

4

Estudo de caso em modelagem geológica geomecânica

Este estudo de caso ilustra a metodologia proposta em uma aplicação a dados sintéticos. O ambiente escolhido para estudo foi o de campos com intercalação entre evaporitos e sedimentos argilosos e carbonáticos, à semelhança da bacia estudada por Zilberman *et al.* (2001).

4.1. Montagem de dados sintéticos

Como não foi possível adquirir um pacote de dados real, optou-se pela montagem de dados sintéticos inspirados no estudo de Zilberman *et al.* (2001) com sequências deposicionais evaporíticas alternadas com sequências marinhas ou costeiras. Os dados foram então montados com base no conhecimento do autor em dados reais e com base em informações públicas disponíveis na literatura e no endereço eletrônico da ANP (Agência Nacional do Petróleo).

Apesar de realizada na metodologia proposta a importância de uso da sísmica na confecção de modelos geológicos adequados ao estudo de pressão de poros, não se trata de um dado passível de geração sintética. Este estudo busca apresentar que é possível gerar um modelo de pressões de qualidade bastante razoável fazendo uso apenas de dados de poços e estudos geológicos. Foram adotados: (i) locação e trajetória de 30 poços; (ii) perfis geofísicos (Rho_b, Dtc, GR e caliper) e litologia interpretada nos 30 poços; (iii) dados de pressão RFT e MDT; (iv) BDPs; (v) ensaios de absorção; (vi) resultados de análises de perfis de imagem.

A Figura 4.1 ilustra as etapas de montagem e ajuste de dados, a iniciar pela escolha da coluna estratigráfica. Para estabelecer a coluna estratigráfica completa, adotou-se uma das sequências apresentadas em Mohriak *et al.* (2009), do tipo bacia intracratônica em regime de regressão, onde inicialmente são depositados sedimentos marinhos, seguidos de sequência evaporítica e por fim sedimentos continentais.

A coluna litológica assumida possui arenitos na base (representando o reservatório), cobertos por intercalações de evaporitos, folhelhos e carbonatos.

Esta camada intercalada é coberta por sedimentos marinhos pouco consolidados, formados por folhelhos, margas e arenito, que por sua vez é sobreposta por nova sequência intercalada de evaporitos. Acima dessa sequência ocorrem os depósitos continentais, formados de arenitos, siltitos e argilitos.

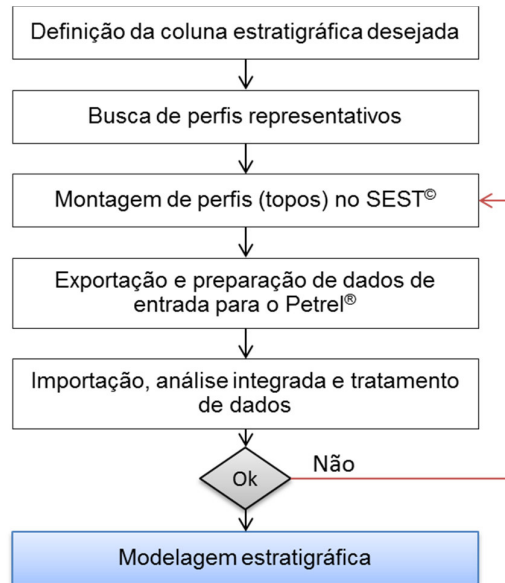


Figura 4.1 – Fluxograma da montagem de dados sintéticos.

Foram coletados perfis de poço (Dtc, GR e Rhob) característicos das sequências apresentadas em profundidades representativas da sequência deposicional definida. Para a montagem foram geradas tabelas de topo e base de unidades geológicas para auxiliar o processo de montagem no simulador SEST (desenvolvido em conjunto entre o GTEP/PUC-Rio e o CENPES/Petrobras) onde os perfis originais dos “poços de correlação” são esticados/encolhidos para a espessura final.

Os poços e perfis foram preparados e importados para o Petrel para análise integrada. A Figura 4.2 ilustra a distribuição espacial dos poços (as coordenadas são propositalmente omitidas, mas a escala é apresentada na figura). Como tratamento inicial pós importação, ruídos excessivos dos perfis foram suavizados pela aplicação de médias móveis de 2 m. Após uma análise prévia integrada e análise de coerência geológica espacial os devidos ajustes foram realizados e passou-se à modelagem estratigráfica.

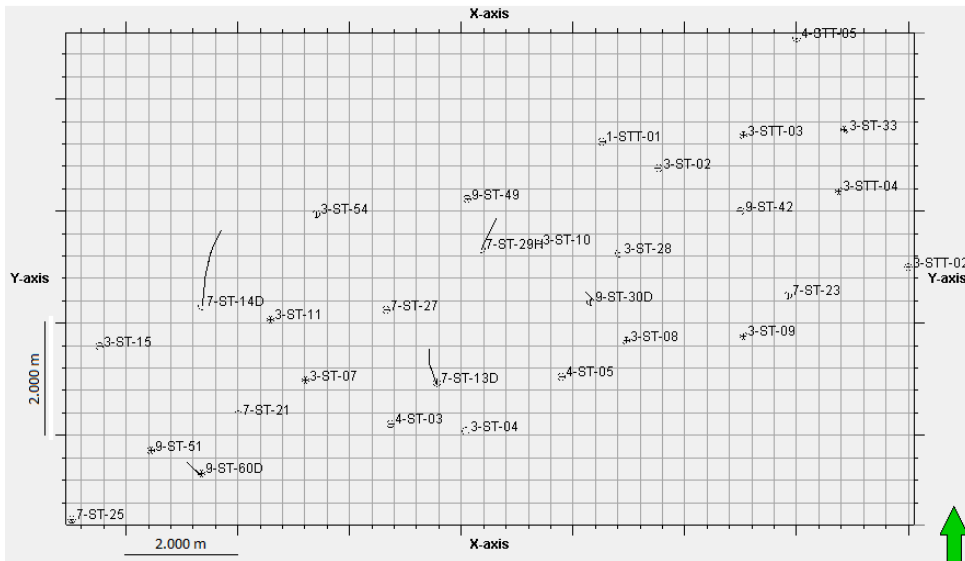


Figura 4.2 – Planta dos poços utilizados no modelo.

4.2. MEM 1D

No MEM-1D foram inicialmente analisados BDPs e montadas as curvas de avanço de perfuração dos poços (Figura 4.3), com eventos de perfuração possivelmente associados ao cenário de pressão de poros, dados de fluido e de pressão e ensaios de absorção. Dada a ausência da litologia na representação apresentada, a análise unicamente por meio desses gráficos fica inconclusiva. Notar o grande diferencial de pressão entre o peso de fluido (traço com losango em laranja) e os dados de pressão (losangos em azul claro) sem qualquer ocorrência de perda de fluido indicada no BDP.

Notam-se, no trecho, apenas duas topadas, que ao observar o perfil caliper, ao lado direito, são justificáveis pela geometria perturbada da parede do poço, indicando possível instabilidade da parede. O aumento e redução da pressão de poros se faz notável entre as profundidades de 1100m a 1800m, além do diferencial de pressão entre o peso de lama (MW) e a pressão de poros medida neste mesmo intervalo. Perdas apenas na profundidade de 1665m.

Para os mesmos poços foi realizada a análise de estabilidade *post mortem* 1D no simulador SEST®, onde foram previstas tanto a pressão de poros quanto a janela operacional como um todo (Figura 4.4). Esta janela operacional corresponde à possível variação do peso de lama para que as paredes do poço ainda se mantenham estáveis. Para os colapsos foi utilizado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e para a fratura foi considerado o método das tensões tangenciais, considerando a resistência à tração da rocha e abertura de fratura.

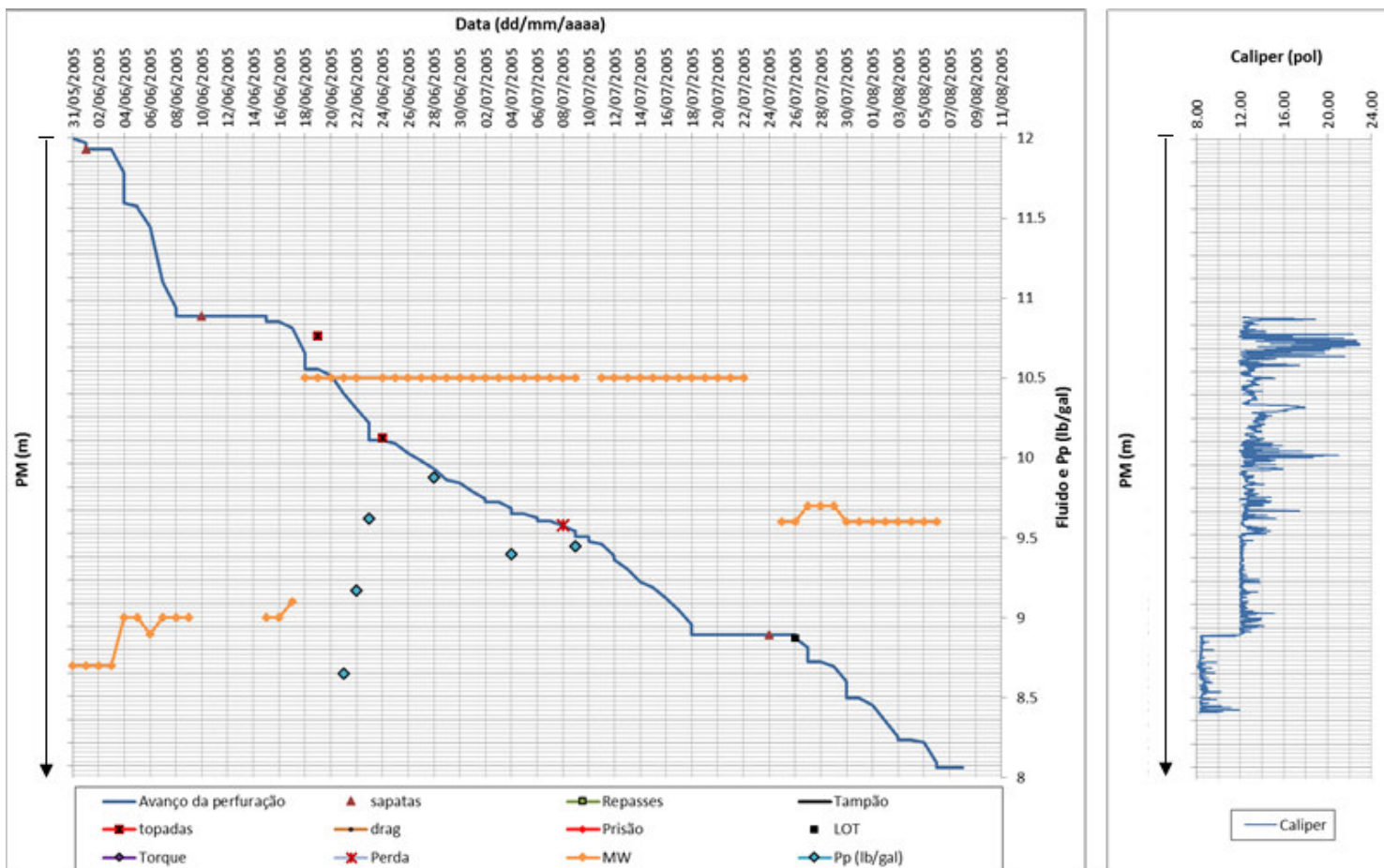


Figura 4.3 – Curva de avanço da perfuração tempo x profundidade (esq.) e diâmetro da parede do poço (dir.): análise do BDP de um poço.

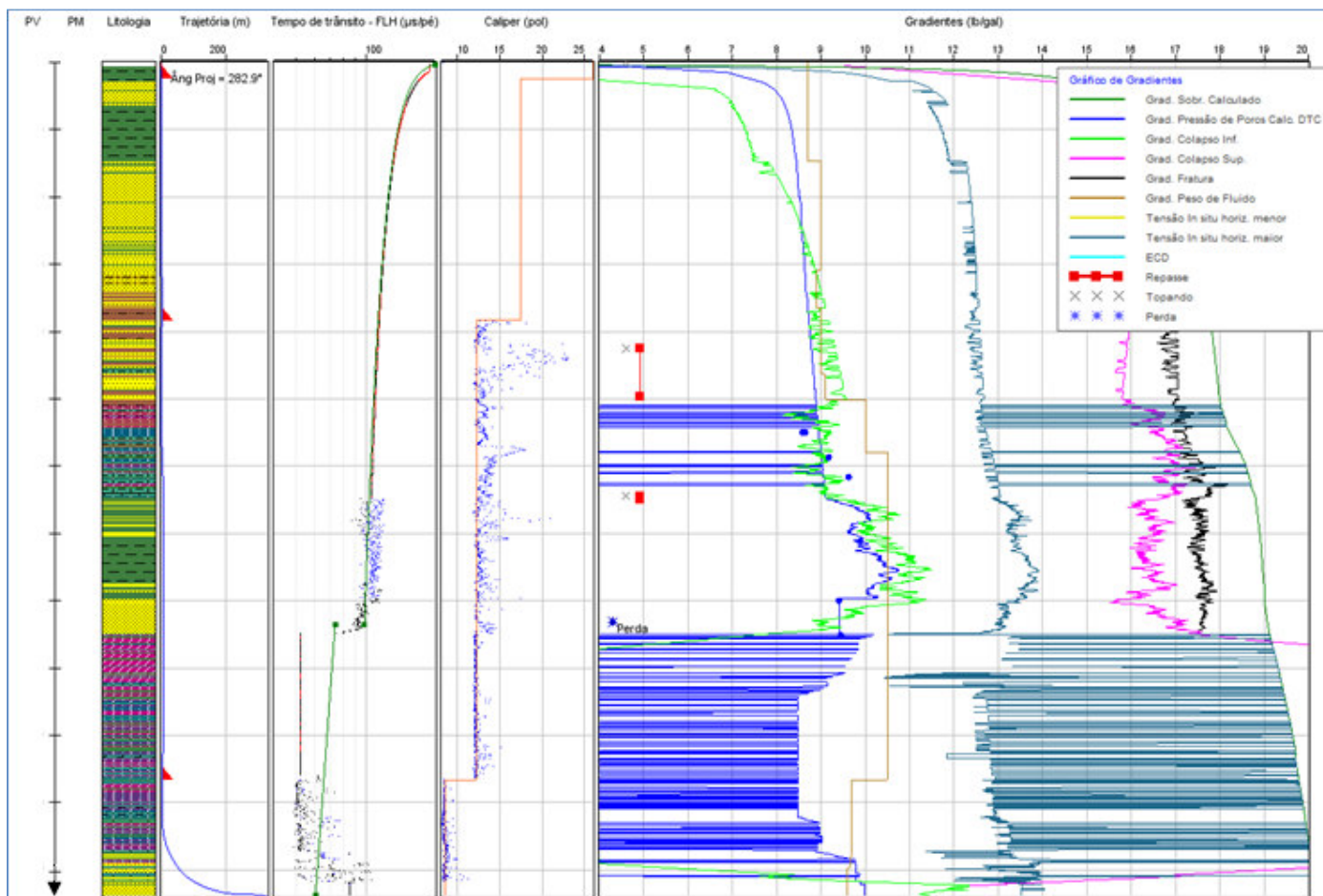


Figura 4.4 – Análise de pressão de poros e estabilidade 1D realizada para o mesmo poço no SEST®.

Para o estudo de pressão de poros, foram aplicados métodos convencionais de previsão aos pacotes com predominância de argila e métricas de ajuste foram aplicadas aos pacotes de permeabilidade elevada (espessas camadas de areias). *Obs.: As profundidades são propositalmente ocultadas.*

A previsão nos trechos de intercalação com evaporitos, contudo, se torna bastante complexa em função da não aplicabilidade direta de métodos convencionais mesmo aos trechos de rochas argilosas, como apresentado por Zilberman *et al.* (2001). A ausência de métodos para estes casos levou à aplicação inicial de métodos convencionais, que indicam pressão de poros normal como consequência dos baixos valores de Dtc apresentados pelas finas laminações de argila. Verificar que estes valores de Dtc são influenciados pela intercalação com carbonatos e com o sal (anidrita).

Para as lâminas de anidrita, devido à sua porosidade desprezível, foi adotada pressão de poros igual a zero. Ainda, devido ao comportamento de fluência do sal que o leva ao estado isostático de tensões (Fredrich *et al.*, 2003), as tensões horizontais foram consideradas iguais à da tensão vertical.

A perda de fluido em apenas uma das profundidades se justifica pela litologia dos trechos em que o diferencial de pressão é maior. A perda ocorre em espessa camada de arenito, enquanto os trechos intercalados de anidrita, folhelho e carbonatos não apresenta perdas.

Dos valores de Dtc ($\sim 60\mu\text{s}/\text{ft}$) e Rhob ($\sim 2.6\text{ g}/\text{cm}^3$) apresentados pelos carbonatos, nota-se que os mesmos se encontram bastante fechados, com valores próximos aos de matriz (ver Chang *et al.*, 2006), ou seja, baixa permeabilidade, evitando perdas e ganhos de fluido.

Os eventos de instabilidade apresentados estão coerentes com a janela operacional do poço apresentado, mas não serão aqui comentados por não se tratarem do escopo deste estudo. Notar, contudo, a dificuldade de previsão de pressão de poros e da própria janela operacional 1D em função da falta de dados de perfil Dtc e da presença das intercalações de anidrita, além do comportamento inesperado de regressão de pressões na camada de sedimentos marinhos, entre 1300m e 1700m.

Dos estudos de MEM-1D surgem dados e dúvidas diversos. Os dados de poços 1D são então organizados para a importação em base 3D para estudo integrado, buscando melhor compreensão da distribuição de pressões do campo como um todo.

4.3. Modelagem estratigráfica-estrutural

A modelagem estratigráfica do campo deveria ser realizada com base em dados de poços e sísmica, como apresentado na metodologia proposta, mas na ausência de dados de sísmica, os topos foram definidos apenas com base nos poços. Neste caso, não é possível mapear com clareza a superfície de topos entre poços e a presença de falhas estruturais.

O mapeamento de topos Figura 4.5 distingue as zonas estratigráficas de interesse em função das sequencias deposicionais, com características específicas da litologia e perfis, e logo, do comportamento geomecânico. Da esquerda para a direita: litologia, Dtc, GR e Rhob.

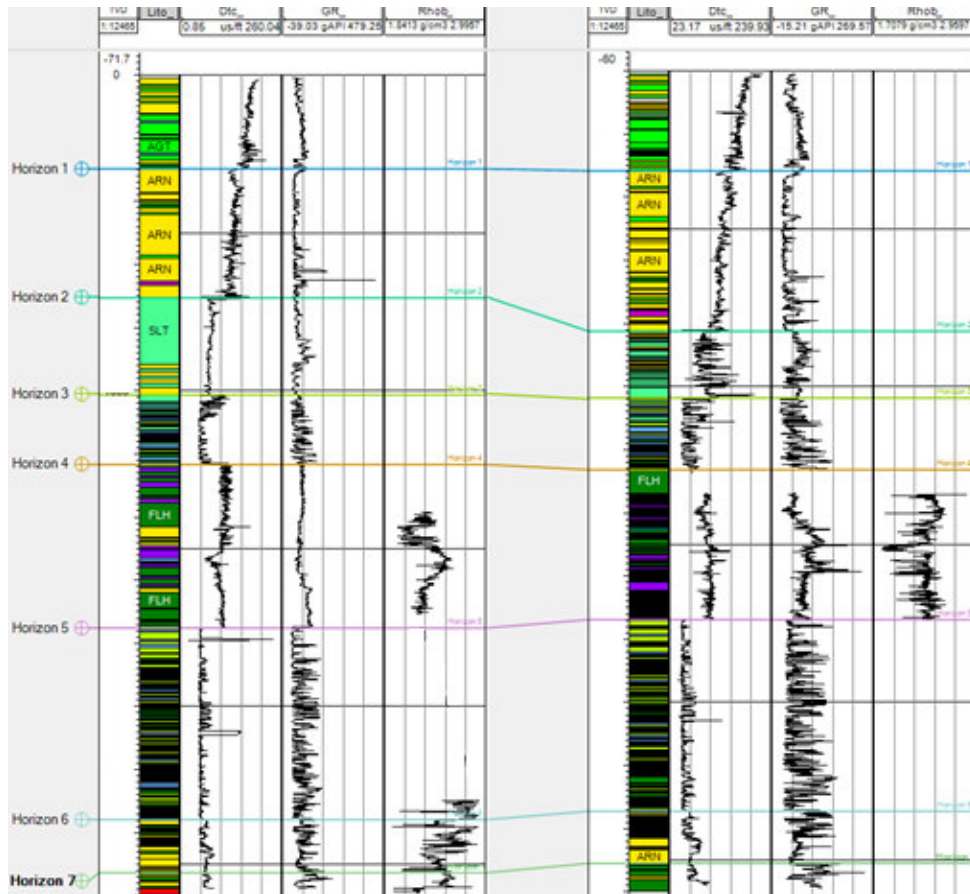


Figura 4.5 - Mapeamento de topos das unidades estratigráficas.

A zona 1 é composta por arenitos e argilitos, com predominância de rochas argilosas, seu topo se trata da superfície do terreno da área de estudo. A zona 2 também apresenta arenitos e argilitos, mas predominam arenitos. Na zona 3 predominam os siltitos. É simulado um hiato deposicional entre as zonas 2 e 3,

onde o comportamento de perfis da zona 3 simula a presença de rochas mais compactadas. Até a zona 3 são simuladas seqüências continentais. A zona 4 é formada por pacote intercalado entre evaporitos, rochas argilosas e carbonatos, simulando água rasa.

A zona 5 foi prevista como seqüência estritamente marinha, formada por folhelhos e arenitos pouco consolidados. A zona 6 simula a mesma seqüência apresentada na 4, supondo mar raso. A zona 7 simula novamente seqüência marinha de água rasa (supostamente o reservatório), com a presença de arenitos com algumas lentes de folhelhos, carbonatos e evaporitos.

O modelo gerado possui 16.000 m de extensão, 6.000 m de largura e 2.800 m de profundidade. As dimensões, em planta, das células do modelo, são de 50 x 50 m em planta com espessura variando de 5 a 10 m, a depender da maior ou menor heterogeneidade vertical da zona.

A modelagem inicial dos horizontes nessa malha apresentava algumas distorções geométricas (como a destacada na Figura 4.6). Tais distorções foram tratadas por meio da análise e ajuste de profundidade dos topos. Neste caso, as distorções são inconsistências oriundas da geração de dados sintéticos. Em alguns casos, os poços passaram novamente por ajustes no SEST© e nova importação para o Petrel.

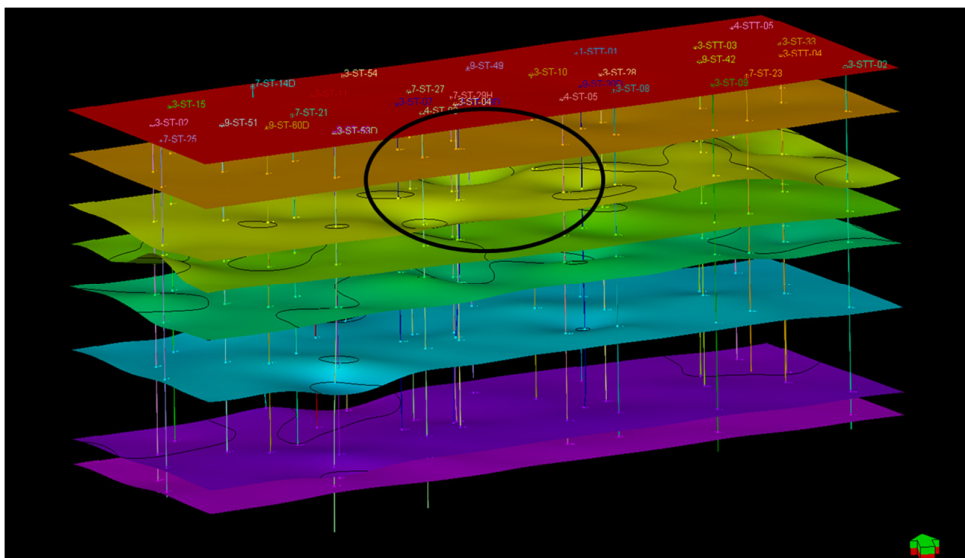


Figura 4.6 – Estratigrafia com distorções.

Buscou-se garantir que as dimensões em planta e em espessura das células atendessem aos requisitos de suporte geoestatístico apresentados por Armstrong (1998). A distribuição dos *layers* obedece à estratigrafia do campo. No caso da

zona 3, onde foi simulado hiato deposicional, os *layers* foram gerados com espessura fixa da base para o topo, simulando efeito de erosão.

4.4. Modelagem de fácies

Para a classificação das fácies (Figura 4.7), foram consideradas propriedades com influência direta na previsão de pressão de poros, como a litologia e os perfis indicadores de porosidade e permeabilidade. Argilas e folhelhos foram mantidos em uma mesma fácies e separadas de siltitos, dada a diferença de comportamento de compactação e retenção de fluidos frente a um mesmo carregamento (ver Hantschel e Kaureaulf, 2009, capítulo 2). Notar que a principal diferença entre argilitos e folhelhos é a fissilidade do folhelho (Rabe, 2003), portanto mecânica. Tal diferença não se faz acentuada nas propriedades permo-porosas, já que ambos são produto da litificação de minerais de argila.








1	Arenito			▼
2	Argilas e folhelh			▼
3	Silito			▼
4	Marga			▼
5	Carbonatos			▼
6	Evaporitos			▼
7	Outros			▼

Figura 4.7 – Classificação de litofácies.

Para o processo de *upscale*, como se trata de dado discreto, foi assumida a moda (fácies de maior frequência) no trecho de perfil cortado por cada célula. Devido às suas características selantes, foi atribuído peso diferenciado (1.5) para as fácies 2 (argilas e folhelhos) e 7 (evaporitos) na zona 2, buscando realçar esses materiais de baixa permeabilidade em relação aos arenitos, predominantes. Na zona 5 foi atribuído peso 1.5 à fácies 1 (arenito). Três poços de diferentes posições do campo foram excluídos para validação cruzada: STT-04, ST-49 e ST-51.

A análise estrutural foi realizada individualmente para cada zona, considerando as curvas de proporção vertical (Figura 4.8), os histogramas de espessuras (Figura 4.9) e os variogramas de correlação espacial (Figura 4.10) de cada litofácies.

A Figura 4.8 ilustra leve predomínio de argilas e folhelhos em relação aos arenitos para a zona 1, comportamento característico previamente observado na unidade geológica delimitada por esta zona. Notar ainda que a predominância dos arenitos se dá no topo e na base da zona, enquanto na região central predominam

as argilas. Da mesma forma, a análise das curvas de proporção vertical permitiu entendimento prévio do comportamento das litofácies de cada uma das zonas, antes da análise variográfica.

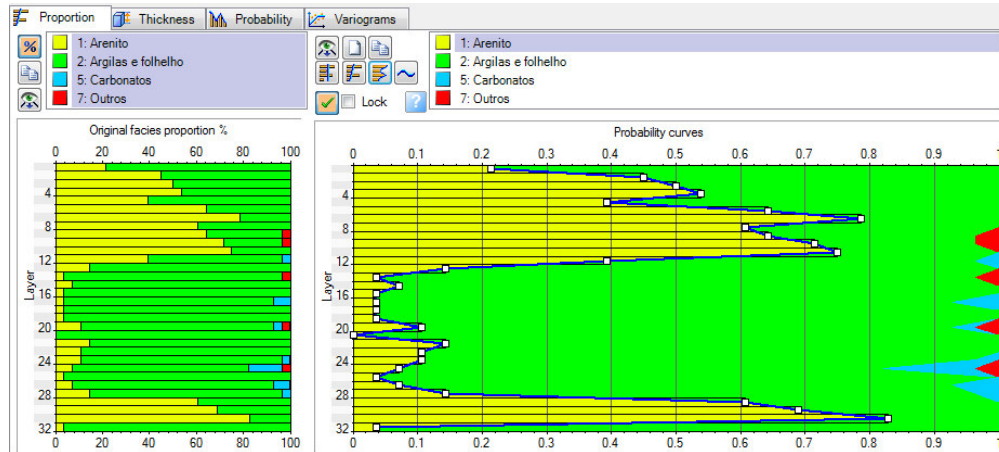


Figura 4.8 – Curva de proporção vertical de fácies para a zona 1.

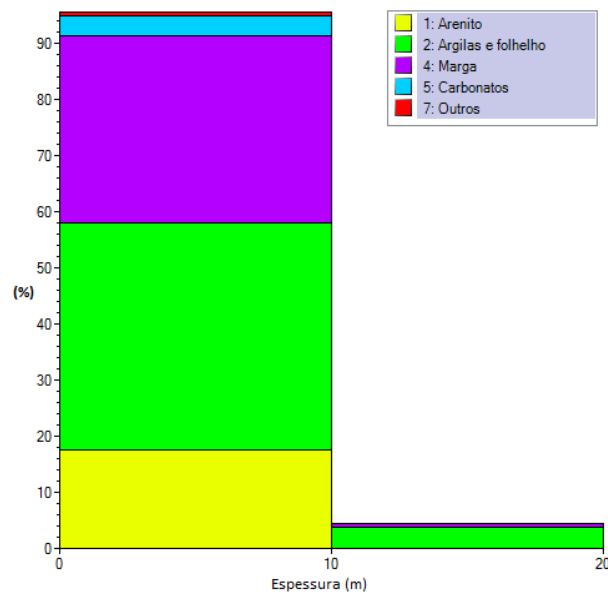


Figura 4.9 – Histogramas de espessura de fácies para uma das zonas.

Na Figura 4.9 é verificada a presença predominante (95%) de lentes inferiores a 10 m para as diversas litofácies presentes na zona em análise. Apenas 5% dos dados são compostos por lentes de maior espessura. A compreensão deste comportamento, juntamente com as curvas de proporção vertical, orienta a análise dos variogramas experimentais e ajuste de modelos teóricos.

Na Figura 4.10 é apresentado um resumo da análise variográfica realizada para cada litofácies presente em cada zona. Notar os alcances: vertical de até 35 m e horizontal máximo de 3.000 m para a fácies argilas e folhelhos na zona 5, sendo as dimensões do modelo 16.000 x 6.000 m.

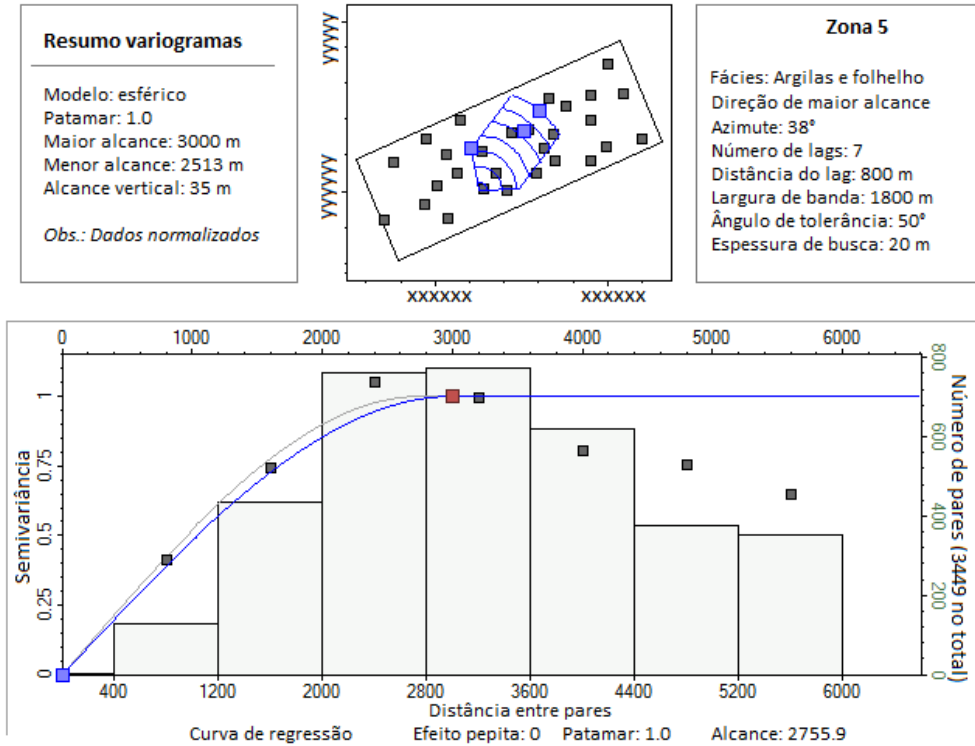


Figura 4.10 – Resultados da análise de variogramas da zona 5 nas três direções (acima à esq.), parâmetros do variograma experimental (acima à dir.) e ajuste de modelo teórico na direção de maior alcance (abaixo).

Para a escolha do algoritmo geoestatístico de distribuição espacial a adotar, foram considerados a análise estrutural dos dados de fácies e os modelos hipotéticos de sedimentação da bacia. O campo em estudo foi formado por ambientes de sedimentação marinho e terrestre, ambos representáveis por análise variográfica e algoritmos com base em métodos de krigagem. Neste caso, métodos orientados a objetos, como canais meandantes (Poletto, 1996) ou simulação gaussiana truncada, como em atóis (Doyen, 2007), não são aplicáveis.

Conforme Caers (2005), desde que a continuidade geológica seja simples o bastante para ser capturada por um modelo de variograma, a distribuição de fácies pode ser prevista pelo método de simulação sequencial indicativa (SIS). Portanto, a SIS foi escolhida e então simulados 20 cenários equiprováveis.

Os 20 cenários buscam representar a heterogeneidade espacial do campo. A moda entre os cenários (litologia mais frequente em cada célula) é ilustrada na

Figura 4.11. Notar forte intercalação entre as fácies carbonatos, evaporitos e argilas, ambiente propício à geração de sobrepressões elevadas por subcompactação e por expansão de fluidos, dada a elevada condutividade térmica dos evaporitos em relação aos demais sedimentos (Mohriak e Szatmari, 2008).

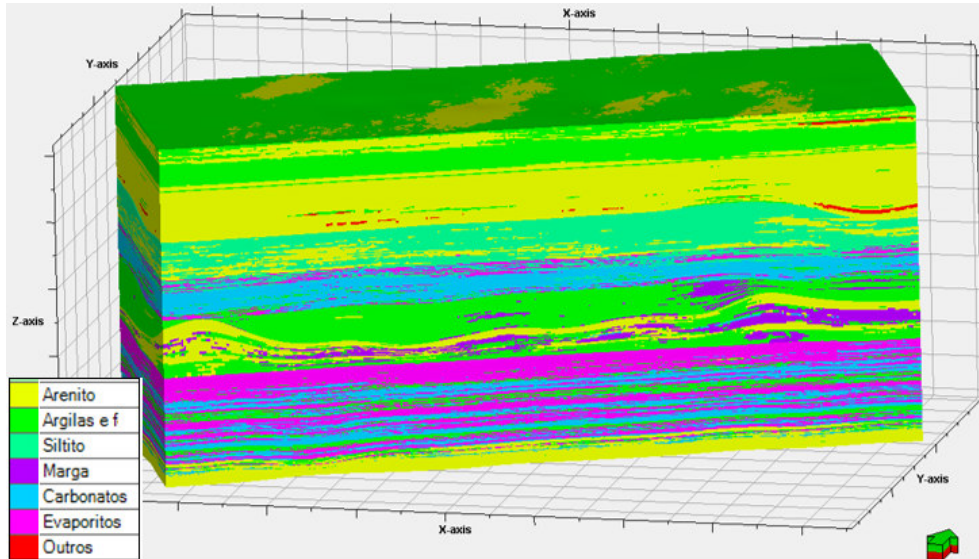


Figura 4.11 – Cenário mais frequente entre 20 simulações de fácies (SIS).

A validação qualitativa dos poços é apresentada na Figura 4.12. Nota-se que a moda entre os cenários (ao centro) é representativa, porém suavizada, não captando a presença de algumas lentes delgadas, como as de argila e de conglomerado (classificadas como outros) nos poços de validação na zona 2. Outro exemplo é o espessamento das camadas previstas em relação às fácies reais nas zonas 4 e 6.

A predominância de determinada fácies em certo intervalo de profundidade leva à maior probabilidade de ocorrência da mesma nas proximidades. Ao extrair a moda das simulações, pequenas lentes podem ser negligenciadas. A análise dos cenários individuais de simulação serve, portanto, para realçar a heterogeneidade do campo e auxiliar na previsão final de pressões. Da validação, o cenário 3 (Figura 4.13) foi escolhido para o condicionamento da distribuição espacial das propriedades.

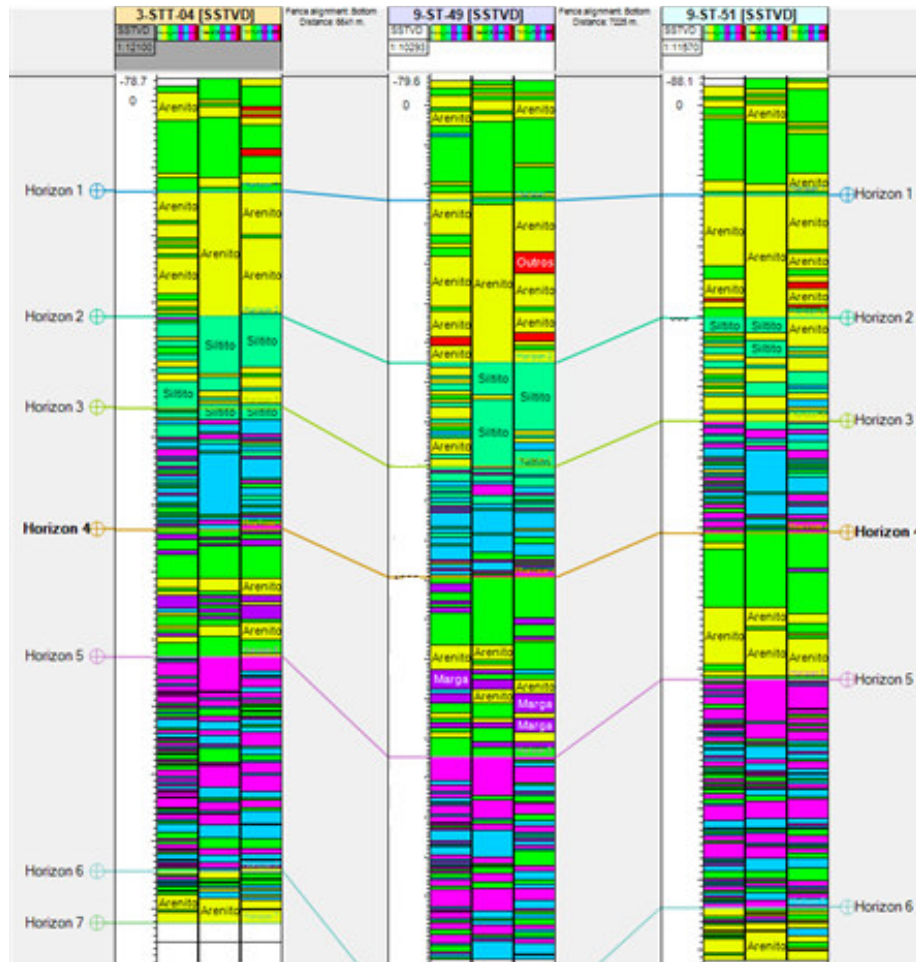


Figura 4.12 – Validação do modelo de fácies. Da esquerda para a direita: fácies real; cenário mais frequente e previsão SIS 03.

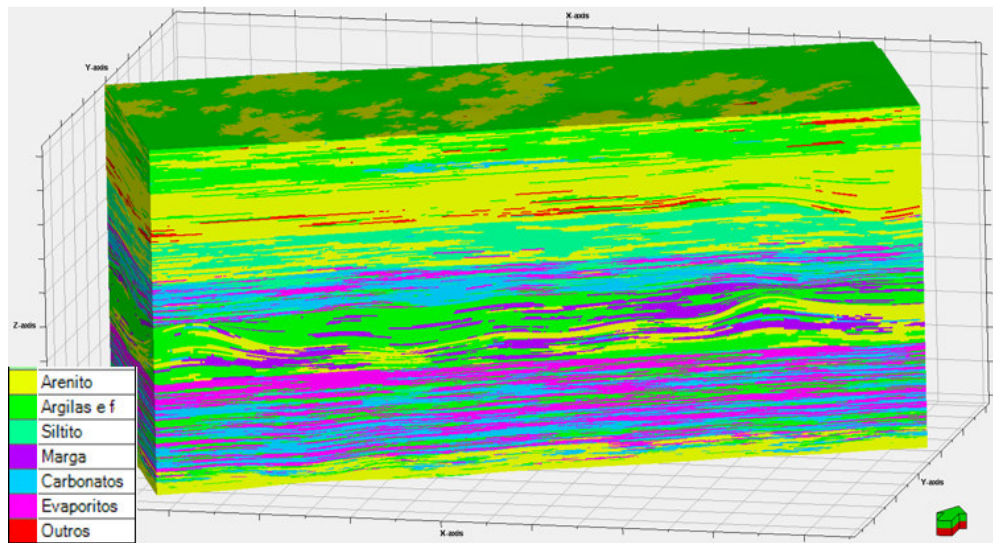


Figura 4.13 – Cenário de fácies escolhido para o condicionamento das propriedades (SIS 03).

4.5. Modelagem de perfis

Para a conclusão do modelo geológico base para a previsão de pressões, foram distribuídos os perfis Dtc, GR e Rhob (indicadores de porosidade e argilosidade). Como essas propriedades são dependentes da litologia, a análise estrutural e a distribuição espacial foram condicionadas às fácies (cenário SIS 03), sendo analisado o comportamento espacial das propriedades para cada fácies em cada zona. Antes do ajuste dos variogramas foram aplicadas transformações para a remoção de tendências dos dados originais, permitindo a melhor adequação dos algoritmos geoestatístico. Uma vez distribuídos os dados sem tendências, as transformações foram retroaplicadas.

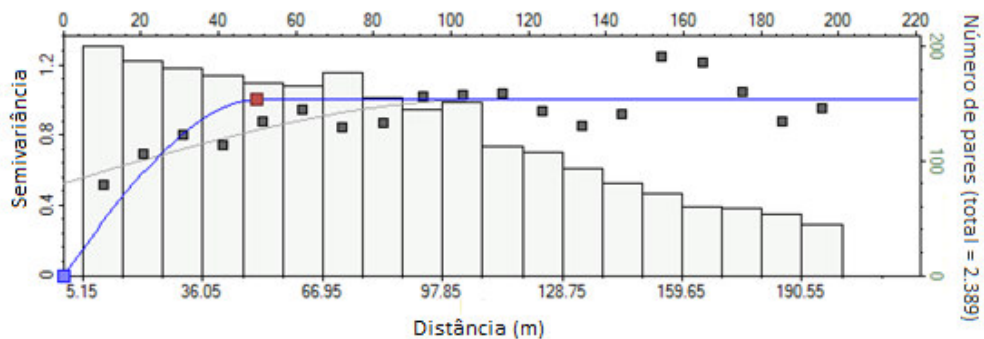


Figura 4.14 – Ajuste de variograma vertical de Dtc da fácies folhelho na zona 1.

A distribuição espacial das propriedades se deu por Simulação Sequencial Gaussiana (SGS), tendo por interpolador a Krigagem Ordinária, que adota médias locais no algoritmo de estimativa.

A OK foi escolhida como interpolador por ser mais adaptável aos dados que a SK, uma vez que comporta variações locais da média, correspondendo, por exemplo, a uma tendência geológica. Quando os dados contidos na vizinhança são esparsos, a OK pode gerar artefatos na forma de descontinuidades abruptas nos mapas de resultados (Doyen, 2007), o que não ocorre no modelo em questão, dada a quantidade de poços distribuídos na região modelada.

A validação das distribuições foi qualitativa e quantitativa. Na análise qualitativa observou-se a coerência dos valores obtidos com o comportamento esperado para o cenário geológico modelado em cada zona. Na Figura 4.15 é apresentado o cenário médio de 20 simulações de Dtc. Notar a queda significativa de Dtc nas zonas 4 e 6, onde há predomínio de anidrita e carbonatos bastante compactos. O mineral anidrita puro tem Dtc = 50 $\mu\text{s}/\text{ft}$ (Mohriak *et al.*, 2009).

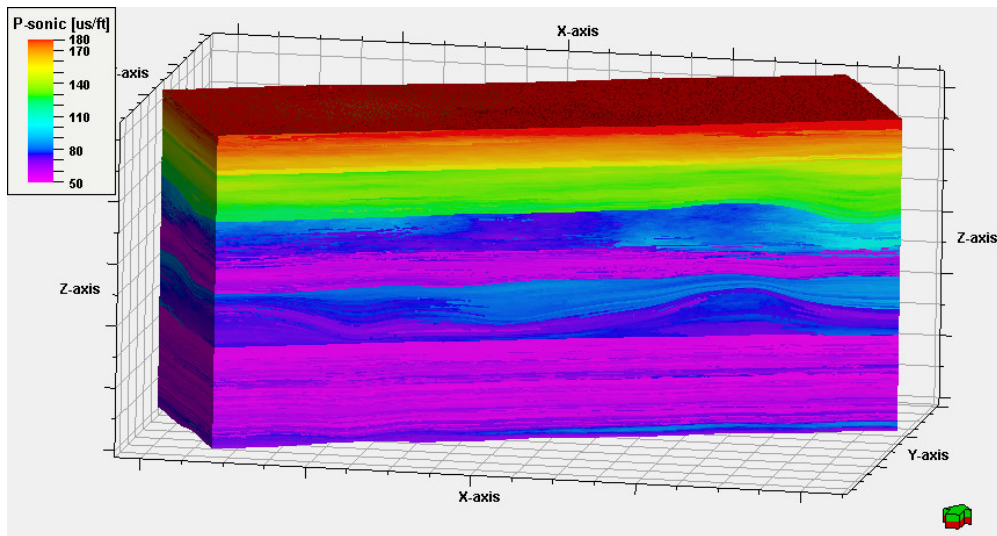


Figura 4.15 – Cenário médio 20 simulações de Dtc por SGS.

A Figura 4.16 ilustra o cenário médio de Rhob, destacando-se a elevada densidade nessas mesmas zonas (a densidade da anidrita pura é de $2,98 \text{ g/cm}^3$, Mohriak *et al.*, 2009) e a densidade de carbonatos pode variar com o tipo e a porosidade do carbonato (chega a $2,87 \text{ g/cm}^3$ em dolomitos).

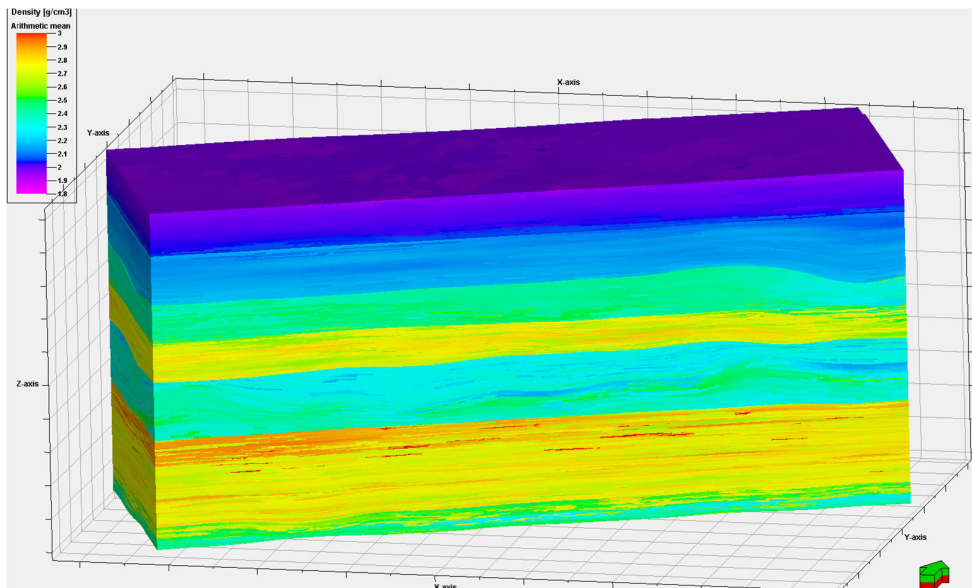


Figura 4.16 - Cenário médio 20 simulações de Rhob por SGS. Magenta = 1.8 g/cm^3 e vermelho = 3.0 g/cm^3 .

A Figura 4.17 ilustra o cenário médio de 20 simulações de GR. Neste caso, percebe-se uma variação intercalada no comportamento de GR nessas duas zonas, pois o valor típico para anidrita pura é $\text{GR} = 0 \text{ API}$ (Mohriak *et al.*, 2009) mas para folhelhos, pode atingir valores superiores a 150 API.

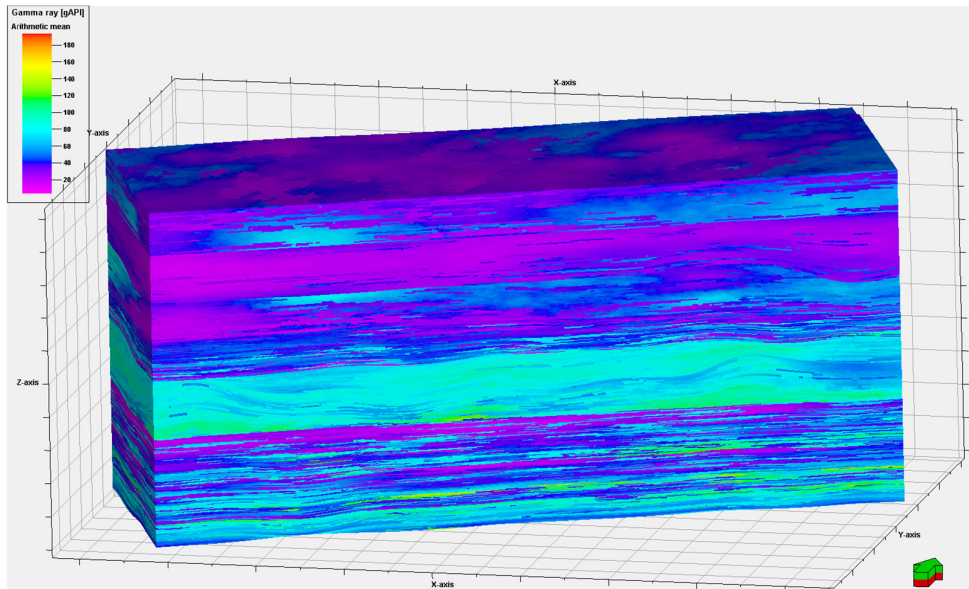


Figura 4.17 - Cenário médio de GR por SGS (Escala de 0 a 200 API).

Para a validação quantitativa (Figura 4.18) foram avaliados o erro percentual absoluto entre a previsão e o perfil original (MAPE - *Mean Absolute Percentage Error* - Equação 4.1), e a abrangência ou não do perfil original nos limites de mínimo e máximo esperado nas simulações.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum Abs \frac{(Vest - Vorig)}{Vorig} * 100\% \quad \text{Equação 4.1}$$

Vest é o valor estimado

Vorig é o valor original

n é o número de pontos do perfil estimado

Como limitantes de mínimo e máximo em cada célula foram extraídos os limitantes inferior e superior para a abrangência de 95% dos dados de uma distribuição normal (média +/- duas vezes o desvio padrão). Com base no Teorema do Limite Central, a distribuição normal é o produto da realização de grande número de previsões por SGS e assumido para essas 20 realizações.

A Figura 4.18 ilustra o valor original (em preto) e variações de mínimo a máximo previsto (sombreamento entre as curvas em vermelho) das propriedades previstas. Da esquerda para a direita as litofácies originais, as litofácies do cenário 3 e as propriedades Dtc, Rhob e GR. Notar que o valor original das três propriedades se encontra dentro desses limites, com poucas exceções, ou seja, as previsões são representativas e aplicáveis aos estudos subsequentes.

Notar que, devido às intercalações, em alguns casos a forma da curva é captada, mas a profundidade da previsão pode apresentar algum deslocamento. Para fins de perfuração e previsão de pressão de poros, conforme observado nos estudos de BDPs, esse pequeno deslocamento em profundidade não é significativo. O importante, neste caso, é captar o comportamento em profundidade aproximada para que as decisões de perfuração sejam tomadas para o trecho aberto.

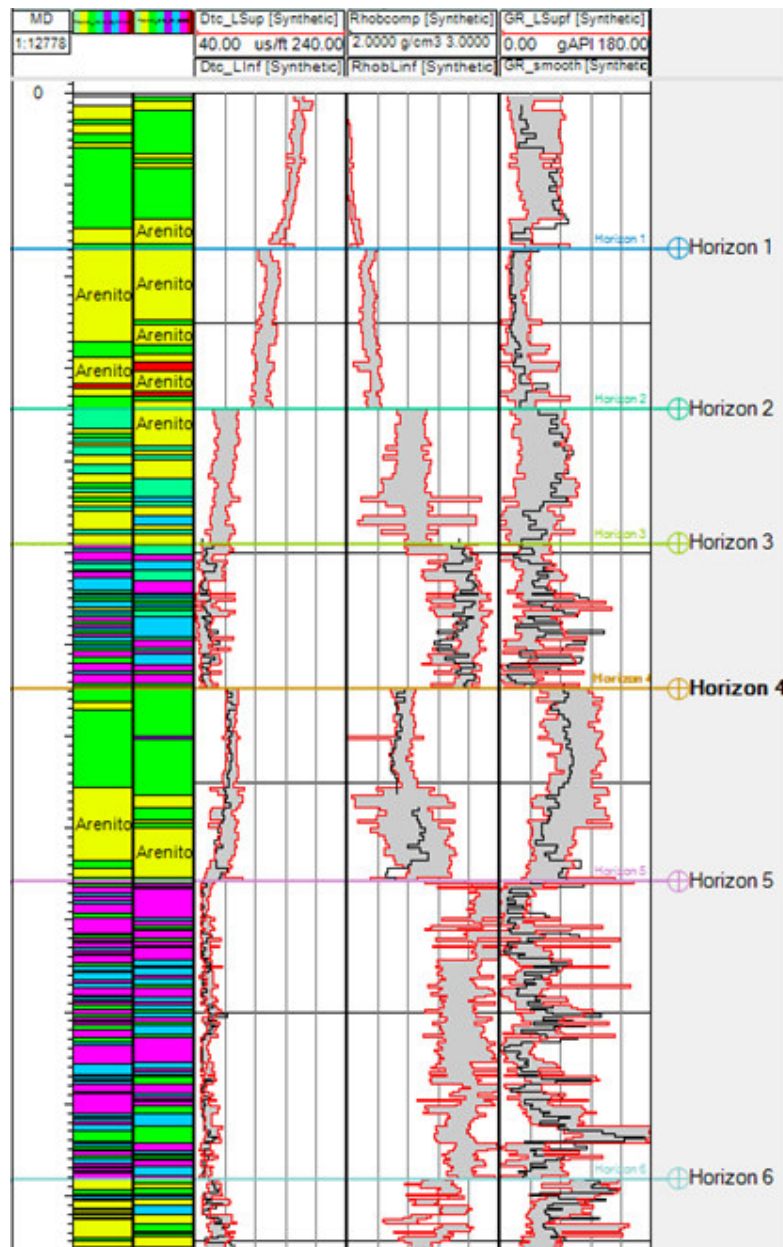


Figura 4.18 – Validação de Dtc (esq.), Rhob (centro) e GR (dir.) para um dos poços excluídos para teste cego (ST-51). Mínimos e máximos em vermelho.

4.6.

Análise integrada e definição do método de previsão de pressão

Para a análise integrada de dados, os trabalhos de Rosero (2013) e Marchesi *et al.* (2014) foram tomados por base. O objetivo é esclarecer dúvidas não sanadas apenas pela análise do MEM 1D. Foram importados para o modelador 3D, vinculados aos dados de poços, dados de interpretação de BDPs, dados de ensaios e dados de fluido: (i) peso de lama; (ii) medições diretas de pressão; (iii) trechos de torque e arraste elevados; (iv) zonas de perdas e ganhos de fluido; (v) pontos de prisão/ameaças de prisão; (vi) profundidade de troca de fase e; (vii) a própria imagem da curva de avanço de perfuração apresentada na análise MEM 1D.

Esses dados foram analisados de forma integrada entre si e ao cubo de litofácies em seções entre poços. Inicialmente foram avaliados perdas e ganhos de fluido, que por sua vez exigiram visualização integrada com as litofácies (Figura 4.19) e com o peso de lama ao longo do trecho de fase aberta (Figura 4.20). O primeiro chama a atenção por apresentar perdas diversas nas zonas iniciais do modelo (nas espessas camadas de arenitos) e na zona 5 (sedimentos marinhos argilosos e arenosos), e ausência de perdas e ganhos nas zonas de intercalação.

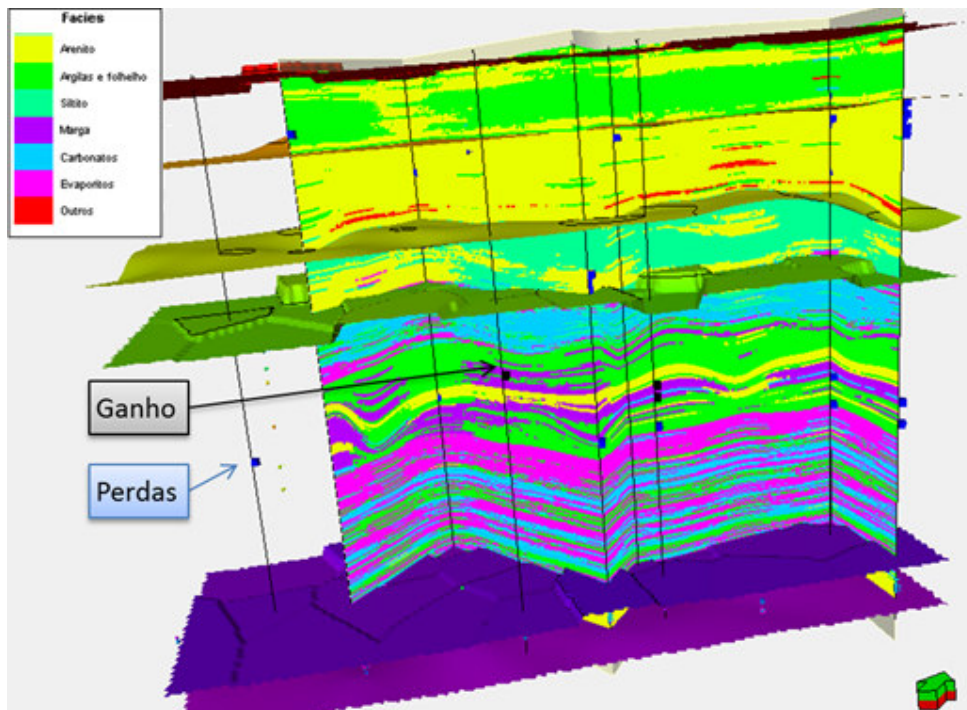


Figura 4.19 – Perdas (pontos em azul) e ganho de fluido (pontos em preto) plotados sobre seção de litofácies entre poços. Superfícies delimitam as fases de perfuração (trechos de poço aberto).

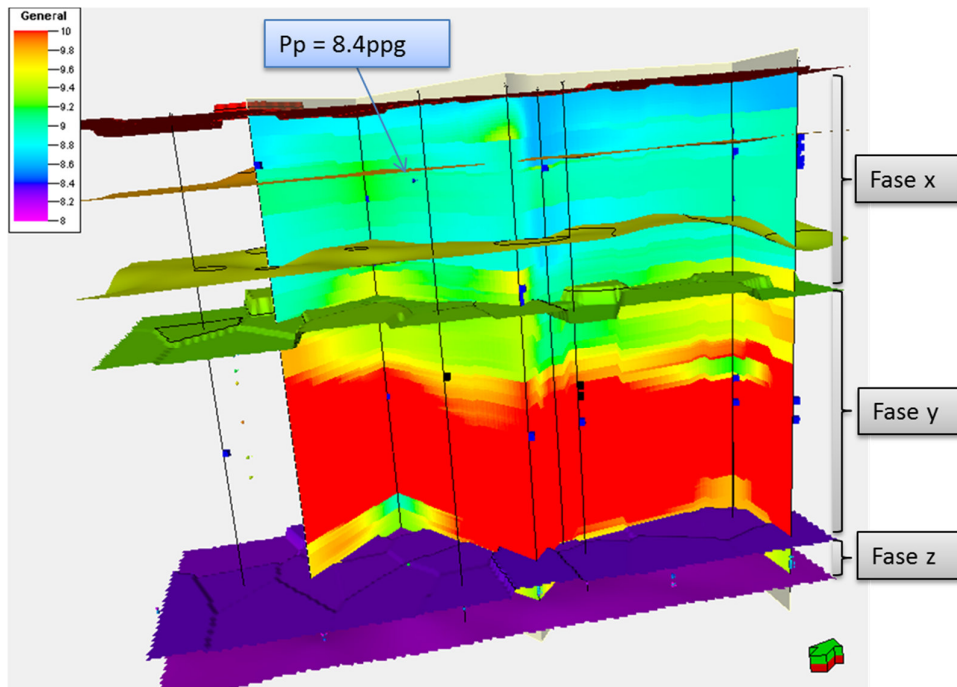


Figura 4.20 – Perdas (pontos em azul) e ganho de fluido (pontos em preto) plotados sobre seção de MW interpolado entre poços.

Da análise integrada ao peso de lama por fase, verifica-se um padrão de perdas nos trechos iniciais de fase possivelmente relacionadas ao aumento do peso de fluido nas profundidades finais do trecho aberto. A Figura 4.20 realça o mapeamento das superfícies de topo e base das fases.

Da análise de MEM 1D, notou-se que os carbonatos das zonas intercaladas apresentavam valores de D_{tc} e R_{hob} próximos aos valores de matriz, sugerindo baixa porosidade e permeabilidade. O comportamento da análise 3D desses perfis vinculado à fácies carbonatos confirma tal comportamento no campo como um todo. Isso pode explicar a ausência de ganhos ou perdas nas intercalações com o sal, apesar das elevadas pressões medidas, principalmente na zona superior de intercalação.

A análise dos dados de pressão medida em ambiente 3D e em pressão vs profundidade vertical indicou compartimentação em profundidade (Figura 4.21). Há rápido aumento de pressão na primeira zona intercalada e em seguida leve redução neste comportamento ao longo da zona de sedimentos marinhos, sugerindo algum alívio de pressão ao longo da camada de arenitos. Na suposta profundidade de reservatório (arenitos da base do modelo), as pressões voltam a se aproximar das pressões normais. Reafirma-se, dessa forma, a regressão de pressões em algum ponto entre a zona intercalada superior e inferior.

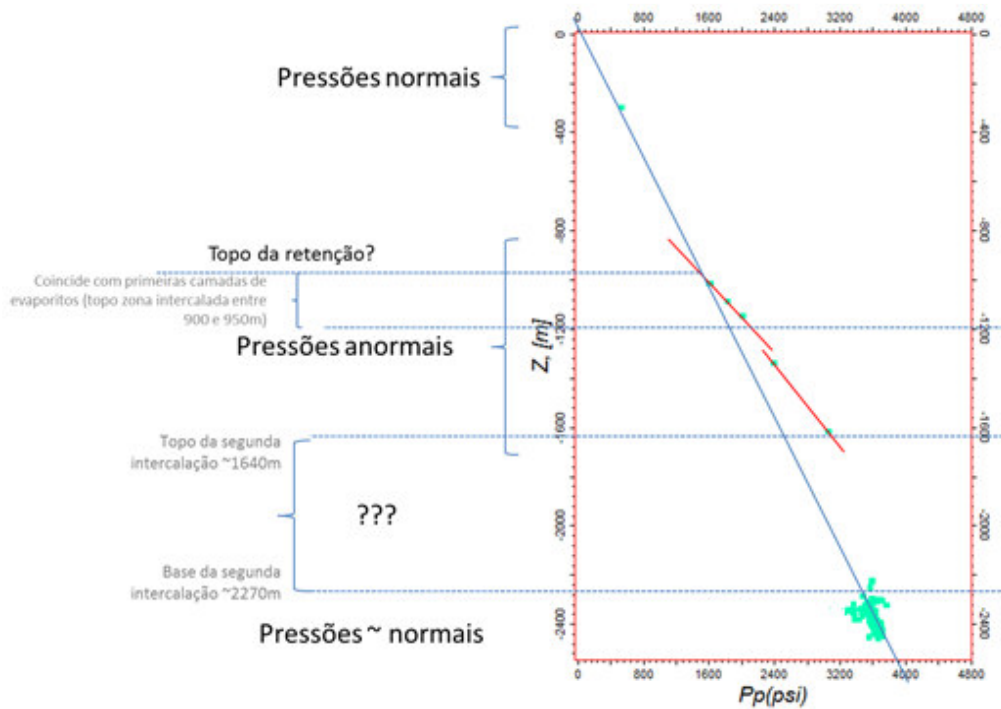


Figura 4.21 – Análise de compartimentos de pressão em curva de pressão versus profundidade vertical.

Voltando à análise MEM 1D, buscou-se observar possíveis indícios de gás durante a perfuração da intercalação superior, que conforme Zilberman *et al.* (2001), justificaria seu comportamento diferenciado em relação à intercalação superior, mas os mesmos não foram encontrados. A análise realizada foi a continuidade lateral e interligação vertical entre sedimentos de permeabilidades extremas (muito baixas, como o sal, e muito altas, como os arenitos).

Para a zona disposta entre as duas zonas de intercalação foi estudada a possibilidade de pressões anormais elevadas por mecanismos secundários (possibilidade de temperaturas elevadas em função da elevada condutividade térmica do sal) pelo método proposto por Bowers (2001), conforme Figura 4.22, para toda a zona. Em verde os folhelhos e em roxo as margas. O comportamento apresentado sugere que tais mecanismos não se encontram presentes nesta camada. Em análise conjunta com as curvas de avanço (Figura 4.23), o comportamento se confirma.

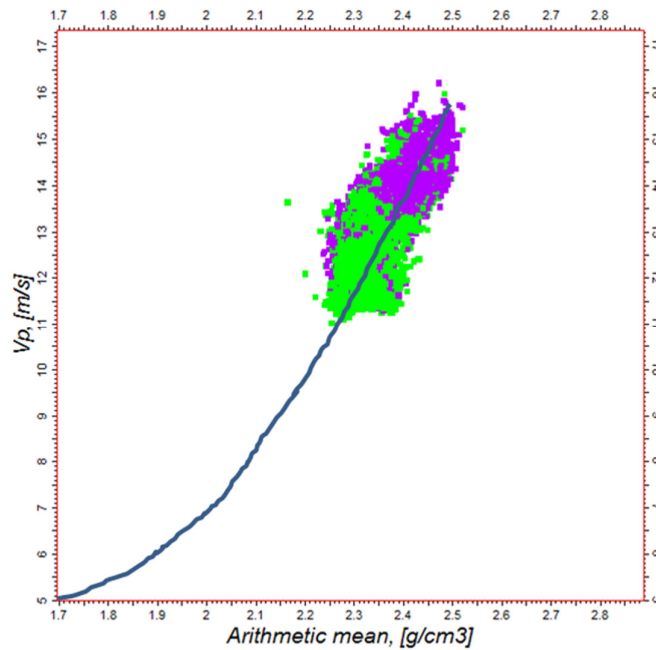


Figura 4.22 – Análise de ocorrência de mecanismos de sobrepressão elevada (verde – folhelhos e roxo – margas).

Diante dessas observações, optou-se por adotar métodos convencionais de previsão nas camadas superiores, com resultados de pressões normais previstas para todo o trecho. O mesmo princípio não se aplicou ao comportamento da zona de sedimentos entre as intercalações, onde foi aplicada distribuição conforme padrão de aumento e redução de pressões medidas e padrões de perdas e ganhos observadas durante a perfuração.

No “reservatório” serão calibradas as pressões conforme medidas de poços perfurados para a data de interesse. Para as intercalações, serão ajustadas pressões conforme medições ao longo do campo e ajustando o valor de pressão igual a zero nas lâminas de sal.

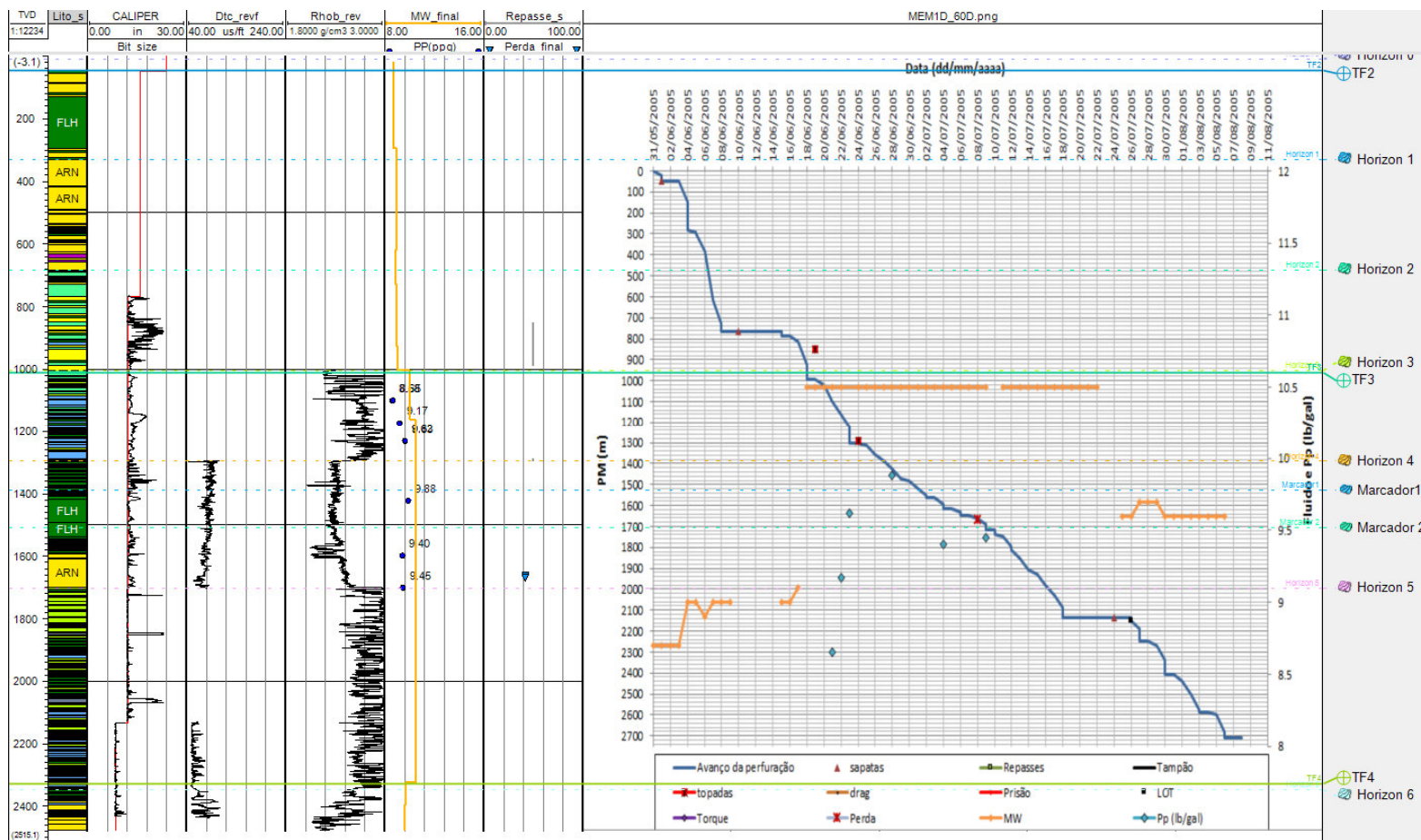


Figura 4.23 – Análise MEM integrada, poço a poço, no modelo.

4.7. Previsão de pressão de poros 3D

Supondo então que os métodos convencionais se aplicam às zonas 1 a 3, para a previsão de pressão de poros nas mesmas foi adotado o método de Eaton (1975) a partir do perfil sônico. Foi avaliada tendência individual e para o campo. Dada a tendência de cada poço, foi gerado um cubo auxiliar de tendência de Dtc de compactação normal em profundidade. Para a aplicação do método de Eaton, foram também gerados os cubos auxiliares de pressão de poros hidrostática e o de sobrecarga (Figura 4.24).

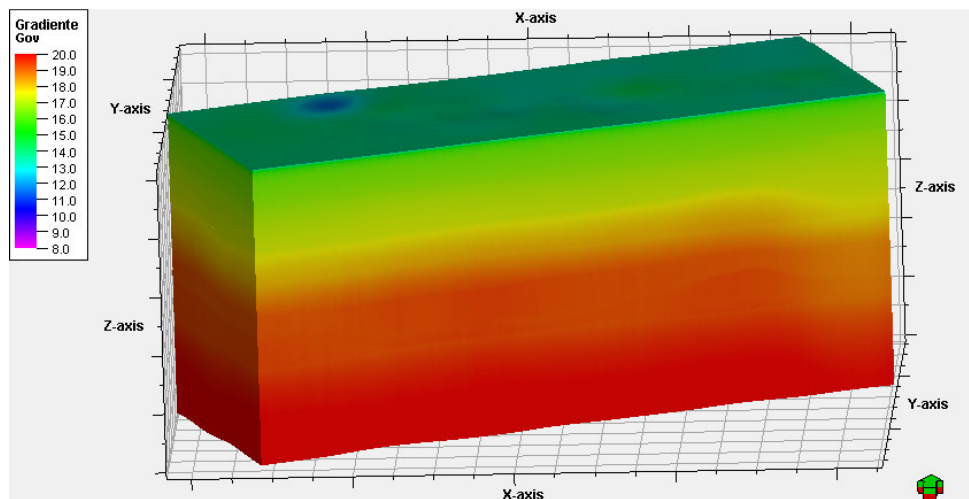


Figura 4.24 – Cubo auxiliar de gradiente de sobrecarga (lb/gal).

Para a previsão na zona de intercalação superior foram traçados padrões em função do crescimento observado de pressão em profundidade e o comportamento foi replicado para a zona. Na zona de sedimentos foram adotadas as métricas apresentadas, observando a redução do gradiente de pressão na camada de arenitos, indicando possível drenagem lateral em algum momento da evolução da bacia.

Para o pacote intercalado inferior foram verificadas pressões mais baixas que aquelas medidas no pacote superior e na zona de sedimentos marinhos entre os dois pacotes intercalados. Da Figura 4.13, em que o cenário de litofácies previsto é apresentado, assume-se que a espessa camada de evaporitos imediatamente abaixo da zona 5 é um divisor do estado de pressões, mais elevadas acima e tendendo à normal abaixo. Um mapeamento em planta (Figura 4.25) com base em medidas de pressão sugere valores entre 9,0 lb/gal e 9,3 lb/gal para esta zona, com tendência a aumento de pressão a noroeste. Este mapeamento foi usado como base para as previsões nesta camada.

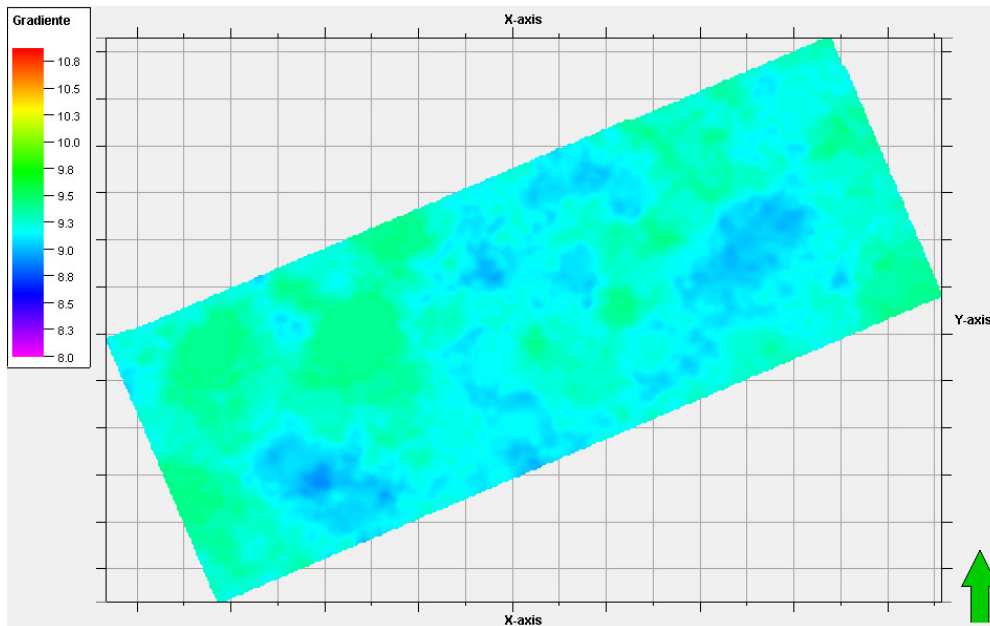


Figura 4.25 – Superfície com possível distribuição em planta de pressão de Gpp (lb/gal) para a zona 6 a partir de dados de medições diretas.

A distribuição de pressões para esta zona teve por tendência o comportamento da superfície da Figura 4.25 com distribuição 3D. Para a zona “reservatório” foram adotadas as pressões dos supostos primeiros poços perfurados, considerando uma previsão do cenário inicial de pressões, ainda não afetado pelo desenvolvimento do campo. Observa-se novamente o comportamento abaixo da zona 5, onde os arenitos aparentemente drenaram parcialmente o excesso de pressão em algum momento da evolução da bacia. Tal comportamento poderia ser melhor comprovado com uma análise de presença de falhas por meio de interpretação sísmica, caso estivesse disponível.

Após avaliadas as pressões de todas as zonas do campo, permeáveis ou não, o cubo de fácies foi utilizado para atribuir valores de pressão iguais a zero às células com litofácies “evaporitos”. O cubo final de pressão de poros previsto é apresentado na Figura 4.26. Notar a compartimentação do comportamento de pressões ao longo das diversas zonas definidas, em geral associadas às lentes de evaporitos, que funcionam como selos, e das camadas de arenitos, que aparentemente funcionam como drenos.

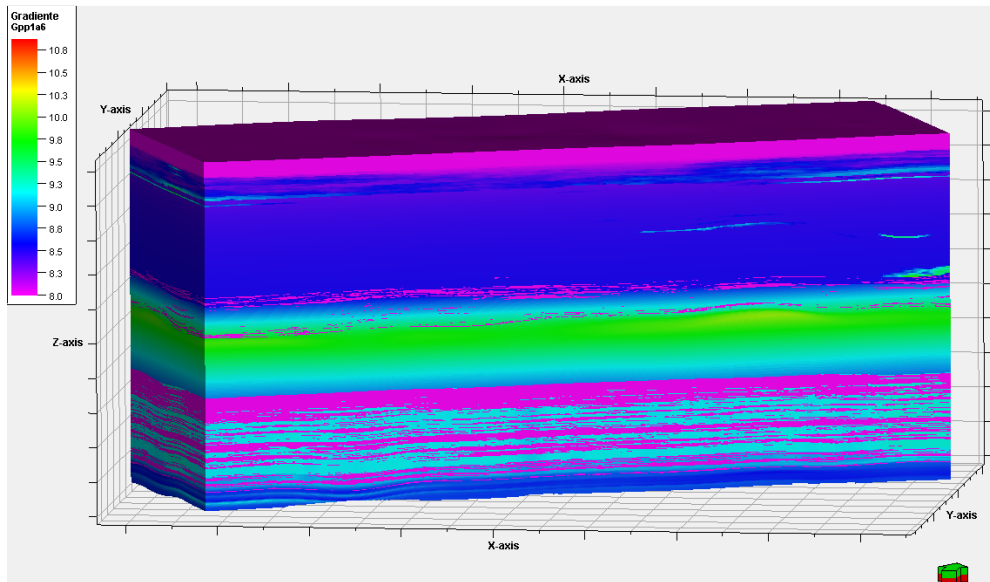


Figura 4.26 – Modelo 3D de pressões previsto (Gpp, em lb/gal).

4.8. Validação e discussão dos resultados

Para a análise de resultados, o valor de pressão foi extraído para os diversos poços e comparado aos valores de pressão medida e aos dados de fluido e eventos, validando o modelo previsto de pressões (Figura 4.27). Verificar o aumento e redução de pressões acompanhando as medições diretas e coerente com as perdas observadas na camada de arenitos da zona 5.

Do estudo de caso apresentado, verifica-se o potencial da contribuição da elaboração de modelos geológicos 3D como ferramenta de auxílio na compreensão do estado de pressões de campos de geologia complexa. A integração entre este modelo e indicadores de pressão observáveis em BDPs e dados de fluido, além de tomadas de pressão, auxilia na interpretação do comportamento de pressão conforme seus possíveis mecanismos geradores. Dentre as vantagens:

- Análise de heterogeneidade lateral e vertical de litologias com permeabilidades extremas, condicionantes de selos ou caminhos de distribuição de pressão;
- Estudo integrado de comportamento de uma mesma litologia ao longo do campo permite distinguir comportamentos globais e locais, como a presença de selo local por mecanismos diagenéticos que não se propaguem até outros poços;
- A análise de dados de perdas e ganhos junto aos dados de fluidos e litologia, juntamente com o mapeamento de topos e bases de fases, permite estruturar um panorama global de comportamento de pressões a ser complementado com os dados de tomada de pressão;

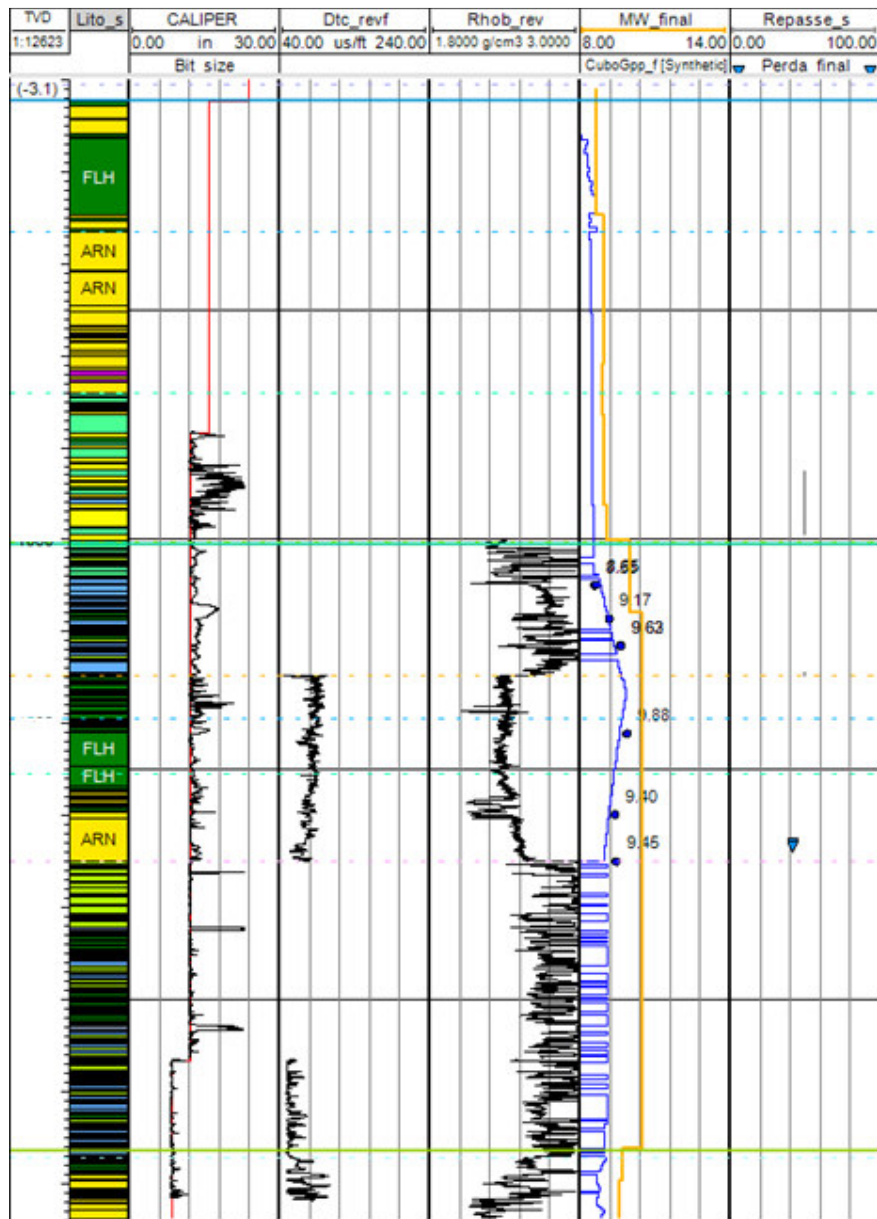


Figura 4.27 – Validação da previsão de pressão de poros (curva azul do segundo track da direita para a esquerda) em profundidade vertical.

- A compreensão de litologias e suas propriedades ao longo do campo permite avaliar a replicabilidade de dados de tomadas de pressão para outras regiões do campo;
- A análise de indícios de pressões anormais em rochas de baixa permeabilidade pode (e deve) ser aplicada simultaneamente no MEM 1D, junto a uma análise completa de estabilidade de poços;
- Os estudos de MEM 1D devem ser posteriormente avaliados em termos de comportamento global no campo. Possíveis indícios identificados como de pressão elevada ou como não tendo relação às pressões podem ser melhor compreendidos.

Notam-se também as fortes implicações da ausência de dados de sísmica 3D no estudo de campos de geologia complexa, como no caso de campos com presença de corpos evaporíticos. Além de ser útil na interpretação de topos entre poços (que podem assumir as mais diversas formas frente a dobramentos, erosão e falhas), forneceria também um elemento a mais na distribuição geoestatística de propriedades físicas entre poços e, talvez a contribuição mais importante, permitiria uma análise mais clara de compartimentos de pressão.

Notar ainda que a análise integrada 3D permite maior flexibilidade, mas garantindo a representatividade, para a previsão da distribuição de pressões em ambientes onde há dificuldade na aplicação de métodos convencionais.