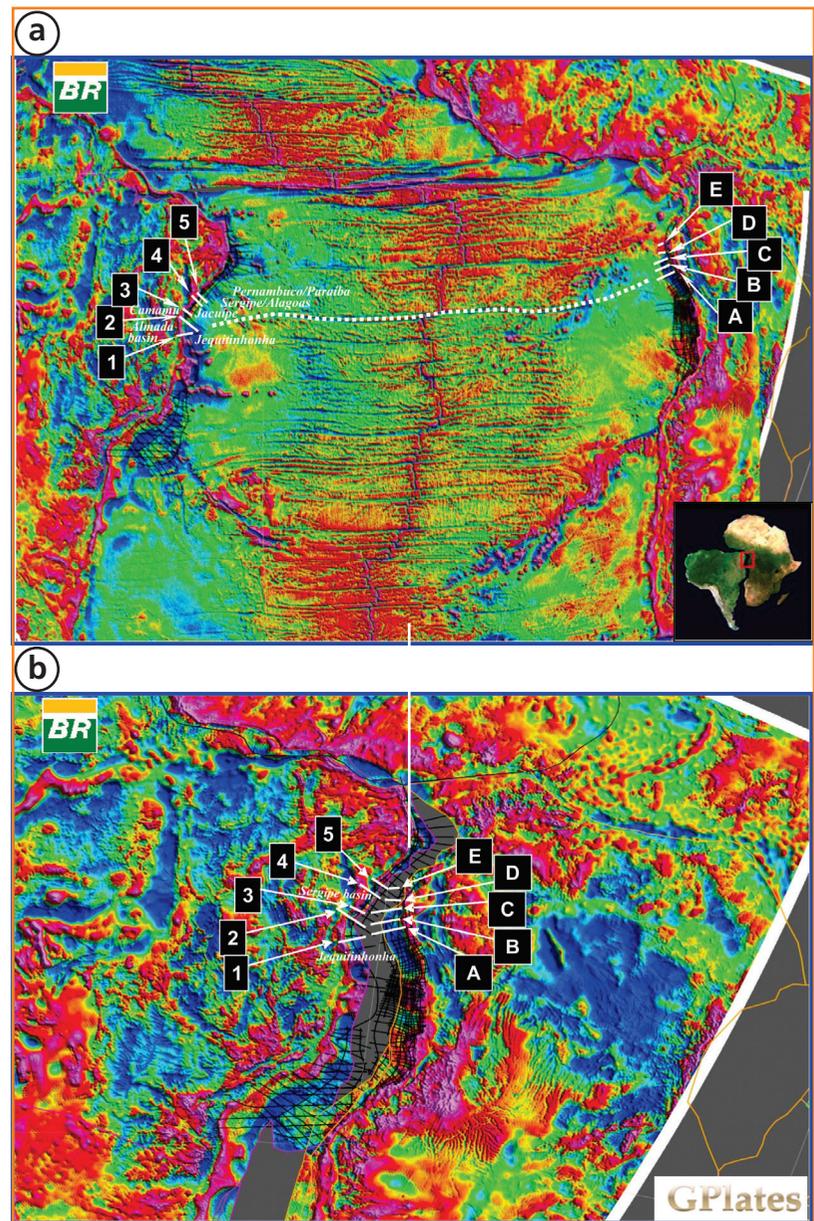


Figura 1 (a) – Figura 1 - (a) Mapa Bouguer de anomalia ar livre com localização das bacias marginais do Nordeste brasileiro, Oeste africano (Gabão) e seções geológicas (1 a 5, A a E). A linha pontilhada indica a correlação das margens conjugadas; (b) mapa restaurado com a posição das seções geológicas conforme programa GPlates (Sandwell et al., 2014, mod.). Consistiu na remoção integral da crosta oceânica para obter o melhor ajuste da posição das margens conjugadas.

Figure 1 - (a) Free air Bouguer gravimetric map with sedimentary basin location for Brazilian Northeast and West African (Gabon) margins and geological sections (1 to 5, A to E). Dotted line shows the correlation between conjugated margins; (b) - restored free air map with geological cross sections using GPlates software (Sandwell et al., 2014, mod.). The oceanic crust was removed to promote the best-fit correlation between conjugated margins.

Embora o grid sísmico Ion-GXT seja abrangente (5.246km lineares), com linhas *strike* e *dip* cobrindo praticamente todas as bacias da margem leste da Bahia para norte, o espaçamento entre linhas é da ordem de 50km, sendo o comprimento médio na direção *dip* da ordem de 200km. Isso favoreceu o mapeamento do limite crosta continental–oceânica (fig. 1b). O registro sísmico de 12s (ou 30km) permite visualizar também o limite crosta–manto, bem como conhecer a espessura da crosta continental, seus estiramentos e suas descontinuidades. Tais informações são importantes para estudos de modelagem de sistemas petrolíferos, que dependem das taxas de estiramento e paleotemperaturas, deste modo inferidos.

Com base nestes novos dados sísmicos profundos, alguns aspectos são notáveis. O primeiro é que existem reflexões sísmicas intensas e contínuas a 8,5s visíveis nas seções sísmicas. Poderiam representar descontinuidades intracrosta internas ao próprio Cráton do São Francisco como remanescentes metamórficos de antigas faixas dobradas, sequências sedimentares de antigas bacias soterradas ou mesmo complexos ígneos intrusivos mais jovens. Devido à grande profundidade em que ocorre (em torno de 20km), a interpretação feita aqui é que são reflexões da base da crosta continental (descontinuidade de Mohorovicic), indicando a passagem para o manto litosférico subjacente, excluindo assim as demais opções acima.

O trabalho consistiu, basicamente, no reconhecimento e delimitação da crosta oceânica nas seções sísmicas das linhas do lado do Brasil e sua conjugada do lado do Gabão. Nesse ponto, as macro-heterogeneidades observadas nos continentes, tais como *trends* estruturais, lineamentos em faixas móveis, falhas de grande porte, limites de bacias, entre outras, servem para o posicionamento e correlação das seções sísmicas (Aslanian *et al.*, 2009; Moulin e Aslanian, 2010). A eliminação das porções da crosta oceânica permitiria, teoricamente, a observação da geometria das bacias outrora contíguas (Manatschal, 2004; Huismans e Beaumont, 2011; Lavier e Manatschal, 2006). A junção dos continentes assim feita é apenas razoável, porque o material ígneo da época do rifteamento acrescentou um volume considerável de rocha aos sedimentos da bacia, não permitindo a restauração do seu perfil original.

o sistema de riftes do Leste africano como paradigma

O modelo geológico aqui adotado faz analogia ao Sistema de Riftes do Leste africano (*Gregory Rift System*, Dawson, 2008), complementado pelos afloramentos albianos das bacias de Pernambuco e Alagoas. No primeiro caso, é notável a profusão de rochas vulcânicas, tanto em volume quanto em diversidade, constituintes do material que preenche as trincheiras tectônicas dos riftes africanos. Destaca-se a quantidade e magnitude dos cones vulcânicos ao longo de praticamente todo o sistema (Frostick, 2005), cenário admitido análogo ao que existiu durante o Albiano para o sistema de riftes do Nordeste brasileiro (fig. 2). O segundo caso representa a única situação em que ocorre um sistema rifte com presença de rochas vulcânicas e intrusivas aflorando na margem leste brasileira. Neste caso, um conjunto de resultados radiométricos indica idades albianas (103–104 Ma) para rochas intrusivas e extrusivas de afloramentos nas bacias de Pernambuco e Alagoas (Almeida *et al.*, 1988; Nascimento, 2003).

Por outro lado, novos resultados radiométricos em basaltos alcalinos, provenientes de poços recentemente perfurados pela Petrobras na Bacia de Sergipe, indicam atividade ígnea contemporânea entre o magmatismo do rifte de Pernambuco e Alagoas e a Bacia de Sergipe durante o Albiano. Assim, estas rochas teriam a mesma idade do magmatismo terminal dos riftes distais observados em Sergipe e de resto pela margem leste, uma vez que se trata de um evento regional de grande magnitude, correlacionável por sísmica pelas bacias do Nordeste brasileiro. Infere-se que o vulcanismo identificado nas porções mais distantes das bacias da margem leste também seja de composição alcalina (como em Sergipe), assim como as ígneas do Leste africano (fig. 2). Porém, nos riftes proximais, incluindo o Sistema Recôncavo–Tucano–Jatobá – sabidamente abortados no Aptiano (Andar Alagoas) – nunca foi reportada atividade ígnea.

Então, como explicar a ausência de magmatismo neste setor se a fase vulcânica é uma característica das mais notáveis nos riftes atuais em formação? Esse registro

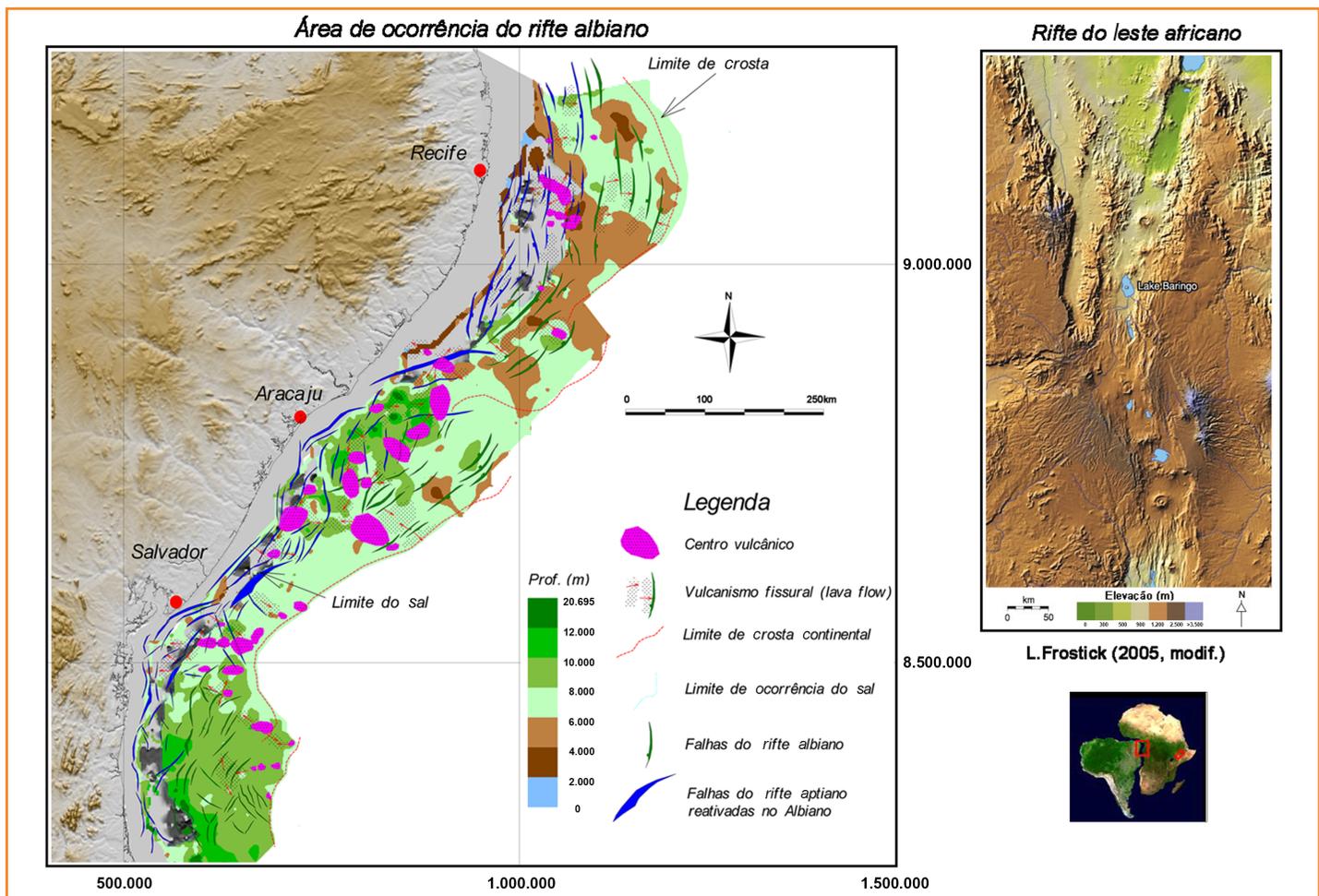


Figura 2 – Comparação entre o sistema de riftes do leste africano e dos riftes albianos do nordeste brasileiro (mesma escala). Os vulcões estampados na imagem de radar dos riftes africanos (Frostick, 2005) seriam equivalentes recentes dos vulcões albianos, vistos nas seções sísmicas (polígonos rosa com litologia de rocha extrusiva).

Figure 2 – Comparison between the modern east african rift valley and the northeastern brazilian albian ones (the same scale). The volcanoes in the radar images (Frostick, 2005) are recent equivalents to the albian volcanoes as interpreted in seismic sections (pink polygons with extrusive rock lithology).

haveria de estar presente em algum lugar nas bacias até então conhecidas. E de fato está, pois, como será detalhado adiante, ele ocorre mais a leste, acompanhando os sistemas de falhas normais que definem inúmeros grabens preenchidos por sucessões de derrames e intrusivas. Os derrames apresentam espessura crescente em direção ao sítio de abertura (SDRs), sendo formados em regime de crosta continental hiperdistendida (figs. 3 e 4) até cerca de 200km a leste do que era inferido como limite de crostas, antes das linhas sísmicas profundas (fig. 2).

contexto tectônico de formação dos riftes vulcânicos albianos

A história do Sistema de Riftes do nordeste brasileiro, assim como seus contemporâneos ao longo da costa, decorre da ruptura do continente Gondwana a partir do Barremiano (c.a. 130 Ma) até a separação final nos diferentes blocos continentais – América do Sul, África, Austrália, Índia e Madagascar, já no Albiano. No setor aqui abordado, durante o rifteamento, formou-se uma série de lagos tectônicos síncronos que sofreu

contínuo assoreamento em ambiente essencialmente continental, com ingressões marinhas efêmeras que se tornam mais frequentes durante o Neoptiano (Dias, 1991, 2005; Dias-Brito, 2000; Arai, 2009; fig. 5). Contudo, a crucial passagem entre os depósitos do rifte barremiano para a seção marinha sobreposta ainda carece de detalhe. Na maior parte das bacias costeiras brasileiras, esta passagem ocorre na sequência transicional evaporítica. Porém, existem locais em que é feita sobre uma extensa discordância erosiva, onde pode não ocorrer parte significativa da seção sedimentar e nem mesmo sal. Admite-se aqui que esta superfície erosiva resulte da formação do rifte ora apresentado (no Eoalbio), quando suas margens teriam sido elevadas por efeito do *rebound* isostático.

Menos ainda se conhece sobre a zona de transição crosta continental–oceânica no registro das nossas bacias. Neste contexto, o sistema vulcânico de riftes aqui abordado, à semelhança com outras bacias mundiais (Geoffroy, 2005), constitui uma feição tectônica notável desta

região. A maior parte das margens continentais vulcânicas (passivas) é caracterizada por espessas cunhas de derrames (Menzies *et al.*, 2002; Franke, 2013). Sismicamente, estes são visíveis como reflexões mergulhantes em direção ao mar (*seaward dipping reflectors* – SDRs; fig. 3), resultado de sucessivos eventos vulcânicos formados junto às margens continentais no clímax da fase rifte (Skogseid, 2001; Stica *et al.*, 2014). No caso das bacias do nordeste brasileiro, as melhores evidências geológicas correspondem à profusão de rochas vulcânicas alcalinas preenchendo o sistema de riftes distal albio, bem como as intrusivas associadas. Porém, não havia até agora evidências inequívocas de magmatismo resultante da separação continental propriamente dita, i.e., formado sobre crosta continental rompida nas vizinhanças de crosta oceânica.

O modelo aqui concebido preconiza que uma porção elevada do embasamento constitui a borda dos riftes precedentes, em resposta à ascensão de material mantélico profundo (figs. 5 e 6). Sobre este embasamento elevado irá ocorrer

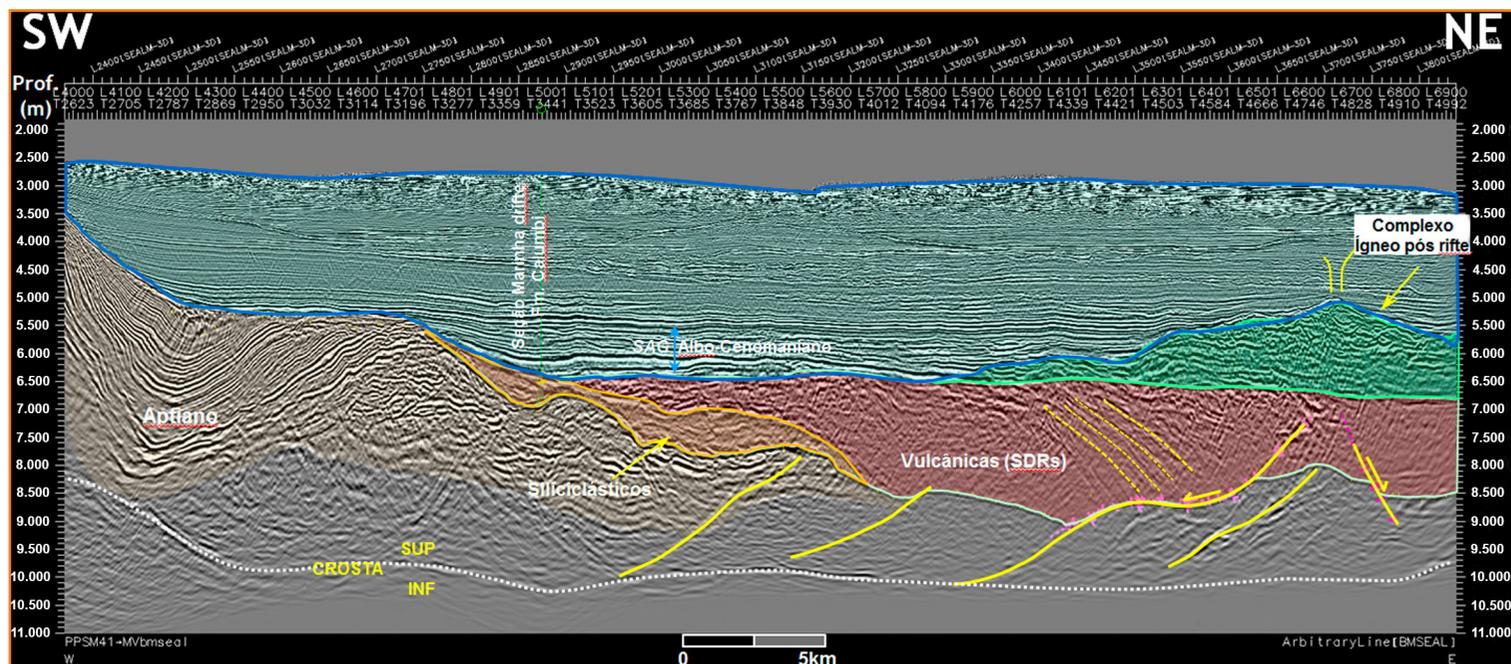
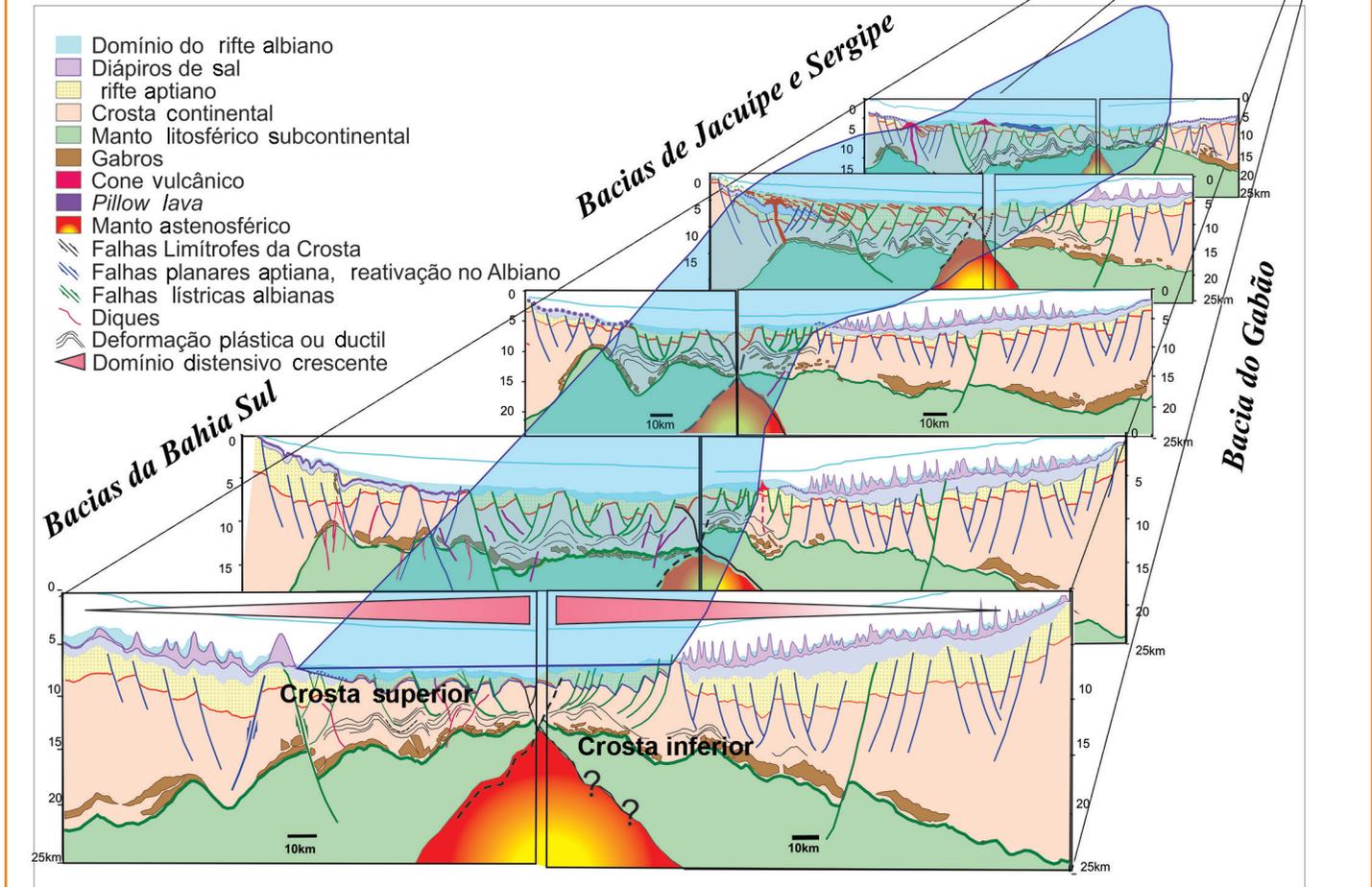


Figura 3 – Seção sísmica no rifte vulcânico distal albio. No nível do seu embasamento há forte deformação na seção superior do rifte proximal (Aptiano) e falhas antitéticas de baixo ângulo com descolamento no topo da crosta inferior. Sobre uma ampla superfície de discordância ocorre geometria de graben assimétrico contendo SDRs vulcânicos, sucedido pela fase sag marinha albocenomaniana. Seção no *dip* deposicional, águas profundas da Bacia de Sergipe.

Figure 3 – Depth seismic cross section on the albian distal volcanic rift. Strong deformation in the rift basement occurs above the Aptian proximal rift deposits. Low angle antithetic faults detaching on the lower crust top. There is asymmetric graben geometry filled by volcanic SDRs, succeeded by Albian to Cenomanian marine sag sequence over a wide surface of discordance. Depositional dip section in the deep waters of the Sergipe Basin.

**Bacia albiana implantada na crosta continental hiperdistendida
(bacias mais jovens em direção à “proto” cadeia meso-oceânica)**



o rifteamento albian, em uma crosta continental afinada (Tempo I). Os riftes proximais mais antigos mantiveram, assim, seus registros preservados lateralmente, incluindo toda a seção evaporítica sobreposta deformada por halocinese. Na sequência (Tempo II), deu-se o rifteamento albian, de natureza dominante vulcânica, desenvolvido sobre as porções elevadas do embasamento. Ressalte-se que, pela cronologia identificada, a formação dos sistemas de riftes albianos ocorreu necessariamente após o estágio evaporítico do Atlântico Sul, em uma faixa acrescida tectonicamente pela (hiper) distensão crustal (fig. 4).

A figura 7 exemplifica um perfil geológico sobre a zona de transição crosta continental-oceânica, com geometria e densidades empregadas para elaboração do modelo gravimétrico.

Note-se a presença dos grabens vulcânicos portadores dos SDRs desenvolvidos sobre crosta continental hiperdistendida (fig. 3), em posição adjacente aos riftes mais antigos. Observa-se que existe um bom ajuste entre o perfil gravimétrico regional sobre a linha sísmica e o estimado pelo modelo.

formas de ocorrência, composição e idades do magmatismo da margem vulcânica no Nordeste brasileiro

Quanto à forma de ocorrência constatada por sísmica, as rochas ígneas formam cones

Figura 4
Bacia rifte albian implantada na crosta continental hiperdistendida. Os depocentros são mais jovens em direção à protocadeia meso-oceânica.

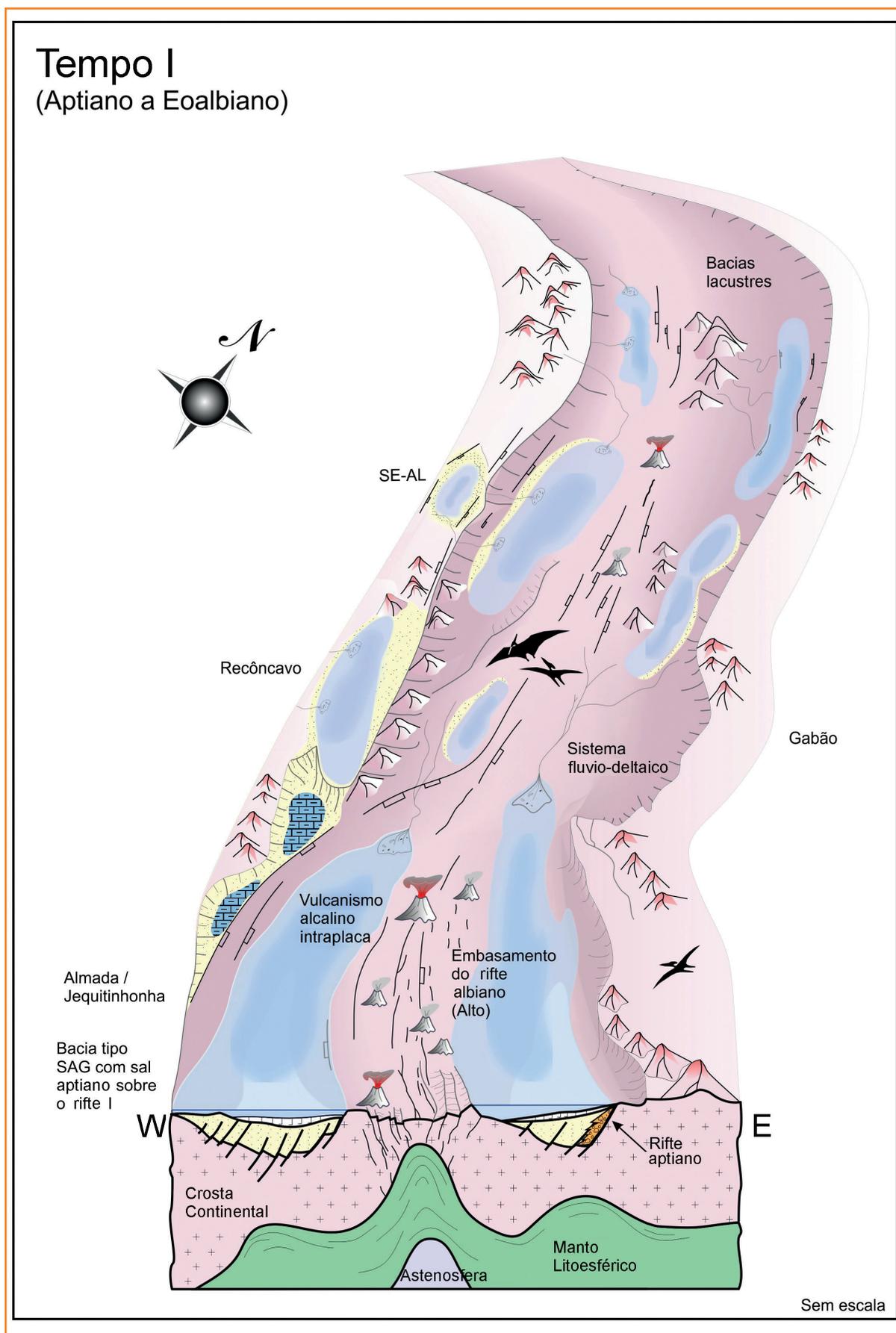
Figure 4
Albian rift basin implanted over hyper-extended continental crust. The depocenters are more recent toward the proto meso-oceanic chain.

Figura 5

Bloco-diagrama com a fisiografia esquemática da margem nordeste brasileira no final do Aptiano ao Eoalbio. Presentes sistemas lacustres descontínuos, vulcanismo alcalino intraplaca e rifteamento resultante do afinamento crustal na região do *necking* da crosta continental. São referenciadas as bacias sedimentares conforme a figura 4.

Figure 5

Block diagram showing the physiography of the northeastern Brazilian margin during the late Aptian and early Albian. Emphasis was given to the discontinuous lake systems, the intra plate (alkali) volcanism and the thinning of the continental crust in the necking zone. Sedimentary basins are named as in figure 4.



Tempo II

(Albocenomaniano – Turoniano a Neoalbiano)

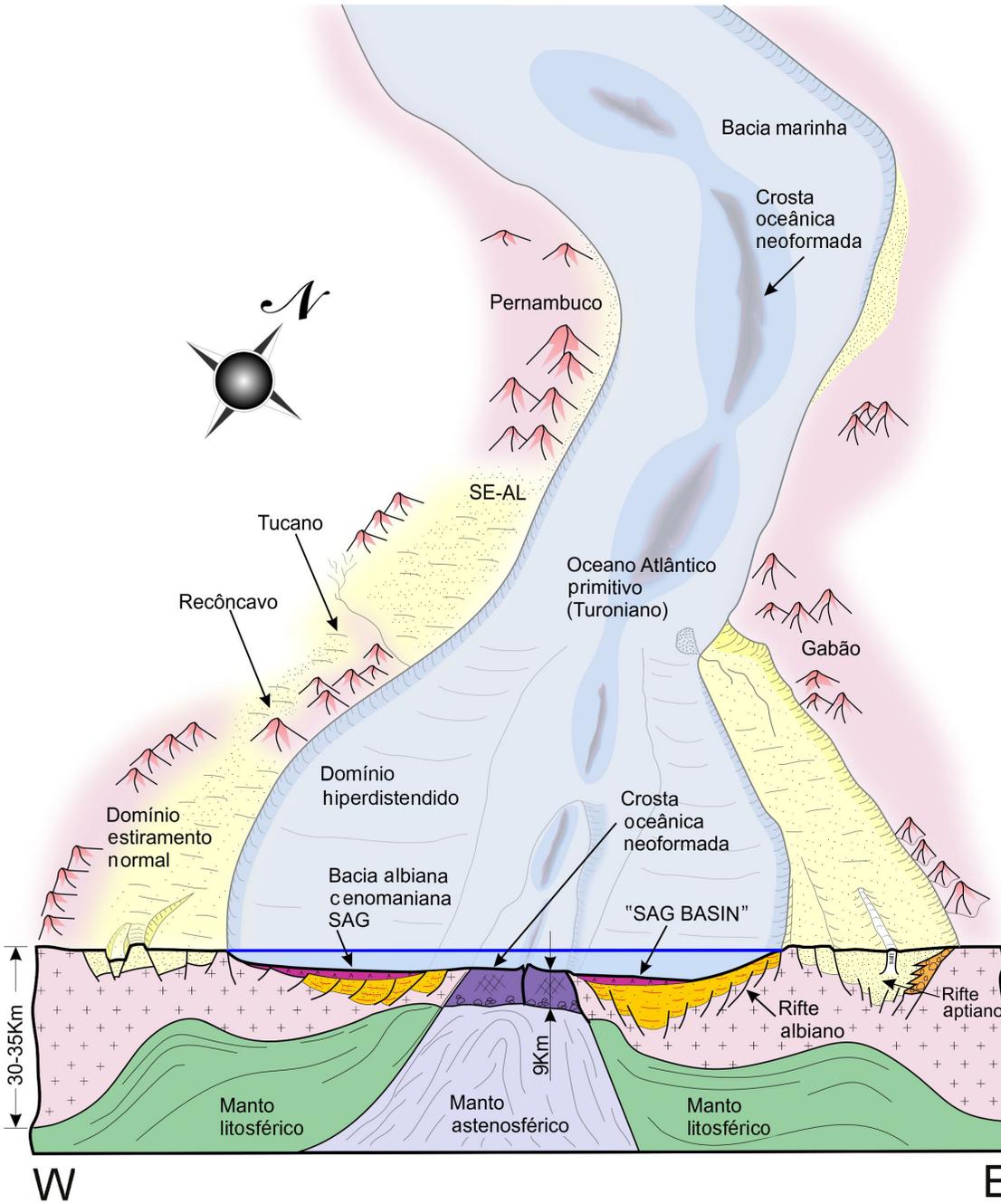


Figura 6

Bloco-diagrama da fisiografia esquemática da passagem rifte albiano/sag albocenomaniano no NE brasileiro. A expansão do rifte albiano se dá para leste em relação aos proximais (aptianos) no caso brasileiro, e para oeste, no caso das bacias albianas africanas. A ampla bacia sag albocenomaniana resulta do esfriamento da crosta continental rifteada e abatida após o Albiano (ver fig. 3).

Figure 6

Block diagram showing the physiography of the Eoalbian rift phase and the Albo-Cenomanian sag stage in the Brazilian Northeast. The increased widening is eastward in the Eoalbian rift on the Brazilian side and westward on the African side. The wide Albo-Cenomanian sag basin is due to cooling and subsidence of the rift basement after the Albian period (see fig. 3).

vulcânicos (figs. 2, 3 e 5) ou derrames condicionados por zonas de falhas (figs. 3 e 8). Em ambos os casos, indicam centros de espalhamento vulcânicos que alimentam depocentros dos meio-grabens, com estratos divergentes, muitas vezes na forma de SDRs (fig. 3), como observado em Jacuípe e em Sergipe e já referidos por Mohriak *et al.* (1998, 2000). Na Bacia de Sergipe também são frequentes rochas intrusivas na forma de diques (inclinados ou verticais) e soleiras, ocupando boa parte da seção da crosta, preferencialmente desde sua base até o Eoceno Médio (35-40 Ma). Apresentam espessuras reduzidas, como identificado em poços, mas frequentemente têm dezenas de metros, sendo bem assinaladas em sísmica. Pelo fato de serem intrusivas, apresentam alteração menos avançada do que as rochas extrusivas (figs. 9a e 9b).

Quanto à composição, as rochas intrusivas e vulcânicas amostradas em Sergipe são basaltos alcalinos. Em dois poços da Bacia de Sergipe foram recuperadas amostras de basaltos típicos de derrames. Um deles representa provável derrame associado à fase rifte (SDR) em situação semelhante à da figura 3, e o outro com belas estruturas em *pillows-lavas* (fig. 8), representantes da fase SAG de resfriamento dos riftes vulcânicos.

Quanto a idades, este último apresenta resultados ($^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$) de 104 ± 2 Ma, contemporâneos ao magmatismo albiano do litoral de Pernambuco (Nascimento, 2003). Já as rochas intrusivas, mesmo podendo se alojar em qualquer posição na coluna sedimentar, fornecem idade de $36,7 \pm 0,8$ Ma (Eoceno Médio), confirmando o observado em seções sísmicas.

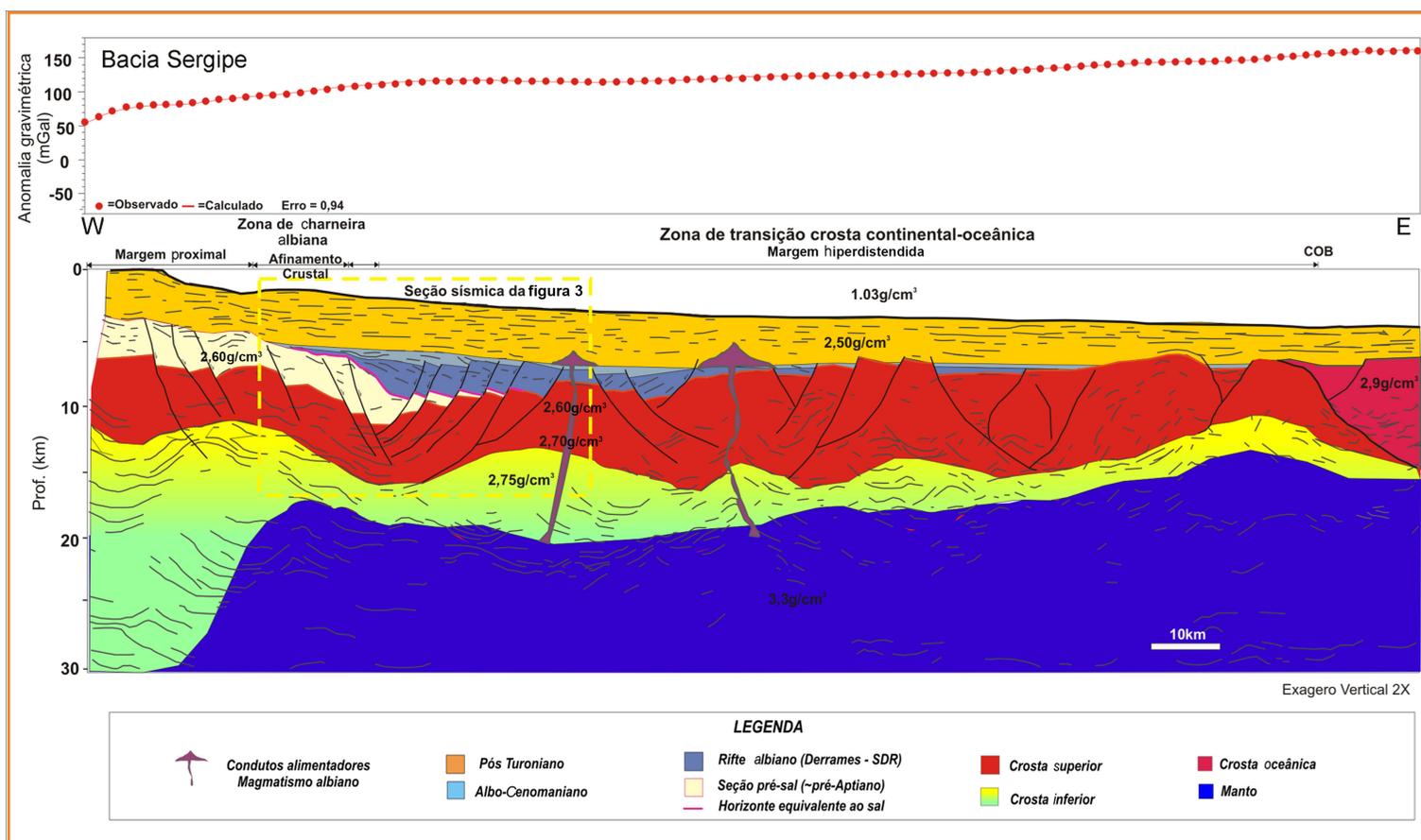


Figura 7 – Perfil geológico mostrando diferentes domínios estruturais da zona de transição crosta continental–oceânica, Bacia de Sergipe. São indicados os valores de densidade empregados no ajuste gravimétrico referente ao perfil 5 na figura 1a. Destaque para a margem hiperdistendida que coincide com a zona de transição crosta continental–oceânica. No detalhe, localização da figura 3.

Figure 7 – Geological cross section showing distinct structural domains in the continental-oceanic crust transition zone, Sergipe Basin. Different density numbers used for gravity modelling in Profile 5 (fig. 1a) are also shown. Note the hyper-extended margin that coincides with the transition zone of continental crust. In detail, is the location of figure 3.

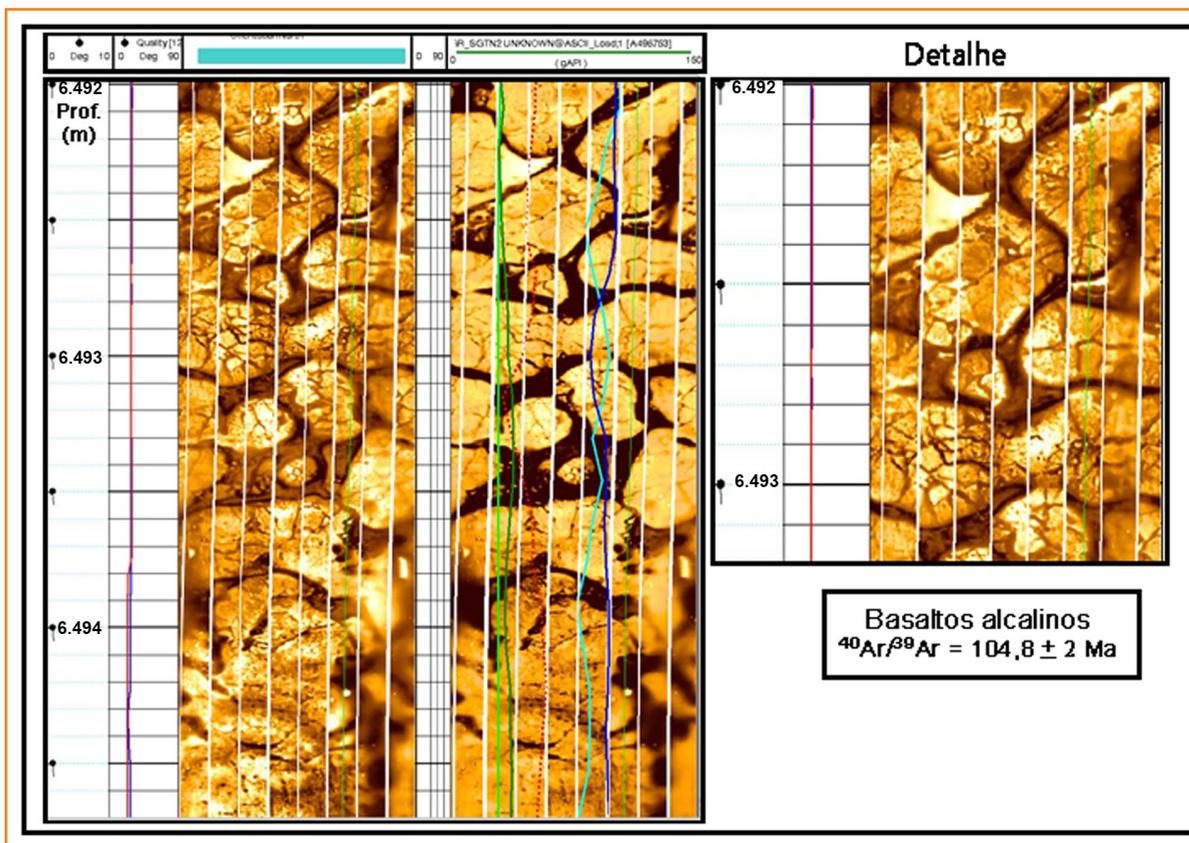


Figura 8 – Perfil de imagem (resistivo e acústico) do poço 1 SES-158 – Bacia de Sergipe. Pertence a uma espessa sequência de derrames que intercalam *pillow-lavas* e sedimentos marinhos, aqui datados ($^{40}\text{Ar}^{39}\text{Ar}$) em $104,8 \pm 2$ Ma.

Figure 8 – Resistive and acoustic image log of the 1-SES-158 well - Sergipe Basin. The pillow-lavas belong to a thick section containing flows with $^{40}\text{Ar}^{39}\text{Ar}$ around $104,8 \pm 2$ Ma in age interbedded with marine sediments.

Como referido, historicamente os riftes proximais no Nordeste não apresentam evidências de magmatismo. Porém, no setor aqui abordado foi identificado um ciclo de abertura completo, de modo que a profusão do magmatismo aumenta em direção ao limite com a crosta oceânica (Ferreira *et al.*, 2011; Caixeta *et al.*, 2013). Caracterizam, portanto, a zona de transição crosta continental–oceânica, decorrente de vulcanismo alcalino intraplaca, gerado nas primeiras emanações vulcânicas que precedem a formação da crosta oceânica. O magma teria se alojado, inicialmente, em câmaras magmáticas interpretadas em sísmica, posicionadas na base da crosta e estruturadas de modo favorável com respeito a falhas alimentadoras para horizontes cretáceos mais rasos (figs. 2, 3 e 5).

a zona de transição crosta continental e a crosta oceânica – um novo habitat para o petróleo nordestino?

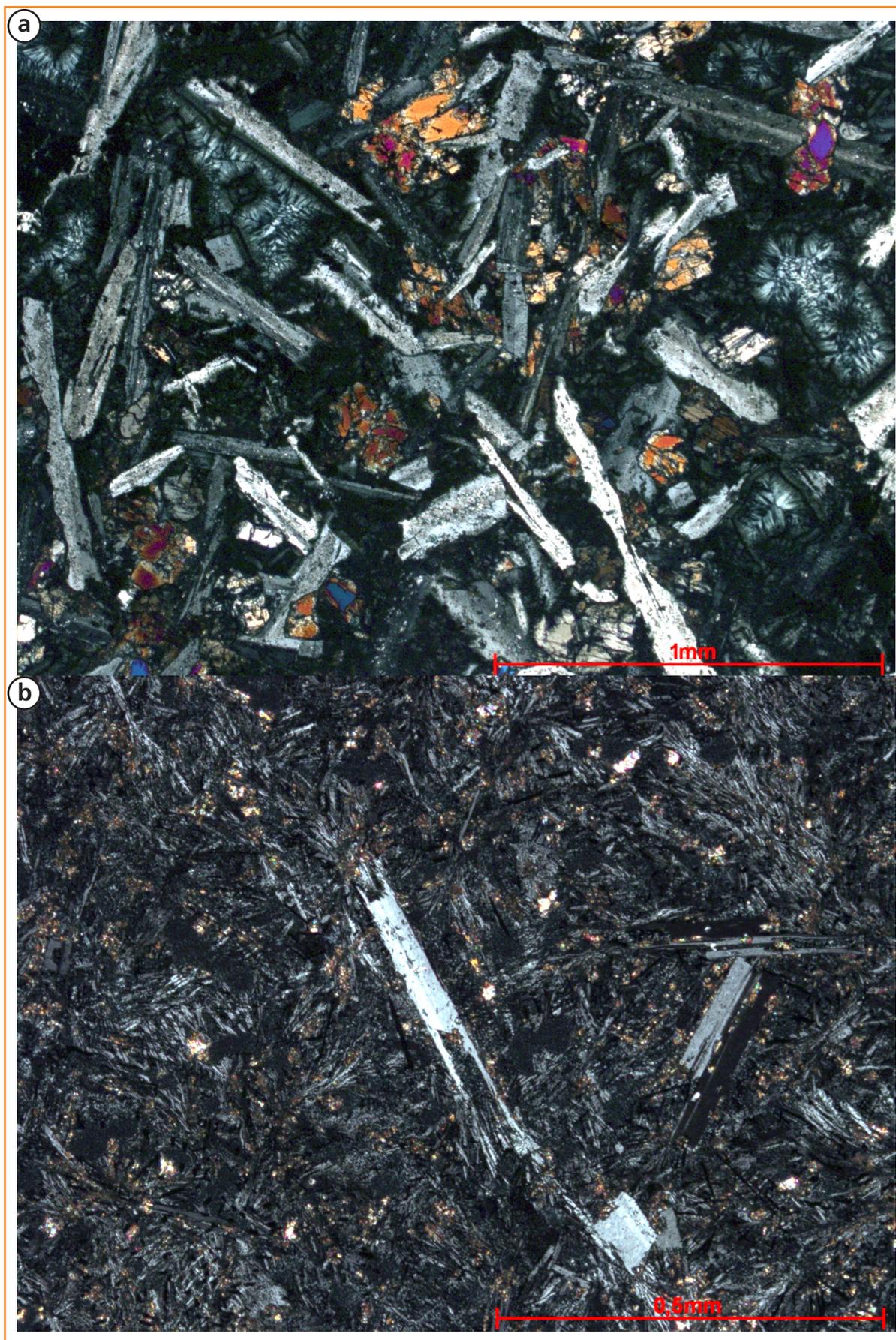
Existe uma ampla faixa marginal sobre crosta continental que pode ser acrescentada às áreas prospectáveis das bacias costeiras do Nordeste, pois tem potencial evidente para conter petróleo. São áreas que tiveram evolução geológica própria – rifteamento sobre crosta hiperdistendida, com intenso magmatismo concentrado no tempo, onde a subsidência mecânica inicial por atuação de falhas é sucedida por subsidência térmica, em resposta ao resfriamento. A conjugação desses eventos gerou amplas áreas subsidentes, a

Figura 9

(a) Poço 1-SES-158 (prof. 6.347m). Textura de intercrescimento cpx-plagioclásio e ausência de vidro vulcânico (holocristalina), característica de soleira; (b) Poço 1-SES-158 (prof. 6.347m). Plagioclásio rabo de andorinha e textura plumosa característica de ambiente subaquoso.

Figure 9

(a) 1-SES-158 Well (6,347m in depth). Cpx-plagioclase overgrowth texture and absence of volcanic glass (holocrystalline), typical in sills; (b) 1-SES-158 Well (6,347m in depth). Plagioclase forked ends and plumy texture typical of subaqueous environment.



princípio com afinidade para geração de petróleo (cozinhas de geração).

Neste contexto, será necessária uma nova abordagem exploratória, pois a bacia recém-formada tem características diferentes. Devido à ausência do sal, não há halocinese, sendo o tectonismo discreto e decorrente somente da fase rifte, com falhas de pequenos rejeitos, em resposta à compactação diferencial da seção mais nova (Cretáceo Superior).

O reconhecimento e o mapeamento da faixa limítrofe entre os dois tipos de crosta – que caracteriza a zona de transição crosta continental–oceânica sobre crosta hiperdistendida – se revestem de importância, pois se trata de uma área de fronteira que ainda baliza a ocorrência de petróleo, definindo a derradeira área prospectável das bacias costeiras. Na hipótese de uma geração exclusivamente marinha, não há mais calor de uma bacia tipo rifte associada, devendo ser a geração de petróleo dependente de outro processo. No domínio da crosta oceânica, por exemplo, as reações de serpentinização das olivinas do assoalho oceânico indicam condições de temperaturas mais baixas para a geração de petróleo. Porém, geração de HC e serpentinização não estão necessariamente vinculadas, o que mantém a prospectividade da área.

conclusões

O mapeamento sísmico sistemático das linhas de longo alcance na margem leste das bacias do Nordeste, associado à interpretação de sísmica 3D, permitiu a identificação mais criteriosa da extensão da crosta continental. De imediato, três considerações podem ser feitas:

primeira: na escala de bacia sedimentar, a evolução tectônica mostra que houve propagação de falhas e, portanto, do rifteamento de oeste para leste, com expansão (ampliação) das bacias marginais no mesmo sentido;

segunda: o limite da crosta continental não apresenta qualquer relação com a extensão pretérita do sal (evaporitos), como admitido no passado, mas se estende até perto de 200km para leste, coincidindo com a faixa de ocorrência da crosta continental

hiperdistendida, que gerou a expansão da bacia para leste;

terceira: todo o setor compreendido pelo sistema de riftes vulcânicos marginal aqui descrito apresenta características típicas de uma margem do tipo vulcânica (*volcanic rich margin*). Observou-se aqui que o magmatismo se relaciona à (hiper) distensão crustal, estando a maior parte dos derrames (SDRs) confinada em grabens produtos da tectônica distensiva.

Como consequência do desenvolvimento de uma margem hiperdistendida, triplicou-se a área prospectável nas bacias do Nordeste brasileiro para hidrocarbonetos.

agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pela oportunidade, incentivo e liberação dos dados sísmicos e de poços, bem como aos colegas do E&P/EXP/NNE, aos consultores Adriano Viana, Peter Szatmari, Juliano Stica e professores Gianreto Manatschal, Daniel Aslanian e Maryline Moulin pelas valiosas discussões que contribuíram para a elaboração do presente trabalho. Agradecemos também às sugestões dos revisores.

referências bibliográficas

ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R.; MACHADO JUNIOR, D. D. L.; DEHIRA, L. K. Magmatismo pós-Paleozoico no Nordeste Oriental do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 18, n. 4, p. 451-462, 1988.

ARAI, M. Paleogeografia do Atlântico Sul no Aptiano: um novo modelo a partir de dados micropaleontológicos recentes. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, p. 331-351, maio/nov. 2009.

ASLANIAN, D.; MOULIN, M.; OLIVET, J. L.; UNTERNEHR, P.; MATIAS, L.; BACHE, F.; RABINEAU, M.; NOUZÉ, H.; KLINGELHOFFER, F.; CONTRUCCI,

- I.; LABALIS, C. Brazilian and African passive margins of the Central Segment of the South Atlantic Ocean: kinematic constraints. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 468, n. 1-4, p. 98-112, Apr. 2009.
- CAIXETA, J. M.; FERREIRA, T. S.; RIGOTI, C. A.; OLIVEIRA, J. A. B. Arquitetura crustal da margem nordeste: uma nova visão para a ruptura da margem brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46., 2013, Santos. **Anais...** Santos: Sociedade Brasileira de Geologia, 2013.
- DAWSON, J. B. **The gregory rift valley and Neogene-recent volcanoes of Northern Tanzania**. London: The Geological Society, 2008. 112 p. (Memoirs, 33).
- DIAS, J. L. **Análise estratigráfica e evolução da fase rifte nas bacias da margem leste e sudeste do Brasil**. 1991. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- DIAS, J. L. Tectônica, estratigrafia e sedimentação no andar aptiano da margem leste brasileira. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 7-25, 2005.
- DIAS-BRITO, D. Global stratigraphy, palaeobiogeography and palaeoecology of Albian–Maastrichtian pithonellid calcispheres: impact on Tethys configuration. **Cretaceous Research**, London, v. 21, n. 2-3, p. 315-349, Apr. 2000.
- FERREIRA, T. S.; CAIXETA, J. M.; RIGOTI, C. A. The diachronous Aptian-Cenomanian rifting controlled by basement inheritance along the Brazilian Northeastern margin. In: INTERNATIONAL GONDWANA SYMPOSIUM, 14., 2011, Búzios. **Anais...** Rio de Janeiro: Meta Marketing e Eventos, 2011.
- FRANKE, D. Rifting, lithosphere breakup and volcanism: comparison of magma-poor and volcanic rifted margins. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 43, p. 63-87, May 2013.
- FROSTICK, L. Rift valleys. Tectonics. In: SELLEY, R. C.; COCKS, L. R. M.; PLIME, I. R. **Encyclopedia of Geology**. Amsterdam: Elsevier, 2005. p. 434-442.
- GEOFFROY, L. Volcanic passive margins: les marges passives volcaniques. **Comptes Rendus Geoscience**, Paris, v. 337, n. 16, p. 1395-1408, 2005.
- HUISMANS, R.; BEAUMONT, C. Depth-dependent extension, two-stage breaking and cratonic underplating at rifted margins. **Nature**, v. 47, p. 74-80, May 2011.
- LAVIER, L. L.; MANATSCHAL, G. A mechanism to thin the continental lithosphere at magma-poor margins. **Nature**, v. 440, p. 324-328, Mar. 2006.
- MANATSCHAL, G. New models for evolution of magma-poor rifted margins based on a review data and concepts from West Iberia and the Alps. **International Journal of Earth Sciences**, v. 93, n. 3, p. 432-466, June 2004.
- MENZIES, M. A.; KLEMPERER, S. L.; EBINGER, C. J.; BAKER, J. Characteristics of volcanic rifted margins. In: MENZIES, M. A.; KLEMPERER, S. L.; EBINGER, C. J.; BAKER, J. (Ed.). **Volcanic Rifted Margins**. Boulder: The Geological Society of America, 2002. p. 1-14. (Special Paper, 362).
- MOHRIAK, W. U.; BASSETTO, M.; VIEIRA, I. S. Crustal architecture and tectonic evolution of the Sergipe-Alagoas and Jacuípe basins, offshore northeastern Brazil. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 288, p. 199-220, 1998.
- MOHRIAK, W. U.; MELLO, M. R.; BASSETTO, M.; VIEIRA, I. S.; KOUTSOUKOS, E. A. M. Crustal architecture, sedimentation and petroleum systems in the Sergipe-Alagoas Basin, Northeastern Brazil. In: MELLO, M. R.; KATZ, B. J. (Ed.). **Petroleum systems of South Atlantic margins**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2000. p. 273-300. (Memoir, 73).
- MOULIN, M.; ASLANIAN, D. U. A new starting point for the south and equatorial Atlantic Ocean. **Earth Science Reviews**, Amsterdam, v. 98, n. 1-2, p. 1-37, Jan. 2010. Corrigendum to v. 103, n. 3-4, p. 197-198, Dec. 2010.
- NASCIMENTO, M. A. L. **Geologia, geocronologia, geoquímica e petrogênese das rochas ígneas cretáceas da Província Granítica do Cabo e suas relações com as unidades sedimentares da Bacia de Pernambuco (NE do Brasil)**. 2003. 302 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

SANDWELL, D. T.; MÜLLER, R. D.; SMITH, W. H. F.; GARCIA, E.; FRANCIS, R. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. **Science**, vol. 346, n. 6.205, p. 65-67, Oct. 2014.

SKOGSEID, J. Volcanic margins: geodynamic and exploration aspects. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 18, n. 4, p. 457-461, Mar. 2001.

STICA, J. M.; ZALÁN, P. V.; FERRARI, A. L. The evolution of rifting on the volcanic margin of the Pelotas Basin and the contextualization of the Paraná-Etendeka LIP in the separation of Gondwana in the South Atlantic. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 50, p. 1-21, Feb. 2014.

expanded abstract

In this article, an alternative interpretation is given to the easternmost portion of Northeastern Brazilian basins as well the continental ocean transition. There, a new huge tectono-magmatic event concentrated in the eastern portion of prior marginal basins occurred during the early Albian, along the Northeastern Brazilian Rifted Margin (NBRM).

According to the South Atlantic rift evolution, the most probable cause is a series of continental lakes with different salinities dominating the tectonic environment, until the first marine incursions and salt depositions took place in the Aptian (~113 Ma). In the Brazilian marginal sedimentary basins, evaporitic deposits were formed in this transitory phase. However, in NBRM even the salt layers - so common in South Atlantic basins - are absent because it is more recent.

The progress of oil exploration toward ultra-deep waters along the Eastern Brazilian coast resulted in the acquisition of seismic reflection data with records as deep as 30km (12s TWT), making it possible to drill exploration wells in the distal portion of the NBRM. The interpretation of this dataset allowed the visualization of an early Albian marine rift system along the NBRM; their internal structures as well as the identification of the continent-ocean boundary (COB).

The rheological behavior of the upper and lower continental crust controlled the geometry of rifted blocks, showing brittle or ductile deformation patterns, from high angle faulted blocks to rotated ones. The level in which the faults terminate coincides with the top of the ductile lower crust.

The early Albian rift system exhibits a wide variation of structural style and amount of associated magmatism along the NBRM. Throughout the NBRM, the early Albian rifting presents half-grabens with flip-flop geometry showing magmatic features such as sills and dykes, related to a broad domain of seaward dipping reflectors (SDRs) and few coarse siliciclastic beds that filled it in, resting over a wide erosional unconformity easily identified by seismic interpretation.

The Albian age of the distal sag – a post-rift system - was confirmed by lateral well samples of pillow lavas (alkali basalts) interbedded with marine sediments, as confirmed by resistivity image logging. Samples of these basalts yield 104 ± 2 Ma

($^{40}\text{Ar}^{39}\text{Ar}$) correlated with magmatic bodies that crop out onshore in the Pernambuco and Alagoas basins and were dated between 94-102 Ma ($^{40}\text{Ar}^{39}\text{Ar}$). All these structures may possibly be related to deep-water extrusive and intrusive magmatic features interpreted in deep reflection seismic sections. Furthermore, organic-rich marine shales drilled in the sag sequence above the rift stage were shown to be like the source rocks in the Upper Cretaceous oil fields recently discovered in the northeastern basins. Therefore, the architecture of the early Albian rift system plays an important role in better understanding of the tectonic evolution of the NBRM and its associated marine oil system.

autor



José Maurício Caixeta

E&P Exploração

Gestão de Ativos Exploratórios das Bacias do Norte e Nordeste

Interpretação I

jmcaixeta@petrobras.com.br

José Maurício Caixeta é graduado em Geologia (1980) pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), após quatro anos de estudos na Universidade de Brasília (UnB), onde se iniciou na Geologia. É pós-graduado em Sedimentologia e Estratigrafia pela Universidade Federal de Ouro Preto (Ufop) no ano de 1988. Na Petrobras desde 1981, atua na interpretação e avaliação de oportunidades exploratórias na margem leste brasileira. Iniciou sua carreira profissional no antigo Distrito de Exploração da Bahia (Dexba), tendo trabalhado no Laboratório de Sedimentologia, no desenvolvimento de campos de petróleo e na exploração das bacias sob jurisdição daquele distrito. Em 1995, transferiu-se para o Rio de Janeiro, tendo trabalhado nas bacias marítimas de Abstracgti, Santos e outras da margem leste brasileira. Na área internacional, deu suporte a vários projetos de natureza exploratória. É consultor sênior e tem dedicado a maior parte do seu tempo à consultoria de projetos exploratórios em diferentes áreas da geologia.



Delzio de Lima Machado Junior

E&P Exploração

Gestão de Ativos Exploratórios das Bacias do Norte e Nordeste

Interpretação I

delzio@petrobras.com.br

Delzio de Lima Machado Junior graduou-se em Geologia (1985) pela Universidade de Brasília (UnB), com mestrado na área de Metalogênese pela Unicamp (1991) e doutorado em Geoquímica e Geotectônica na Universidade de São Paulo (2000). De 1988 a 1997 trabalhou como geólogo pesquisador no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Ingressou na Petrobras em 2000 e até 2007 trabalhou como geólogo de exploração na Unidade de Exploração & Produção na Bacia de Campos, bem como em projetos de tectônica regional, sedimentação e deformação de carbonatos albianos nas bacias da Região Sudeste. Em 2008, passou a consultor técnico, atuando, além da Bacia de Campos, em projetos de abrangência regional nas bacias do Sudeste. Trabalha com projetos exploratórios na Gerência de Exploração do Norte e Nordeste e em tectônica regional concentrados nas bacias da margem leste brasileira.



Talles Souza Ferreira

E&P Norte–Nordeste

Unidades de Operações de Exploração e
Produção da Bahia

Avaliação de Blocos e Interpretação
Geológica e Geofísica

tallesferreira@petrobras.com.br

Talles Souza Ferreira é graduado em Geologia (2004) pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Logo em seguida, ingressou na pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, tendo trabalhado em projetos de pesquisa nas bacias de Potiguar, Sergipe–Alagoas e Tucano. Na Petrobras desde 2006, atuou como intérprete na avaliação de oportunidades exploratórias em bacias da margem nordeste do Brasil, especialmente na costa da Bahia, lotado na Gerência de Interpretação do Norte–Nordeste, no Rio de Janeiro (RJ). Ainda em 2006, formou-se especialista em análise de bacias pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Em 2010, obteve o título de Mestre em Geodinâmica pela UFRN. Em 2013, foi nomeado consultor em exploração, ainda no Rio de Janeiro. Exerce a função de gerente de Interpretação Geológica e Geofísica na Unidade de Operações da Bahia (UO-BA), em Salvador (BA). Como especialista em tectônica de bacias, tem se dedicado a projetos exploratórios e de pesquisa sobre as bacias do Nordeste brasileiro.



Marco Antonio Thoaldo Romeiro

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento
Leopoldo A. Miguez de Mello (Cenpes)

P&D em Geociências

Geologia Estrutural e Geotectônica

marcothoaldo@petrobras.com.br

Marco Antonio Thoaldo Romeiro é graduado pela Universidade Federal do Paraná em 2009. cursou especializações em geofísica e graduou-se Mestre pela Universidade Federal do Paraná em 2014, com pesquisa em geofísica aplicada a estudos geotectônicos. Geólogo na Petrobras desde 2010, atua na análise e interpretação de dados gravimétricos e magnetométricos aplicados no estudo de bacias sedimentares.