



Aplicação da estratigrafia de sequências em bacias rifte: análise sismoestratigráfica na porção central da Bacia do Recôncavo

Taíla C. S. Sant'Ana* (UFBA), Felipe S. Moreira (UFBA) and Michael Holz (UFBA)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

In this present article, it was carried out an applied study of the sequence stratigraphy in rift basins and sismoestratigraphy, with the aim to get a better understanding of the stratigraphic evolution and the structural framework of the Recôncavo Basin, in line with the researchers developed by the Grupo de Estratigrafia Teórica e Aplicada (GETA-UFBA). The study area is located in the central portion of the Recôncavo basin, which is part of the Recôncavo-Tucano-Jatobá failed rift arm. The data interpretation was based on the identification of patterns and characteristics facies of Tectonic Systems Tracts, based on the Prosser's model (1993) changed by Holz et al. (2014). For the application of theoretical concepts, were used well geophysical logs and 2D seismic lines which run throughout the study area. After bibliographic studies, it was happened the initial stage of interpretation of geophysical logs. The subsequent stage was based on the interpretation of seismic data and synthetic seismograms from geophysical logs were made for this. Through the association between the results of well logs and seismic interpretations were made geological correlation sections. Representative maps of stratigraphic surfaces were configured in striking results of the interpretations of the data.

Introdução

O poder de adaptação da estratigrafia de sequências a diferentes contextos geológicos é uma peça-chave no estudo estratigráfico quando a área estudada foge dos "padrões eustáticos" das bacias de margem passiva.

As bacias rifte se inserem em um destes contextos diferenciados, no qual o principal parâmetro controlador do nível de base não mais corresponde às variações do nível do mar, já que os intensos movimentos tectônicos assumem este papel ao sincronizar a criação e destruição de espaço de acomodação. Formam-se em um contexto tectônico de extensão e gradual estiramento da crosta continental, podendo resultar no rompimento efetivo, gerando uma bacia de margem passiva, ou em um rifte abortado com estruturação preservada, caso da bacia em estudo. Além do substancial papel da tectônica como parâmetro controlador nessas bacias, a dinâmica

de formação e preenchimento das mesmas são também muito influenciadas pelo aporte sedimentar e clima atuante.

Localizada no Nordeste do Brasil, a Bacia do Recôncavo se originou na abertura do paleocontinente Gondwana, no Eocretáceo (144 MA). Sua disposição estrutural se consiste em diversos sistemas de falhamentos normais extensionais, acarretando então uma configuração geral de meio-gráben com orientação NE-SW, caracterizado por uma calha deposicional assimétrica. Na porção mais profunda desta calha se desenvolveu a falha de borda (sistema de falhas de Salvador), enquanto que a margem flexural se estabeleceu à NW.

O arranjo dos sistemas deposicionais nesse contexto é controlado principalmente pela geometria do meio-gráben e atuação do clima. A partir da margem flexural, se desenvolveram sistemas fluviais que distalmente gradaram para sistemas deltaicos. Por sua vez, junto à falha de borda de alto declive evoluíram gradativamente sistemas de leques aluviais, enquanto no depocentro da calha se desenvolveu o sistema lacustre com fluxos gravitacionais de sedimentos.

Estratigrafia de sequências em bacias rifte

A estratigrafia de sequências permite o entendimento da evolução e da arquitetura de preenchimento das bacias sedimentares com base na análise das mudanças de tendências deposicionais (progradação, retrogradação, agradação) e dos padrões de empilhamento estratal resultantes, os quais são controlados por mudanças no equilíbrio entre espaço de acomodação e aporte sedimentar (Catuneanu *et al.*, 2010).

A aplicação desta ciência geológica à bacia rifte requer uma adaptação dos conceitos e métodos ao conjunto de variáveis condicionadoras e controladoras da deposição e preservação dos sedimentos em riftes (Kuchle, 2007). Dessa forma, com base em Prosser (1993) e Holz *et al.* (2014), neste trabalho adotou-se um modelo estratigráfico no qual a fase sin-rifte é dividida basicamente em três tratos tectônicos: Trato Tectônico de Início de Rifte (TTIR), Trato Tectônico de Desenvolvimento de Rifte (TTDR) e Trato Tectônico de Final de Rifte (TTFR).

Sismoestratigrafia

A sismoestratigrafia foi definida por Vail e Mithchum (1977) como o estudo da estratigrafia e das características deposicionais interpretadas a partir de dados sísmicos; se molda na identificação das terminações estratais e de formas externas e internas características de determinados processos sedimentares, tendo em vista a associação entre refletores com determinados padrões de empilhamento e fácies

sísmicas, permitindo a correta identificação de superfícies estratigráficas.

Apesar de ter sido estabelecida inicialmente em um contexto de margem passiva, esta análise não depende do modelo estratigráfico na qual está sendo empregada, já que representa um indicio de qualquer sucessão sedimentar (Catuneanu, 2006).

Materiais e Métodos

A aplicação prática da sismoestratigrafia e estratigrafia de seqüências em bacias rifte foi efetuada através de confecções de seções geológicas e interpretação de seções sísmicas com base nos dados disponíveis objetivando uma melhor compreensão da evolução deposicional da bacia do Recôncavo na sua região central, com ênfase à sua fase rifte.

Com este intuito, foram selecionadas na área de estudo dados de poço e linhas sísmicas migradas em tempo (Figura 1), com base na cobertura e disposição espacial dos mesmos. Foram interpretadas sete linhas sísmicas, denominadas de 0006, 0007, 1402, 1407, 1408, 1410, 1421, sendo quatro delas *dip* (NW-SE) e três *strike* (NE-SW), e 9 poços, denominados de 1 a 9, com seus respectivos perfis geofísicos. A profundidade máxima desses poços variou entre 1646 e 3449 metros, em geral abrangendo estratos do pré-rifte ao final de rifte. Estes dados foram devidamente carregados, tratados e interpretados utilizando a plataforma IHSTM Kingdom.

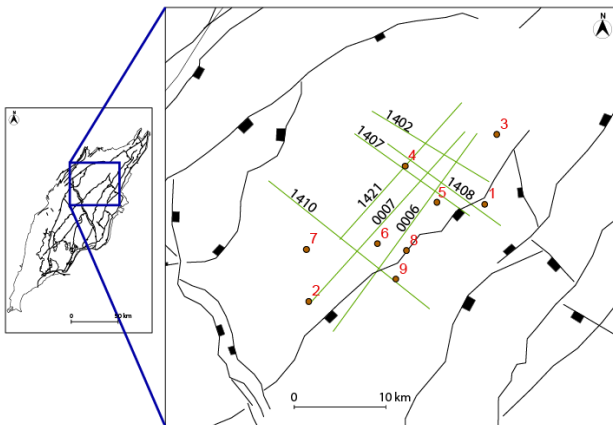


Figura 1: Localização dos poços e linhas sísmicas na Bacia do Recôncavo (Mapa de Destro, 2002).

Interpretação de perfis geofísicos

Dos perfis geofísicos analisados, o perfil de Raios Gama (GR), cuja escala geralmente varia de 0 a 150 API, constitui o de maior preferência devido à sua capacidade de diferenciar de forma satisfatória as principais litologias presentes na bacia em estudo (arenitos e folhelhos). Nos casos em que houve a ausência da curva do GR, optou-se pela interpretação do perfil de Potencial Espontâneo (SP) devido à similaridade entre estas duas curvas para grandes profundidades.

Por meio das análises realizadas no perfil GR nos poços da área foi possível a interpretação de algumas principais fácies sedimentares que estão relacionadas aos sistemas deposicionais, e, conseqüentemente, às Sequências Pré-rifte e Sin-rifte. A partir da identificação destas fácies

sedimentares nos perfis geofísicos, foi possível inferir as mudanças de sistemas deposicionais e suas tendências. Ao integrar estas interpretações com o conhecimento teórico da estratigrafia de seqüências em bacias rifte, identificou-se 5 principais superfícies e discordâncias nos poços:

- A Discordância Basal (DB), que marca o topo do embasamento e base dos estratos acima depositados (em geral estratos pré-rifte), foi encontrada apenas no poço 8, que se encontra na escarpa de uma falha, não apresentando estratos do pré-rifte e do TTIR.

- A Discordância Sin-rifte (DSR) (Figura 2) separa padrões de GR bastante serrilhados e variáveis, correspondentes à Sequência Pré-rifte com possível presença de arcóseos nos arenitos fluvio-deltáicos, de padrões de GR progradacionais a agradacionais do TTIR, quando a criação de espaço pelo tectonismo incipiente ainda não é capaz de superar o aporte sedimentar.

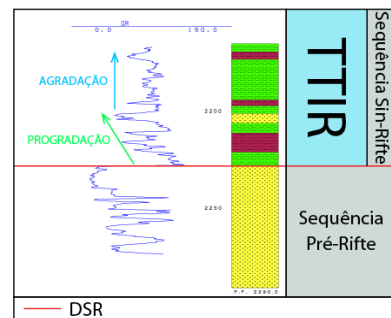


Figura 2: Exemplo demarcação da DSR - Poço 4.

- A Superfície de Início de Desenvolvimento de Rifte (SIDR) (Figura 3) caracteriza a intensificação do tectonismo e a conexão das pequenas falhas e sub-bacia do TTIR de forma a moldar a bacia na configuração de meio-gráben, proporcionando uma rápida transgressão lacustre no TTDR. Dessa forma, o padrão da curva GR no TTDR se apresenta em valores mais elevados, correspondentes ao lamito lacustre e com um caráter mais retrogradacional.

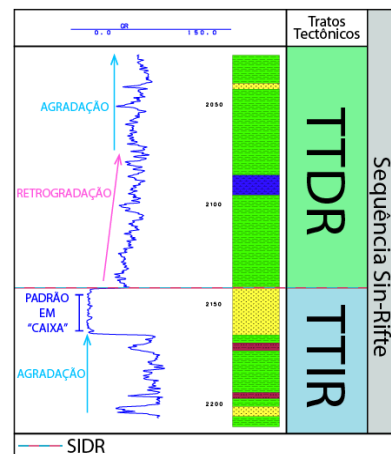


Figura 3: Exemplo de demarcação da SIDR- Poço 4.

- A Superfície de Máximo Rifteamento (SMR) (Figura 4) caracteriza o início do declínio da atividade tectônica, com a máxima expansão do sistema lacustre e recuo dos sistemas deposicionais costeiros em direção à margem

flexural. Marca a transição do TTDR para o TTFR, no qual a criação de espaço de acomodação é gradativamente superada pelo aporte sedimentar, que passa a progradar oriundo da margem flexural.

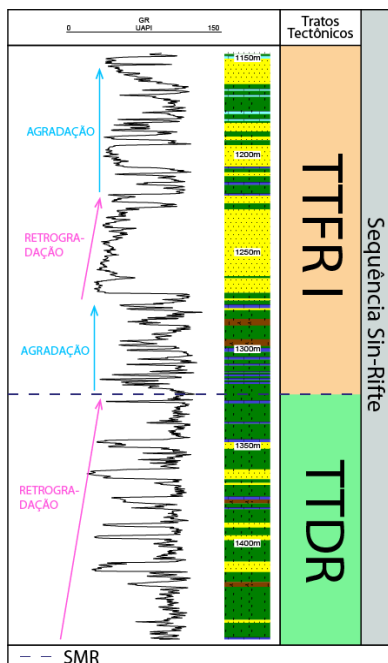


Figura 4: Exemplo de demarcação da SMR - Poço 6.

- A Superfície de Tendência de Fácies (STF) (Figura 5) permite um melhor detalhamento do registro sedimentar, já que representa a mudança natural de fácies do sistema deltaico (curva de GR em padrão “funil” - TTFR I) para o fluvial (curva de GR em padrão “sino” - TTFR II).

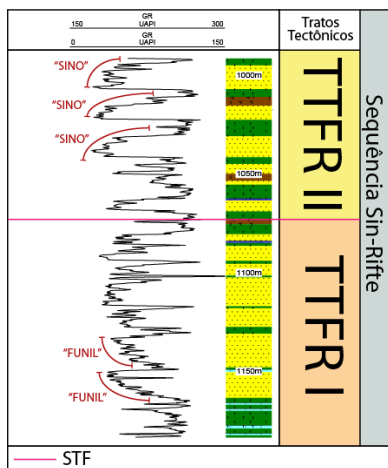


Figura 5: Exemplo de demarcação da STF - Poço 6.

Parâmetros da análise sismoestratigráfica

Na conjuntura de bacias rifte, os dados sísmicos fornecem informações cruciais, principalmente no que diz respeito ao reconhecimento de falhas, padrões de reflexões e fácies sísmicas características de diferentes tratos de sistemas. Para a identificação e delimitação dos tratos tectônicos nas linhas sísmicas foram aplicados os conceitos de sismoestratigrafia, dando ênfase às

expressões sísmicas relacionadas aos tratos e superfícies.

A interpretação sísmica dos componentes geológicos da bacia do Recôncavo teve seu alicerce na identificação de padrões de sismofácies e geometrias internas e externas. As correlações sísmica-poço tiveram um papel preponderante nesta etapa do estudo, principalmente nos casos em que o poço amarrado se encontrava em áreas onde a qualidade da sísmica não permitiu o efetivo reconhecimento de expressões sísmicas características.

O embasamento cristalino se expressa sísmicamente através de configurações internas caóticas, com escassas reflexões de baixa amplitude e continuidade. Por sua vez, na sequência pré-rifte, os estratos se apresentam através de refletores plano-paralelos geralmente contínuos e com tendências a altas amplitudes. A DB foi então marcada no primeiro refletor de alta amplitude acima das sismofácies de formas caóticas do embasamento (Figura 6). Dessa forma, a DB foi mapeada utilizando critérios de mudanças de fácies sísmicas e formas internas de refletores.

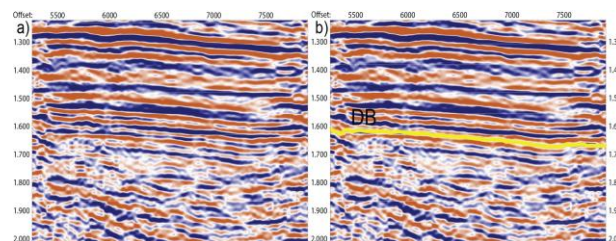


Figura 6: Trecho da seção 1410 a) não-interpretado e b) interpretado, quanto à marcação da DB.

Na etapa de interpretação dos perfis geofísicos, observou-se que TTIR teve uma espessura máxima de 108 metros, correspondente ao poço 1. Ou seja, a DSR se encontra a cerca de apenas 100 metros abaixo da SIDR. Esta é considerada uma espessura relativamente delgada para a resolução da sísmica com a qual esta interpretação é feita, de forma que a DSR provavelmente estaria aproximadamente um ou dois refletores abaixo da SIDR. Considerando que entre dois refletores não é possível identificar terminações estratais ou mudanças de fácies, a marcação da DSR não foi adotada neste trabalho, estando então os tratos de pré-rifte e início de rifte não delimitados entre si.

Separando os estratos pré-rifte e TTIR da sedimentação do TTDR, se encontra a SIDR, que marca a rápida transgressão do sistema lacustre. Essa transgressão coloca em contato a sedimentação do sistema lacustre com os depósitos flúvio-eólico-lacustres do TTIR. O contato entre litologias de diferentes densidades e velocidades resulta em um alto contraste de impedância, correspondente a um refletor de alta amplitude. Dessa forma, a SIDR foi marcada no primeiro refletor de alta amplitude abaixo das fácies sísmicas lacustres (Figura 7). Enquanto os tratos anteriores à SIDR se apresentam como refletores mais contínuos e paralelos, as fácies do sistema lacustre profundo acima desta superfície são descontínuas e com formas internas caóticas.

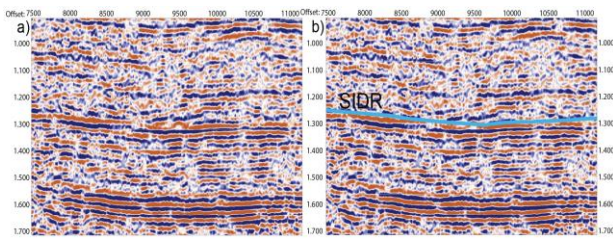


Figura 7: Trecho da seção 1421 a) não-interpretado e b) interpretado, quanto à marcação da SIDR.

A SMR finaliza o TTDR e dá início ao TTFR. As fácies do sistema flúvio-deltaico do TTFR se revelam como refletores de amplitudes variáveis, porém mais fortes e mais contínuos do que as feições sísmicas do lago profundo do TTDR. Integrando este reconhecimento de fácies sísmicas e o auxílio fundamental das interpretações dos poços amarrados às sísmicas, foi possível o mapeamento da SMR nas linhas (Figura 8).

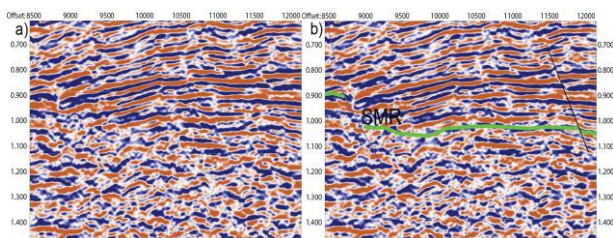


Figura 8: Trecho da seção 1408 a) não-interpretado e b) interpretado, quanto à marcação da SMR.

Dentro do TTFR, temos a Superfície de Tendência de Fácies (STF) que representa a transição do sistema deltaico para o fluvial. Por não se tratar de uma mudança de litologia, mas apenas da gradação natural de sistemas deposicionais, esta superfície não se revela em variações de fácies sísmicas. Dessa forma, a STF não foi passível de ser marcada nos dados sísmicos.

Amarração sísmica-poço

A confecção e amarração de sismogramas sintéticos consistem em importantes auxílios à interpretação sísmica. Através destes processos foi possível confirmar ou mesmo retificar a marcação de horizontes e falhas nas linhas sísmicas ao correlacionar estes dados com as discordâncias e superfícies interpretadas nos perfis geofísicos dos poços.

A amarração sísmica-poço pode ser sucintamente descrita como uma equiparação entre os dados sísmicos próximos à locação do poço e os perfis de poço. Esta correlação é feita através da modelagem direta de um sismograma sintético a partir da convolução da função refletividade com a *wavelet* sísmica, e então o traço sintético resultante é correlacionado ao dado sísmico, produzindo uma relação entre o dado de poço (medido em profundidade) e a sísmica (medida em tempo). Os dados de entrada para este procedimento foram os perfis geofísicos de poço (Sônico e Densidade) devidamente calibrados e editados, e a *wavelet Ricker* de fase zero equivalente ao espectro de amplitude do dado sísmico; também se fizeram necessários os traços sísmicos da linha sísmica que são circunvizinhos ao poço, já que a correlação do sismograma sintético com a linha sísmica é

feita com base neles. Rotações de fase da *wavelet* e *time shift* do traço sintético foram moderadamente utilizados na etapa final de ajustes. Todo este processo foi efetuado através do *software IHS™ Kingdom*.

A seleção dos poços a serem amarrados se baseou na distância deles em relação à linha sísmica mais próxima assim como na presença dos perfis geofísicos necessários para tal. Após avaliadas as possibilidades, foram realizadas as correlações entre os poços 1, 4, 5, 6 e 7 com as linhas 1408, 1421, 1407, 0006 e 1410 respectivamente. Os sismogramas sintéticos auxiliaram principalmente na marcação da SIDR e SMR nos dados sísmicos, já que os poços passíveis de amarração não atingiram a DB.

Exemplos

Após a interpretação da sequência pré-rifte e das superfícies que delimitam os tratos tectônicos sin-rifte da bacia em cada um dos poços, foram feitas quatro correlações geológicas entre os poços. Através destas seções busca-se um melhor entendimento da configuração geológica desta porção da bacia do Recôncavo, tendo como referência as superfícies demarcadas nos poços. Por sua vez, por meio dos parâmetros sismoestratigráficos e do auxílio da correlação sísmica-poço, foram mapeados nas linhas sísmicas os horizontes referentes à DB, TTIR e SMR. Diversas falhas normais foram mapeadas, sendo que as de maiores rejeitos se estabeleceram até o tempo do TTDR e cortam o embasamento da bacia e estratos do pré-rifte e TTIR.

As figuras de 9 a 12 exemplificam as interpretações realizadas na sísmica e seções geológicas confeccionadas. A seção entre os poços 4, 5 e 1 se localiza aproximadamente na mesma posição geográfica da linha sísmica 1408; o mesmo acontece com a seção 7, 6 e 8 com a linha 1410.

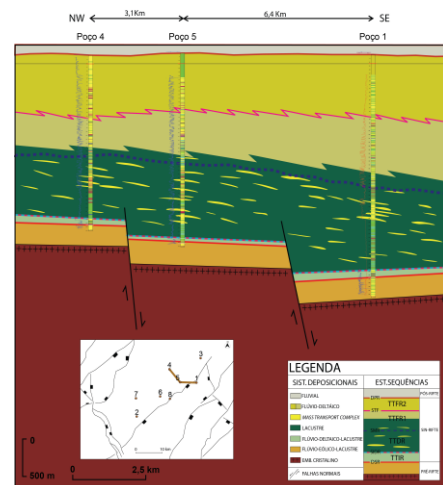


Figura 9: Seção geológica de correlação entre os poços 4, 5 e 1.

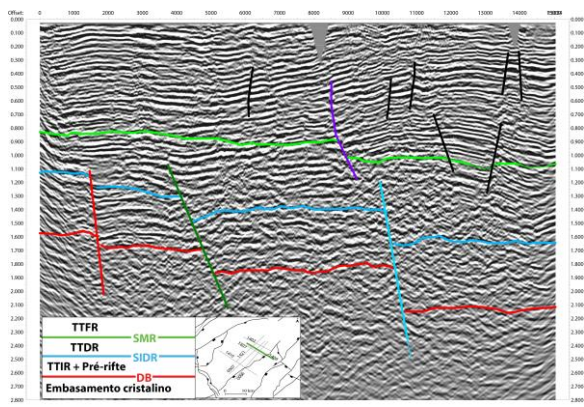


Figura 10: Linha 1408 interpretada.

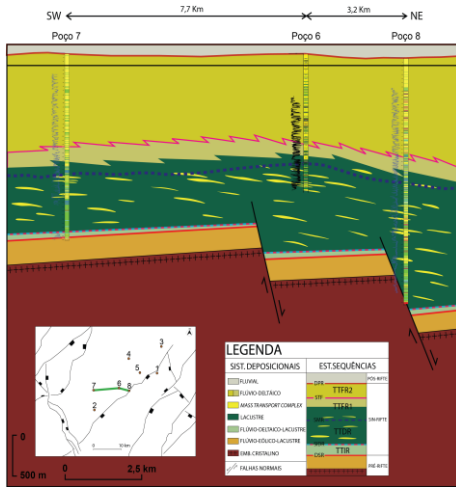


Figura 11: Seção geológica de correlação entre os poços 7, 6 e 8.

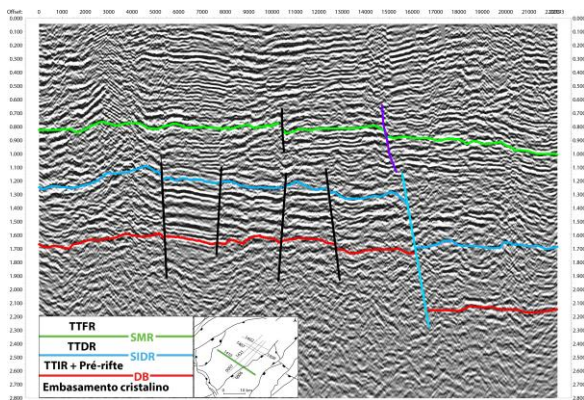


Figura 12: Linha 1410 interpretada.

Resultados

Depois de concluídas as interpretações dos dados sísmicos e de poço, alguns mapas das discordâncias e superfícies estratigráficas foram gerados através da confecção de grids no software IHS™ Kingdom.

Estes mapas retratam como as superfícies estão estruturadas na região de estudo através de uma escala de cores. As cores do azul ao verde correspondem aos maiores tempos/profundidades, enquanto que colorações do vermelho ao branco indicam porções onde a

superfície/discordância se encontra mais rasa. A análise destes resultados se configura numa síntese final da configuração estrutural da bacia do Recôncavo na sua porção central com base nos dados trabalhados. É importante ressaltar que, nos locais onde não há dados das superfícies, uma extrapolação foi realizada pelo software com base nas tendências advindas dos dados existentes. Portanto, estes mapas devem ser examinados com cautela quanto a este aspecto, principalmente aqueles baseados nos poucos poços disponíveis.

Nos mapas criados com base na interpretação sísmica podem ser visualizadas algumas falhas que foram mapeadas através das linhas, sendo que seus planos de falha se estendem por várias seções sísmicas.

A DB mapeada em dados sísmicos (Figura 13) se apresentou em maiores tempos (e, portanto profundidade) nas porções NE e SE.

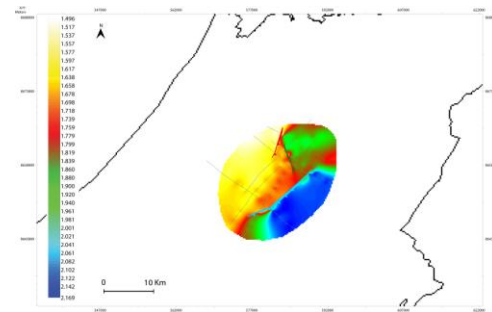


Figura 13: Mapa da DB baseado em dados sísmicos.

Os mapas da SIDR (Figura 14) baseados nos dois distintos dados revelaram configurações equivalente, porém a falta de mais dados de poços impossibilitou uma efetiva representação, principalmente no mapa dos poços.

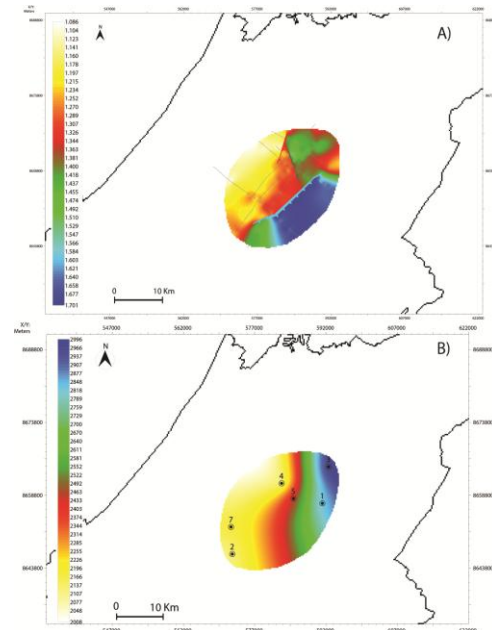


Figura 14: Mapas da SIDR baseados em A) dados sísmicos; B) dados de poços.

Quanto à SMR, os mapas apresentaram altos valores de tempo e profundidade na porção leste da área de estudo (Figura 15).

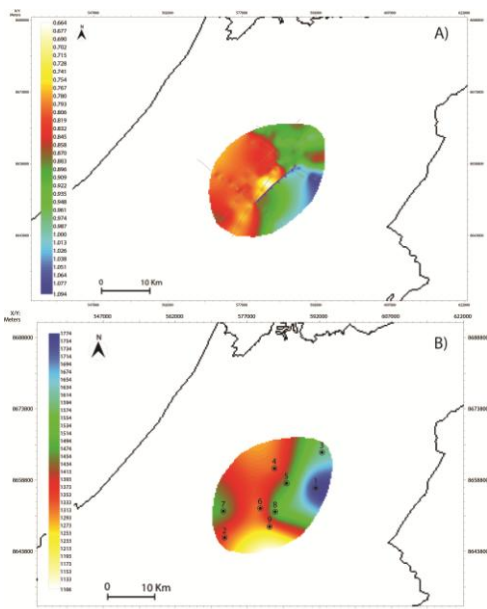


Figura 15: Mapas da SMR baseados em A) dados sísmicos; B) dados de poços.

Por sua vez, a STF com base nos poços se mostrou mais profunda na porção oeste da área, em ambos os dados (Figura 16). Isto permite inferir que o sistema deltaico pode ser mais pronunciado na porção nordeste, onde essa superfície se encontra a menores profundidades.

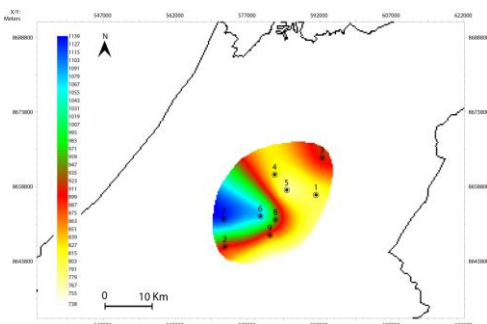


Figura 16: Mapa da STF baseado em dados de poços.

Conclusões

Através da aplicação da estratigrafia de seqüências em bacias rifte auxiliada pela sismoestratigrafia, foi possível compreender como se sucedeu o processo de deposição dos estratos na fase pré-rifte e sin-rifte na porção central da Bacia do Recôncavo, assim como a estruturação da bacia, moldada pelos intensos pulsos tectônicos.

Os perfis geofísicos permitiram o reconhecimento das eletrofácies características dos diversos tratos tectônicos, apesar da dificuldade em interpretá-las devido à geometria complexa da bacia. Por sua vez, a análise sísmica se mostrou eficiente na identificação das superfícies e delimitação dos tratos tectônicos. A partir dos produtos de interpretação obtidos, ficou evidente a configuração estrutural da área de estudos dominada por falhamentos normais com rejeitos consideráveis, que

seccionaram o embasamento e estratos acima depositados em blocos basculados.

É importante destacar que a qualidade das linhas sísmicas utilizadas não favoreceu o reconhecimento de determinadas respostas sísmicas das estruturas geológicas, já que se tratam de linhas sísmicas terrestre, nas quais a qualidade e resolução dos dados é comprometida. Isto se converte na dificuldade da identificação de expressões sísmicas, como terminações de refletores.

Por sua vez, a ausência de perfis de Raio Gama em alguns poços ou intervalos de poços fez necessária a interpretação dos mesmos com base em outros perfis de poços não tão marcantes e característicos quanto o GR.

Os mapas de superfícies estratigráficas elaborados com base em poucos dados de poço se mostraram consideráveis, porém pouco representativos, evidenciando a necessidade de uma mais ampla malha de informações interpretadas para um efetivo mapeamento.

Dessa forma, vale ressaltar que a aquisição de mais alguns dados, como dados sísmicos e de poço, poderia aperfeiçoar e detalhar os resultados obtidos.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto desenvolvido no GETA (Grupo de Estratigrafia Teórica e Aplicada), com o apoio da Geopark e *IHS Kingdom*.

Referências

- Catuneanu, O. (2006) Principles of sequence stratigraphy, Elsevier, Amsterdam.
- Destro, N. (2002) Falhas de alívio e de transferência: o significado tectônico e econômico do rifte do Recôncavo-Tucano-Jatobá, NE Brasil. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Kuchle, J.; Holz, M.; Scherer, C. M. S.; Fernandes, F. e Bedregak, R. P. (2007) Mapeamento estratigráfico de bacias rifte a partir de padrões de empilhamento e seus significados genéticos. In: Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 4, Campinas. São Paulo, Outubro.
- Martins-Neto, M.A., Catuneanu, O., Rift sequence stratigraphy, Marine and Petroleum Geology (2009).
- Mitchum JR., R. M.; Vail, P. R. e Sangree, J. B. (1977) Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 6: stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: Payton, C. E. (Ed.) Seismic stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration. AAPG, Memoir 26, Tulsa, p. 117-133.
- Prosser, S. (1993) Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. From Williams G. D. and Dobb, A. (eds), Tectonics and Seismic Sequence Stratigraphy. Geological Society Special Publication n. 71, p. 35-66.