5 - MODELAGEM GEOFÍSICA

Como foi dito na introdução deste trabalho, a modelagem de um reservatório é tema de extrema importância nas diversas etapas da indústria petrolífera, pois é através da modelagem que se extraem parâmetros importantes, tais como porosidade, permeabilidade e geometria destes reservatórios, os quais influem na definição de reservas e na produção de petróleo. Entretanto, como neste trabalho o foco são lagos carbonáticos, que são sistemas dinâmicos e susceptíveis a flutuações do clima e altamente variáveis nos contextos tectônicos e sedimentológicos, não há um conjunto-padrão de critérios confiáveis para o reconhecimento desses depósitos lacustres.

Desta maneira, como existe a necessidade da geração de um modelo deposicional, há a importância fundamental da correta identificação das fácies presentes no ambiente sedimentar, bem como da definição do arcabouço estrutural, e sua influência na caracterização do reservatório. Esta compilação de informações é muito importante além da modelagem deste sistema, pois poderá ser utilizada como análogo para outros lagunares carbonáticos que foram formados nas mesmas condições do Membro Morro do Chaves.

Para a caracterização deste reservatório foi necessária a integração de todas as informações disponíveis da área, desde os dados de mapeamento regional, como aqueles obtidos em afloramento, integrando finalmente aqueles interpretados no volume 3D de GPR desta dissertação, identificação e caracterização de sequências e suas respectivas arquiteturas e a extração de atributos, com a finalidade de se obter um resultado o mais fidedigno possível.

Este capítulo tem como objetivo integrar as principais informações obtidas pela interpretação geofísica e de extração de atributos com os dados existentes na bibliografía, no sentido de maximizar em detalhes o modelo já existente.

5.1 - Caracterização das Sequências de Fácies

Nos itens 2.3 e 2.2.1 foram apresentados os modelos de fácies já publicados referente aos afloramentos dessa sequência carbonática e também quanto ao modelo deposicional em um sistema carbonático. Além de dados de afloramento obtidos na mesma área deste trabalho, Azambuja Filho *et. al.* (1998) apresentaram um modelo de fácies esquemático com quatro grupo de fácies (*fan-deltas*, conglomerados e arenitos misturados com bivalvos, espessas camadas de coquinas e folhelhos negros).

Lomando *et. al.* (2000) definiram as coquinas como *grainstones* e *packstones* em ciclos de "*shoaling-upward*" de alta frequência, separados muitas vezes por folhelhos pretos. Kinoshita (2007) utilizando dados de afloramento e perfil de sondagem observou a presença das mesmas fácies citadas pelos autores. Portanto, as descrições de fácies realizadas pelos diferentes autores, estão em linhas gerais, concordantes e complementares entre si.

A partir da identificação da assinatura geofísica de cada sequência foi possível integrar as informações já existentes e identificar cada unidade, bem como suas associações de fácies.

A sequência G, poderia ser definida como um *mound* carbonático em função dos refletores com alto contraste de amplitude, contínuos, aparentemente ausentes de relações discordantes. Esta sequência seria seguida pela sequência F, com refletores em *downlap* e aparente progradação sigmoidal, e pela sequência E, também representada por refletores em *downlap*, relativamente contínuos e com baixo ângulo de mergulho (Figura 4.3.2.2).

Esta associação de fácies seria formada por *packstones* e *grainstones* em um ambiente de trato de sistema trangressivo, mais propriamente na transição da fase de *catch-up*, com a formação de um *mound* carbonático, com a *keep-up*, com a progradação das unidades em função da subida do nível do mar e elevação de energia do ambiente. Caracterizando assim ambiente do tipo "*shoaling-upward*".

A sequência D poderia ser interpretada como uma unidade composta pelos típicos folhelhos negros mapeados em outros trabalhos por toda a região. Isto em função de sua assinatura geofísica com refletores com baixo contraste de amplitude a aparentemente planoparalelos e de sua limitada espessura (Figura 4.3.2.2). Além disso há a contribuição do trato de sistema de mar alto, no qual poderia ter ocorrido diminuição da zona fótica, inviabilizando assim, a presença de carbonatos.

As sequências C, B e A formariam associação de fácies composta por packstone/grainstone, wackestone e grainstone, respectivamente. Esta afirmação pode ser feita em função de suas assinaturas geofísicas (Seq. C com refletores sigmoidais em downlap, Seq. B com refletores plano-paralelos com baixo contraste de amplitude e padrão de corte-preenchimento e Seq. A apresentando relações discordantes marcados por refletores em downlap e sigmoidais, com alto ângulo de mergulho) e dos resultados do cálculo DIP para delimitação das sequências B e C (esta última apresentanto valores de mergulho concordante com aqueles obtidos em afloramento 45° de atitude)) concordantes com dados de afloramentos publicados por Kinoshita (2007). Esta associação de fácies apresenta-se com morfologia sigmoidal progradante típica de trato de mar trangressivo a alto, corroborando a identificação deste ambiente como "shoaling-upward" feito por Kinoshita (2007).

Portanto, o modelo de fácies do afloramento definido nesta dissertação é caracterizado por pacotes médios de coquinas, com cerca de sete metros de espessura, compostas de associações de fácies de *packstones* e *grainstones* com geometria sigmóide em ciclos de "*shoaling-upward*" de alta frequência intercalados por camadas de menor espessura, com cerca de um metro compostas por folhelho preto.

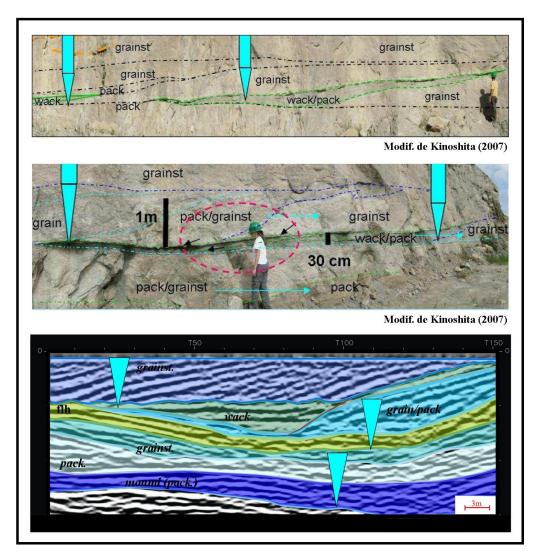


Figura 5.1.1: Imagens utilizadas para construir analogia entre as sequências caracterizadas em afloramento e interpretadas no volume GPR deste trabalho.

5.2 - Caracterização do arcabouço estrutural

Nos itens 2.2 e 2.3 foram apresentadas algumas informações sobre a geologia estrutural da bacia de Sergipe-Alagoas, bem como do Membro Coqueiro Seco. No item 4.3.4 foram demonstrados os resultados obtidos através do cálculo de coerência do volume de GPR e o mapeamento das incoerências, que poderiam ser falhas e fraturas, identificados neste volume.

Os resultados foram compatíveis com o que existe publicado na literatura a cerca desta bacia. No entanto, desde o mapeamento de Lana (1990) e Falkeinhein *et al.* (1986), os quais identificaram falhas normais com orientações NE-SW e N-S, existindo até mesmo pares conjugados com esta mesma orientação e que seriam os fatores controladores da estruturação da bacia, não existiam trabalhos de escala de reservatório até a publicação de Kinoshita (2007). As falhas e fraturas mapeadas neste trabalho apresentam a mesma orientação das estruturas mapeadas em escala regional na região da Plataforma de São Miguel dos Campos (Figura 5.2.1), o que significa que este arcabouço regional teve influência no controle deposicional das rochas do Membro Coqueiro Seco, foco desta dissertação.

5.3 - Integração dos resultados

A integração dos resultados obtidos a partir da caracterização de fácies, com a identificação de assinaturas geofísicas e cálculo de atributo geométrico, e da caracterização do arcabouço estrutural permite a construção de um modelo deposicional, o qual proverá informações sobre litologia, porosidade e permeabilidade. Estas informações são de suma importância para a modelagem de um reservatório em produção, faltando somente informações sobre corrente de fluido de saturação deste reservatório.

Primeiramente, no que diz respeito à litologia, a partir da caracterização das fácies do GPR e com dados de outros trabalhos foi possível identificar cada tipo de rocha presente na área de estudo. A partir daí é possível avaliar o quão porosa cada sequência pode se apresentar, visto que porosidade é uma propriedade intrínseca a cada rocha, e depende do material composicional (grãos e matriz).

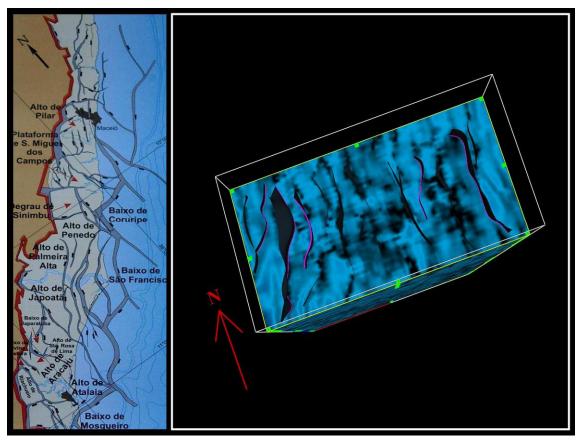


Figura 5.2.1: Semelhança no padrão estrutural do arcabouço regional na região da Plataforma de São Miguel dos Campos (painel esquerdo) (modificado de Lana, 1990) com a interpretação estrutural do Membro Coqueiro Seco (painel direito).

Assim, de acordo com a classificação de *Dunham* (Figura 2.2.4), aplicada neste trabalho, e a partir de dados de afloramento, é possível supor que unidades compostas por *packstones* e *grainstones* são mais porosas do que aquelas formadas por *wackestones*. Estas diferenças de propriedade seria em função da pouca matriz presente ou mesmo classificação do tipo grão-suportado que *packstones* e *grainstones* apresentam, sendo portanto propriedade intrínseca no seu conteúdo composicional.

Quanto à permeabilidade, a estimativa desta propriedade depende da permeabilidade da matriz e da permeabilidade condicionada por fraturas e/ou falhas que existam na área do reservatório. Como dados desta propriedade na matriz só é possível medir através de análises de testemunhos de poços, não foi possível estimá-la através deste tipo de dado, limitando a estimativa apenas à geologia estrutural.

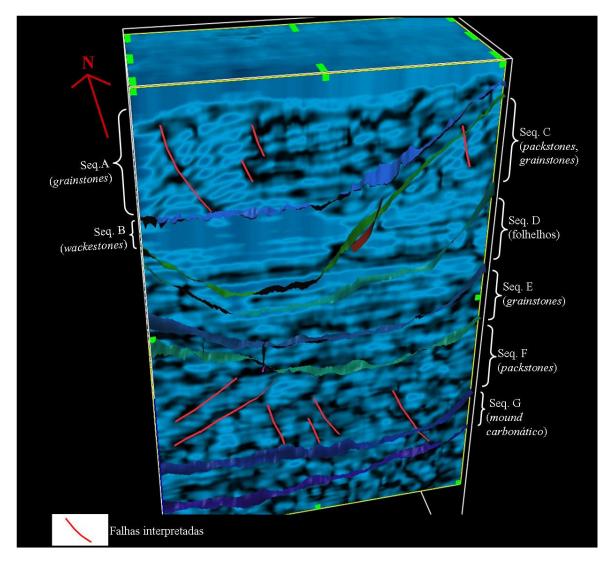


Figura 5.3.1: Volume de coerência com falhas NE-SW e N-S interpretadas na área de estudo. Observar a quase ausência de incoerências na sequência B, havendo apenas uma falha normal que aparenta ter influência na deposição desta sequência. (Imagem com exagero vertical de 2 vezes feito no intuito de auxiliar a visualização das incoerências).

Desta forma, é importante o entendimento de que a estruturação formadora da bacia, também foi fator condicionante para a deposição das coquinas, controlando a deposição da mesma. Esta proposta é possível de ser feita em função da mesma orientação de falhas e fraturas interpretadas no volume 3D, e da existência das mesmas deformando unidades compostas por *packstones* e *grainstones* em sua maioria (Figura 4.3.4.5), mas também controlando a deposição em *wackestones* (Figura 5.3.1), e que poderiam ter função primordial na migração de hidrocarbonetos, em especial com respeito à conectividade destas falhas é fundamental uma vez que é possível determinar o fluxo preferencial de hidrocarbonetos e as barreiras de interconectividades dentro de um reservatório. Estudos desse tipo auxiliam a locação de poços, quer sejam de produção ou de injeção, durante as diversas etapas de vida de um reservatório.

No que diz respeito à arquitetura do sistema, sugere-se ação limitada às falhas citadas anteriormente, ausente da ação de outros fatores externos, visto que as sequências apresentam espessuras com pouca variação e relativamente concordantes (Figura 5.3.2).

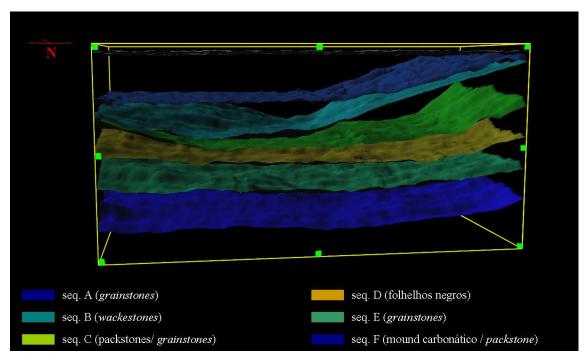


Figura 5.3.2: Disposição das sequências ao longo do volume 3D.

6 - CONCLUSÕES

A realização deste trabalho teve como objetivo a interpretação geofísica de dados GPR 3D em coquinas do Mb. Morro do Chaves da Fm. Coqueiro Seco, Bacia de Sergipe-Alagoas de modo a definir um modelo análogo para os reservatórios carbonáticos da Bacia de Campos. Além da interpretação tradicionais via mapeamento das radar-fácies, foram empregados com sucesso atributos geométricos usualmente utilizados em dados sísmicos. A utilização desses atributos permitiu a identificação/visualização de feições estruturais-estratigráficas antes mascaradas no dado de amplitude GPR.

O fluxograma de trabalho seguiu a seguinte cronologia:

- levantamento de campo com aquisição de 54 linhas GPR *fixed-offset*, com extensão de 45 metros cada, foi possível integrá-las em um volume 3D.
- processamento de dados com as seguintes etapas: carregamento dos dados, préprocessamento, dewow, análise espectral filtragem passa-banda, ganhos, análise de velocidade, migração e deconvolução e conversão tempo-profundidade;
- através da interpretação GPR foram caracterizadas cinco sequências estratigráficas, cada qual individualizada em função de sua assinatura geofísica, sendo diagnósticos padrão de terminações de refletores, contraste de impedância e morfologia das unidades;
- com a extração do atributo geométrico DIP, o qual auxilia na individualização de sequências e possibilita estimativa de valor de mergulho dos estratos, foi possível corroborar a interpretação feita no dado GPR e identificar valores semelhantes de mergulhos de algumas unidades quando comparadas com medidas obtidas em afloramento;
- a extração do atributo de coerência, também conhecido como cálculo Structure Cube, que utiliza o algoritmo eigenstructure, possibilitou a interpretação de grande número de falhas que não são visíveis no cubo GPR padrão;
- a interpretação destas falhas demonstrou padrão NE-SW e N-S predominante, concordante com a estruturação da bacia;

- com a integração dos dados já existentes na literatura com aqueles interpretados neste trabalho foi possível criar um modelo deposicional para esta área, além de propôr a possível influência estrutural na deposição destas coquinas. Primeiramente, com a integração feita entre os modelos deposicionais já existentes, com dados de afloramento e resultados deste trabalho, constatou-se a existência de quatro tipos de litologias diferentes. A nomenclatura utilizada para descrever cada litologia baseou-se na classificação de Dunham (1962), sendo grainstones (caracterizados pela morfologia sigmoidal e refletores em downlap), packstones (também sigmoidais e na maioria das vezes com refletores em downlap), wackestones (refletores plano-paralelos e contraste baixo de amplitude) e folhelhos negros (baixo contraste de amplitude e morfologia planar). Com a integração destas informações foi possível interpretar o ambiente como ciclos de "shoaling-upward".
- a importância da caracterização deste ambiente como ciclos de "shoaling-upward" não
 é enriquecedor apenas no âmbito geológico, mas também no quesito exploração e
 produção de hidrocarbonetos, visto que esta ciclicidade é fator preponderante na
 porosidade das rochas, tornando aquelas depositadas no término destes ciclos
 potencialmente mais porosas.
- com relação à geologia estrutural foi possível identificar relação entre as falhas e fraturas controladoras do embasamento da bacia com àquelas interpretadas nas coquinas. Isto sugere provável influência do arcabouço estrutural regional no controle deposicional destas coquinas, visto que foram encontradas falhas limitadoras da deposição da sequência composta por wackestones.
- é importante ressaltar a importância do mapeamento das falhas em reservatórios análogos, visto que as mesmas têm função importante na permeabilidade e na direção preferencial de fluxo do sistema petrolífero.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azambuja Filho, N. C. & Mello, M. R. 1992. Sedimentação de coquinas e folhelhos betuminosos da Fm. Morro do Chaves, Cretáceo Inferior, Bacia de Alagoas. In: Congresso Brasileiro de Geologia. Volume 37. São Paulo.
- Azambuja Filho, N. C., Arienti, L. M. and Mello, M. R. Sedimentological and geochemical evidence of high frequency climatic cycles controlling the deposition of source and reservoir rocks in a Lower Cretaceous Rift Lake, Sergipe-Alagoas Basin, Brazil. In: AAPG Annual Convention, 1998, Salt Lake City, Utah, USA.
- Cateneanu, O. 2006. Principles of Sequence Stratigraphy. Department of Earth and Atmospheric Sciences. University of Alberta. Edmonton, Alberta, Canada. Elsevier Editor, 387p.
- Dunhan, R. J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Classification of Carbonate Rocks (Ed. By W. E. Ham) Mem. Am. Ass. Petrol. Geol. 1, p. 108-121.
- Falkenhein, F. H. U, *et al.*, 1986. Projeto Análise da Bacia de Sergipe-Alagoas. Relatório Interno da Petrobras. 1996.
- Feijó, F. J. Bacias de Sergipe e Alagoas. In: Boletim de geociências da Petrobras, 8; p. 149-161. 1994.
- Finn, C. J., 1986. Estimation of three dimensional dip and curvature from reflection seismic data: M. S. thesis, University of Texas, Austin.
- Hardage, B.A.; Pendetlon, V.M.; Simmons Jr., J.L; Stubbs, B.A.; Uszinski, B.J. 1998, 3-D instantaneous frequency used as a coherence continuity parameter to interpret reservoir compartment boundaries across an area of complex turbidite deposition. Geophysics, 63, 1520-1531.
- James, N. P. and Kendall, A. C. 1992. Introduction to carbonate and evaporite facies models. In Facies Models: Response to Sea Level Change (R. G. Walker and N. P. James, Eds), pp. 265-275. Geological Association of Canada, GeoText 1.
- Jones, B. and Desrochers, A. 1992. Shallow platform carbonates. In Facies Models: Response to Sea Level Change (R. G. Walker and N. P. James, Eds.), pp. 277-301. Geological Association of Canada, GeoText 1.
- Kinoshita, E. M. 2007. Modelagem Sísmica Geométrica de fácies dos Carbonatos Lacustres o Membro Morro do Chaves, Bacia de Sergipe-Alagoas. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, 97p.

- Lana, M. C. Bacia de Sergipe-Alagoas: Uma hipótese de evolução tectono-sedimentar. In: Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro. Ed. Gávea. Petrobras, 1990.
- Lomando, A. J., Hashimoto, A. T., Azambuja Filho, N. C., Rangel, M. D., Cruz, W. M., Hanashiro, M. 2000. Architectural characteristics within lacustrine carbonate reservoirs, Angola and Brazil. In: International Geological Congress. Abstract. Vol. 31. Rio de Janeiro, RJ.
- Marfurt, K. J., R. L. Kirlin, S. H. Farmer, and M. S. Bahorich, 1998. 3-D Seismic attributes using window semblance-based algorithm: Geophysics, 63, 1150-1165.
- Marfurt, K. J., Chopra, S. 2007. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization. SEG Geophysical Developments Series No 11. 464p.
- Mendes, J.M.C. 1994. Análise estratigráfica da seção Neo-Aptiana/Eocenomania (Fm. Riachuelo) na área do Alto de Aracaju e adjacências, Bacia de Sergipe-Alagoas. Dissertação de Mestrado. UFRGS, 122p.
- Newman, A. C. & MacIntyre, I. G. 1985. Reef response to sea level rise: keep-up, catch-up or give-up. Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress, Tahiti, v.3, p.105-110.
- Nogueira, M. S., Lemos, V. B., Terra, G. J. S. 2003. As "coquinas" do Membro Morro do Chaves, Cretáceo Inferior da Bacia de Alagoas, e seu potencial reservatório de petróleo. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás.
- Ojeda, H. A. O. & Fujita, A. M. 1972. Bacia de Sergipe-Alagoas: tectônica, evolução tectonosedimentar e perspectivas petrolíferas. Relatório Interno da Petrobras.
- Rabinowitz, P. D. & Labrecque, J. 1979. The Mesozoic South Atlantic Ocean and evolution of its continental margins. Journal of Geophysical Research, vol. 84, B11, 5973-6002.
- Schlager, W. 1992. Sedimentology and sequence stratigraphy of reefs and carbonate platforms. Continuing Education Course Note Series #34, *American Association of Petroleum Geologists*, p. 71.
- Souza-Lima, W.; Lima, R. S.; Andrade, E. J.; Carvalho, I. S.; Santos, P. R. S.; Leite, O. R. C.; Manso, C. L. & Galm, P. C. 1999. A Fundação Paleontológica Phoenix preservação, pesquisa e ensino de paleontologia no Estado de Sergipe. *In*: Congresso Brasileiro de Paleontologia, 16, Crato, Ceará, 1999. *Sociedade Brasileira de Paleontologia, Boletim de Resumos*, pp. 113-114.

- Souza Lima, W. A. 2002. A bacia de Sergipe-Alagoas. Evolução geológica, estratigrafía e conteúdo fóssil. Fundação Paleontológica Phoenix. Edição especial 1. Aracaju, Sergipe, Brasil.
- Wang, F.P; Lucia, F.J; Kerans, C., 1998a. Modeling dolomitized carbonate ramp reservoirs: A case study of the semihole San Andres unit- Part I, petrophysical and geologic characterizations.
- Wang, F.P.; Daí, J.; Kerans, C., 1998b. Modeling dolomitized carbonate ramp reservoirs: A case study of the semihole San Andres unit- Part II, seismic modeling, reservoir statistics, and reservoir simulation. Geophysics, 63, 1876-1884.
- Yilmaz, O. 1987. Seismic data processing. In: Doherty, S.M. (Ed.), SEG series: Investigations in Geophysics, vol. 2. SEG, Tulsa, OK, 526p.