

Tectonismo e sedimentação na porção SW do Rifte Potiguar - Bacia Potiguar emersa

Tectonism and sedimentation in the southwestern portion of the Potiguar Rift - onshore Potiguar Basin, Brazil

Ubiraci Manoel Soares | Enio Luiz Rossetti

resumo

A partir da integração de dados litoestratigráficos, bioestratigráficos e sismoestratigráficos, paleoclimáticos e geoquímicos ($\delta^{18}\text{O}$), e utilizando os conceitos da Estratigrafia de Seqüências, bem como das técnicas de descarregamento sedimentar e modelagem estratigráfica, foi possível diferenciar os efeitos tectônicos e climáticos na sedimentação de um rifte continental.

A seção estudada compreende o intervalo Valanginiano Superior - Barremiano Inferior (Cretáceo Inferior) da Formação Pendência, na porção SW do Gráben de Umbuzeiro, Bacia Potiguar emersa, constituído predominantemente por depósitos flúvio-deltaicos e lacustres.

A análise da arquitetura deposicional do intervalo de estudo, através de seções sísmicas e perfis elétricos de poços da área, permite interpretar dois gran-

des intervalos regressivos (seqüências Verde e Amarela), separados por um nível transgressivo (Seqüência Laranja) de expressão regional, conhecido como "Folhelho Livramento".

No geral, a evolução do intervalo de estudo compreende duas fases de maior atividade tectônica durante a deposição das seqüências Verde e Amarela, separadas por um período de quiescência durante a deposição da Seqüência Laranja. Os dois períodos de atividade tectônica mais intensa mostram uma evolução paleoclimática com tendência de aridez em direção ao topo do intervalo (lago cada vez mais raso), enquanto o período de quiescência registra uma tendência de condições cada vez mais úmidas.

(originais recebidos em 01.07.2005)

Palavras-chave: Estratigrafia de Seqüências | efeitos tectônicos | efeitos climáticos | arquitetura deposicional | rifte

abstract

Through an integrated approach, using lithostratigraphic, chronostratigraphic and biostratigraphic data the relative importance of climatic variations and tectonics has been recognized in rift sediments of the onshore Potiguar Basin, Northeast Brazil. Sequence stratigraphy concepts have been applied as a template to integrate sedimentological, geochemical (oxygen isotopes) and biostratigraphic (quantitative palynology) data, as well as backstripping and sedimentary basin modeling techniques to address and recognize the main depositional patterns produced in a rift basin. The main objective is to distinguish the effects of climatic changes and tectonics to the resulting stratigraphic architecture.

The studied section includes a Late Valanginian-Early Barremian (Lower Cretaceous) rift interval from the Pendência Formation, located in the southwestern portion of Umbuzeiro Graben in the onshore Potiguar Basin. The depositional setting is interpreted as a progradational fluvial-deltaic system entering a lake through its flexural margin.

Seismic stratigraphic and well logs analysis provided an interpretation of two regressive intervals (Green and Yellow sequences), separated by a broad transgressive interval (Orange Sequence), known as the Livramento Shale. The depositional history encompasses three stages: two tectonically active phases, during the deposition of the Green and Yellow sequences, and a tectonically quiescent phase, during the deposition of the Orange Sequence. Paleoclimatic interpretation, based on quantitative palynology and geochemical data ($\delta^{18}O$), suggests a tendency to arid conditions during the tectonically active phases and wet conditions during the tectonically quiescent phase

(expanded abstract available at the end of the paper)

Keywords: *Sequence Stratigraphy | tectonic controls | climatic controls | stratigraphic architecture | rift*

introdução

Os estudos mais recentes de preenchimento de bacias lacustres tectonicamente ativas (Gawthorpe *et al.* 1994; Scholz *et al.* 1997;

Carrol e Bohacs, 1999) têm mostrado que, ao contrário de bacias marinhas de margem passiva, onde há uma valorização da eustasia como principal mecanismo responsável pelo espaço de acomodação e limites de uma seqüência (Posamentier e Vail, 1988), nas bacias rifte não existe um fator preponderante no controle das seqüências deposicionais, mas sim uma combinação dos mesmos. Portanto, a origem dos limites de seqüência neste tipo de bacia é atribuída tanto a efeitos climáticos quanto tectônicos, sendo necessário um entendimento das relações entre as variações climáticas e das taxas de subsidência, tendo em vista que as diferenças de fase entre estas variáveis tanto podem diminuir quanto amplificar os processos erosivos.

O objetivo, aqui, é relacionar os controles tectônicos e climáticos durante a deposição de seqüências deposicionais de 3ª ordem na porção SW do Rifte Potiguar emerso, o que permite uma melhor compreensão de seus efeitos na geometria e arranjo interno das mesmas, bem como na distribuição e controle dos sistemas deposicionais, tornando o processo exploratório menos arriscado, tanto na busca de trapas estruturais convencionais quanto na de trapas estratigráficas e mistas.

Além da técnica de descarregamento sedimentar para as estimativas das taxas de subsidência tectônica e de sedimentação, utilizou-se a integração de dados litoestratigráficos, bioestratigráficos, paleoclimáticos e geoquímicos de quatro poços e sua correlação com a interpretação sismoestratigráfica de uma seção sísmica 3D. Assumiu-se como arcabouço estratigráfico base as seqüências Verde, Laranja e Amarela (Rossetti, 1996), pertencentes ao intervalo Valanginiano Superior - Barremiano Inferior da Formação Pendência (Seqüência 3 de Della Fávera *et al.* 1992).

o Rifte Potiguar origem e arcabouço tectônico

Localizado na porção mais oriental do Nordeste do Brasil, no Estado do Rio Grande do Norte, este rifte abrange em sua porção emersa uma

área de aproximadamente 5 500 km². Os limites a sul, leste e oeste são dados por falhamentos com rochas do embasamento cristalino, e sua extremidade nordeste se estende em direção ao Oceano Atlântico (fig. 1).

Françolin e Szatmari (1987) admitem que a origem do Rifte Potiguar está inserida no contexto da evolução da margem equatorial atlântica, iniciado ao final do Jurássico. Segundo estes autores, a rotação diferencial dextral entre a América do Sul e a África gerou, na Província Borborema, um regime de esforços com distensão norte-sul e compressão leste-oeste, o que propiciou o desenvolvimento de diversas bacias rifte sob regimes transtensional (caso do Rifte Potiguar) e transpressional (caso das bacias de Souza e Rio do Peixe).

A ocorrência do Enxame de Diques Rio Ceará Mirim, presente na forma de diques de diabásio com orientação E-W, no embasamento adjacente

à borda sul da Bacia Potiguar (fig 1), e interpretado por Françolin e Szatmari (1987) como situado segundo o eixo de maior compressão, foi a responsável pela separação dos segmentos transtensional a NE e transpressional a SW. Este evento magmático ocorre em dois pulsos principais entre 145 e 130 Ma (Oliveira, 1998), sendo correlacionado por Anjos *et al.* (1990) com as rochas vulcanoclásticas intercaladas aos sedimentos da porção basal da Formação Pendência (Souza, 1982).

Outros autores (Matos, 1987; Chang *et al.* 1988) reconhecem pelo menos três importantes estágios, em resposta à dinâmica das placas tectônicas durante o início da fragmentação do Gondwana, denominados de Sin-Rifte I e Sin-Rifte II, desenvolvidos sob regime predominantemente distensional, e Sin-Rifte III, desenvolvido em regime transtensional. A abordagem de Matos (2000) admitiu uma divisão com base tanto no estágio de desenvolvimento das zonas

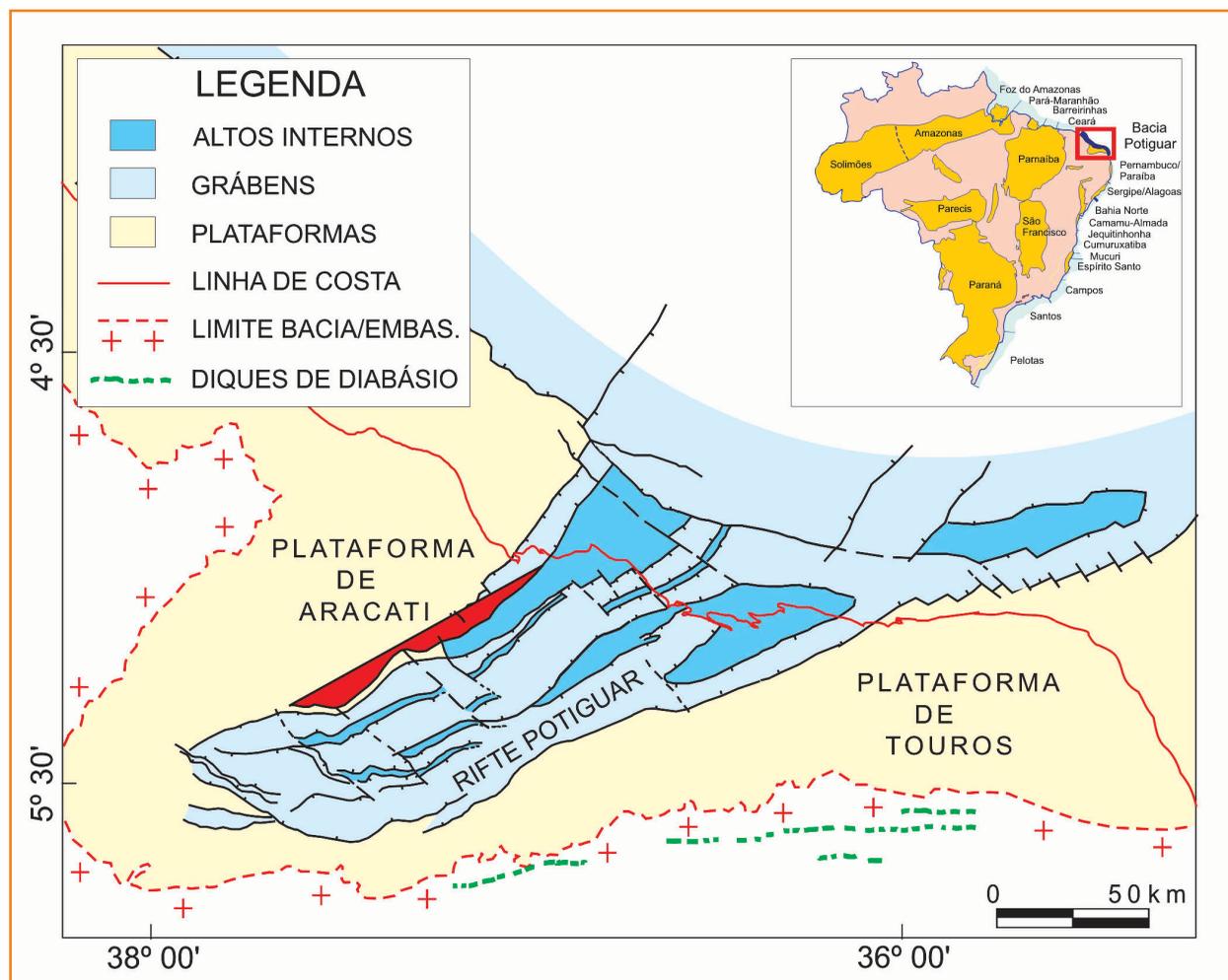


Figura 1

Mapa de localização e arcabouço tectônico do embasamento da Bacia Potiguar (Cremonini *et al.* 1996).

Figure 1

Location map and basement tectonic framework of Potiguar Basin (Cremonini *et al.* 1996).

transformantes quanto no posicionamento das bacias em relação a elas, e propõe três estágios principais denominados de Pré-, Sin- e Pós-Transformante.

O estágio Sin-Rifte I (Neojurássico) refere-se ao início da deformação distensional, com a deposição de clásticos em uma ampla depressão denominada de Depressão Afro-Brasileira, seção esta sem registro na Bacia Potiguar.

O estágio Sin-Rifte II (Neobarremiano/Eobarremiano) caracteriza-se pelo desenvolvimento de bacias rifte intracontinentais controladas por falhas de rejeito preferencialmente normal, definindo meio-grábens assimétricos tendo sido, neste período, gerado todo o sistema de riftes cretáceos do Nordeste brasileiro.

No estágio Sin-Rifte III (Neobarremiano/Eoapertiano), o processo distensivo começou a concentrar a deformação ao longo da futura margem continental, causando grande mudança na cinemática rifte. Na Bacia Potiguar, este evento provocou um deslocamento do eixo de rifteamento para a porção submersa da bacia, ao mesmo tempo em que causou um levantamento e erosão (discordância do topo da seção neocomiana/eobarremiana) na porção emersa, que se comporta como uma ombreira do novo rifte.

O final da fase rifte é marcado pela deposição da seqüência neo-apertiana, representada pelos sedimentos da Formação Alagamar, sobre uma discordância regional (com caráter angular em boa parte da bacia emersa), em resposta ao início da subsidência termal.

A geometria do rifte presente na porção emersa da bacia é definida por meio-grábens (basculados para SE) e altos internos com direção geral NE-SW, margeados por duas plataformas rasas denominadas de Aracati (a oeste) e Touros (a leste; fig. 1). Estas feições são o produto de duas grandes falhas lístricas cuja profundidade máxima de descolamento foi estimada entre 20 e 22 km (Matos, 1992).

Outra importante direção estrutural presente na porção emersa, tanto dentro quanto fora do rifte, são os falhamentos NW-SE (fig. 1). Segundo Matos (1992), estas estruturas funcionaram como falhas de transferência durante a fase inicial de rifteamento. Outros autores (Fortes, 1982;

Hackspacher *et al.* 1985; Oliveira *et al.* 1993) interpretam estes falhamentos como produto de reativações pós-campanianas, já que muitas dessas falhas também afetam os sedimentos das formações Açú e Jandaíra, depositados entre o Albiano e o Eocampaniano.

Na porção SW do Rifte Potiguar, o sistema de altos internos presente em toda a bacia mergulha para sul, o que torna difícil a separação entre os grábens de Umbuzeiro e Apodi (fig. 2). O padrão estrutural é caracterizado pela mudança de direção dos grandes falhamentos que limitam o rifte, denominado de sistema de falhas Apodi (segmento NW) / Baixa Grande (segmento NE).

Borges (1993) descreveu o estilo estrutural do Gráben de Apodi como duas rampas de embasamento com mergulhos opostos (fig. 3), cuja parte mais profunda define uma linha com direção NE-SW (fig. 2). Matos (1992) atribui as diferenças de estilo estrutural entre o Gráben de Apodi e o restante da bacia à atuação tardia (final da fase rifte) de um terceiro plano de *detachment* (Falha de Mulungu) restrito ao pacote sedimentar, cujo mergulho é oposto aos dos *detachments* representados pelos sistemas de falhas de Baixa Grande e *Dix-Sept* Rosado (fig. 3).

estratigrafia e preenchimento sedimentar

A calha tectônica do Rifte Potiguar foi preenchida por rochas sedimentares de um sistema flúvio-deltaico-lacustre que constituem a Formação Pendência (Souza, 1982). As seqüências, de idade neocomiana, são mais bem amostradas na porção emersa da bacia, enquanto as de idade neobarremiana ocorrem apenas na porção submersa da mesma.

Na porção emersa da bacia a depressão do rifte foi preenchida por sedimentos depositados durante o Neocomiano/Eobarremiano, entre 139 e 122 Ma. A carta estratigráfica apresentada na figura 4 compara os diversos zoneamentos cronoestratigráficos propostos para a Formação Pendência.

O primeiro trabalho que propõe uma divisão cronoestratigráfica da seção rifte da Bacia

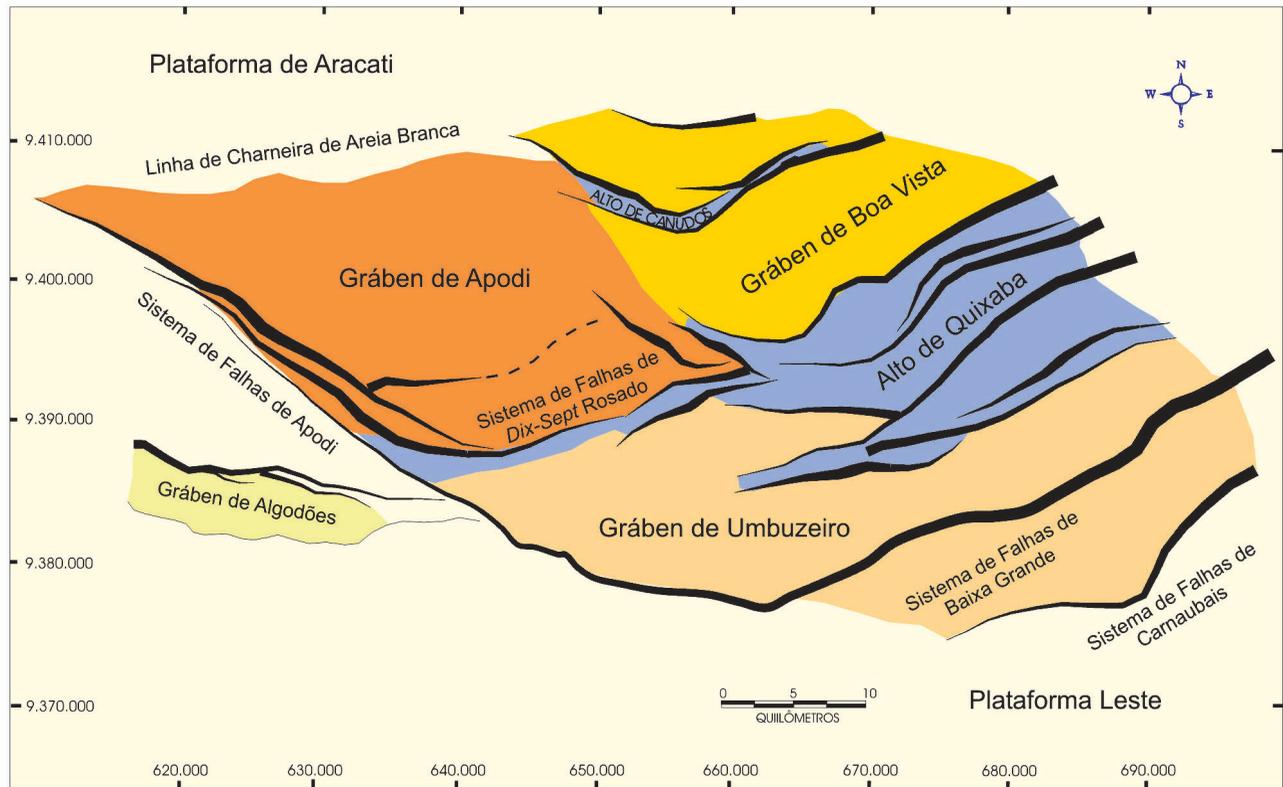


Figura 2 – Compartimentos estruturais do embasamento na porção SW do Rifte Potiguar (Borges, 1993). A linha tracejada de direção NE-SW representa a porção mais profunda do Gráben de Apodi.

Figure 2 – Basement structural compartments in the southwestern portion of Potiguar Rift (Borges, 1993). The NE-SW dotted line represents the deepest portion of Apodi Graben.

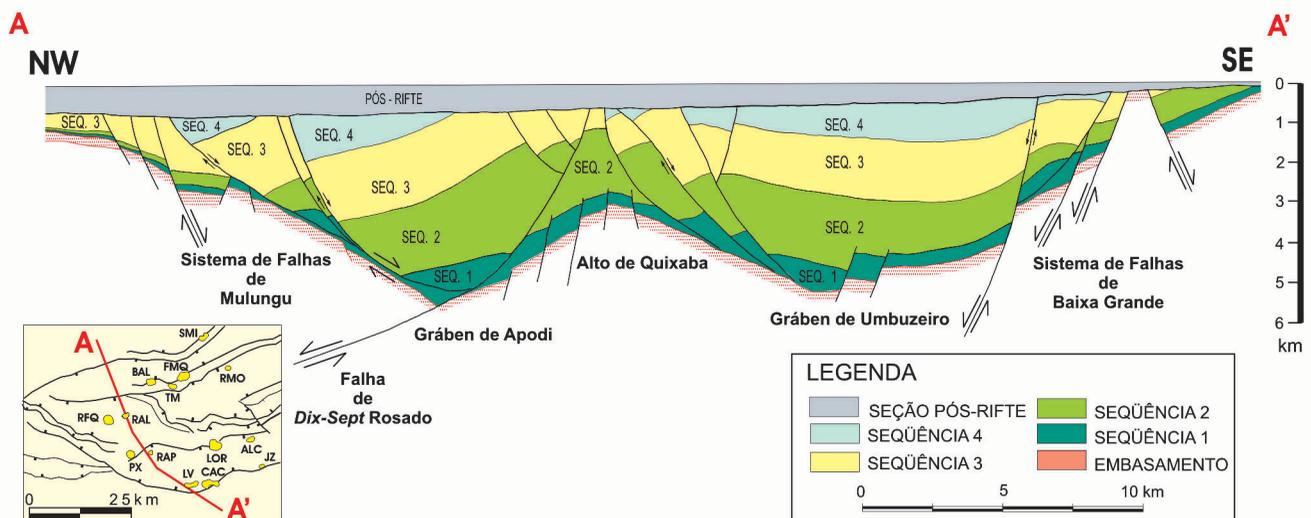


Figura 3 – Seção geológica A/A' transversal aos grábens de Apodi e Umbuzeiro na porção SW do Rifte Potiguar, com seqüências estratigráficas (Della Fávera et al. 1992) e arcabouço estrutural da Formação Pendência (Deus e Sessegolo, 1997).

Figure 3 – Geologic cross-section A/A' in the Apodi and Umbuzeiro grabens in the southwestern portion of Potiguar Rift, showing the stratigraphic sequences (Della Fávera et al. 1992) and the structural framework of the Pendência Formation (Deus and Sessegolo, 1997).

Potiguar emersa foi proposto por Lima Neto *et al.* (1987). Utilizando critérios sismo, lito e bioestratigráficos, estes autores dividiram a Formação Pendência em cinco unidades, mapeáveis em grande parte da porção emersa do rifte (fig. 4).

Outros trabalhos que abordam o preenchimento sedimentar e Estratigrafia de Seqüências no Rifte Potiguar foram realizados por Della Fávera *et al.* (1992), Silva (1993) e Rossetti (1996). Silva (1993) utilizou uma base de dados apoiada essencialmente em informações de poços (bioes-

tratigrafia, testemunhos e perfis elétricos), enquanto os demais trabalhos também incluem uma abordagem sismoestratigráfica.

Della Fávera *et al.* (1992) dividiram a Formação Pendência em quatro seqüências deposicionais (fig. 4), limitadas por discordâncias e suas concordâncias relativas, com suporte tanto em critérios sismoestratigráficos quanto em dados litoestratigráficos e bioestratigráficos de poços.

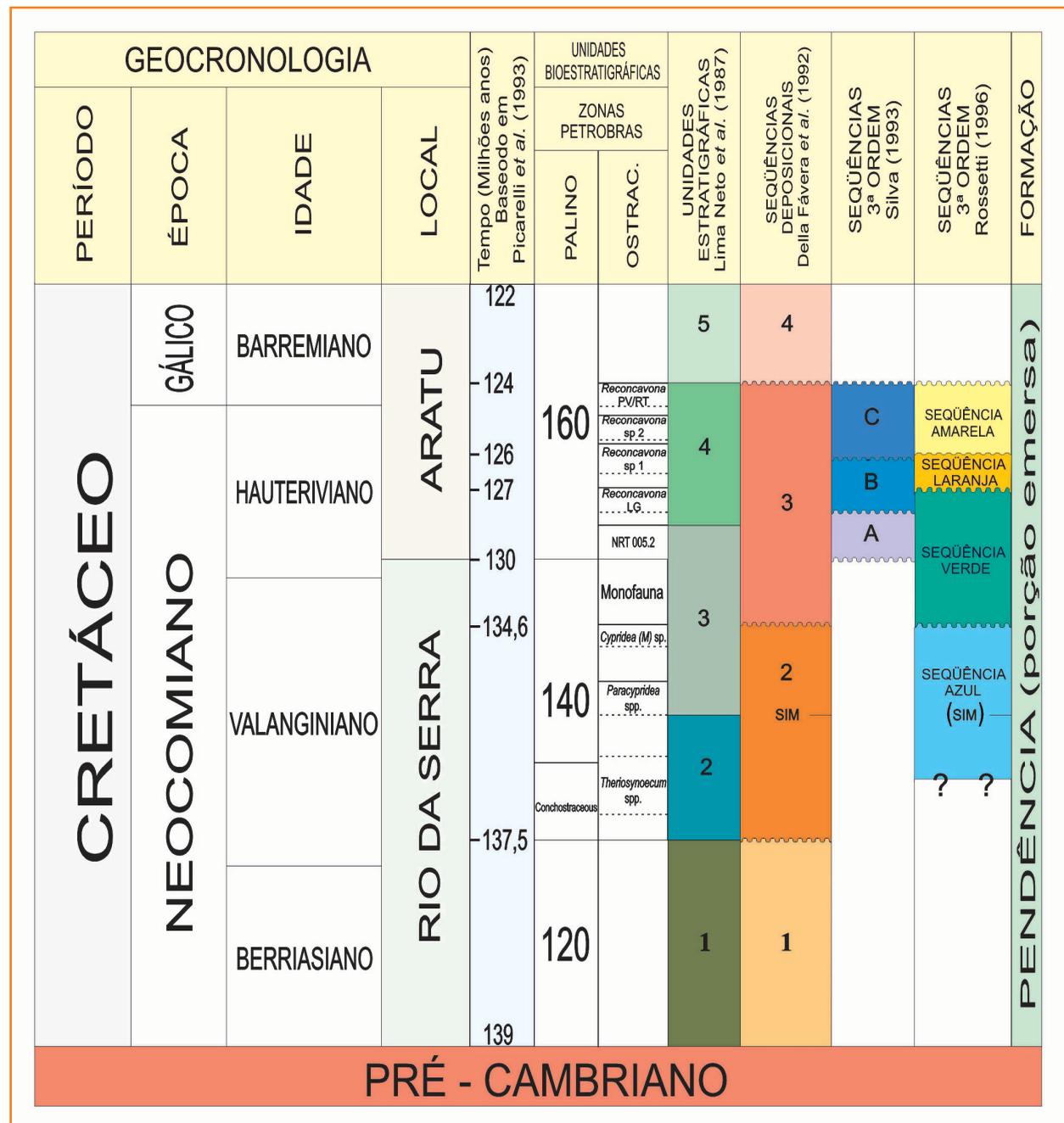
Com base no modelo de "tratos de sistemas para lagos tectônicos" de Scholz *et al.* (1990),

Figura 4

Carta geocronológica e bioestratigráfica para o Cretáceo Inferior da Bacia Potiguar emersa (Araripe e Feijó, 1994; idades absolutas baseadas em Picarelli *et al.* 1993), onde se apresenta a correlação entre as principais divisões cronoestratigráficas propostas para a Formação Pendência. Modificado de Rossetti (1996). SIM: Superfície de Inundação Máxima

Figure 4

Chronostratigraphic and biostratigraphic chart for the Lower Cretaceous interval of onshore Potiguar Basin (Araripe and Feijó, 1994; absolute ages based in Picarelli *et al.* 1993) showing the correlation among the main chronostratigraphic units proposed for the Pendência Formation. Modified from Rossetti (1996).



assim como no de “fases tectônicas em bacias rifte” (Lambiase, 1990; Della Fávera *et al.* (1992) propuseram os termos “trato de nível de lago profundo”, “trato de nível de lago raso” e “trato de lago assoreado”, associando cada “trato” às distintas fases de subsidência do Rifte Potiguar, a saber: taxa de subsidência maior do que a taxa de aporte sedimentar para o primeiro “trato” e taxa de aporte sedimentar maior do que a taxa de subsidência para os dois últimos.

Nas seqüências 1 e 2 (“trato de nível de lago profundo”) o padrão dos refletores é descontínuo e de baixa amplitude (fig. 5) e o empilhamento estratigráfico é agradacional na margem falhada e retrogradacional na margem flexural, com predomínio de uma sedimentação lacustre com fluxos gravitacionais de arenitos e conglomerados. A espessura máxima de sedimentos para estas seqüências é da ordem de 3 000 m, mostrando regionalmente uma tendência de espessamento em direção à margem falhada devido

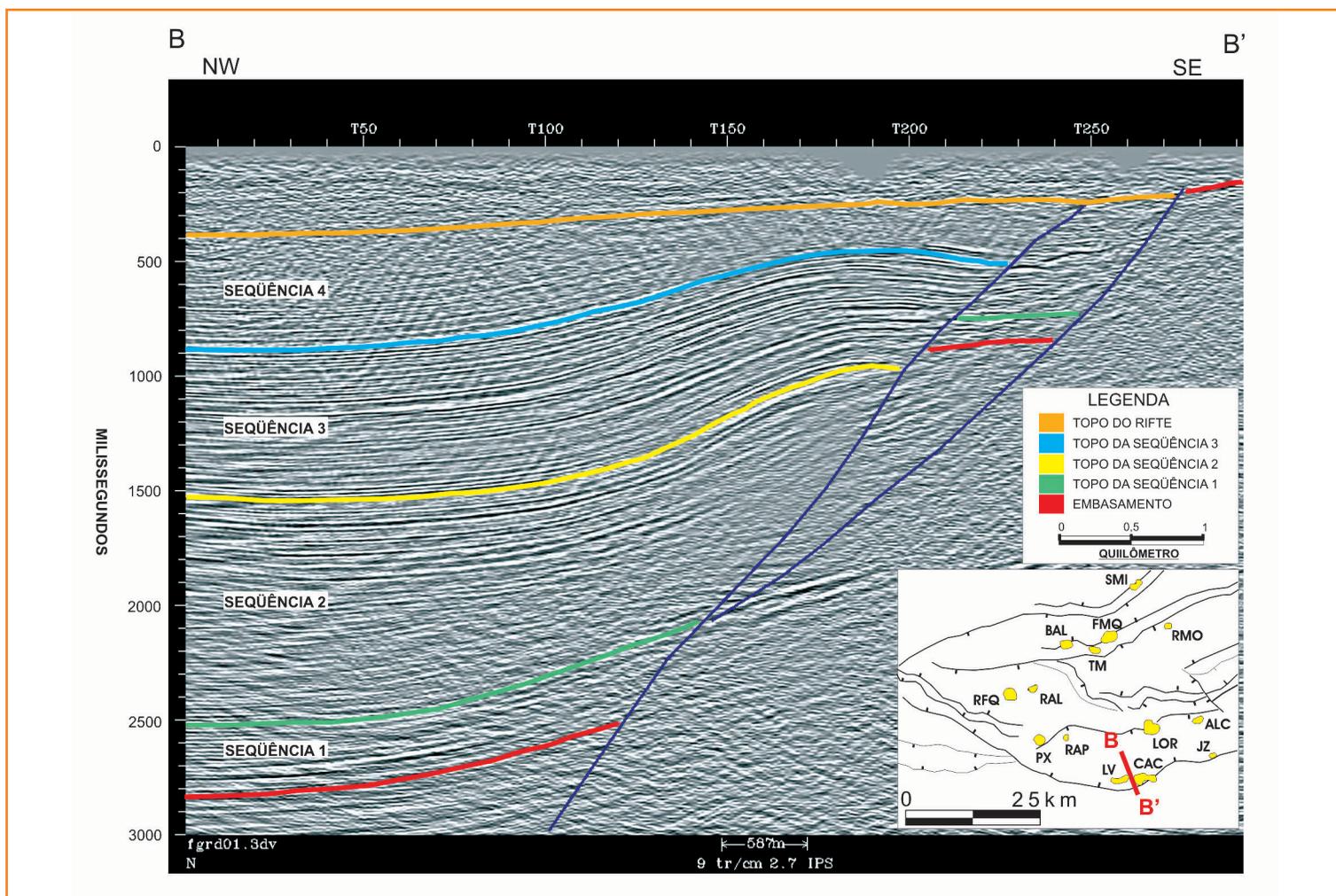


Figura 5 – Seção sísmica B/B' na porção SW do Rifte Potiguar, onde se mostra a divisão em seqüências deposicionais proposta por Della Fávera *et al.* (1992) para os sedimentos da Formação Pendência. Modificado de Soares (2000). Notar a diferença no padrão sísmico da Seqüência 1 e base da Seqüência 2 (refletores mais fracos e descontínuos) e da Seqüência 3 e porção superior da Seqüência 2 (refletores de boa continuidade lateral e reflexões de alta amplitude e freqüência). Della Fávera *et al.* (1992) atribuem tal diferença a uma mudança nos processos deposicionais (depósitos lacustres e fluxos gravitacionais nas unidades inferiores e complexos deltaicos progradacionais nas unidades superiores).

Figure 5 – Seismic section BIB' in the southwestern portion of the Potiguar Rift, displaying the depositional sequences proposed by Della Fávera *et al.* (1992) for the Pendência Formation sediments. Modified from Soares (2000). Observe the seismic pattern difference of Sequence 1 and the lowermost portion of Sequence 2 (weak and discontinuous reflectors related to lacustrine deposits with alluvial fans and turbidites) and Sequence 3 and the uppermost portion of Sequence 2 (high amplitude/frequency and continuous reflectors related to the interplay of fluviodeltaic and lacustrine deposits).

ao contínuo basculamento do bloco baixo durante a deposição.

Nas seqüências 3 (“trato de nível de lago raso”) e 4 (“trato de lago assoreado”) predominam refletores com padrões plano-paralelos e *shingled* (fig. 5) e o empilhamento estratigráfico é predominantemente progradacional. A sedimentação é predominantemente flúvio-deltaica, ficando a sedimentação lacustre reduzida a nichos isolados na bacia. A espessura máxima de sedimentos para estas seqüências é de 3 200 m, sendo sua tendência de espessamento em direção à margem falhada menos evidente do que a das seqüências inferiores.

A boa qualidade dos dados sísmicos da Seqüência 3 e da porção superior da Seqüência 2, aliada a uma boa resolução bioestratigráfica (ostracodes), permitiram a Rossetti (1996) desenvolver um trabalho com enfoque sismoestratigráfico dividindo este intervalo em quatro seqüências de 3ª ordem (denominadas de Azul, Verde, Laranja e Amarela; fig. 4).

O comportamento diferenciado dos refletores sísmicos para cada seqüência (fig. 6) permitiu uma razoável interpretação dos sistemas deposicionais. As feições progradacionais (clinoformas) foram interpretadas como sistemas deltaicos vindos da margem flexural, sendo os refletores mais contínuos e paralelos interpretados como folhelhos basinais resultantes de eventos transgressivos.

Foram identificados três pacotes com geometrias sísmicas distintas (fig. 6). O pacote inferior (seqüências Azul e Verde) destaca-se por apresentar feições progradantes com alto ângulo das clinoformas (interpretadas como deltas de nível de lago baixo); o pacote intermediário (Seqüência Laranja) apresenta clinoformas com menores ângulos de mergulho e superfícies erosivas bem marcadas; e o pacote superior (Seqüência Amarela) caracteriza-se por refletores predominantemente plano-paralelos com clinoformas menos expressivas (interpretadas como deltas de nível de lago alto).

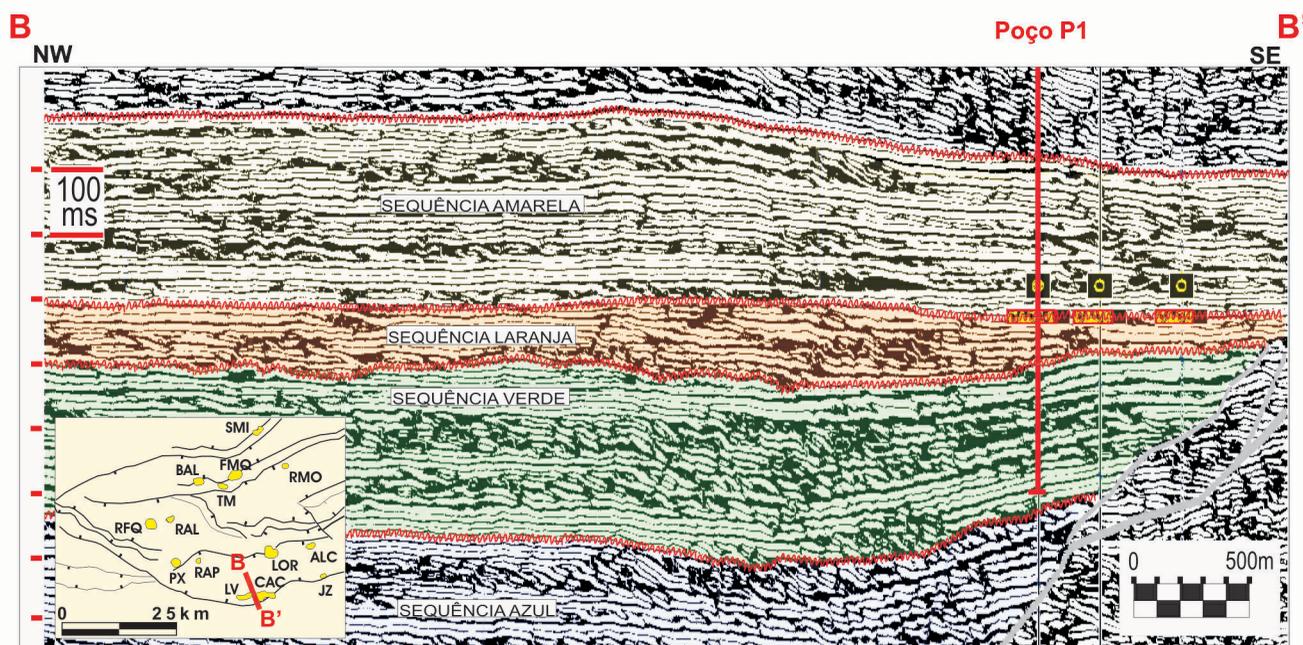


Figura 6 – Seção sísmica B/B' horizontalizada mostrando a divisão em seqüências de 3ª ordem para o intervalo neovalanginiano-eobarremiano da Formação Pendência, na porção SW do Rifte Potiguar (Rossetti, 1996). Notar as expressivas clinoformas progradantes das seqüências Verde e Azul, interpretadas como deltas de nível de lago baixo, bem como o padrão mais plano-paralelo e *shingled* dos refletores das seqüências Amarela e Laranja.

Figure 6 – Flattened seismic section B/B' in the southwestern portion of the Potiguar Rift, displaying the 3rd order depositional sequences for the neovalanginian-eobarremian interval of the Pendência Formation (Rossetti, 1996). Observe the high expression of the progradational clinoforms in the Blue and Green sequences interpreted as lowstand deltas, as well as the predominant shingled and parallel reflector patterns in the Orange and Yellow sequences.

evolução tectono-climática e seus efeitos na sedimentação

A partir da integração dos dados paleoclimáticos (curvas de frequência de *Cicatricosisporites spp* e *Classopollis non-striate*; (Picarelli et al. 1993) e geoquímicos (curva de variação de isótopos $\delta^{18}\text{O}$; Rodrigues e Takaki, 1992; Rodrigues et al. 1993; fig. 7) com os resultados das análises das taxas de subsidência tectônica e sedimentação (fig. 8), Soares (2000) estudou as variações de clima e tectonismo no intervalo

neovalanginiano-eobarremiano da Formação Pendência, de modo a facilitar o entendimento dos efeitos destas duas variáveis na deposição das seqüências Verde, Laranja e Amarela definidas por Rossetti (1996).

Visando a uma melhor compreensão dos efeitos climáticos e tectônicos na variação do nível do lago, bem como nas taxas de acomodação e aporte sedimentar, Soares (2000) utilizou a técnica de modelagem estratigráfica (Flemings et al. 1997), que é de grande utilidade na concepção da evolução tectono-sedimentar das seqüências deposicionais.

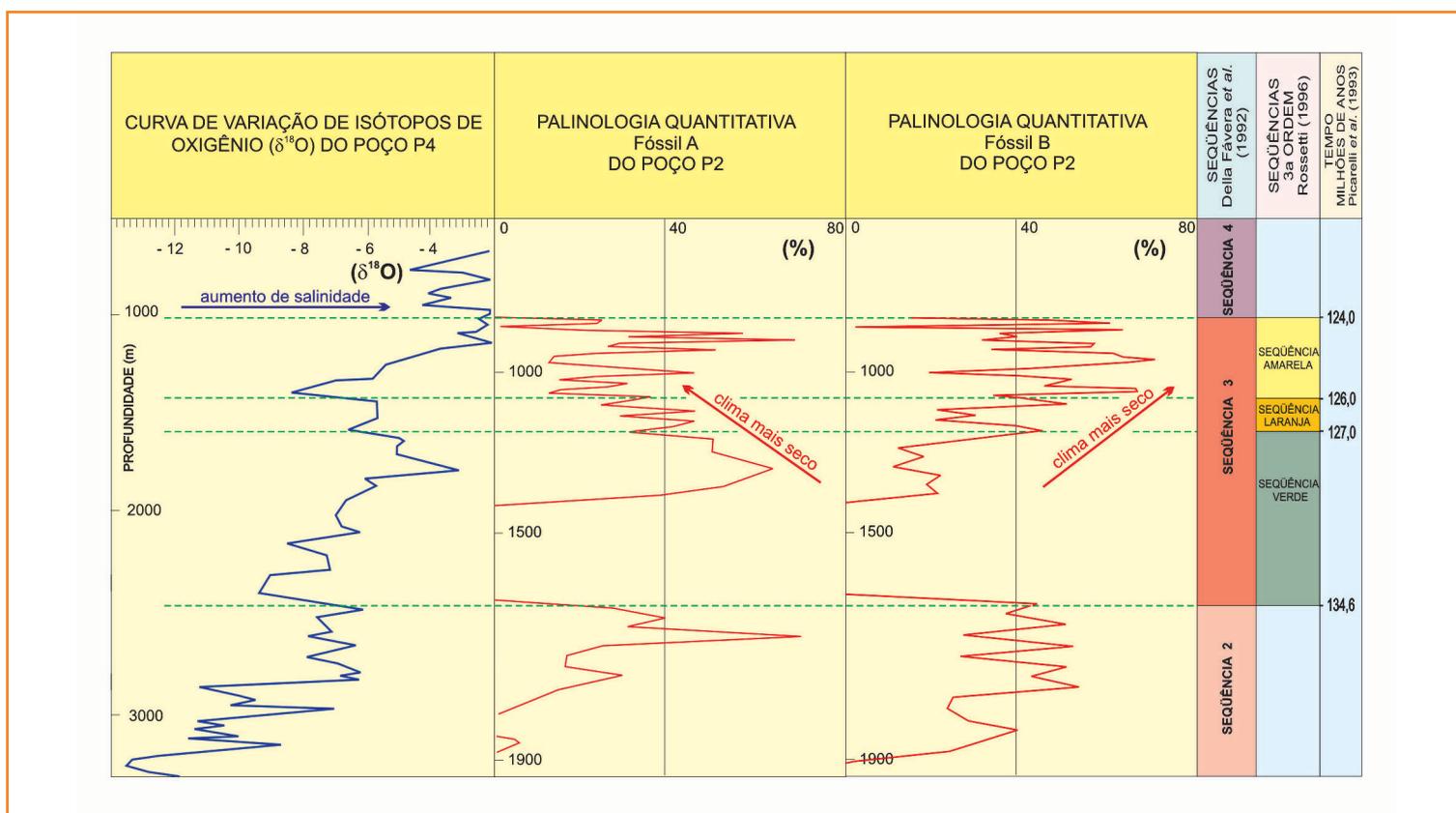


Figura 7 – Correlação tentativa entre a curva de variação de isótopos de Oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$ em azul; Rodrigues e Takaki, 1992; Rodrigues et al. 1993) e as curvas de frequência de palinomorfos (*Cicatricosisporites spp* e *Classopollis non-striate* em vermelho; (Picarelli et al. 1993) dos poços P4 e P2 (Soares, 2000; ver localização dos poços nas figuras 9 e 11). Notar a correlação positiva entre as tendências de aumento de salinidade (dada pela curva de $\delta^{18}\text{O}$) e aridez (dada pelas curvas de frequência de *Cicatricosisporites spp* e *Classopollis non-striate*) em direção ao topo do intervalo de estudo. A perfeita correlação entre os picos de valores mais negativos de $\delta^{18}\text{O}$ e valores mais baixos na concentração de *Cicatricosisporites spp* sugere que os grandes eventos transgressivos do lago inibiram momentaneamente as progradações deltaicas responsáveis por grande parte do influxo de sedimentos. Idades absolutas baseadas em Picarelli et al. (1993).

Figure 7 – Tentative correlation between the Oxygen isotopes curve ($\delta^{18}\text{O}$ in blue color; Rodrigues and Takaki, 1992; Rodrigues et al. 1993) and the palynomorphs frequency curves (Picarelli et al. 1993) of wells P4 and P2 (Soares, 2000; see well location in figures 9 and 11). Observe the positive correlation of the progressive increase in salinity ($\delta^{18}\text{O}$ curve) and paleoclimatic arid conditions (palynologic frequency curves) towards the top of the study interval. The match of $\delta^{18}\text{O}$ most negative peaks and low frequency of fossils suggests that the broad transgressive lake events inhibited momentarily the deltaic progradations responsible for most of the lake sediment influx. Absolute ages based in Picarelli et al. (1993).

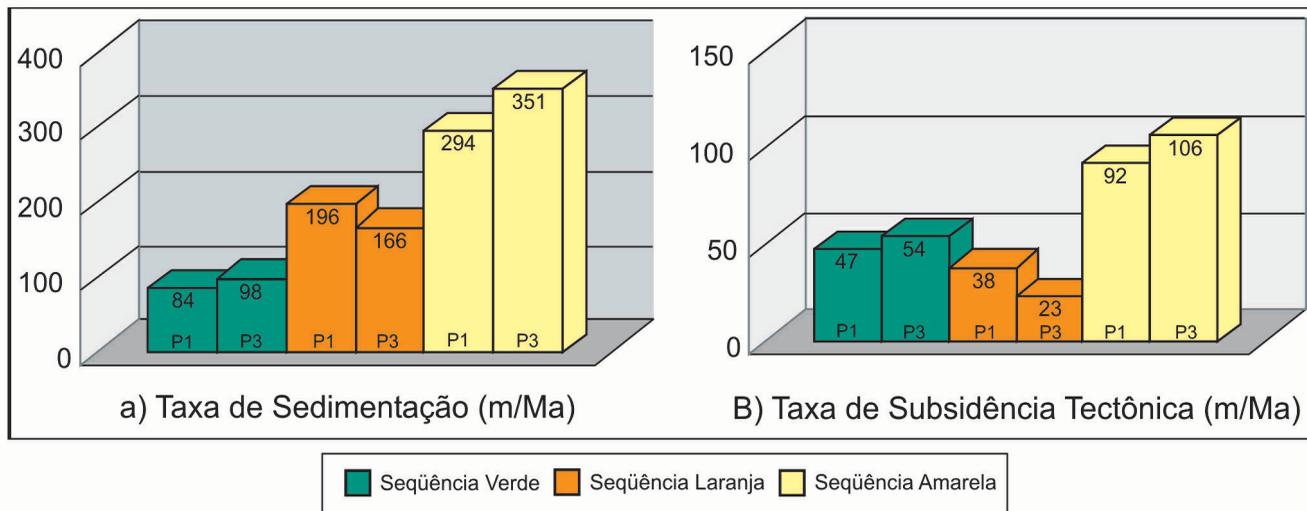


Figura 8 – Comparação das taxas de sedimentação (a) e subsidência tectônica (b) das seqüências Verde, Laranja e Amarela, nos poços P1 e P3 (Soares, 2000; ver localização dos poços nas figuras 9 e 11). Notar que as taxas de sedimentação das três seqüências apresentam valores crescentes em direção ao topo do intervalo de estudo, o que evidencia uma taxa de acomodação também crescente, a despeito das variações constatadas nas taxas de subsidência tectônica; a análise das taxas de subsidência tectônica sugere que as seqüências Verde e Amarela correspondem a períodos de maior atividade tectônica do rifte, enquanto a Seqüência Laranja foi depositada durante um período de diminuição desta atividade; a correlação negativa entre os valores das taxas de sedimentação (crescente) e subsidência tectônica (decrecente) para a Seqüência Laranja sugere que a criação do espaço de acomodação nesta seqüência teve grande contribuição da subida do nível do lago (efeito climático).

Figure 8 – Graphic representation of the sedimentation and tectonic subsidence rates of the Green, Orange and Yellow sequences in well P1 and P3 (Soares, 2000; see well location in figures 9 and 11). Observe the progressive increase in the sedimentation rates towards the top of the study interval, consistent with also the increase of accommodation space rates, in spite of fluctuations in the tectonic subsidence rates. The tectonic subsidence rates analysis suggests that the Green and Yellow sequences are related to a tectonically active rift phase whereas the Orange Sequence was deposited during a quiescent phase; the negative correlation between sedimentation (increasing) and tectonic subsidence (decreasing) rates suggests that the creation of accommodation space in the Orange Sequence had a significant contribution from the rising lake level (climatic effect).

Admitindo-se uma taxa de aporte sedimentar crescente, o evidente padrão progradacional da Seqüência Verde (fig. 6) é condizente com uma progressiva diminuição na paleobatimetria do lago, interpretada a partir da tendência de um paleoclima cada vez mais árido em direção ao topo desta unidade (fig. 7).

As expressivas progradações deltaicas desta seqüência (fig. 6), interpretadas por Rossetti (1996) como deltas de nível de lago baixo, marcam o início do avanço destes sistemas sobre um lago ainda relativamente profundo (mínimo de 80 a 100 m, estimados a partir de espessuras máximas das progradações deltaicas), com alternância de períodos úmidos e secos. A análise do mapa de fácies para esta seqüência (Della

Fávera *et al.* 1992; fig. 9) permite interpretar importantes sistemas deltaicos progradantes vindos de NW, fato este também corroborado pela direção e sentido das clinofomas em linhas sísmicas da área. Os litotipos predominantes na área dos poços P1 e P3 são depósitos de frente deltaica, intercalados a folhelhos lacustres e turbiditos. O predomínio de sistemas prodeltaicos e lacustres na área do poço P4 sugere que esta região permaneceu sempre como uma porção mais bacinal, mesmo durante os períodos de rebaixamento do nível do lago.

O padrão predominantemente agradacional da Seqüência Laranja (fig. 6) reflete o início de um grande período transgressivo, controlado basicamente por efeito climático (tendência para

condições mais úmidas; fig. 7), já que o efeito da subsidência tectônica é pouco expressivo nesta seqüência (fig. 8). O registro deste evento na área é um espesso pacote de pelitos lacustres conhecido como “Folhelho Livramento” (fig. 10).

O apogeu deste evento transgressivo (superfície de inundação máxima) ocorreu no início da deposi o da Seq ncia Amarela, provavelmente amplificado pela retomada da atividade tectônica, representado por um aumento na taxa de subsidência. Este intervalo   caracterizado pela depo-

si o de um pacote de folhelhos radioativos, mapeável em grande parte da bacia devido tanto   sua peculiar resposta grafo-elétrica em perfis (fig. 10) quanto por ocorrer associado a um horizonte bioestratigráfico de ampla distribui o, denominado de *Reconcavona sp1* (fig. 4). Picarelli *et al.* (1993) correlacionam este grande evento transgressivo com os folhelhos conhecidos como Marco 7 na se o rifte da Bacia do Recôncavo (Brasil), ao atribuir que os mesmos sejam resultantes de um mesmo evento paleoclimático regional.

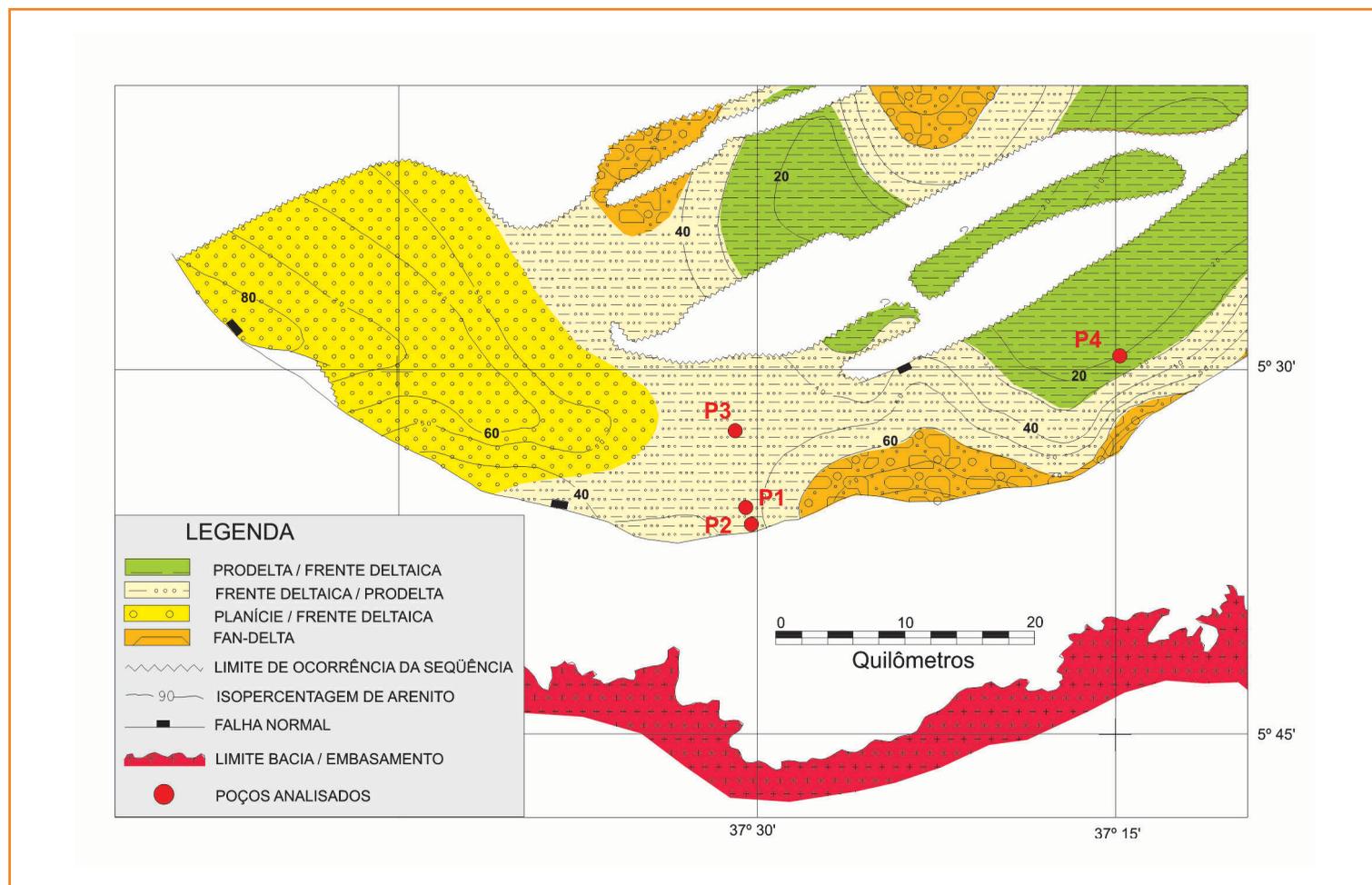


Figura 9 – Mapa de fácies para a porão inferior da Seq ncia 3 (Della Fávera *et al.* 1992) correspondente   Seq ncia Verde de Rossetti (1996). Modificado de Soares (2000). As curvas de contorno representam valores de percentagem de arenito. Notar os importantes sistemas deltaicos progradantes vindos de NW, fato este também corroborado pela dire o e sentido das clinofomas em linhas sísmicas da  rea. Os litotipos predominantes na região dos poços P1 e P3 são depósitos de frente deltaica intercalados a folhelhos lacustres e turbiditos. O predomínio de sistemas prodeltaicos e lacustres na área do poço P4 sugere que esta região permaneceu sempre como uma porão mais distal, mesmo durante os períodos de rebaixamento do nível do lago.

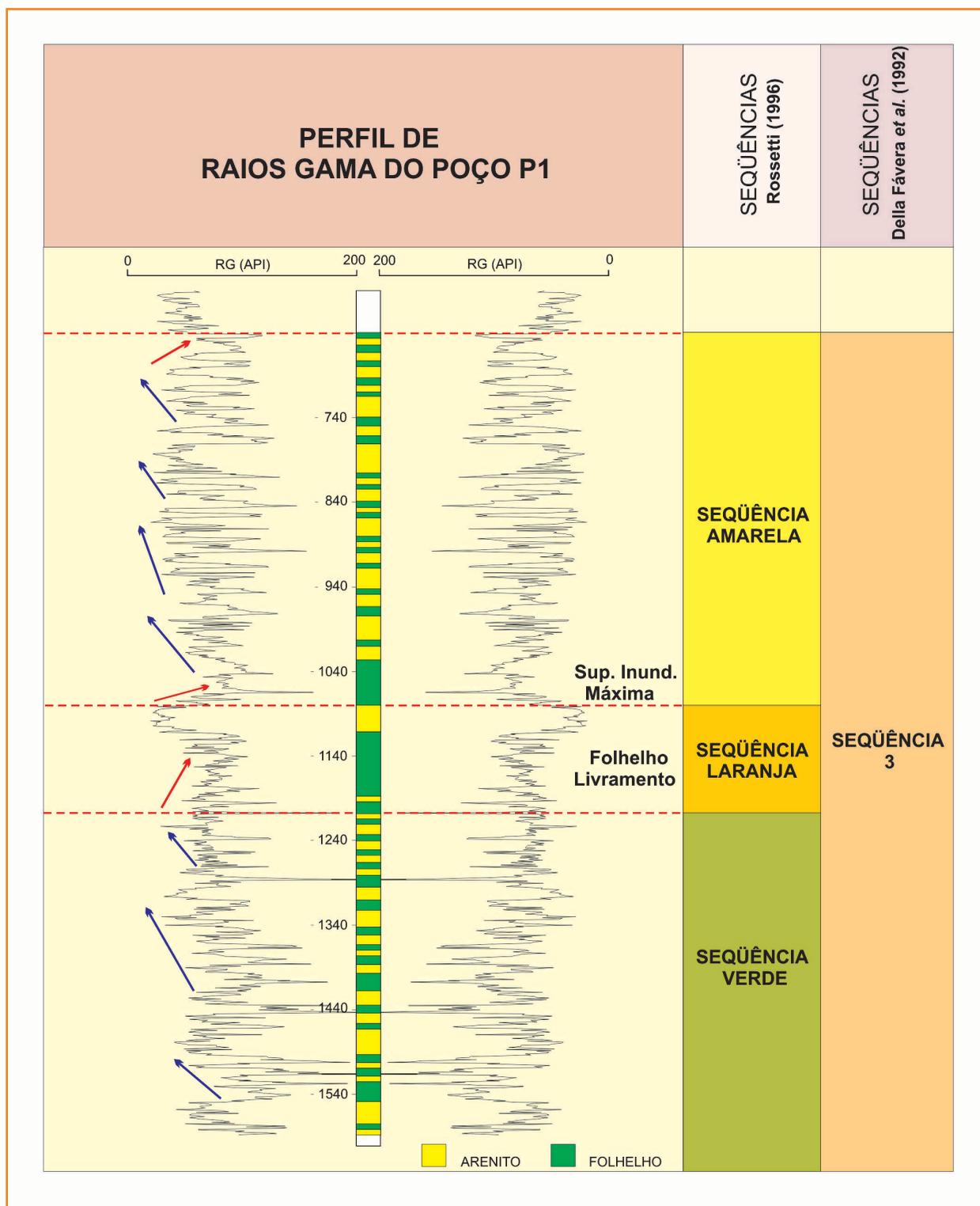
Figure 9 – Facies map for the lowermost portion of Sequence 3 (Della Fávera *et al.* 1992) corresponding to the Green Sequence (Rossetti, 1996). Modified from Soares (2000). Contour curves represent sand percentage values. Observe the broad progradational deltaic system coming from northwest, consistent with clinofoms dip directions in the seismic lines. The predominant lithologies in the area of wells P1 and P3 are delta-front deposits interbedded to lacustrine shales and turbidites. The dominance of pro-deltaic facies in the area of well P4 suggests that this region remained as a distal portion, even during the lake lowstands.

Figura 10

Perfil de Raios gama do poço P1 (ver localização nas figuras 9 e 11) onde são mostrados os padrões de empilhamento das parasequências nas seqüências Verde, Laranja e Amarela (Soares, 2000). As setas azuis indicam um arranjo progradacional e as vermelhas um arranjo retrogradacional. Notar o padrão predominantemente progradacional das seqüências Verde e Amarela, em contraste com o padrão predominantemente retrogradacional da Seqüência Laranja.

Figure 10

P1 (see location in figures 9 and 11) well-log expression of the parasequence-stacking patterns of the Green, Orange and Yellow sequences (Soares, 2000). The blue and red arrows respectively represent progradational and retrogradational patterns. Observe the dominant progradational pattern in the Green and Yellow sequences and the characteristic retrogradational pattern of the Orange Sequence.



A menor expressividade das clinofórmulas progradantes e o predomínio de padrões *shingled* e plano-paralelo na arquitetura estratigráfica da Seqüência Amarela (fig. 6) parecem ser reflexo tanto de efeitos climáticos quanto tectônicos.

A presença de um paleoclima cada vez mais árido (fig. 7) provocou uma diminuição drástica na paleobatimetria do lago, o que permitiu o estaqueamento de sucessivas progradações deltaicas em uma área cada vez mais ampla. O signifi-

cativo aumento na taxa de subsidência tectônica (fig. 8), bem como o crescente efeito do carregamento sedimentar, parecem ser os responsáveis pelo padrão mais agradacional dos estratos, mesmo levando-se em consideração uma taxa crescente de aporte sedimentar.

A análise dos padrões estratigráficos em perfis elétricos de poços que atravessaram esta seqüência (fig. 10) confirma o empilhamento de sucessivos pares de arenitos de frente deltaica sobrepostos por folhelhos lacustres (Carrasco, 1989), resultando no padrão de sino invertido,

típico de progradações deltaicas. A evidente ciclicidade destes depósitos foi interpretada por Della Fávera *et al.* (1992) como o resultado de variações paleoclimáticas relacionadas à excentricidade orbital da terra (periodicidade de 100.000 anos).

A análise do mapa de fácies da seqüência 3 (Della Fávera *et al.* 1992; fig. 11) permite interpretar que o aumento significativo da razão arenito/folhelho indica a progradação generalizada dos sistemas deltaicos em direção às partes mais basinais, o que causa grande redução nos

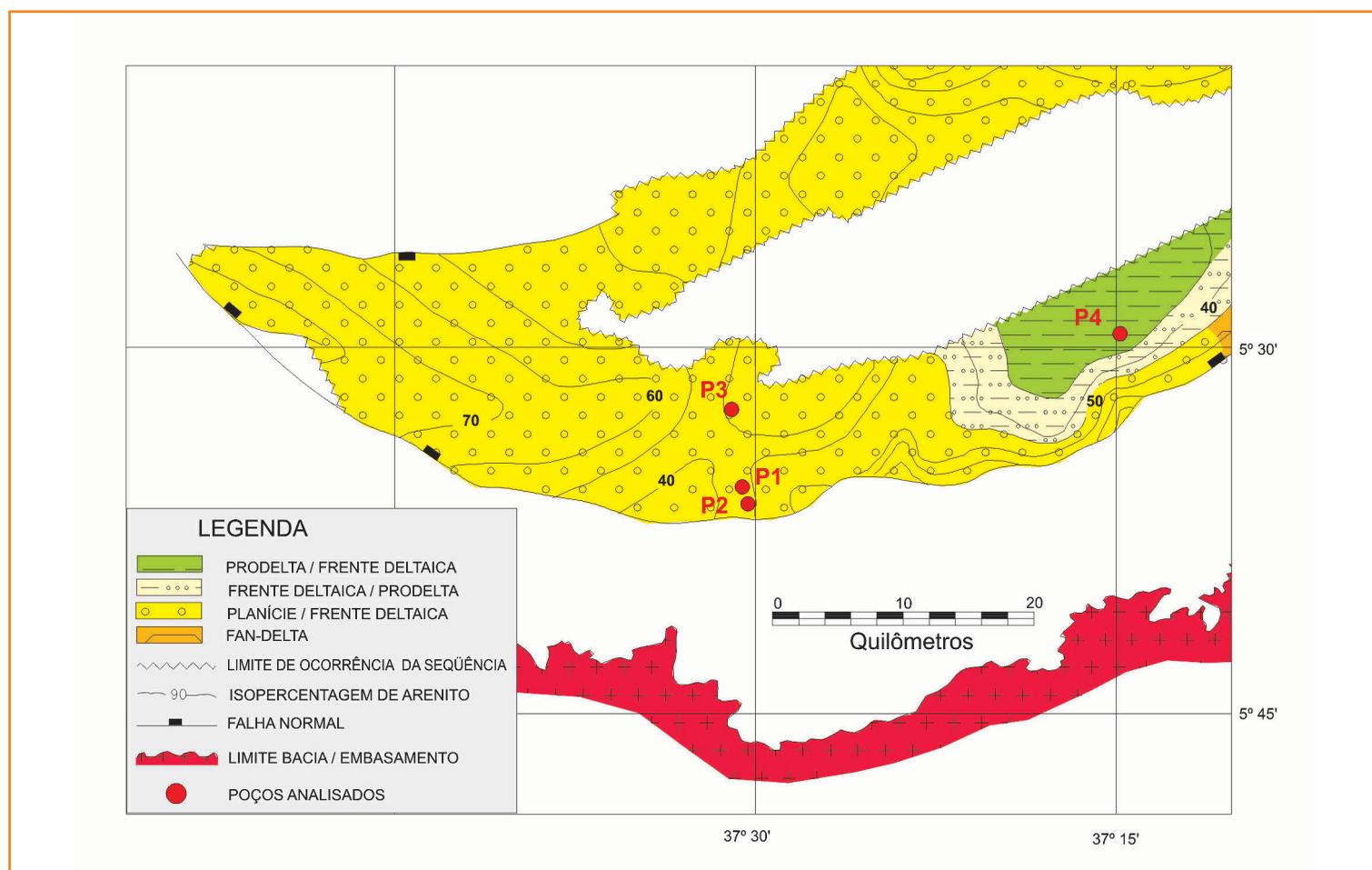


Figura 11 – Mapa de fácies para a porção superior da Seqüência 3 (Della Fávera *et al.* 1992) correspondente à Seqüência Amarela de Rossetti (1996). Modificado de Soares (2000). As curvas de contorno representam valores de percentagem de arenito. O aumento significativo nestas percentagens é consequência do progressivo avanço dos sistemas deltaicos em direção às partes mais basinais, o que causa grande redução nos limites do lago. Os litotipos predominantes nestes depósitos são arenitos da planície e frente deltaicas, intercalados a folhelhos lacustres transgressivos de períodos de nível de lago alto. Notar que a região do poço P4 ainda registra o predomínio de fácies de um ambiente lacustre de baixa energia, sugerindo que esta área permaneceu sempre como uma porção mais distal.

Figure 11 – Facies map for the uppermost portion of Sequence 3 (Della Fávera *et al.* 1992) corresponding to the Green Sequence (Rossetti, 1996). Modified from Soares (2000). Contour curves represent sand percentage values. The expressive increase in the sand percentages in this sequence is consistent with a progressive basinward progradation of the deltaic systems, responsible for the reduction of the lake limits. The predominant lithologies are flood-plain and delta-front deposits interbedded with transgressive lacustrine shales. Observe that the area of well P4 still registers the predominance of low energy pro-deltaic deposits suggesting that this region remained as a distal portion of the deltaic systems.

limites do lago. Estes fatos são condizentes com a progressiva diminuição paleobatimétrica do lago e o aumento da taxa de aporte sedimentar. Carrasco (1989) e Silva (1993) descrevem estes depósitos prográdantes como arenitos de planície e frente deltaica, intercalados a folhelhos lacustres transgressivos de períodos de nível de lago alto. É importante notar que a região do poço P4 ainda registra o predomínio de fácies de um ambiente lacustre de baixa energia, sugerindo que esta área permaneceu sempre como uma porção mais distal durante a deposição de todas as seqüências aqui analisadas.

conclusões

A integração dos dados paleoclimáticos (pali-nologia quantitativa) e geoquímicos ($\delta^{18}\text{O}$) com os resultados das análises das taxas de subsidência tectônica e sedimentação, analisados sob a ótica dos conceitos da Estratigrafia de Seqüências, permite tecer as seguintes considerações sobre a evolução tectono-climática durante a deposição das seqüências Verde, Laranja e Amarela.

- no geral, a evolução do intervalo de estudo compreende duas fases de maior atividade tectônica durante a deposição das seqüências Verde e Amarela, separadas por um período de quiescência durante a deposição da Seqüência Laranja. Os dois períodos de maior atividade tectônica mostram uma evolução paleoclimática com tendência de aridez em direção ao topo do intervalo (lago cada vez mais raso), enquanto o período de quiescência registra uma tendência de condições cada vez mais úmidas;
- admitindo-se uma taxa de aporte sedimentar crescente, o evidente padrão prográdacional da Seqüência Verde é condizente com uma progressiva diminuição na paleobatimetria do lago, interpretada a partir da tendência de um paleoclima cada vez mais árido em direção ao topo desta unidade;

- o padrão predominantemente agradacional da Seqüência Laranja reflete o início de um grande período transgressivo, controlado basicamente por efeito climático (tendência para condições mais úmidas), já que o efeito da subsidência tectônica é pouco expressivo nesta seqüência. A correlação negativa entre os valores das taxas de sedimentação (crescente) e subsidência tectônica (decrecente) sugere que a criação do espaço de acomodação nesta seqüência teve grande contribuição da subida do nível do lago (efeito climático). O registro deste evento na área é um espesso pacote de pelitos lacustres conhecido como "Folhelho Livramento";

- a menor expressividade das clinofórmulas prográdantes e o predomínio de padrões *shingled* e plano-paralelos na arquitetura estratigráfica da Seqüência Amarela parecem ser reflexo tanto de efeitos climáticos quanto tectônicos. A presença de um paleoclima cada vez mais árido provocou uma diminuição drástica na paleobatimetria do lago, o que permitiu o estaqueamento de sucessivas progradações deltaicas em uma área cada vez mais ampla. Já o significativo aumento na taxa de subsidência tectônica, bem como o crescente efeito do carregamento sedimentar, parecem ser os responsáveis pelo padrão agradacional dos estratos, mesmo levando-se em consideração uma taxa crescente de aporte sedimentar.

referências bibliográficas

ANJOS, S. M. C.; SOUZA, R. S.; SOMBRA, C. L.; SCUTA, M. S. Evidência de atividade vulcânica na base da Formação Pendência, Bacia Potiguar Emersa. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 4, p. 555-558, 1990.

ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 127-141. 1994.

- BORGES, W. R. E. **Caracterização Estrutural da Porção SW do Rifte Potiguar**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 1993. 146 p. Dissertação (Mestrado).
- CARRASCO, B. N. **Estudos sedimentológicos, petrológicos e petrofísicos da Formação Pendência no Campo de Livramento, Bacia Potiguar, Brasil**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 1989. 141 p. Dissertação (Mestrado).
- CARROL, A. R.; BOHACS, K. M. Stratigraphic classification of ancient lakes: Balancing tectonic and climatic controls. **Geology**, Boulder, Colo., v. 27, n. 2, p. 99-102, 1999.
- CHANG, H. K.; KOSWMANN, R. O.; FIGUEIREDO, A. M. F. New concepts on the development of East Brazilian marginal basins. **Episodes**, Ottawa, v. 11, n. 3, p. 194-202, set. 1988.
- CREMONINI, O. A.; GOULART, J. P. M.; SOARES, U. M. O Rifte Potiguar: novos dados e implicações tectônicas. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 4., 1996. **Boletim do...** Rio Claro: UNESP, 1996. p. 89-93.
- DELLA FÁVERA, J. C.; ROSSETTI, E.; GUZZO, J.; MATSUDA, N.; SOARES, M.; HASHIMOTO, A.; ALVES, D.; CASTRO, J.; AZAMBUJA, N.; RODRIGUES, R. **Estratigrafia de seqüências da Formação Pendência, Bacia Potiguar**. Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEPEX. 1992. 2 v. Relatório Interno.
- DEUS, F. S. B.; SESSEGOLO, L. A. F. **Proposta de Localização Exploratória – 1-VRG-1D-RN**. Natal: PETROBRAS. E&P-RNCE. GEXP. GEINT. 1997. Relatório interno.
- FLEMINGS, P. B.; GROTZINGER, J. P.; MORRIS, J. E. **STRATA: A Stratigraphic Modeling Package**, Release 2.14. 1997. Disponível em: <http://hydro.geosc.psu.edu/Strata_html>. Acesso em: 19 outubro 2005.
- FORTES, F. P. **Mapa Geológico da Bacia Potiguar (1:100.000): a origem da Bacia Mesozóica do Apodi como decorrência do ciclo Tectono-Orogênico Brasileiro**. Natal: PETROBRAS. DEPEX. 1982. Relatório interno.
- FRANÇOLIN, J. B. L.; SZATMARI, P. Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 196-207, 1987.
- GAWTHORPE, R. L.; FRASER, A. J.; COLLIER, R. E. LI. Sequence stratigraphy in active extensional basins: implications for the interpretation of ancient basin-fills. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 11, n. 6, p. 642-658, 1994.
- HACKSPACHER, P. C.; CORSINO, A. R.; SRIVASTAVA, N. K.; TIRIBA, V. F. A Falha de Afonso Bezerra como evidência de significativo tectonismo frágil NW-SE, na Bacia Potiguar emersa – RN. **Boletim UFRN/CCE/DG**, Natal, v. 10, p. 33-44. 1985.
- LAMBIASE, J. J. A Model for Tectonic Control of Lacustrine Stratigraphic Sequences in Continental Rift Basins. In: KATZ, B. J. (Ed). **Lacustrine basin exploration: case studies and modern analogs**. Tulsa, Okla., American Association of Petroleum Geologists, 1990. p. 265-273. (American Association of Petroleum Geologists. Memoir, 50).
- LIMA NETO, F. F.; MATOS, R. M. D.; PRAÇA, U. M.; HASHIMOTO, A. T., **Análise Estratigráfica da Formação Pendência**. Natal: PETROBRAS. 1987. Relatório Interno.
- MATOS, R. M. D. Sistema de riftes cretáceos do Nordeste Brasileiro. In: SEMINÁRIO DE TECTÔNICA DA PETROBRAS, 1., 1987. **Atas...** Rio de Janeiro: PETROBRAS.DEPEX, 1987. p. 126-159.
- MATOS, R. M. D. The northeast brazilian rift system. **Tectonics**, Washington, v. 11, n. 4, p. 766-791, 1992.
- MATOS, R. M. D. Tectonic Evolution of the Equatorial South Atlantic. In: MOHRIAK, W. U.; TALWANI, M., (Ed). **Atlantic Rifts and Continental Margins**. 2000. p. 331-354. (Geophysical Monograph, 115).
- OLIVEIRA, D. C.; MATOS, R. D.; SOARES, U. M. Contribuição ao estudo de estruturas rasas na Bacia Potiguar: análise estrutural do afloramento Afonso Bezerra (RN) e adjacências. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 4., 1993. **Anais....** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993. v. 12, p. 306-311.
- OLIVEIRA, D. C. Evolução magmática da Bacia Potiguar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40., 1998. **Anais....** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1998. p. 102.

- PICARELLI, A. T.; LANA, C. C.; GUZZO, J.; MILHOMEM, P. **Correlação e refinamento bioestratigráfico da seqüência rifte das Bacias do Recôncavo, Tucano e Potiguar**. Rio de Janeiro: PETROBRAS. DEBAR. DEXBA. 1993. Relatório interno.
- POSAMENTIER, H. W.; VAIL, P. R. **Eustatic controls on clastic deposition II: sequence and system tract models**. Houston, Tex.: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1988. p. 125-154. (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication, 42).
- RODRIGUES, R.; TAKAKI, T. Estratigrafia química de seqüências lacustres: Cretáceo Inferior da Bacia Potiguar. In: SIMPÓSIO SOBRE AS BACIAS CRETÁCEAS BRASILEIRAS, 2., 1992. **Resumos expandidos...** Rio Claro: UNESP, 1992. p. 26.
- RODRIGUES, R.; LANA, C. C.; PICARELLI, A. T. Estratigrafia isotópica e sua comparação com dados palinológicos: seqüências lacustres do Eocretáceo da Bacia Potiguar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 13., 1993, São Leopoldo. **Resumos...** São Leopoldo: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 1993. p. 155.
- ROSSETTI, E. L. **Estratigrafia de Seqüências de alta resolução obtida com imageamento de linhas sísmicas na fase rifte da Bacia Potiguar (Eo-Cretáceo)**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996. 151 p. Dissertação (Mestrado).
- SCHOLZ, C. A.; ROSENDAHL, B. R.; SCOTT, D. L. Development of Coarse-grained Facies in Lacustrine Rift Basins: Examples from East Africa. **Geology**, Boulder, Colo., v. 18, n. 2, p. 140-144. 1990.
- SCHOLZ, C. A.; MOORE Jr., T. C.; HUTCHINSON, D. R.; GOLMSHTOK, A.; KLITGORD, K. D.; KUROTKHIN, A. G. Comparative Sequence Stratigraphy of Low-Latitude versus High-Latitude Lacustrine Rift Basins: Seismic Data Examples from the East African and Baikal Rifts. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, 1997 (Special Limogeological Congress issue).
- SILVA, L. G. **Fácies, ambientes e seqüências deposicionais do Andar Aratu na porção SW do Graben de Umbuzeiro – Bacia Potiguar**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 1993. 109 p. Dissertação (Mestrado).
- SOARES, U. M. **As relações entre tectonismo e seqüências deposicionais no Rifte Potiguar – porção SW do Graben de Umbuzeiro, Bacia Potiguar emersa**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2000. 128 p. Dissertação (Mestrado).
- SOUZA, S. M. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32., 1982. Salvador. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1982, v. 5, p. 2392-2406.

expanded abstract

Through an integrated approach, using lithostratigraphic, chronostratigraphic and biostratigraphic data, the relative importance of climatic variations and tectonics has been recognized in rift sediments of the onshore Potiguar Basin, Northeast Brazil. Sequence stratigraphy concepts have been applied as a template to integrate sedimentological, geochemical (oxygen isotopes) and biostratigraphic (quantitative palynology) data, as well as backstripping and sedimentary basin modeling techniques to address and recognize the main depositional patterns produced in a rift basin. The main objective is to distinguish the effects of climatic changes and tectonics for the resulting stratigraphic architecture.

The studied section was the Upper Valanginian - Lower Barremian (Lower Cretaceous) rift interval from the Pendência Formation, located in the southwestern portion of Umbuzeiro Graben, in the onshore Potiguar Basin. The depositional setting is interpreted as a progradational fluvial - deltaic system entering a lake through its flexural margin.

The origin of the Potiguar Rift is associated with the Equatorial South Atlantic Margin evolution started during the Late Jurassic. The differential rotation between South America and Africa generated a tectonic stress field in the Borborema Province responsible for the development of all Northeast Brazilian rifts.

Rift geometry in the offshore portion of the Potiguar Basin is defined by a NE-SW system of half-grabens (tilted to SE) and internal highs, bordered by two shallow platforms denominated Aracati (west side) and Touros (east side). In the SW portion of the rift the internal high system dips towards the south, thus making the limit between the Umbuzeiro and Apodi grabens unclear. The dominant NE-SW direction of the major border faults has a strong deflection to NW-SE in this area, known as the Apodi/Baixa Grande fault system.

The rift depression was filled by fluvial-deltaic-lacustrine sediments from the Neocomian to the Early Barremian (139 to 122 m.y.) that constitute the Pendência Formation. This unit was divided into four depositional sequences limited by regional unconformities.

In the basal sequences (1 and 2) the stratal stacking pattern is aggradational in the faulted margin and retrogradational in the flexural margin, and the sedi-

mentation is dominated by lacustrine deposits with alluvial fans and turbidites. The maximum sedimentary thickness for this interval is 3 000 meters, close to the faulted margin, which shows an evident divergent pattern in the geometry of the seismic reflectors related to the continued tilting of the hanging wall.

Otherwise, in sequences 3 and 4, the stratal stacking pattern is mainly progradational and the sedimentation is dominated by fluvial-deltaic systems with isolated lacustrine areas. The maximum sedimentary thickness is 3 200 meters, showing a sub-parallel pattern in the geometry of the seismic reflectors.

The good quality of the seismic data associated with the biostratigraphic analysis permitted the division of Sequence 3 into the SW portion of the Potiguar Basin in to three new 3rd order sequences entitled Green (basal), Orange and Yellow.

The integration of sedimentological, paleoclimatic (quantitative palynology) and geochemical (oxygen isotopes) data, with tectonic subsidence and sedimentation rates under the Sequence Stratigraphic concepts, allowed us to produce an interpretation on the tectono-climatic evolution during the deposition of Green, Orange and Yellow sequences.

The depositional history encompasses three stages: two tectonically active phases during the deposition of the Green and Yellow sequences, and a tectonically quiescent phase during the deposition of the Orange Sequence. Paleoclimatic interpretation, based on quantitative palynology and geochemical data ($\delta^{18}\text{O}$), suggests a tendency to arid conditions during the tectonically active phases and wet conditions during the tectonically quiescent phase.

Assuming an increasing sedimentary supply rate, the progradational pattern in the Green Sequence is consistent with a progressive decrease in lake paleobathymetry, interpreted from the tendency of paleoclimatic arid conditions towards the top of this unit.

The dominant aggradational pattern in the Orange Sequence is consistent with the beginning of a transgressive period, controlled by the tendency of paleoclimatic wet conditions. The negative correlation between sedimentation (increasing) and tectonic subsidence (decreasing) rates suggests that the creation of accommodation space in this sequence had a significant contribution from the rising lake level (climatic effect). This event in the area is represented by a thick lacustrine pelitic interval known as "Livramento Shale".

The lower expression of progradational clinoforms and the predominant shingled and parallel patterns in the stratigraphic architecture of the Yellow Sequence seems to be the result of both climatic and tectonic effects. The tendency to arid climatic conditions caused a decrease in the lake paleobathymetry, which permitted the stacking of deltaic prograding systems in a broad area. On the other hand, the increase in the tectonic subsidence rate associated with the loading effect are responsible for the shingle and parallel stratal patterns, even taking into account an increase in the sedimentary supply rate.

autor author



Ubiraci Manoel Soares

Unidade de Negócio de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará

Ativo de Exploração

Avaliação de Blocos e Interpretação Geológica e Geofísica

e-mail: ubiraci@petrobras.com.br

Ubiraci Manoel Soares graduou-se em Geologia pela Universidade Federal da Bahia em 1981. Em 2000 obteve o título de mestre em Geodinâmica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, defendendo tema de dissertação sobre as relações entre tectonismo e seqüências deposicionais no Rifte Potiguar. Admitido na Petrobras em 1982, trabalhou durante seis anos na área de acompanhamento e avaliação de poços nas bacias de Segipe-Alagoas e Potiguar, e desde então trabalha como intérprete exploracionista na Bacia Potiguar emersa e submersa.