

Análise sismoestratigráfica dos depósitos sinrifte da Formação Coqueiro Seco (Aptiano inferior a médio), Bacia de Sergipe-Alagoas

seismic stratigraphic analysis of sinrift deposits of the Coqueiro Seco Formation (lower to middle Aptian), Sergipe-Alagoas Basin

Luciano José Costa Larré¹

resumo

O intervalo sedimentar estudado compreende os depósitos sinrifte de idade eo a mesoaptiana da Formação Coqueiro Seco, Bacia de Sergipe-Alagoas. Os depósitos são sedimentos essencialmente clásticos que ocorrem desde a porção norte da Sub-bacia de Sergipe até o extremo nordeste da Sub-bacia de Alagoas, alcançando espessuras da ordem de 3.000m. O arcabouço estratigráfico proposto foi construído a partir do reconhecimento de seqüências transgressivas-regressivas (T-R) caracterizadas com base na avaliação dos padrões de empilhamento dos estratos e superfícies-chave. A não-diferenciação de tratos de nível de mar alto e baixo, usando dados de poços e sísmicos, inviabilizou a aplicação de modelos mais usuais de Estratigrafia de Seqüências. O intervalo de investigação é particularizado pela forte condicionante

tectônica, evidenciada principalmente pela destacada ação exercida pelo baixo deposicional de Varrelas. Sismicamente, predominam os padrões de reflexões plano-paralelos e divergentes associados à típica fisiografia em cunha. O uso de um aplicativo para o reconhecimento de padrões sísmicos forneceu resultados úteis para uma melhor identificação e caracterização das seqüências sismoestratigráficas aqui propostas. Em geral, um forte controle tectônico condicionou uma sedimentação essencialmente do tipo *braided* deltas, onde sedimentos flúvio-deltaicos e lacustres estão lateralmente associados a sistemas de leques aluviais (*fan*-deltas) relacionados à borda falhada da bacia. Deste modo, os meio-grábens foram preenchidos com um padrão de empilhamento de caráter geral progradacional.

Palavras-chave: Bacia de Sergipe-Alagoas | Formação Coqueiro Seco | análise sismoestratigráfica | padrões de empilhamento | superfícies-chave

¹ Petrobras. Unidade de Negócio de Exploração e Produção de Sergipe e Alagoas. Gerência de Avaliação de Blocos e Interpretação Geológica e Geofísica. larre@petrobras.com.br.

abstract

The study interval comprises the early-middle Aptian sinrift deposits of the Coqueiro Seco Formation of the Sergipe-Alagoas Basin. The interval is composed mainly by clastic rocks which are distributed from the northern part of the Sergipe sub-basin to the northeastern sector of the Alagoas Sub-basin, where it reaches thicknesses up to 3.000m. The proposed stratigraphic framework was based on the identification of T-R (transgressive-regressive) sequences, characterized by distinct sedimentary stacking patterns and key surfaces. It could be divided in at least in three sequences and their respective systems tracts, limited by erosional unconformities. The non differentiation of tracts of high and low sea levels in the available well and seismic data make it difficult to consider usual models of Sequence Stratigraphy. This interval is particularized by its strongly conditioning tectonic source, which is mainly characterized by the peculiar influence of an important depositional low, named Varrelas Low. In seismic terms, the reflection patterns related to the target interval are mainly composed by plane-parallel and diverging events in a typical ramp feature. The use of a seismic pattern recognition software provided useful results for better identification and characterization of the proposed seismic stratigraphic sequences. In general, a strong tectonic influence is assumed for the sedimentation, which is mainly characterized as a braided delta system, where fluvial-deltaic and lacustrine sediments are laterally associated with alluvial fan systems related to the faulted border. In this way, half-grabens were infilled with a prevailing progradational character.

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

Keywords: *Sergipe-Alagoas Basin | Coqueiro Seco Formation | seismic stratigraphic analysis | stacking patterns | key surfaces*

introdução

O pacote sedimentar objeto do presente estudo é parte integrante do rifte da Bacia de Sergipe-Alagoas. Estratigraficamente, foi depositado sobre a discordância pré-Neojiquiá (base do Aptiano Inferior) e se estende até o topo do Andar Jiquiá Superior (Aptiano Médio), relacionado à discordância pré-Ala-

goas. O pacote sedimentar corresponde à Formação Coqueiro Seco, equivalendo em quase sua totalidade à seqüência deposicional K38, de acordo com recente revisão estratigráfica da bacia (Campos Neto *et al.* 2007). Esses sedimentos ocorrem desde a porção norte da Sub-bacia de Sergipe (Baixo de Japarutuba, Degrau de Alagamar e Baixo de São Francisco) até o extremo nordeste da Sub-bacia de Alagoas, atingindo, no Baixo de Alagoas, espessura da ordem de 3.000m.

Neste trabalho, foi dada ênfase à arquitetura estratal do preenchimento sedimentar, baseado em dados de reflexão sísmica, com suporte em dados de poços e na bioestratigrafia de ostracodes. A formulação de um arcabouço estratigráfico e a proposição de uma subdivisão do intervalo estudado em seqüências T-R, conforme Embry e Johannessen (1992) e Embry (1993, 2002), constituem os objetivos principais deste trabalho. Sua estrutura, portanto, está centrada na distinção e identificação de ciclos transgressivos-regressivos a partir da análise de padrões de empilhamento dos estratos e superfícies-chave.

São abordados aspectos relacionados ao cenário tectônico (rifte), ao contexto paleogeográfico e à caracterização sísmica das seqüências aqui propostas. O enfoque exploratório foi propositadamente excluído por não fazer parte do escopo deste estudo.

área de estudo e arcabouço tectônico-estratigráfico

A área de estudo ocupa a porção centro-sul da Sub-bacia de Alagoas, com aproximadamente 1.200km². Abrange os compartimentos estruturais desde o Baixo de Fernão Velho, no extremo norte, ao Baixo de Sinimbu e Degrau de Fazenda Riachuelo, ao sul (fig. 1).

Estratigraficamente, a área estudada é composta por clásticos do Cretáceo Inferior (formações Feliz Deserto, Barra de Itiúba, Penedo, Morro do Chaves, Coqueiro Seco, Maceió e Poção), sobrepostos a depósitos jurássicos (formações Serraria, Bananeiras e Candeiro) e paleozóicos (formações Aracaré e Batinga). Encontra-se recoberta, discordantemente, por uma delgada cobertura pliocênica a quaternária (Grupo Barreiras).

Sob o ponto de vista estrutural, a Sub-bacia de Alagoas possui geometria em meio-gráben, mergulhando para E-SE em blocos escalonados por falhas de direção predominante NE-SO, separados entre si por falhas de direção E-O e/ou N-S (Souza-Lima *et al.* 2002), (fig. 2).

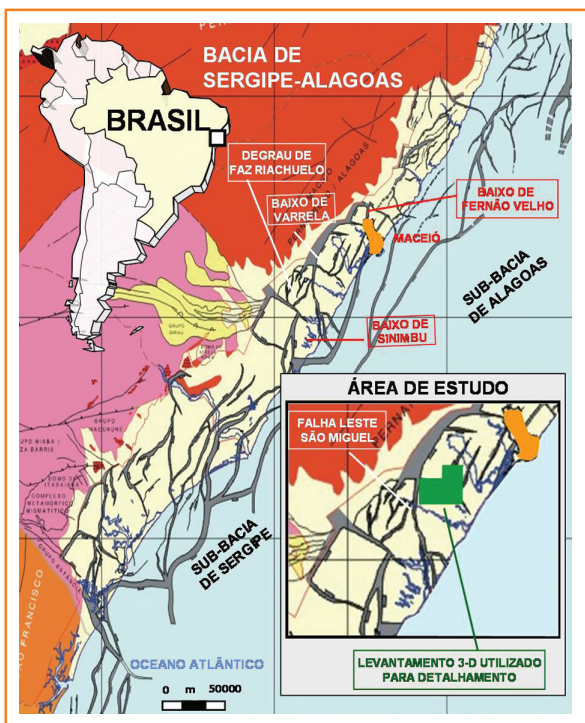


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo e compartimentação estrutural da Bacia de Sergipe-Alagoas ao nível do embasamento.

Figure 1 – Location map of the studied area and basement tectonic framework of Sergipe-Alagoas Basin.

A presença de sais de halita foi detectada no proeminente baixo deposicional de Varrela, na porção superior da Formação Coqueiro Seco, sendo atribuída à idade Neojiquiá. Esse evento evaporítico – revelado em um único poço, o 1-HZ-1-AL (Horizonte-1) – particulariza a área de estudo como sendo onde a primeira incursão marinha ocorreu (Souza-Lima, 2008).

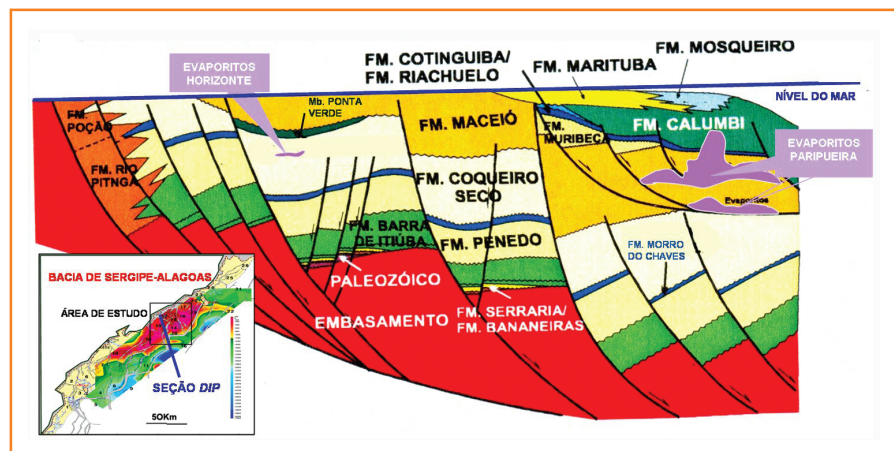


Figura 2 – Seção geológica esquemática dip representando o perfil estrutural da Sub-bacia de Alagoas. Em destaque, os eventos evaporíticos Paripueira e Horizonte (modificado de Souza-Lima et al. 2002).

Figure 2 – Geologic schematic dip section representing the structural profile of Alagoas Sub-basin. The evaporitic events Paripueira and Horizonte are highlighted (modified from Souza-Lima et al. 2002).

a Formação Coqueiro Seco

A Formação Coqueiro Seco refere-se à espessa sucessão de estratos que abrange o intervalo de idade eo a mesoaptiana correspondente aos andares locais Jiquiá e parte do Alagoas Inferior, representando um segundo ciclo tectônico do rifte. Em recente revisão estratigráfica da Bacia Sergipe-Alagoas (Campos Neto et al. 2007), seus limites estratigráficos foram redefinidos, sendo limitada no topo e na base por discordâncias. Esta formação grada lateralmente em direção à borda da bacia para os conglomerados da Formação Rio Pitanga, na Sub-bacia de Sergipe, e para os conglomerados da Formação Poção, na Sub-bacia de Alagoas (fig. 3).

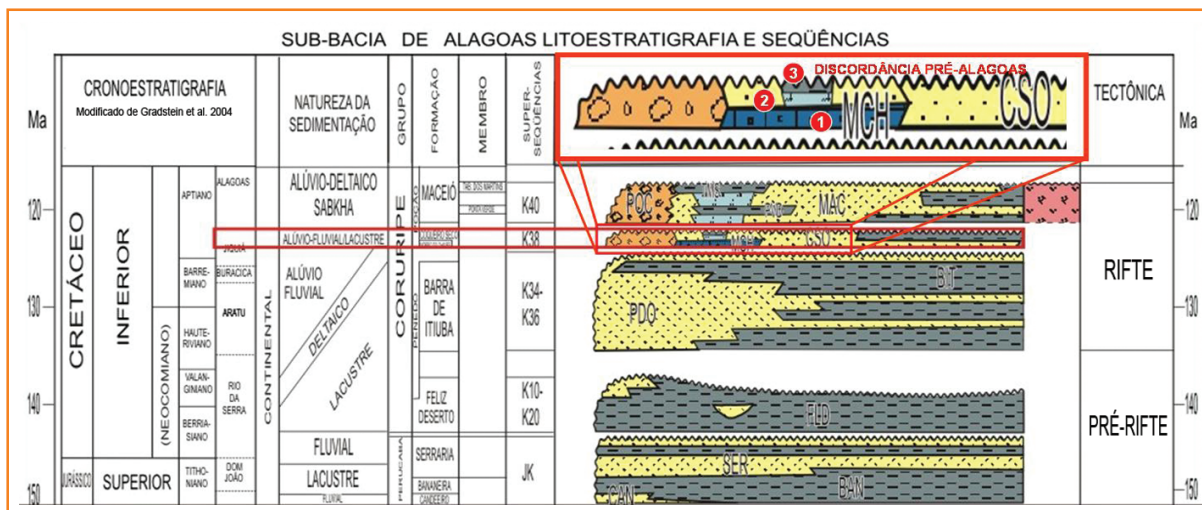
Figura 3

Carta estratigráfica da Sub-bacia de Alagoas (Campos Neto et al. 2007). As numerações em vermelho indicam as alterações após as revisões estratigráficas relativas ao intervalo de estudo:

- 1) a plataforma carbonática Morro do Chaves retoma seu status de formação;
- 2) evento evaporítico Horizonte situado na porção superior da Formação Coqueiro Seco;
- 3) discordância pré-Alagoas adotada como limite superior da Formação Coqueiro Seco.

Figure 3

Geologic Stratigraphic chart of the Alagoas sub-basin (modified from (Campos Neto et al. 2007)). Red numbers indicates the modifications after stratigraphic revision relative to the study interval: 1) the carbonatic platform returned to the original status of Formation; 2) the evaporitic event Horizonte is situated in the superior position of the Coqueiro Seco Formation; 3) the pré-Alagoas unconformity was adopted as superior boundary of the Coqueiro Seco Formation.



De modo geral, essa formação caracteriza-se por uma alternância de arenitos, folhelhos e siltitos. Os arenitos variam de finos a médios até conglomeráticos, imaturos, mal selecionados, quartzo-feldspáticos, caolínicos e localmente argilosos. Os folhelhos são de coloração castanha e aspecto betuminoso, em parte sílticos, e muitas vezes laminados, com delgadas intercalações de dolomito acastanhado criptocristalino. Esporadicamente, observam-se folhelhos cinza-esverdeados a cinza e em parte sílticos (Schaller, 1970). Na porção alagoana, essa unidade está exposta principalmente em afloramentos escavados nos vales de rios, indo desde o vale do Rio Jiquiá até as encostas da Lagoa Manguaba, a oeste de Maceió.

A importância econômica da Formação Coqueiro Seco é evidenciada pelo grande interesse exploratório desde a década de 60. Isto aconteceu não só pelos seus inúmeros reservatórios de muito boa permoporosidade, mas igualmente pela presença de folhelhos capeadores e excelentes folhelhos geradores associados.

a importância do cenário tectônico e do modelo de seqüências T-R

Neste artigo, levou-se em consideração o cenário tectônico rifte em que se insere a área de estudo, detentor de um perfil deposicional em rampa. Tal cenário é dramaticamente diferente da paisagem de plataforma-talude-bacia de margens passivas. Neste contexto pressupõe-se que:

- I. o nível do lago e seu posicionamento relativo ao depocentro e ao bloco falhado da bacia representem o nível de base local;
- II. os efeitos das flutuações do nível do lago interfiram no espaço de acomodação (Scholz *et al.* 1990).

Foi empregado o modelo de seqüências T-R de Embry e Johannessen (1992) e Embry, (1993, 2002). Este modelo, em linhas gerais, corresponde ao deslocamento da linha de costa em um completo ciclo transgressivo e regressivo. Oferece uma alternativa para uma subdivisão em seqüências deposicionais, visando superar algumas das dificuldades

de aplicação apontadas em outros modelos. Em bacias significativamente dominadas pela tectônica, pode promover um razoável reconhecimento das variações do nível de base na arquitetura deposicional para depósitos predominantemente não-marinhos. Seus tratos de sistemas e subdivisão – fase transgressiva e fase de preenchimento regressivo bem como seus limites e superfícies-chave – podem proporcionar uma boa correlação estratal e o estabelecimento de um arcabouço cronoestratigráfico consistente (Catuneanu, 2006).

contexto paleogeográfico

A intensa compartimentação tectono-estratigráfica à qual foi submetida a Sub-bacia de Alagoas dificulta enormemente uma reconstrução paleofisiográfica mais acurada do pacote sedimentar em estudo. Apesar disso, algumas evidências indiretas permitiram a recomposição do cenário geomorfológico à época da deposição.

Em geral, os compartimentos tectônicos que compõem os riftes são de características predominantemente assimétricas, tornando-se importante identificar a direção de basculamento desses blocos. Isso facilita a inferência de como se processou seu preenchimento sedimentar no decorrer de cada ciclo tectônico.

A assimetria na área estudada é assinalada, sobretudo, pelo baixo deposicional de Varrela, associado à margem falhada. O mapa de isópacas do pacote correspondente à Formação Coqueiro Seco revela essa conformação (fig. 4). Delineia-se igualmente a Falha Leste de São Miguel dos Campos que, informalmente, é referida como uma expressiva falha de alívio (Destro *et al.* 2003). A margem flexural propaga-se pela porção sul/sudeste, culminado com a linha de charneira de idade Alagoas (Aptiano).

análise sismoestratigráfica

De um modo geral, é bastante evidente o caráter cíclico do intervalo Coqueiro Seco, correspondente a sucessões de fases transgressivas e regressivas, representadas por alternâncias faciológicas, fundamentalmente arenitos e folhelhos.

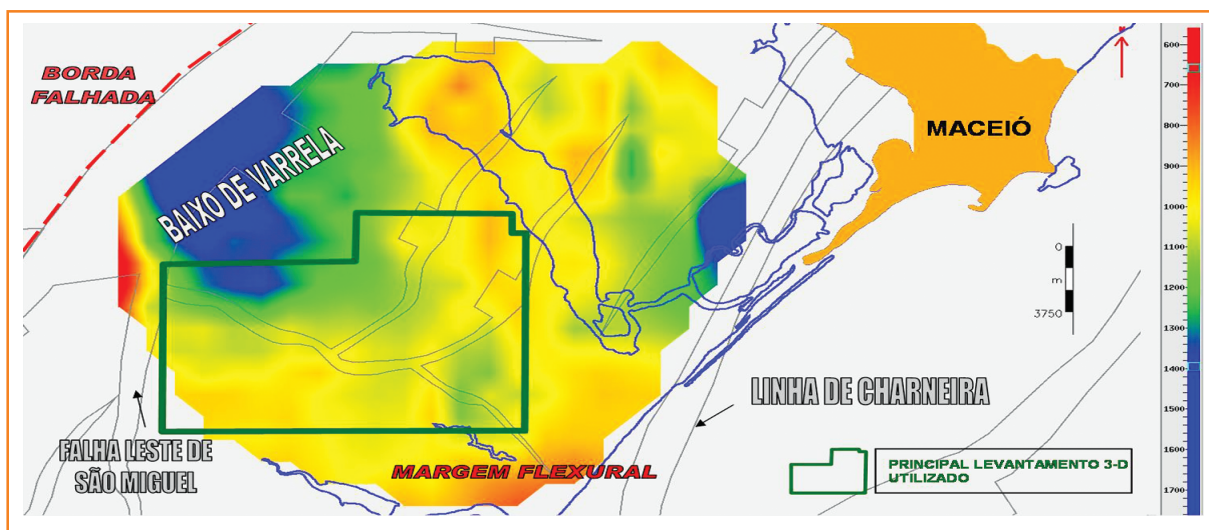


Figura 4
Mapa de isópacos do intervalo Coqueiro Seco, revelando o principal depocentro da área, o Baixo de Varrela, associado à borda falhada da bacia. Na porção sul/sudeste, aparece a margem flexural que bordeja a linha de charneira de idade Alagoas. Em destaque, a área do levantamento 3-D empregado para estudo de detalhamento.

Figure 4
Isopach map of the Coqueiro Seco interval, showing the principal low of the area, named Varrela Low, associated to the border fault. In the south/southeast portion, it exposed the flexural margin around Alagoas hinge line. The area of 3-D employed for detail in this study is highlighted.

A partir da análise dos padrões de empilhamento e superfícies-chave em 16 poços da área, considerados como os de melhor representatividade da sucessão dos estratos em estudo, e a partir da análise do principal levantamento sísmico 3-D utilizado, foi possível propor pelo menos três seqüências T-R nomeadas de S(t-r)1, S(t-r)2 e S(t-r)3 e respectivos tratos de sistemas (figs. 5a e 5b). Estas seqüências envolvem uma extensão temporal de aproximadamente 1,2 Ma. Seu posicionamento bioestratigráfico está vinculado ao zoneamento de ostracodes, estabelecido desde a revisão estratigráfica da bacia de Schaller (1970).

A seção estratigráfica *dip* (NO-SE), plotada nas figuras 6 e 7, está orientada segundo o perfil tipo representativo da geometria em meio-gráben que caracteriza a unidade estrutural basal do rifte.

seqüências T-R

Todas as seqüências aqui estabelecidas estão estruturadas a partir de seus limites basais, nomea-

dos do mais antigo para o mais novo de LS-1, LS-2 e LS-3 e LS-4 (esse último correspondente à discordância pré-Alagoas). Estes limites foram reconhecidos, na sísmica, por terminações de refletores em truncamento erosional.

A análise dos perfis de poços e a sísmica permitiram o reconhecimento dos tratos: TST-1, TSR-1 para a seqüência (t-r) 1; TST-2, TSR-2 para a seqüência (t-r) 2 e o trato TST-3 e TSR-3 (?) para a seqüência (t-r) 3. As características gerais que separam esses tratos puderam ser agrupadas e descritas em conjunto face ao caráter cíclico das sucessões estratiais.

seqüência S(t-r) 1

A seqüência S(t-r)1 é composta pelos tratos TST-1 e TSR-1. Seu limite inferior (LS1) representa o final da deposição dos carbonatos da Formação Morro do Chaves (seqüência S0) e reserva uma estreita relação com a destacada discordância pré-Neojiquiá, de caráter regional na Bacia de Sergipe-Alagoas (passagem da Formação Penedo para a Formação Morro

Abreviações:	Abbreviations
S – seqüências (T-R);	S – sequences (T-R);
LS – limite de seqüência;	LS – limit of sequence;
TST – trato de sistemas transgressivo;	TSR – transgressive systems tract;
SIM – superfície de inundação máxima;	SIM – maximum flooding surface;
TSR – trato de sistemas regressivo.	TSR – regressive systems tract;

Quadro 1 – Abreviações utilizadas nas figuras 5a, 6 e 7.

Table 1 – Abbreviations used in figures 5a, 6 and 7.

Figura 5

Poço-chave representando a proposta de subdivisão em seqüências T-R (transgressivas-regressivas) S(t-r)1, S(t-r)2 e S(t-r)3 para o intervalo de investigação (Formação Coqueiro Seco). Estão assinalados por setas os padrões de empilhamento retrogradacional e progradacional que delimitam os respectivos tratos de sistemas. Abaixo está assinalada a seção de correlação dip relacionada às figuras 6 e 7.

Figure 5

Representative well used for the subdivision of the interval of investigation (Coqueiro Seco Formation) in T-R (transgressive-regressive) sequences S(t-r)1, S(t-r)2 and S(t-r)3. Arrows indicates the progradational and retrogradational staking patterns that mark their respective systems tracts. Below the dip section of correlation formulated in figure 6 and 7.

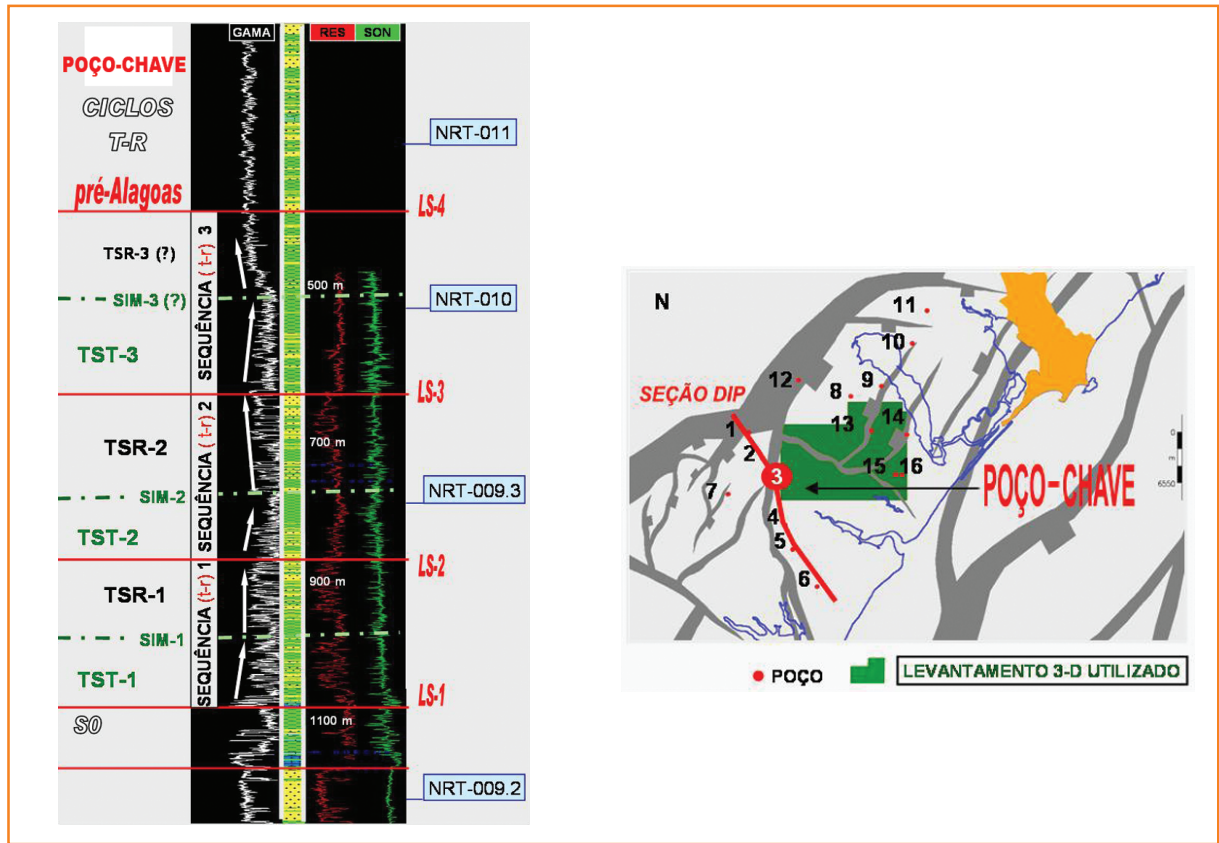


Figura 6

Seção estratigráfica dip apresentando a interpretação do arcabouço estratigráfico para o intervalo de estudo. Notar o contexto de perfil típico em rampa.

Figure 6

Dip oriented stratigraphic cross section showing the interpretation stratigraphic framework for the studied interval. Note the typical ramp profile.

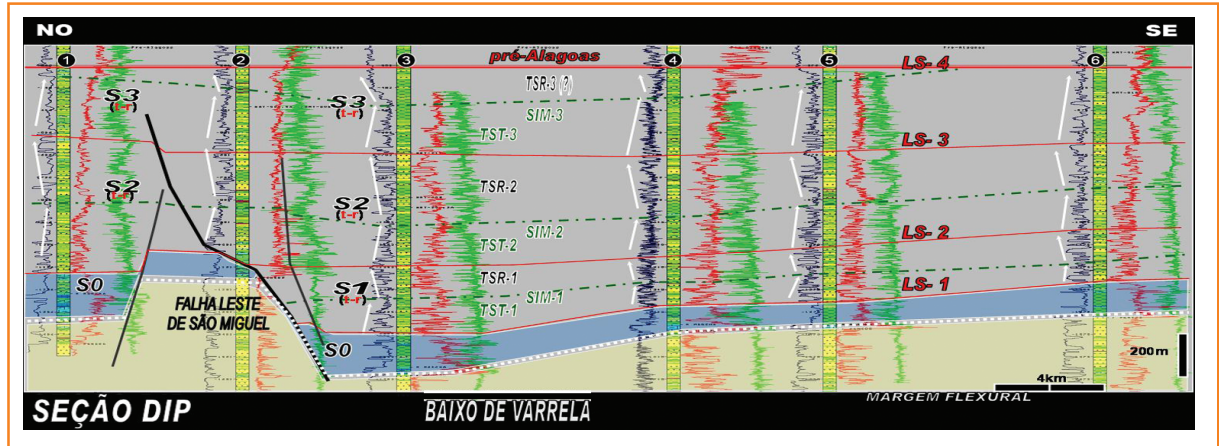
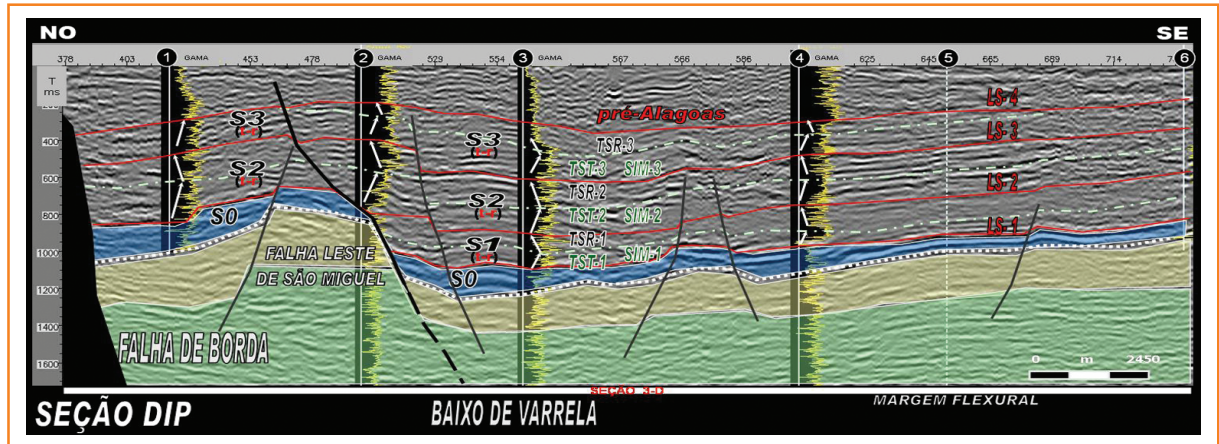


Figura 7

Seção sísmica dip equivalente à seção estratigráfica da figura 6. Consiste em uma linha arbitrária construída em dado sísmico 3-D.

Figure 7

Dipward seismic line equivalent to the stratigraphic cross section of the figure 6. It consists of an arbitrary line built in 3-D seismic data.



do Chaves, correspondente também a uma mudança da subzona NRT – 009.2 para a NRT – 009.3).

Em poços, o limite inferior (LS-1) aparece muito bem caracterizado, sempre correspondendo a uma variação brusca nos perfis de resistividade e sônico, além do marcante contraste de litologia: carbonatos (Morro do Chaves) e arenitos e folhelhos (Coqueiro Seco). Na sísmica, está caracterizado regionalmente por refletores fortes, paralelos e contínuos, principalmente quando pouco estruturados. Essas características são provenientes de bancos de coquinas em forte contraste de impedância acústica com os arenitos e folhelhos da Formação Coqueiro Seco, acima, e com os arenitos Penedo, abaixo. É considerada como uma das mais proeminentes feições na área.

seqüência S(t-r)2

A seqüência S(t-r)2 é composta pelos tratos TST-2, TSR-2 e é considerada como a seqüência de maior visibilidade, seja em poço ou sísmica. Isso fica ainda mais evidente quando há uma maior presença do folhelho transgressivo, informalmente conhecidos como folhelho “C” em estudos internos, de abrangência regional na área de estudo. Nestes casos, a distinção dos tratos transgressivo e regressivo torna-se enormemente facilitada quando apoiada pelas assinaturas dos perfis dos poços, perfis sísmicos e análise de sismofácies.

Seu limite inferior (LS-2) está bem registrado em poço, tendo na sísmica as terminações de refletores em truncamento erosional como principal aferição.

Observam-se expressivos refletores de forte amplitude relacionados aos folhelhos transgressivos (folhelho “C”), por vezes, configurando feições de escalonamento retrogradacional (*backstepping*) da fase transgressiva, com terminações em *onlap*. Por outro lado, ocorrem refletores em clara disposição oblíqua progradacional, interpretados como clinofórmulas progradantes que caracterizam as terminações em *downlaps* sobrepostos à superfície de inundação máxima, corroborando a subdivisão dos tratos.

seqüência S(t-r)3

A seqüência S(t-r)3, a mais superior do intervalo de investigação, é composta pelo trato transgressivo TST-3 e por um possível trato regressivo TSR-3 (?).

Em poço, geralmente aparenta ter um percentual de argila ligeiramente superior às demais. Seu limite inferior está bem delimitado, correspon-

dendo a um marco (discordância) operacional local (zoneamento interno da Petrobras) de boa extensão ao longo da área.

Em seu trato transgressivo, a seqüência S(t-r)3 mostra localmente conjuntos bem definidos de paraseqüências retrogradacionais, destacadas no padrão de perfil de raios-gama (sino invertido). Pode ainda intercalar trechos em padrão serrilhado significando um possível predomínio de uma sedimentação agradacional, representativo do início do trato regressivo.

Um possível trato regressivo pode ser interpretado baseando-se principalmente no comportamento dos perfis de raios-gama que insinua um padrão retrogradacional, porém freqüentemente ausente pela ação da discordância pré-Alagoas.

estudo de fácies sísmicas

Para o estudo de fácies sísmicas, optou-se pelo uso do programa *Stratimagic* (Paradigm) que foi aplicado unicamente no levantamento sísmico 3-D utilizado para detalhamento (fig. 1). É uma ferramenta para análise das variações laterais das respostas sísmicas a partir da forma de onda. Utiliza-se de técnicas de redução de dados (extração de componentes principais – PCA) e métodos de classificação (tecnologia por redes neurais) que otimizam e preservam as características essenciais do dado sísmico. Esta tecnologia afiança que, assim como para as variações laterais dos atributos de amplitude ao longo de uma janela selecionada, as variações nas formas de onda sísmica também correspondem a mudanças laterais de fácies. O principal produto gerado são mapas de fácies sísmicas pelo método da classificação por famílias de traços semelhantes, codificado por cores. Esta ferramenta também serviu de complemento às análises das seqüências T-R e, conseqüentemente, nas definições dos tratos de sistemas transgressivos e regressivos.

Os mapas de fácies obtidos a partir das três seqüências forneceram uma promissora distinção de domínios, levando naturalmente a uma busca de seu significado estratigráfico-deposicional. A ausência de uma diferenciação efetiva na razão arenito/folhelho impede uma conotação geológica direta e preditiva em termos de litofácies, como desejável. No entanto, desde que as sismofácies detectadas representem distintos padrões de deposição, podem-se inferir importantes informações sobre a distribuição sedimentar tais como: prováveis direções de aporte de sedimentos, compartimentação e paleorrelevo.

Dada a complexidade das variáveis envolvidas na deposição dos sistemas deposicionais da fase rifte, é difícil prever o tipo de sedimento que irá se acumular e o tipo de acomodação das associações de fácies. Contudo, sugere-se aqui um comparativo de possíveis padrões de distribuição de sedimentação para uma melhor compreensão da assinatura estratigráfica na área.

Para exemplificação, são apresentados os mapas de fácies sísmica das seqüências S(t-r)1 e S(t-r)2 e respectivos mapas de isópacas, extraídos do aplicativo *Stratimagic* aplicado no levantamento 3-D utilizado para detalhamento (figs. 1 e 5). Refletem de maneira geral uma boa correspondência, delineando-se claramente a forte condicionante tectônica cuja configuração foi herdada do principal depocentro (Baixo de Varrelas), em resposta à ação da borda falhada da bacia. Pelo menos dois grandes compartimentos podem ser delineados na figura 8. O primeiro, representando o principal depocentro (Baixo de Varrelas) associado essencialmente às famílias de classes 5 a 10 na seqüência S(t-r)1 e, em boa parte, da seqüência S(t-r)2. O segundo, relacionado às famílias de classes 2 a 4, correspondendo às porções menos espessas das seqüências. A seqüência S(t-r)2 exibe uma feição em forma de leque no extremo oeste da área, provavelmente associada ao bloco alto da Falha de São Miguel dos Campos. Possíveis direções de aporte de sedimento são indicadas com setas brancas.

padrões de distribuição

A seqüência S(t-r)2 foi escolhida para um maior detalhamento dos padrões de distribuição assinalados por apresentar maior confiabilidade tanto em perfis de poços quanto na sísmica. Para isso, procedeu-se não só a geração de dois mapas de fácies distintos, separando os tratos transgressivo e regressivo desta seqüência, como também a realização de um estudo comparativo dos atributos granulométricos das areias para cada intervalo de poço relacionado a cada trato de sistemas (figs. 9a e 9b). Esta seqüência ainda registra a transgressão mais bem preservada da área.

A peculiar característica dos estratos Coqueiro Seco de apresentar uma razão arenito/folhelho aproximadamente constante (em torno de 50%) não foi capaz de produzir uma correspondência direta com as sismofácies.

A despeito de um melhor posicionamento dos poços, o que se constata é uma boa correlação aos atributos granulométricos das areias. A predominância da fração fina das areias, no trato transgressivo, pode apontar para uma maior razão entre espaço de acomodação e suprimento de sedimento. Em contrapartida, a predominância da fração grossa das areias sinaliza para uma menor razão entre espaço de acomodação e suprimento de sedimentos patro-

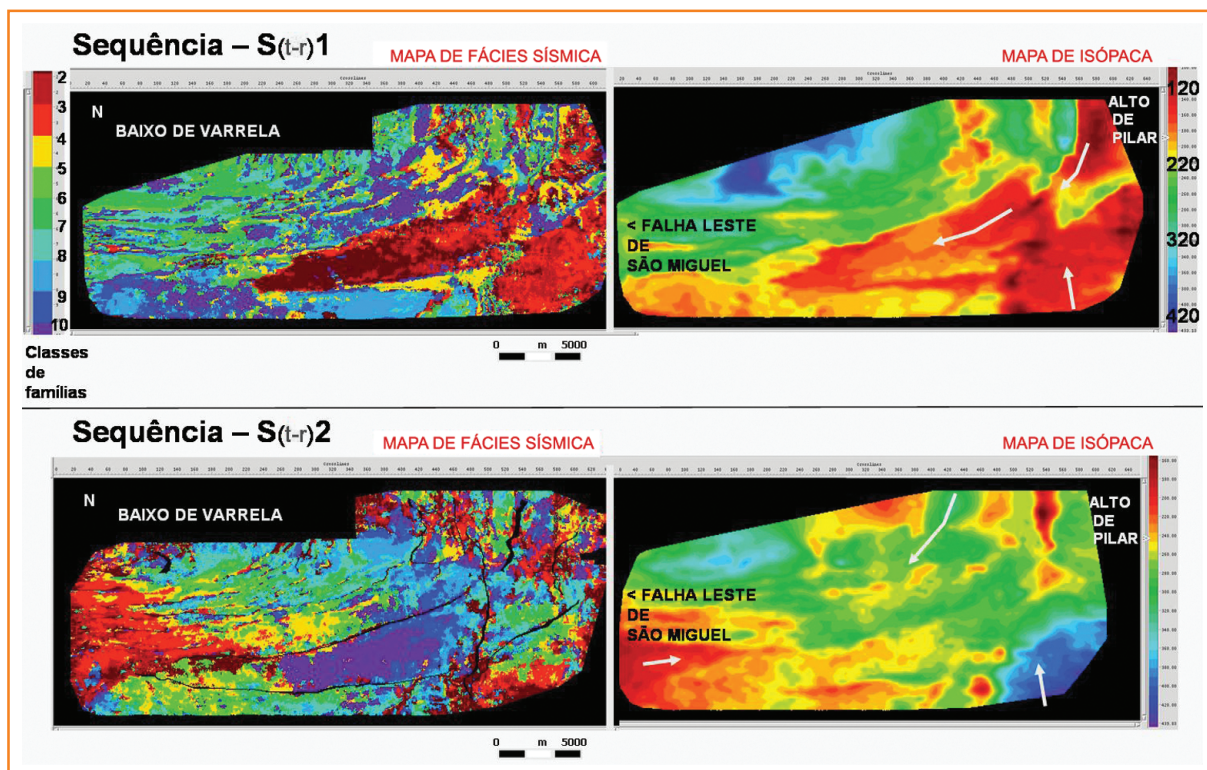


Figura 8
Mapas de fácies sísmica das seqüências S(t-r)1 e S(t-r)2 comparados aos seus respectivos mapas de isópacas, exibindo uma clara correspondência.

Figure 8
Seismic facies maps for the sequences S(t-r)1 and S(t-r)2 compared to their respective isopach maps, suggesting fair correlation.

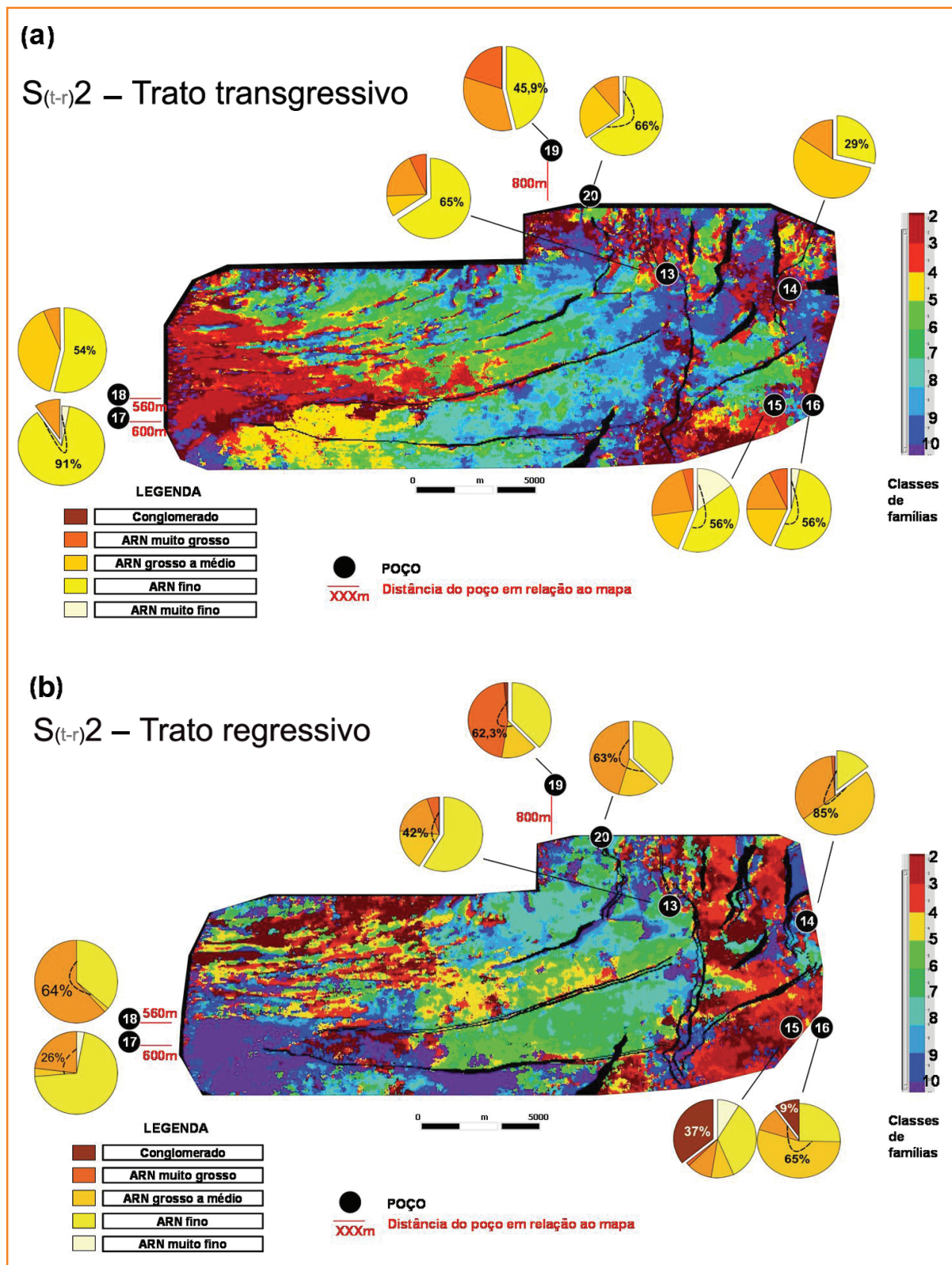


Figura 9
 Mapas de fácies sísmicas dos tratos transgressivo e regressivo da sequência $S_{(t-r)2}$: (a) distribuição granulométrica para o trato transgressivo dos poços selecionados, mostrando a predominância de areias finas a muito finas e a feição de leque deposicional; (b) distribuição granulométrica para o intervalo do trato regressivo dos mesmos poços, revelando uma importante contribuição de areias médias a muito grossas. Há uma clara compartimentação no setor leste da área, onde a fração conglomerática se destaca (poços 15 e 16).

Figure 9
 Seismic facies maps of the transgressive and regressive systems tracts for the sequence $S_{(t-r)2}$: (a) granulometric distribution for the transgressive systems tracts in selected wells, showing the predominance of fine to very fine sandstones and the fan-shaped depositional geometry; (b) granulometric distribution for the regressive systems tracts intervals at the same wells, but revealing a coarser (medium to very coarse sandstones) contribution. It is also discernible a clear separation of an eastern sector, where conglomeratic sandstones dominate (wells 15 and 16).

cinado pelo *trend* deposicional progradacional, relacionado ao trato regressivo. A mudança do estilo deposicional ilustra uma partição sedimentar distinta entre *trends* retrogradacionais (TST) abaixo e

agradacionais a progradacionais (TSR) acima, corroborando os ciclos transgressivos-regressivos propostos, podendo estar associada tanto a causas climáticas como tectônicas.

discussão

Em particular, a área estudada em detalhe corresponde a um contexto paleofisiográfico representado por uma extensa rampa flexural que favoreceu um importante balanceamento em termos de magnitude de carga e/ou atributos granulométricos, a julgar pela significativa espessura e intensa ritmicidade de litotipos. Este preenchimento teria sido construído obedecendo a uma interação dos fluxos de sedimentos, oriundos dos altos adjacentes e da margem flexural, com as drenagens tectonicamente controladas, e em grande parte subordinadas à principal calha tectônica.

Sismicamente, predomina o padrão plano-paralelo e divergente das reflexões em resposta ao típico perfil em rampa (fig.10). As análises dos dados de reflexão sísmica na área permitiram definir as seguintes generalizações utilizadas no reconhecimento dos ciclos transgressivos-regressivos:

- I configuração de refletores essencialmente contínua e paralela, interpretados como concernentes às fases transgressivas. Estes refletores são também caracterizados por feições de *onlap*.
- II conjunto de configuração de refletores oblíquos, interpretados como clinofomas progradantes das fases de preenchimento regressivo. Estes refletores são caracterizados por terminações em *downlap*;
- III limites de seqüências caracterizados sismicamente, por terminações de refletores em truncamento erosional.

Cada seqüência aqui proposta consiste em um distinto episódio deposicional que, em linhas gerais, corresponderia ao esquema evolutivo, como ilustrado na figura 11, que melhor representaria o empilhamento vertical observado.

A alternância de fases de tectonismo e quiescência parece retratar a arquitetura dos depósitos da Formação Coqueiro Seco analisados.

A maioria dos modelos de preenchimento de rifte, em uma escala regional, descreve a fase tectonicamente ativa como diretamente ligada ao aumento das taxas de subsidência/soerguimento (criação de espaço do bloco baixo e elevação do bloco alto). Já a fase de quiescência estaria associada basicamente às progradações dos sistemas deposicionais e à concomitante diminuição progressiva da subida do nível de base. A sucessão sedimentar do intervalo estudado, em linhas gerais, segue esse padrão.

Em sua porção subaérea, uma expressiva quantidade de sedimentos teria sido carregada segundo um modelo de deltas tipo *braided*, como argumentado por Falconi (1990). Baseado essencialmente na análise de testemunhos, este autor admitiu uma composição em pelo menos cinco ambientes para este modelo de sistema deposicional, a partir de sua posição proximal: ambiente de planície aluvial, planície deltaica, frente deltaica e prodelta e lacustre (fig.12).

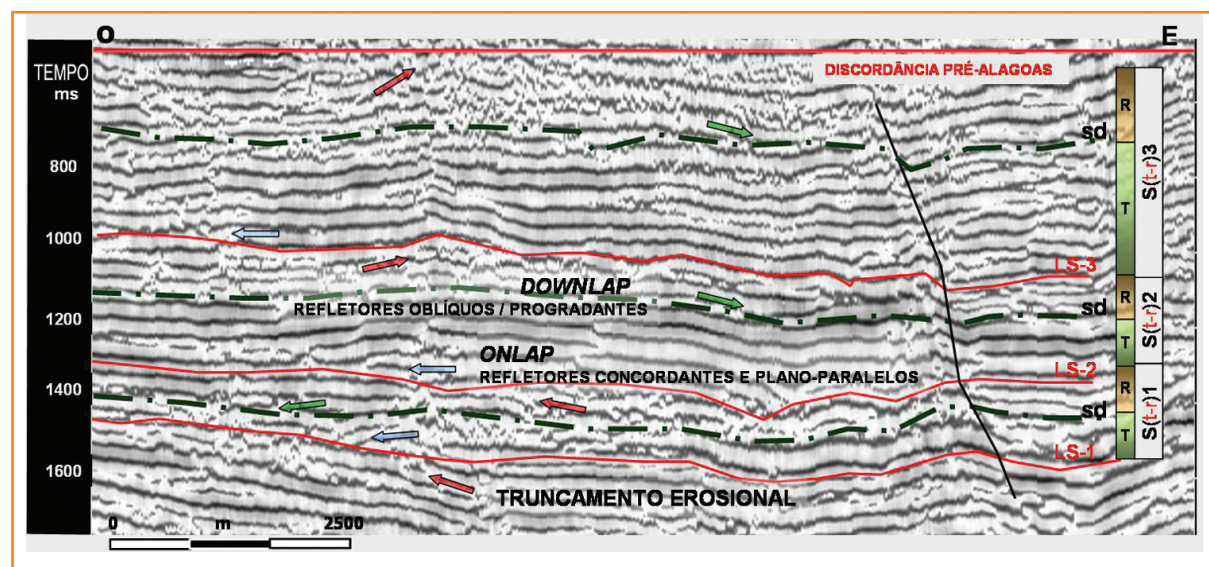
O episódio deposicional Coqueiro Seco pode ser considerado ainda sob outra perspectiva a partir da mencionada ocorrência dos evaporitos denominados Horizonte, levando à pressuposição do contexto não exclusivamente continental. Estudos recentes desta ocorrência (Souza-Lima, 2008) direcionam para uma efetiva possibilidade de uma incursão ma-

Figura 10

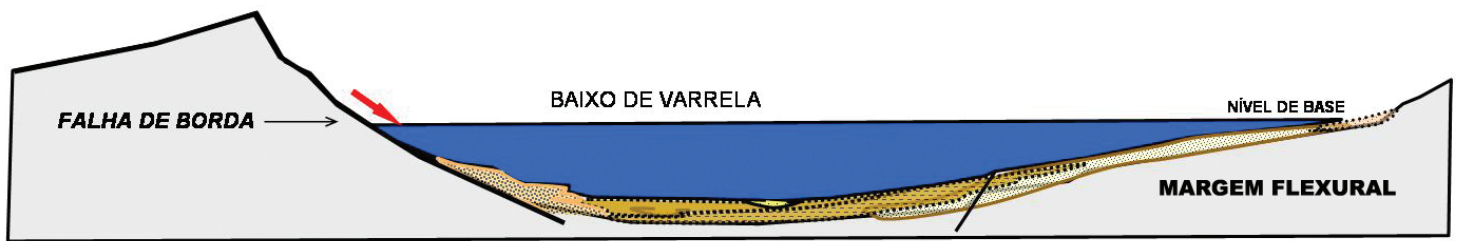
Seção sísmica horizontalizada representativa da área de estudo, inserida no levantamento 3-D utilizado para detalhamento, mostrando as configurações e terminações de refletores características dos ciclos transgressivos-regressivos propostos. Terminações de refletores em *onlap* caracterizam a transgressão que se mostra em refletores paralelos e concordantes. As terminações em *downlap* caracterizam clinofomas progradantes referentes ao preenchimento regressivo. Os limites de seqüência são caracterizados por feições e truncamentos erosionais. T – fase transgressiva; R – fase regressiva; sd – superfície de *downlap*; LS – limite de seqüência.

Figure 10

Representative seismic section of the study area from the mainly 3-D employed for detail in this work, illustrating the characteristic reflectors' patterns of the proposed transgressive-regressive cycles. The transgression is characterized by parallel and conformable reflectors that onlap the depositional surface. The regressive phase is characterized by prograding clinofoms disposed in downlap reflection terminations. T – transgressive phase; R – regressive phase; ds – downlap surface; sl – sequence limit.



(a) Intenso tectonismo ==> Trato transgressivo



(b) Quiescência tectônica ==> Trato regressivo

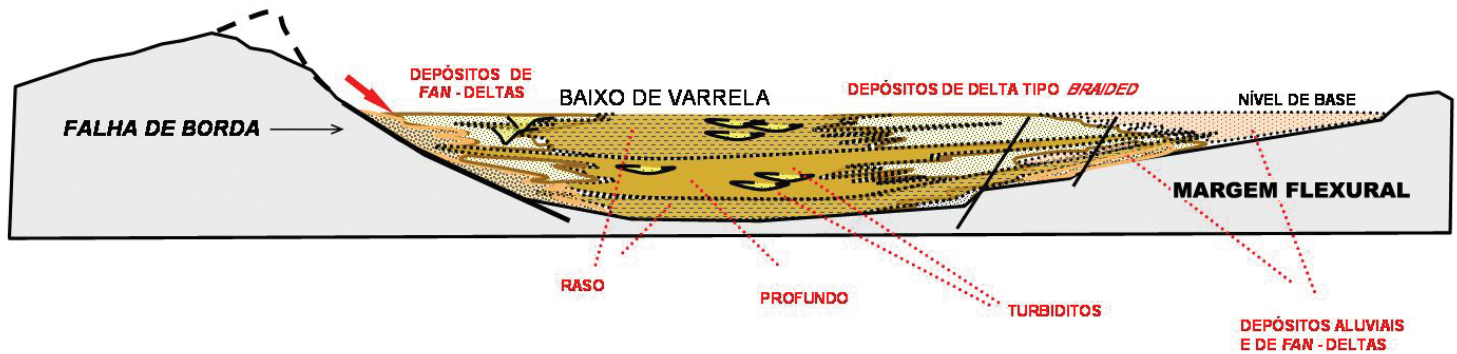


Figura 11 – Esquema evolutivo de preenchimento sedimentar a partir da geometria de meio-gráben durante um ciclo transgressivo-regressivo. Compõe-se de um estágio inicial de intensa atividade tectônica e:

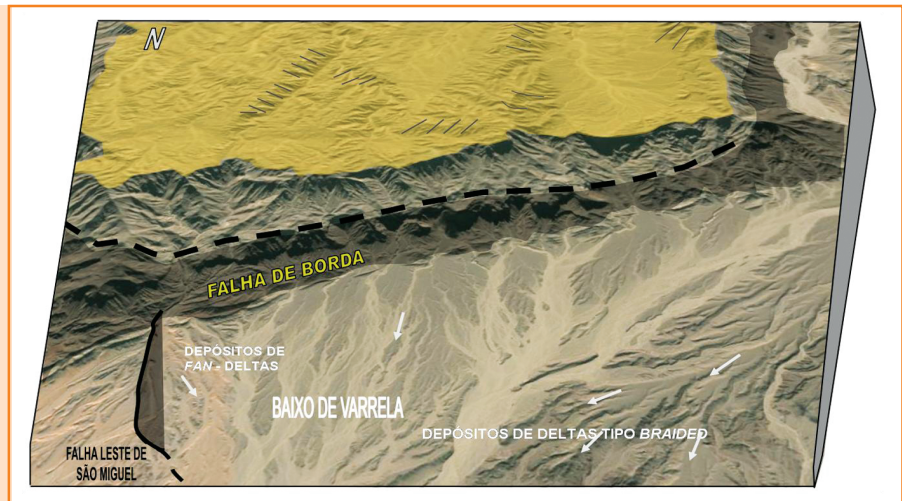
- (a) sedimentação predominantemente lacustre, seguida por um estágio de quiescência tectônica;
- (b) sedimentação predominantemente flúvio-deltaica.

Figure 11 – Schematic diagram illustrating a half-graben infilling during a Transgressive-Regressive cycle. Initially it is conditioned by intensive tectonic activity with:

- (a) an essentially lacustrine sedimentation, followed by a final phase of tectonic quiescence;
- (b) dominant fluvial-deltaic sedimentation.

Figura 12 – Modelo esquemático para ilustrar o cenário deposicional da Formação Coqueiro Seco na Sub-bacia de Alagoas. O preenchimento sedimentar está relacionado, essencialmente, a um complexo sistema coalescente de deltas tipo braided, associado às principais falhas da área (Falha de borda e falha leste de São Miguel).

Figure 12 – Schematic model to illustrate the depositional setting of the Coqueiro Seco Formation in the Alagoas Sub-basin. The sedimentary infill is related essentially to a complex coalescent braided delta system associated to the subsiding footwall of the main faults in the area (border fault and São Miguel Fault).



rinha anterior aos eventos Paripueira, mostrando tratar-se de um acontecimento distinto que representa o mais antigo registro evaporítico da bacia. Está fora da presente discussão apresentar um conteúdo mais detalhado acerca dos depósitos salíferos Horizonte e suas implicações num possível cenário marinho-

transicional precoce. Importa retratar aqui que este evento está posicionado, estratigraficamente, na porção superior da seqüência S(t-r)3, relacionado ao seu trato transgressivo. Efetivamente, os depósitos de sais de halita mostram pouca expressividade sísmica, sendo sua detecção restrita ao Baixo de Varrela.

conclusão

Os depósitos sinrifte de idade eo a mesoaptiana da Formação Coqueiro Seco, Bacia de Sergipe-Alagoas, foram aqui subdivididos em três seqüências T-R – nominadas de S(t-r)1, S(t-r)2 e S(t-r)3 e respectivos tratos de sistemas – limitadas por discordâncias de caráter erosivo. Esta subdivisão foi efetivada pela integração entre os dados de poços e a sísmica de reflexão. O arcabouço sismoestratigráfico construído foi centrado no reconhecimento de ciclos transgressivo-regressivos, conforme Embry e Johannessen (1992) e Embry (1993, 2002), com base na avaliação de padrões de empilhamento dos estratos e superfícies-chave. Este tratamento foi considerado conclusivo em termos de proposta de fatiamento do intervalo em seqüências estratigráficas geneticamente consistentes. A não-diferenciação de tratos de nível alto e baixo, com dados de poços e sísmicos, tornou a aplicação de modelos mais usuais de Estratigrafia de Seqüências inapropriado.

O posicionamento estratigráfico da subdivisão proposta foi definido a partir do zoneamento bioestratigráfico de ostracodes estabelecido na área. A sincronização desse zoneamento obedeceu ao critério das unidades cronoestratigráficas locais, constituídas desde a revisão estratigráfica da Bacia de Sergipe-Alagoas de Schaller (1970).

O decisivo cenário tectônico da área pode ser apontado, em grande parte, como o responsável pelo arranjo sedimentar encontrado, cuja principal condicionante estrutural de tal arranjo foi herdada do singular depocentro (Baixo de Varrela), em resposta à ação da borda falhada da bacia. A área de detalhamento ostenta um perfil de uma extensa rampa flexural que favoreceu a um importante balanceamento de carga de sedimentos e atributos granulométricos.

Ambientes essencialmente flúvio-deltaicos e lacustre raso estariam coligados à margem flexural; contemporaneamente, leques aluviais e *fan*-deltas coalescentes se depositariam ao longo da falha de borda, interdigitados a pelitos lacustres. A efetiva ação exercida pela importante depressão tectônica (Baixo de Varrela) está expressa nos mapas apresentados, sejam estruturais sísmicos, de isópacas ou de sismofácies bem como as seções de correlação geológica e sísmica, revelando categoricamente esta conformação.

A área é caracterizada, sísmicamente, pela predominância de padrões de reflexões plano-paralelos e divergentes relacionados à típica fisiografia em rampa.

Os sucessivos episódios deposicionais encontrados refletem um preenchimento intensamente rítmico, consistente, ordenado por padrões de empilhamento retrogradacional, progradacional e agradacional.

O encerramento da deposição dos clásticos terrígenos da Formação Coqueiro Seco está demarcado pela ampla discordância pré-Alagoas que antecede a sedimentação dos folhelhos do Membro Ponta Verde.

agradecimentos

O autor agradece à Petrobras pela autorização concedida, e mais designadamente ao Comitê Editorial do Boletim de Geociências da Petrobras, na pessoa do Doutor Edison J. Milani, pela oportunidade de submissão deste trabalho. Ao geólogo Wilson Rubem Winter pela avaliação criteriosa do texto e em especial, ao geólogo Wagner de Souza Lima pela extrema boa-vontade e pela paciência nas correções e na estruturação final do presente artigo. Finalmente, aos demais colegas que contribuíram com destacadas sugestões.

referências bibliográficas

CAMPOS NETO, O. P.; SOUZA-LIMA, W.; CRUZ, F. E. G. Bacia de Sergipe-Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 405-415, maio/nov. 2007.

CATUNEANU, O. **Principles of Sequence Stratigraphy**. Amsterdam: Elsevier, 2006. 375 p.

DESTRO, N.; SZARMARI, P.; MAGNAVITA, L. P. Release faults, associated structures, and their control on petroleum trends in the Recôncavo rift, Northeast Brazil. **American Association of Petroleum Geologist. Bulletin**, Tulsa, Okla., v. 87, n. 7, p. 1123-1144, jul. 2003.

bibliografia

EMBRY, A. F. and JOHANNESSEN, E. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the upper most Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada. In: VORREN, T. O.; BERGSAGER, E.; DAHL-STAMNES, O. A.; HOLTER, E.; JOHANSEN, B.; LIE, E.; LUND, T. B. (Ed.). **Arctic Geology and Petroleum Potencial**. Oslo: Norwegian Petroleum Society, p. 121-146, 1992. (NPS. Special Publication, 2).

EMBRY, A. F. Transgressive-regressive (T-R) sequence analysis of the Jurassic succession of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago. **Canadian Journal of Earth Science**, v. 30, p. 301-320, 1993.

EMBRY, A. F. Transgressive-regressive (T-R) sequence stratigraphy. In: Annual Gulf Coast Section SEPM Foundation Bob F. Perkins Research Conference, 22., 2002, Texas. **Anais...** Texas: GCSSEPM Foundation Bob F. Perkins Research Conference, 2002, p. 151-172.

FALCONI, C. M. O. **Sedimentação e caracterização dos arenitos-reservatório da Formação Coqueiro seco (Cretáceo inferior), Campo de Pilar, Bacia de Sergipe-Alagoas**. 1990. 178 p. Tese (Mestrado) – Universidade federal de Ouro Preto, 1990.

SCHALLER, H. Revisão estratigráfica da Bacia de Sergipe/Alagoas. **Boletim Técnico da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 21-86, 1970.

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.

SOUZA-LIMA, W.; ANDRADE, E.J.; BENGTON, P.; GALM, P.C. **A Bacia de Sergipe-Alagoas: evolução geológica, estratigrafia e conteúdo fóssil**. Aracaju: Fundação Paleontológica Phoenix, 2002. 34 p. Edição especial, 1.

SOUZA-LIMA, Wagner. Seqüências evaporíticas da bacia de Sergipe-Alagoas. In: MOHRIAK, Webster Ueipass; SZATMARI, Peter; ANJOS, Sylvia Maria Couto dos (Org.). **Sal, geologia e tectônica: exemplos nas bacias brasileiras**. São Paulo: Beca, 2008. cap. 9, p. 111-127.

VAN WAGONER, J. C.; POSAMENTIER, H. W.; MITCHUM, R. M.; VAILI, P. R.; SARG, J. F.; LOUTIT, T. S.; HARDENBOL, J. An overview of the fundamentals of the sequence stratigraphy and key definitions. In: WILGUS, C. K.; KENDALL, C.G.St.C.; POSAMENTIER, H. W.; ROSS, C. A.; VAN WAGONER, J. C. (Ed.). **Sea-level changes: an integrated approach**. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 1988. (SEPM. Special Publication, 42).

expanded abstract

The main purpose of this study was to build a stratigraphic framework for the interval early-mid Aptian sinrift deposits (Coqueiro Seco Formation) of the Sergipe-Alagoas Basin. It is composed mainly by clastic rocks which are distributed from the northern part of the Sergipe Sub-basin to the northeastern extreme of the Alagoas Sub-basin, where it reaches thicknesses up to 3.000m.

The studied interval consists in a succession of transgressive and regressive phases that could be arranged in, at least, three sequences: S(t-r)1, S(t-r)2 and S(t-r)3, and their respective systems tracts, limited by erosional unconformities. This subdivision was done by the integration between seismic reflection and well logs. The seismostratigraphic framework built was focused on the recognition of transgressive-regressive cycles, *sensu* Embry and Johannessen (1992) and Embry (1993, 2006), based on stacking pattern recognition and key-surface determination. This approach could be considered conclusive in terms of proposal for subdivision of the interval in genetically consistent stratigraphic sequences. It was not possible to make the identification of high and low level tracts on well and seismic data, and this avoid the use of more usual sequence stratigraphy models.

All pre-selected data set for the present study totaled 245 exploratory wells, 383 2-D seismic lines and seven 3-D seismic surveys. The methodology used in this study comprises: search and selection of wells and seismic data in order to attend the criteria of better representation of the analyzed stratigraphic interval; recognizing of stacking patterns; key-surfaces definition based in well logs and by the configuration and termination of reflectors, and seismic facies analysis.

The proposed subdivision could be correlated to the biostratigraphic zonation established in the area, mainly by biozone ostracodes. This zonation is linked to local chronostratigraphic units defined since Sergipe-Alagoas Basin stratigraphic revision (Schaller, 1970).

All the established sequences are structured from their basal limits, called from the oldest to the newest: LS-1, LS-2 and LS-3 and LS-4 (this last one corresponds to pré-Alagoas discordance). In seismic, reflector terminations on erosional truncation were decisive for the recognition of those limits. It was recognized the tracts TST-1 and TSR-1 for sequence (t-r) 1; TST-2,

TSR-2 for sequence (t-r) 2 and TST-3 and TSR-3 (?) for sequence (t-r) 3. General characteristics that differentiate the system tracts could be grouped and described together, as a consequence of the cyclical character of the strata successions.

The concerned area is seismically characterized by the predominance of plan-parallel and divergent reflection patterns, associated to the typical physiography of ramp. Emphasized parallelism and consequent low angle of reflection termination made difficult the immediate recognition of downlaps, onlaps and erosional truncation surfaces, which are essential for recognizing of the key surfaces. Making an effort to overcome the problems as stated, Stratimagic software (Paradigm) was used. In general terms this software is a tool for lateral variation analysis of seismic answers from the waveform. Facies maps generated by the software supplied a promising domain distinction, which led to a search for its stratigraphic-depositional meaning. The lack of a real differentiation of the sandstone/shale ratio prevents the direct predictive geological connotation concerning lithofacies, as desirable. However, considering that the detected seismic facies represent deposition patterns, it is possible to realize about sediment distribution (probable directions of sediment incoming, compartments) and paleotopography.

Due to complexity of variables involved on deposition in rift systems, it is difficult to foresee what kind of sediment will be accumulated and what kind of accommodation is available. Nevertheless, possible patterns on sediment distribution for a better understanding of stratigraphic signature in the concerned area were promoted.

Particularly in the studied area, It could be defined a paleofisiographic context represented by an extensive flexural ramp that had an important task balancing related to load magnitude and/or granulometric attributes, as can be inferred by the significant thickness and intense rhythm of lithotypes as a whole.

Decisive tectonic scenario could be pointed out, largely, as the responsible for the sediment arrangement found. The principal structural restriction for this arrangement was that inherited from the singular depocenter (Varrela Low) formed by the action the basin faulted edge. Mainly fluvio-deltaic and shallow lacustrine environments would be associated to flexural margin in a more distal context, whereas,

alluvial fans and coalescent fan-deltas would be deposited along the border fault, interfingering to the lacustrine mudstones in the deepest context. The clear action carried out by the outstanding tectonic depression is expressed by the presented maps, either structural seismic and isopach, or seismofacies, or even seismic and stratigraphic correlation sections, revealing emphatically this configuration.

The Coqueiro Seco Formation has been focused in many works and multiple approaches, which aimed at the understanding of its depositional systems. In general, all the models assumed a clear tectonic control to sedimentation in a progradational common pattern.