

CONSTRUÇÃO DE MATRIZES DE PROPORÇÃO DE FÁCIES PARA A CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA 3D DE RESERVATÓRIOS DELTAICOS DA BACIA DO RECÔNCAVO (BA)

Mario S. S. Braga

PETROBRAS/E&P-BC/GERET

Av. Elias Agostinho 665, Macaé, RJ, Brasil - 27913-350

Olinto G. de Souza Jr.

PETROBRAS/E&P/GERET

Av. Chile 65, Rio de Janeiro, RJ, Brasil - 20031-170

Resumo. A caracterização geológica de reservatórios apresenta como um de seus principais desafios a definição do arranjo das rochas situadas nas regiões interpoços. A matriz de proporção de fácies constitui-se numa ferramenta que permite o estabelecimento de modelos tridimensionais da distribuição espacial das heterogeneidades dos reservatórios, a partir das informações obtidas nos poços e na sísmica. Neste artigo são descritos diferentes métodos para a construção de matrizes de proporção das fácies deltaico-lacustrinas da Formação Pojuca, de um campo da Bacia do Recôncavo, e os resultados obtidos pela simulação estocástica Gaussiana Truncada de cada um dos modelos de repartição espacial das fácies produzidos. Precedendo a construção das matrizes de proporção, foram definidos quatro litotipos e, com base na análise de seus arranjos espaciais, assumida a hipótese de não-estacionariedade vertical e horizontal no intervalo estratigráfico em foco. As matrizes de proporções de fácies possibilitaram compreender as relações de continuidade lateral e vertical existentes entre os litotipos. As imagens geradas pela simulação estocástica confirmaram que os padrões de continuidade dos litotipos variaram em função da matriz utilizada e ratificaram a importância do emprego da matriz de proporção na modelagem de reservatórios heterogêneos.

Palavras-chave: Matriz de proporção, Modelagem Geológica, Geoestatística, Fácies, Reservatórios – Recôncavo (BA)

1. INTRODUÇÃO

Um dos aspectos mais relevantes da caracterização de reservatórios petrolíferos é a identificação dos padrões de distribuição de suas heterogeneidades, uma vez que elas influenciam, dentre outros aspectos, a quantificação de volumes e a produção de petróleo. Dentro deste contexto, o emprego da matriz de proporção de fácies possibilita a utilização integral das informações obtidas dos poços e também da sísmica, acessando, assim, o volume

interpoços. O emprego destas proporções de fácies na simulação estocástica gaussiana, possibilita a modelagem 3D mais confiável do reservatório.

A área de estudo está localizada na porção central da Bacia do Recôncavo e engloba parte de um importante campo de petróleo (Fig. 1). Apresenta 6 km² e está orientada na direção de deposição dos arenitos produtores de hidrocarbonetos (NW-SE). O intervalo estratigráfico selecionado apresenta espessura máxima de 91 metros e é delimitado por duas camadas-guia reconhecíveis por toda a bacia: o **marco 11**, situado no topo e escolhido como *datum* para este estudo, e o **marco 12**, na base do intervalo. Foram selecionados os 55 poços que apresentam a *suite* de perfis de raios-gama, densidade e neutrônico, sendo que três destes poços apresentam testemunhos de rocha e análises petrofísicas.

O desenvolvimento do trabalho obedeceu as seguintes etapas: definição de fácies permo-porosas ou litotipos nos poços; análise do arranjo espacial destes litotipos; geração de matrizes de proporção das fácies permo-porosas, e, por fim, a realização de simulações condicionais sobre os modelos gerados, utilizando o algoritmo estocástico gaussiano truncado. Na primeira etapa foi utilizado o pacote estatístico SAS (SAS Institute Inc., 1994) e nas demais, os *softwares* geoestatísticos HERESIM (Beicip-Franlab - *Petroleum Consultants*, 1997) e ISATIS (Transvalor & Geovariances, 1997).

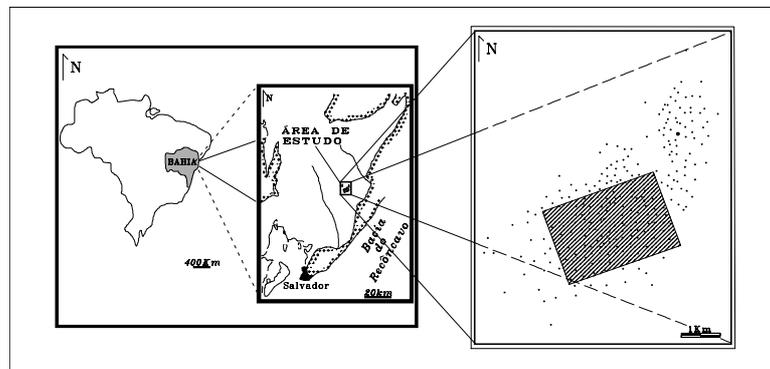


Figura 1 - Mapa de localização da Bacia do Recôncavo e da área de estudo.

2. ARCABOUÇO GEOLÓGICO DA ÁREA

O intervalo estratigráfico analisado pertence à Megasequência Estratigráfica do Lago definida por Asmus e Porto (1980) e corresponde aos sedimentos deltaico-lacustrinos da Formação Pojuca depositados a 130 Ma, durante a fase *rift* da bacia.

Com base nas análises de testemunhos efetuadas em 15 poços do campo, Mato (1984) e Soares (1997) descreveram oito litofácies as quais gradam desde arenitos finos a muito finos com laminações plano-paralelas e cruzadas de baixo ângulo, característicos de lobos deltaicos, a siltitos e interlaminações de siltitos, lamitos e arenitos muito finos bioturbados, relacionados a depósitos de interlobos/interdistributários, e finalmente a folhelhos lacustres.

A sedimentação das areias deltaicas ocorreu de NW para SE, num ambiente de baixa energia, inicialmente sob a forma de corpos descontínuos. A medida que a sedimentação deltaica prosseguia, alguns destes pacotes acomodaram-se segundo arranjos de compensação, favorecendo a formação de corpos arenosos lateralmente contínuos. Concomitantemente, formaram-se depósitos argilo-arenosos nas áreas interdistributárias. Com a diminuição do aporte sedimentar e o afogamento do delta pelo lago, depositaram-se areias com menor espessura e folhelhos lacustres. A maioria dos pacotes de arenitos constitui agrupamentos de corpos lobados formados pela amalgamação das barras de desembocadura dos canais distributários na frente deltaica. As rochas não-reservatório, são representadas por arenitos

muito finos intercalados com lamitos e/ou siltitos, depositados nas áreas interdistributárias, e por folhelhos com geometria tabular e boa continuidade, relacionados aos períodos de afogamento do sistema deltaico pela transgressão do lago. Estas rochas constituem importantes heterogeneidades sin-deposicionais, uma vez que representam barreiras verticais ao fluxo (Soares, 1997).

3. DEFINIÇÃO DOS LITOTIPOS

A partir das relações existentes entre os perfis elétricos/radioativos e as litofácies descritas nos intervalos testemunhados, foram definidos, em todos os poços, conjuntos de litofácies, denominados de litotipos. Para tanto, foram utilizadas técnicas não-paramétricas de análise estatística multivariada, adotando-se o método não-supervisionado (Braga, 1998). A validação dos resultados foi feita pela confrontação dos litotipos formados com os dados de rocha e petrofísica.

O conjunto de dados foi distribuído por quatro litotipos, cada um deles com características permo-porosas próprias. Existe uma gradação da qualidade permo-porosa que se inicia com litotipo 1, de melhor qualidade de reservatório ($\Phi=21,7\%$ e $K=178$ mD) e que corresponde aos arenitos dos lobos deltaicos; passa pelos litotipos 2, com boa permo-porosidade ($\Phi=17,6\%$ e $k=10$ mD) e é interpretado como sedimentos da porção marginal dos lobos deltaicos, e 3, com $\Phi=16\%$ e $K=7$ mD e que representa os sedimentos argilo-arenosos não-reservatórios dos interdistributários; e termina com o litotipo 4, formado por pelitos predominantemente lacustres.

4. ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS LITOTIPOS

A definição dos litotipos ao longo do intervalo estratigráfico dos 55 poços permitiu o uso de técnicas que forneceram informações a respeito do comportamento espacial daqueles litotipos, tanto individualmente como entre si. As relações espaciais observadas, após serem comparadas ao modelo geológico conceitual proposto para a área, propiciaram a tomada de decisões quanto à elaboração de um modelo 3D de repartição de fácies mais coerente com as relações verificadas. Dentre as várias técnicas de análise das relações espaciais utilizadas, citam-se os mapas de proporção (Fig. 2), as curvas de proporção vertical e horizontal (Fig. 3) e as análises variográficas direta e cruzada dos litotipos (Braga, 1998).

A integração dos resultados obtidos pelas diferentes técnicas indicou que as proporções dos quatro litotipos variam tanto em área como ao longo da seqüência estratigráfica e distribuem-se coerentemente com o modelo geológico conceitual. Isto é, os litotipos depositaram-se preferencialmente na direção NW/SE, inicialmente predominando a sedimentação pelítica, seguindo-se a deposição de grandes volumes de areia que gradavam lateralmente para sedimentos mais finos. Por fim, houve a retomada da sedimentação de pelitos, até cessar qualquer sedimentação arenosa. O seqüenciamento entre os litotipos dá-se de forma que o litotipo 1 passa lateral e verticalmente para o litotipo 2, que por sua vez, grada para o litotipo 3, que é recoberto pelo litotipo 4. Isto posto, dada a grande variabilidade espacial dos litotipos na área estudada, assumiu-se a hipótese de não-estacionaridade tanto na horizontal como na vertical deste litotipos.

5. CONSTRUÇÃO DAS MATRIZES DE PROPORÇÃO

Uma matriz de proporção (MP) representa um conjunto de curvas de proporção verticais padrão, onde cada uma delas está relacionada a uma célula de um *grid* 2D (Beicip-Franlab - *Petroleum Consultants* (1997), Souza Jr. (1997), Johann (1997) e Braga (1998)).

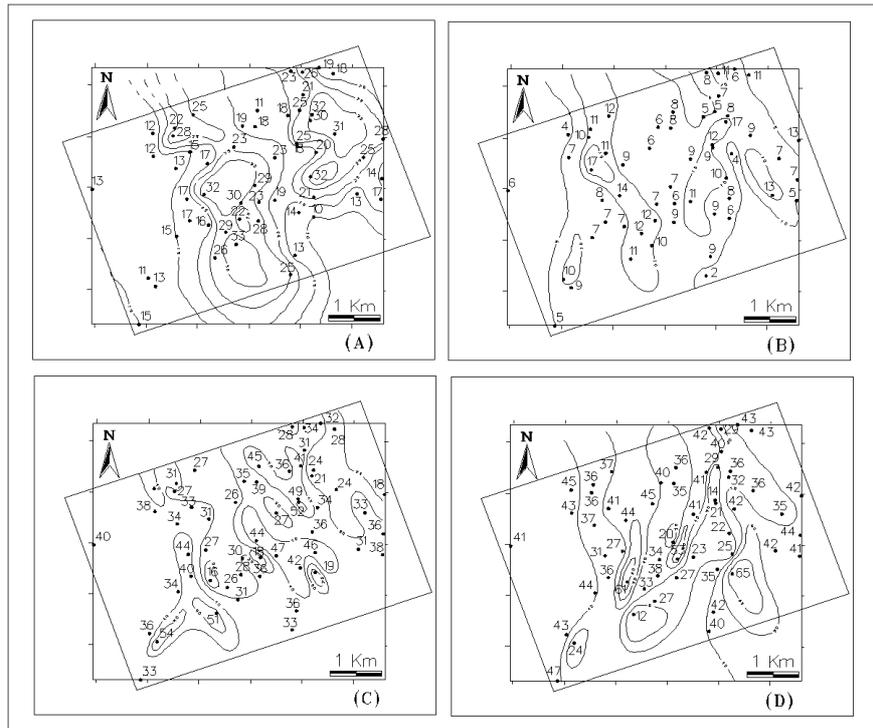


Figura 2 - Mapas de proporção das espessuras dos litotipos do intervalo estudado: (a) litotipo 1; (b) litotipo 2; (c) litotipo 3 e (d) litotipo 4.

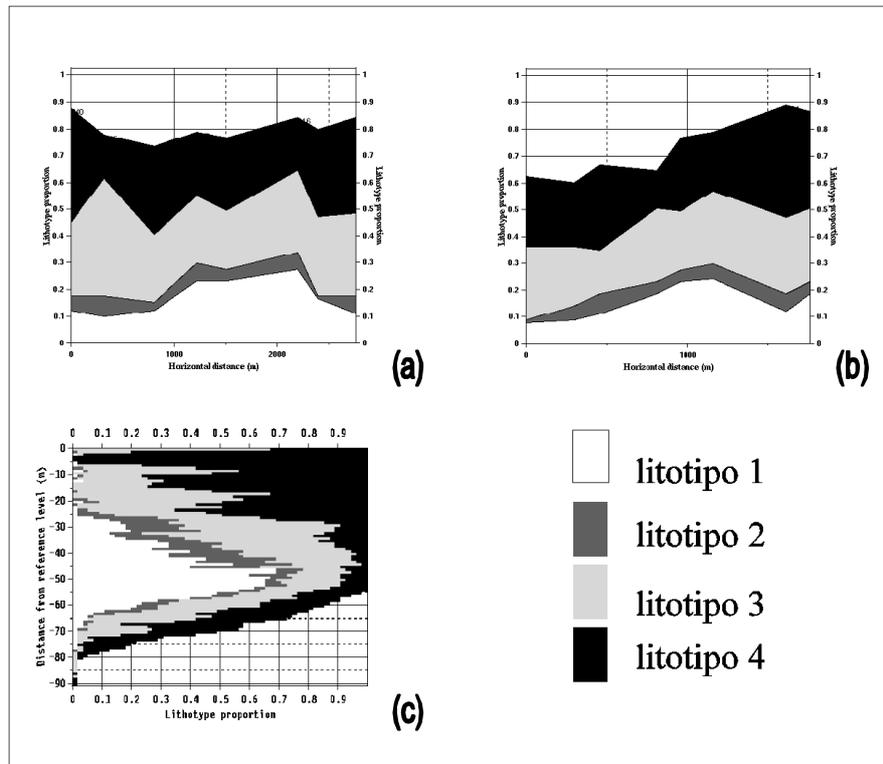


Figura 3 - Curvas de proporção dos litotipos do intervalo de estudo: (a) horizontal transversal à deposição; (b) horizontal paralela à deposição e (c) vertical.

Inicialmente, foi estabelecido um *grid*, com os mesmos tamanho e orientações da área de estudo e composto de células 3D de dimensões de 100m x 100m x 1m.

5.1. Métodos de construção das MP's

As MP's foram construídas seguindo-se três métodos diferentes:

Método das áreas. Este método constitui a forma mais simples de preenchimento de uma MP. Consiste na divisão do *grid* 2D em áreas, e na associação de uma determinada curva de proporção vertical (CPV) a cada uma destas áreas. As áreas podem ser demarcadas a partir de mapas geológicos de modo a propiciarem a identificação de regiões onde predominam as rochas com características permo-porosas distintas. Uma vez que a definição destas áreas depende de ferramentas geológicas, pode-se dizer que o conhecimento geológico da região estudada assume papel fundamental na construção deste tipo de MP.

Neste trabalho foi elaborado o mapa de razão das fácies reservatório/fácies total, a partir da interpolação fácies dos poços pelo método do inverso do quadrado da distância (Fig. 4). Com base neste mapa e no conhecimento geológico da região dividiu-se o *grid* em duas áreas: área de reservatório (proporções > 30%) e área de não-reservatório. A área de reservatório distribui-se no centro e a NE da área estudada, enquanto que a área de não-reservatório predomina nas porções W, SW e SE. À cada área foi associada uma curva de proporção vertical, formada pelas proporções dos litotipos dos poços existentes em cada área.

A matriz de proporção resultante reflete com clareza as duas CPVs associadas (Fig.5a). Observa-se a predominância dos litotipos mais pelíticos nas regiões W e SE e dos litotipos mais arenosos no centro e a NE da área. Esta compartimentação, entretanto, resulta em mudanças laterais abruptas das proporções dos litotipos, principalmente do litotipo 1 e do litotipo 3, e conseqüentemente na perda de suas continuidades. Apesar desta característica a matriz de proporção revela o caráter retrogradante dos sedimentos arenosos para o topo do intervalo estratigráfico.

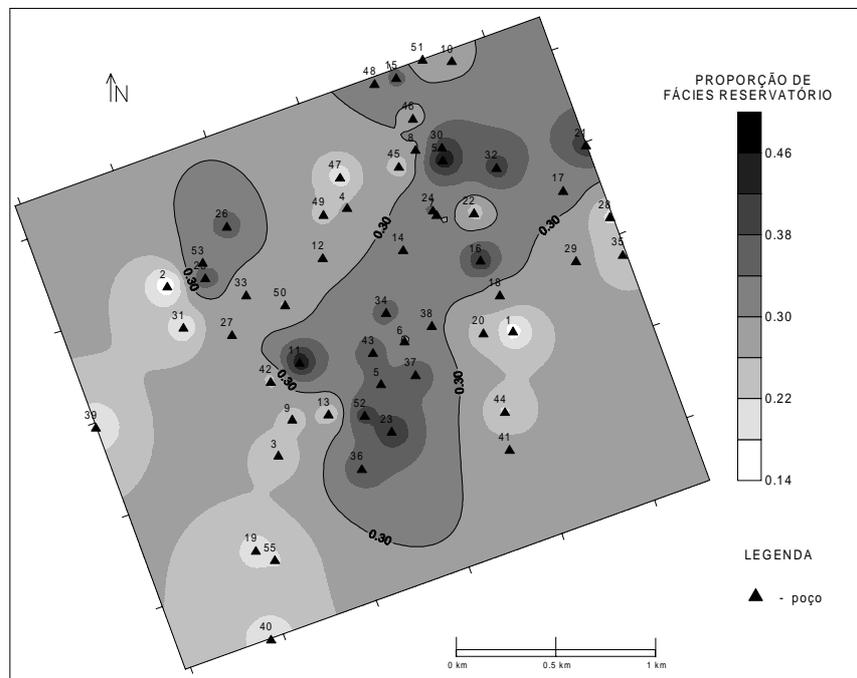


Figura 4 – Mapa das proporções das fácies reservatório (litotipos 1 e 2).

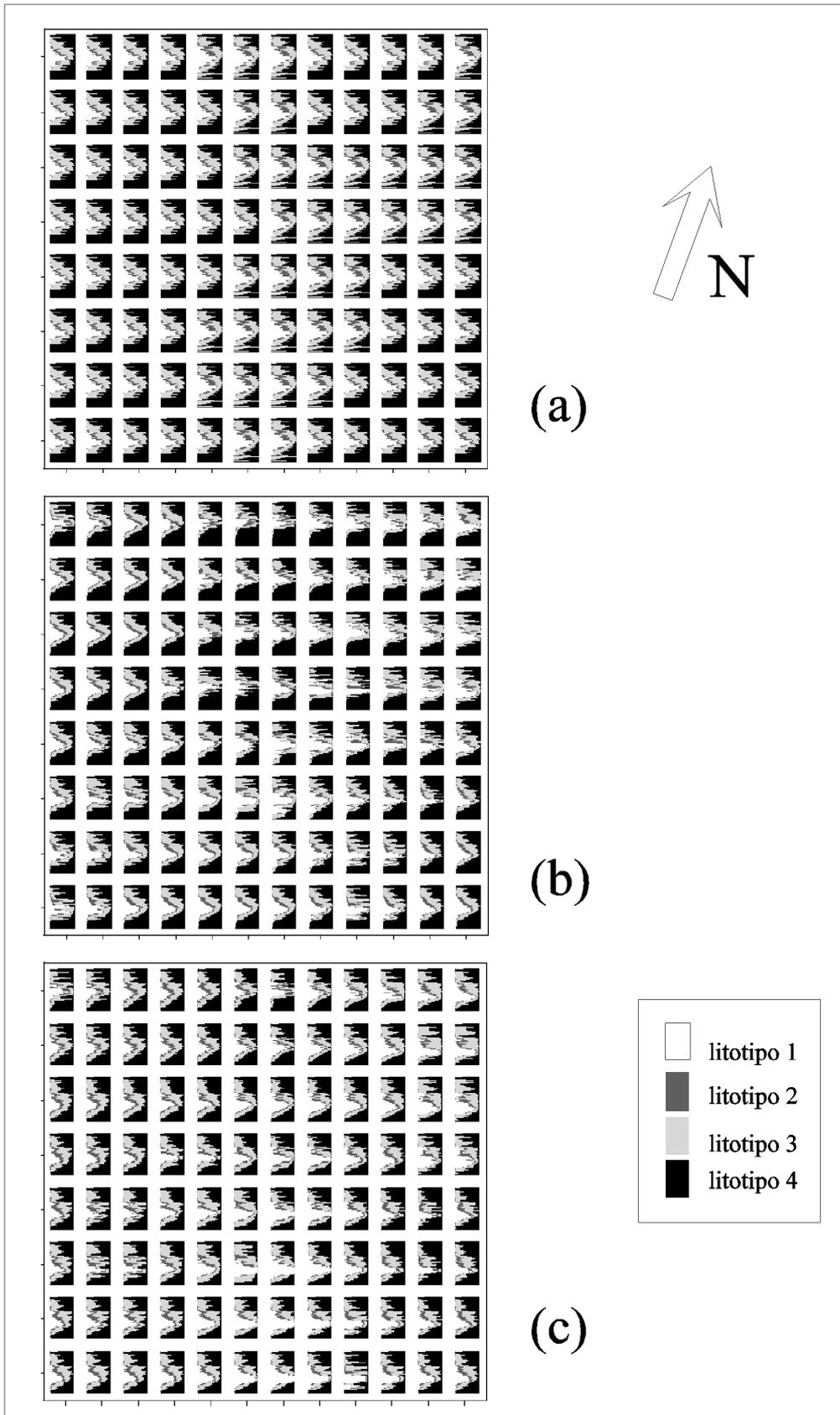


Figura 5 – Matrizes de proporção do intervalo estudado obtidas pelo métodos: (a) das áreas; (b) da krigagem das *CPVs* de 55 poços e (c) da krigagem de 16 poços com condicionador.

Método da krigagem das proporções. O método é caracterizado pela interpolação das proporções dos litotipos a partir das CPVs dos poços. No centro de cada célula 3D do *grid* da MP, a proporção de cada litotipo é interpolada, nível a nível, através da krigagem ordinária. Como a estimativa é efetuada nível a nível, somente o modelo estrutural horizontal é imposto ao sistema de krigagem (Souza Jr., 1997). Assim, para se levar em conta as informações dos níveis vizinhos, é efetuada uma média móvel sobre três níveis (aquele que está sendo estimado e os seus níveis adjacentes, superior e o inferior).

A MP resultante revela a história deposicional coerente com o modelo geológico conceitual da área (Fig. 5b). Verifica-se, da base para o topo do intervalo, o crescente incremento das proporções dos litotipos mais arenosos até a porção mediana do intervalo e, em seguida, sua diminuição gradativa ocasionada pelo crescimento das proporções dos litotipos mais pelíticos, resultado da transgressão lacustre sobre o delta. Os pacotes de sedimentos mais arenosos (litotipos 1 e 2) mostram continuidade variável ao longo do tempo e espaço em função da geração de heterogeneidades causadas pela variação lateral dos demais litotipos.

Método da krigagem das proporções dos litotipos com um condicionador. Este método é semelhante ao anterior, porém é enriquecido por condicionadores externos, tais como mapas de razão e dados sísmicos (Mouliere et al., 1996), que mostram aspectos importantes da região estudada, como por exemplo, *trends* gerais da deposição dos sedimentos. As informações contidas nesta variável contínua podem ser adicionadas ao sistema de krigagem, reduzindo a incerteza da estimativa das proporções dos litotipos e, conseqüentemente, gerando uma matriz de proporção que reproduzirá mais fielmente as heterogeneidades do reservatório.

Para a construção desta MP, foram escolhidos apenas 16 dos 55 poços existentes, de modo a cobrirem toda a área de estudo. A variável condicionadora foi obtida a partir da krigagem das proporções do litotipo 1 nos 55 poços, resultando em um mapa da distribuição das proporções médias deste litotipo (Fig. 6). Este mapa mostra valores mais elevados no centro e nordeste da área, enquanto os baixos valores ocorrem principalmente nas regiões noroeste e sudeste.

A matriz de proporção resultante, Fig. 5c, mostra que a utilização do condicionador e apenas 16 poços gerou resultados semelhantes à MP construída pela krigagem das proporções de todos os poços.

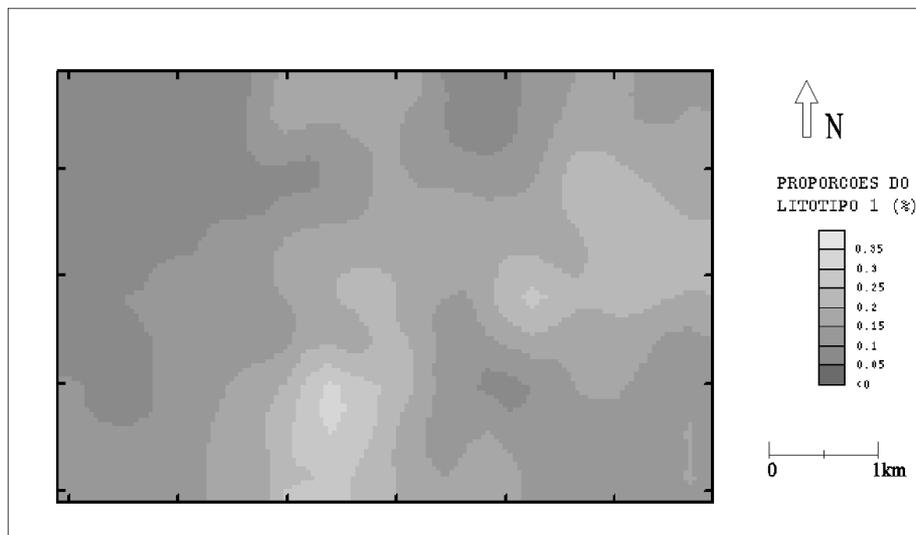


Figura 6 – Mapa suavizado das proporções do litotipo1, obtido a partir de krigagem.

5.2. Resultados

Os resultados das três matrizes de proporção mostram que suas construções são fortemente dependentes, não só da quantidade dos dados disponíveis, como também da forma como são tratados. Não se deve, entretanto, esquecer que a qualidade dos dados também influencia sobremaneira.

Observa-se, no método por áreas, que as mudanças laterais dos litotipos são abruptas, o que contraria o modelo geológico conceitual para a região. O método da krigagem das proporções dos litotipos mostra que os litotipos apresentam maior continuidade, de modo semelhante ao método que usa um condicionador adicional e um número menor de poços. Apesar das diferenças constatadas na comparação entre os resultados dos três métodos de construção de matrizes de proporção, em todas elas foi possível compreender o arranjo espacial dos litotipos no tempo e no espaço, o que, em outras palavras, reflete a distribuição das heterogeneidades ao longo do intervalo estudado.

6. SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA CONDICIONAL DOS LITOTIPOS

Na geração de imagens estocásticas, a partir das informações obtidas pela construção das matrizes de proporção dos litotipos, escolheu-se o método de simulação gaussiano truncado, uma vez que este método leva em conta a existência de seqüenciamento dos litotipos.

O método consiste em estabelecer a ligação entre o modelo de distribuição 3D das proporções dos litotipos compreendidos num intervalo estratigráfico e a realização de uma Função Aleatória Gaussiana Estacionária $Y(\mathbf{x})$, centrada e normalizada. Os litotipos são modelados por um conjunto aleatório, que, por sua vez, corresponde a uma partição do campo gaussiano, cujos limites são definidos pelas proporções de litotipos (Souza Jr, 1997). Cada realização de $Y(\mathbf{x})$ corresponde a uma realização do conjunto aleatório, interpretado como um modelo da repartição espacial daqueles litotipos. Supondo serem suscetíveis de variar dentro do espaço, estas proporções podem ser representadas por um processo estocástico não-estacionário e as realizações da repartição dos litotipos serão, portanto, não-estacionárias, mesmo que estejam intrinsecamente ligadas ao processo estacionário modelado por $Y(\mathbf{x})$.

O domínio 3D de simulação é idêntico ao utilizado na construção das MPs, porém, cada célula deste *grid* apresenta as dimensões de 50 x 50 x 1 m, perfazendo, assim, um total de 218.400 células. Utilizando-se a mesma semente, foi obtida uma realização de cada modelo de distribuição 3D das proporções de litotipos.

De modo geral as imagens geradas (mapas de isópacas dos litotipos e seções estratigráficas e estruturais horizontais e verticais) das três realizações mostram-se consistentes com o modelo geológico conceitual. Salienta-se, entretanto, que as imagens produzidas a partir da MP construída pelo método das áreas mostram os litotipos com menor continuidade, quando comparadas com as imagens advindas das outras duas MPs (Fig.7).

7. CONCLUSÕES

A compreensão da distribuição espacial das rochas reservatório e de suas heterogeneidades na área estudada foi possível graças a construção de matrizes de proporção de fácies, a partir das informações dos testemunhos de rocha e dos perfis elétricos e radioativos e do conhecimento do modelo geológico conceitual da área.

A análise espacial dos litotipos, utilizando-se diversas técnicas, ratificou o preconizado pelo modelo geológico, não só em relação às suas distribuições e geometrias como também ao arranjo vertical e lateral dos litotipos, permitindo a adoção da hipótese de não-estacionariedade vertical e horizontal do intervalo.

A Matriz de Proporção é uma ferramenta de fácil construção e extremamente útil na visualização 3D do reservatório. Através dela geraram-se modelos de repartição espacial das propoções dos litotipos de toda a área estudada.

Embora a quantidade de dados e a forma como eles são utilizados na construção da matriz de proporção influenciem nos resultados, constatou-se que, em linhas gerais, em todas as matrizes construídas foi possível verificar as mesmas mudanças no padrão de sedimentação da área. Em análise mais detalhada, ficou evidente que o uso do método de construção da matriz de proporção que associa uma curva de proporção por área, quando comparado com os demais métodos, resultou na menor continuidade da distribuição dos litotipos. O método que utiliza um condicionador e apenas 16 poços mostrou resultados semelhantes ao método da krigagem das proporções dos litotipos de todos os poços, estando ambos os métodos mais consistentes com o modelo geológico conceitual para a área.

As imagens estocásticas condicionais e não-estacionárias da repartição espacial das proporções dos litotipos, geradas através da Simulação Gaussiana Truncada, mostraram padrões de continuidade coerentes com o tipo de matriz de proporção utilizada.

O conhecimento do modelo geológico conceitual da área estudada foi fundamental na tomada de decisões em todas as etapas deste estudo.

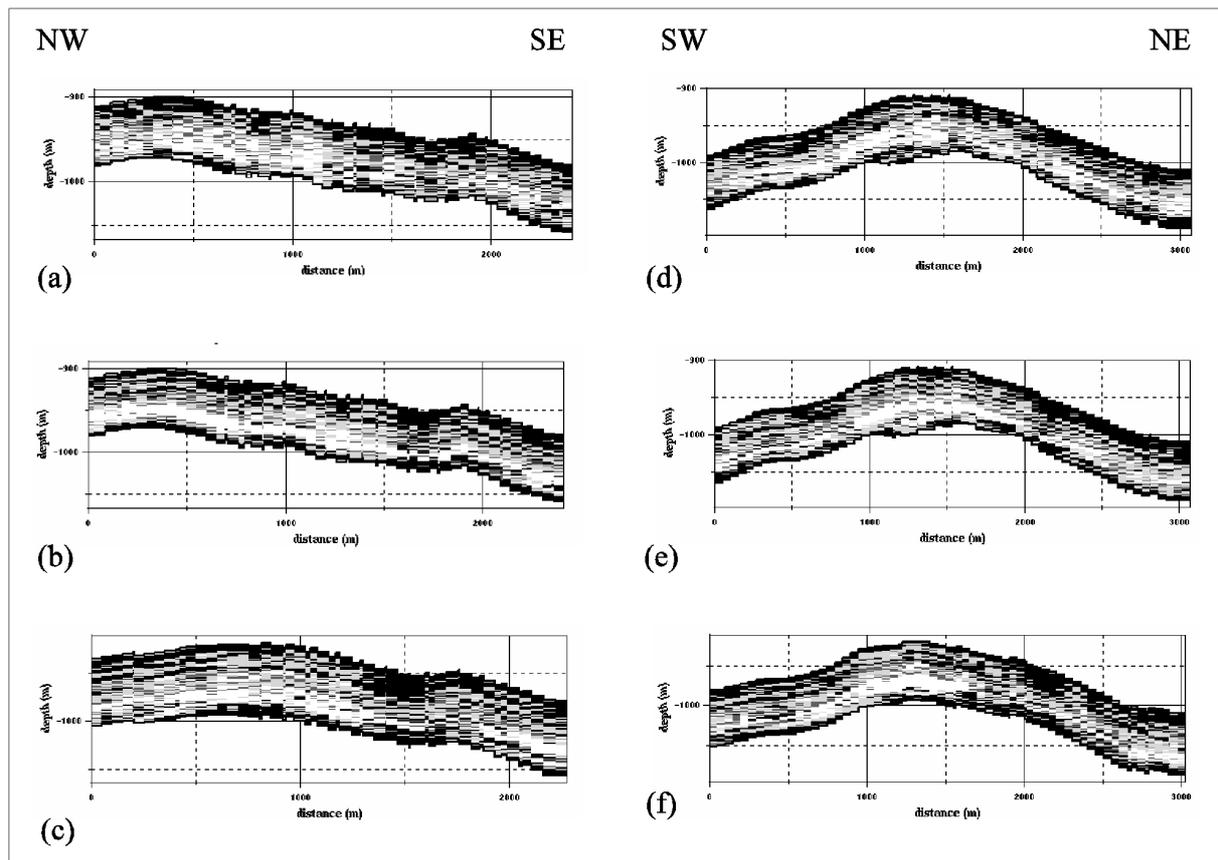


Figura 7 - Seções verticais estruturais, paralelas (NW/SE) e perpendiculares (SW/NE) ao eixo geral de deposição dos sedimentos, das simulações do intervalo estudado, segundo o método de construção da MP: (a; d) por área; (b; e) por krigagem de 55 poços e (c; f) por krigagem de 16 poços com condicionador.

REFERÊNCIAS

- Asmus, H. E. & Porto, R., 1980, Classificação das bacias sedimentares brasileiras segundo a tectônica de placas, 23p.
- Beincip-Franlab, Petroleum Consultants, 1997, Heresim 3D v4.0 user's guide. Rueil Malmaison, França.
- Braga, M. S. S., 1998, Construção de matrizes de proporção de fácies para a modelagem geológica 3D de reservatórios deltaicos da Bacia do Recôncavo (BA), Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- Johann, P. R. S., 1997, Seismic inversion and stochastic modelling of a turbidite reservoir. PhD Thèse, Université Pierre e Marie Curie, Paris, França.
- Mato, L. F., 1984, Arenitos reservatório do Membro Santiago Superior, no Campo de Miranga - bloco principal e bloco norte, Bacia do Recôncavo, Relatório Interno da Petrobras, Salvador - BA.
- Mouliere, D., Beucher, H., Hu, L. Y., Fournier, F., Terdich, P., Melchior, F. & Griffi, G., 1996, Integration of seismic derived information in reservoir stochastic modelling using truncated gaussian approach, Fifth Geostatistical Congress, Melbourne, Austrália.
- SAS Institute Inc., 1994, SAS/STAT user's guide, version 6, Cary, NC. 4^a vol 1 p.519-771 e p.1241-1263.
- Soares, C. M., 1997, Análise estratigráfica e geoestatística de reservatórios deltaicos da Bacia do Recôncavo (BA), Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- Souza Jr., O. G., 1997, Stratigraphie séquentielle et modélisation probabiliste des réservoirs d'un cone sous-marin profond - Champ de Namorado, Brésil; intégration des données géologiques et géophysiques. PhD Thèse, Université de Paris 6, Paris, França.
- Transvalor & Geovariances, 1997, Isatis - the geovariances key, user's guide, v3.1.2.

FACIES PROPORTION MATRIXES BUILDING FOR 3D GEOLOGIC MODELLING OF RECÔNCAVO BASIN DELTAIC RESERVOIRS (BA)

Abstract: *The facies proportion matrix is a tool which enables the construction of 3D models for the distribution of reservoir heterogeneities by using well and seismic information. This paper aimed to build proportion matrixes of the deltaic facies of the Pojuca Formation in the Recôncavo Basin through different methodologies and to show the results of their stochastic simulations through a truncated Gaussian algorithm. Before building the proportion matrixes four lithotypes (different facies grouped by similar porosity and permeability characteristics) were defined and their spatial distribution was analysed. The facies proportion matrixes built for these zones and for the studied stratigraphic section significantly improved the understanding of the relations in horizontal and vertical continuities that exist among the lithotypes. The simulation images confirm that the lithotype patterns of continuity depend on the type of proportion matrix used. They also corroborate the importance of using proportion matrixes to model heterogeneous reservoirs.*

Key-words: *Proportion matrix, Geologic modelling, Geostatistics, Facies, Reservoirs*