



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/ÁREA DE GEOLOGIA
DE PETRÓLEO**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS**

VITOR HUGO SIMON

**SIMULAÇÃO PLURIGAUSSIANA TRUNCADA COM
CONDICIONAMENTO**

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências com
requisito parcial para obtenção do título de Mestre em
Geociências - Área de Geoengenharia de Reservatórios.

Orientador: Professor Dr. Armando Zaupa Remacre - UNICAMP

CAMPINAS - SÃO PAULO

DEZEMBRO - 1997

Si55s

32957/BC

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

7805630

UNICAMP
Si 55s
E
3295f
395/98
D
R\$ 11,00
07/03/98
CPD

CM-00106335-7

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA
PELA BIBLIOTECA I.G. - UNICAMP

Simon, Vitor Hugo
Si55s Simulação plurigaussiana truncada com
condicionamento / Vitor Hugo Simon.-
Campinas,SP.: [s.n.] , 1997.

Orientador: Armando Zaupa Remacre
Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de
Campinas, Instituto de Geociências

1. Reservatórios. 2. Análise Estocástica. 3.
Métodos de Simulação. 4. Geoestatística. I.
Remacre, Armando Zaupa. II. Universidade Estadual
de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



UNICAMP

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

VITOR HUGO SIMON

SIMULAÇÃO PLURIGAUSSIANA TRUNCADA COM CONDICIONAMENTO

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Geociências - Área de Geoengenharia de Reservatórios.

Orientador: Professor Doutor ARMANDO ZAUPA REMACRE

Este exemplar corresponde ao
redação final defendido
por Vitor Hugo Simon
e aprovado em 17/12/97
em 17/12/97 Julgadora

Armando Zuppa Remacre
ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO

DEZEMBRO - 1997



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/ÁREA DE GEOLOGIA
DE PETRÓLEO
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

AUTOR: VITOR HUGO SIMON

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO : SIMULAÇÃO PLURIGAUSSIANA TRUNCADA
COM CONDICIONAMENTO

ORIENTADOR: Professor Doutor ARMANDO ZAUPA REMACRE

Aprovada em: ____/____/____

EXAMINADORES: nomes e assinaturas

Prof. Dr. ARMANDO ZAUPA REMACRE - Presidente

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Armando Zaupa Remacre", is written over the name of the President.

Prof. Dr. OLINTO GOMES DE SOUZA Jr.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Olinto Gomes de Souza Jr.", is written over the name of the second examiner.

Prof. Dr. DENIS JOSÉ SCHIOZER

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Denis José Schiozer", is written over the name of the third examiner.

Campinas, 17 de dezembro de 1997

**A meus filhos Mauro e Alisson, à minha
esposa Marise, a meus Mestres, a meus Amigos e a
Deus.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à PETROBRAS e à UNICAMP pela oportunidade do Mestrado, pelo apoio financeiro e logístico que esteve a minha disposição.

Ao Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre, meu orientador, por seu apoio na condução dos trabalhos.

Aos meus colegas do EP-SEAL pela colaboração, principalmente na revisão ortográfica.

A meus Mestres e colegas de curso que muito contribuíram para que a caminhada não fosse tão árdua.

Agradeço a minha família que em muito foi privada em função desse trabalho mas que sempre foi fonte de incentivo e reconhecimento da necessidade de vencer mais esse desafio.

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. GAUSSIANO TRUNCADO	4
2.1 HISTÓRICO.....	4
2.2 METODOLOGIA DO GAUSSIANO TRUNCADO	6
2.3 INVERSÃO DO VARIOGRAMA : INDICATRIZ X GAUSSIANA	13
2.4 TRUNCAMENTOS.....	15
2.5 PRÓS E CONTRAS AO GAUSSIANO TRUNCADO	19
3. MODELO PLURIGAUSSIANO TRUNCADO.....	23
3.1 HISTÓRICO.....	23
3.2 VARIÁVEIS DE MODELAGEM.....	24
3.3 CARACTERÍSTICAS DO PLURIGAUSSIANO TRUNCADO.....	25
3.4 MODELO GERAL DO PLURIGAUSSIANO TRUNCADO	27
3.4.1 <i>Detalhamento do Método</i>	28
3.5 ESTRATÉGIA DOS TRUNCAMENTOS E VARIAÇÕES NOS MODELOS DE COVARIÂNCIA.....	35
4. SIMULAÇÃO PLURIGAUSSIANA TRUNCADA NÃO-CONDICIONAL.....	39
4.1 CONDIÇÕES INICIAIS E PROGRAMAS UTILIZADOS	39
4.2 SIMULAÇÃO POR GAUSSIANAS INDEPENDENTES	42
4.3 GAUSSIANAS CORRELACIONADAS.....	48
5. SIMULAÇÃO PLURIGAUSSIANA TRUNCADA COM CONDICIONAMENTO	54
5.1 RESERVATÓRIOS AUX VASES, CAMPO DE RURAL HILL	54
5.1.1 <i>LOCALIZAÇÃO E CONTROLE DOS DADOS</i>	55
5.1.2 <i>CARACTERÍSTICAS DOS RESERVATÓRIOS ARENOSOS</i>	56

5.1.3 CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS E FEIÇÕES DE PERFIS.....	56
5.1.4 ZONEAMENTO DOS RESERVATÓRIOS.....	57
5.1.5 DISTRIBUIÇÃO DAS FÁCIES.....	59
5.2 IMAGEM DE TREINAMENTO	61
5.3 PREPARAÇÃO DOS DADOS E ESTRATÉGIA DE SIMULAÇÃO.....	63
5.4 MODELAGEM ESTRUTURAL	65
5.5 SIMULAÇÃO COM TRUNCAMENTOS ESTACIONÁRIOS	69
5.6 SIMULAÇÃO COM TRUNCAMENTOS NÃO-ESTACIONÁRIOS.....	72
5.7 COMPARANDO RESULTADOS	76
6. CONCLUSÕES.....	77
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. ILUSTRAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES SIMPLES E ACUMULADA DAS FÁCIES SEGUNDO ÀS PROPORÇÕES (EXEMPLO PARA TRÊS FÁCIES).....	8
FIGURA 2.2. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA OBTENÇÃO DOS TRUNCAMENTOS GLOBAIS $T_i(V)$ POR TRANSFORMAÇÃO GAUSSIANA.....	9
FIGURA 2.3. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TRANSFORMAÇÃO DAS FÁCIES EM UMA DISTRIBUIÇÃO PSEUDOGAUSSIANA PADRONIZADA.....	10
FIGURA 2.4. ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA SEÇÃO AB, REPRESENTANDO UM CORTE SOBRE A MALHA 2D NA QUAL A VARIÁVEL $Y_s(x)$, FOI SIMULADA DE FORMA CONDICIONAL.....	11
FIGURA 2.5. REPRESENTAÇÃO DO RETORNO DA VARIÁVEL CONTÍNUA $Y_s(x)$ ÀS FÁCIES, ATRAVÉS DE TRUNCAMENTOS ESTACIONÁRIOS, SOBRE A VARIÁVEL CONTÍNUA $Y_s(x)$ SIMULADA.....	13
FIGURA 2.6. IMAGENS (MALHA 520x520), GERADAS A PARTIR DE TRUNCAMENTOS SOBRE UMA ÚNICA FA GAUSSIANA COM ESTRUTURAÇÃO GAUSSIANA E ALCANCE DE 100. DA ESQUERDA PARA A DIREITA, OS VALORES DOS TRUNCAMENTOS CORRESPONDEM ÀS PROPORÇÕES DE 15, 25 E 50%.....	14
FIGURA 3.1 . ESTRATÉGIA DOS TRUNCAMENTOS PARA TRÊS FÁCIES.....	30
FIGURA 3.2 . ESTRATÉGIA DOS TRUNCAMENTOS PARA TRÊS FÁCIES USANDO-SE CORRELAÇÃO ENTRE AS FA GAUSSIANAS.....	31
FIGURA 3.3 . REPRESENTAÇÃO DOS TRUNCAMENTOS RELATIVOS À PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE DETERMINADA FÁCIES.....	32
FIGURA 3.4. ESTRATÉGIA DOS TRUNCAMENTOS PARA TRÊS FÁCIES.....	34
FIGURA 3.5 . REPRESENTAÇÃO GRÁFICA E ANALÍTICA DE TRUNCAMENTOS NÃO-LINEARES (GALLI ET AL. (1994)).....	36
FIGURA 3.6 . SIMULAÇÃO USANDO DUAS GAUSSIANAS INDEPENDENTES E TRUNCAMENTOS CIRCULARES (GALLI ET AL. (1994))......	36
FIGURA 3.7 . SIMULAÇÃO USANDO O MODELO VARIOGRÁFICO EXPONENCIAL E O ESFÉRICO (GALLI ET AL. (1994)).....	36
FIGURA 3.8 . SIMULAÇÃO USANDO O MODELO VARIOGRÁFICO EXPONENCIAL E O GAUSSIANO (GALLI ET AL. (1994)).....	37
FIGURA 3.9 . SIMULAÇÃO USANDO O MODELO VARIOGRÁFICO EXPONENCIAL E O GAUSSIANO (GALLI ET AL. (1994)).....	37

FIGURA 4.1 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESTRATÉGIA DOS TRUNCAMENTOS, DENOMINADA DE TRUNCAMENTO EROSIVO.....	40
FIGURA 4.2 ILUSTRAÇÃO SIMPLIFICADA DO DIAGRAMA DE FLUXO DA ROTINA DE SIMULAÇÃO PLURIGAUSSIANA TRUNCADA, DESENVOLVIDA EM LINGUAGEM IDL.....	41
FIGURA 4.3 ESTRATÉGIA DOS TRUNCAMENTOS E PROPORÇÕES DAS FÁCIES PARA A SIMULAÇÃO NÃO-CONDICIONAL.....	43
FIGURA 4.4 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA E ANALÍTICA DO TRUNCAMENTO DA GAUSSIANA G_1 POR s_1 . À DIREITA, A IMAGEM 2D (200 x 200) RESULTANTE DO TRUNCAMENTO, FÁCIES F_1 (ESCURA) E $\bar{N}_1 F_1$ (CLARA).....	46
FIGURA 4.5. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA E ANALÍTICA REFERENTE AO TRUNCAMENTO DE G_2 POR t_1 E, À DIREITA, A IMAGEM (200 x 200) RESULTANTE DO TRUNCAMENTO, DETERMINANDO AS FÁCIES F_2 (AMARELA) E F_3 (VERDE).....	46
FIGURA 4.6. COMPOSIÇÃO FINAL DOS MULTITRUNCAMENTOS, MALHA 200 x 200.....	48
FIGURA 4.7 . A) IMAGEM DA ESQUERDA É O RESULTADO DE G_2 TRUNCADA POR t_1 . B) IMAGEM DA DIREITA É O RESULTADO DA COMPOSIÇÃO DE DUAS FA GAUSSIANAS INDEPENDENTES ($G_1, G_2; \rho = 0$) TRUNCADAS POR s_1 E t_1 , MALHA 200 x 200.....	50
FIGURA 4.8 . A) IMAGEM DA ESQUERDA É O RESULTADO DO TRUNCAMENTO DE G_2 POR t_1 COM $\rho = 0.7$; B) IMAGEM DA DIREITA É O RESULTADO DA COMPOSIÇÃO DE DUAS FA GAUSSIANAS TRUNCADAS, ($G_1, G_2; \rho = 0.7$), MALHA 200 x 200.....	51
FIGURA 4.9 . A) IMAGEM DA ESQUERDA É RESULTANTE DO TRUNCAMENTO DE G_2 POR t_1 COM $\rho = 0.97$; B) IMAGEM DA DIREITA É O RESULTADO DA COMPOSIÇÃO DE DUAS FA GAUSSIANAS TRUNCADAS, $G_1, G_2; \rho = 0.97$), MALHA 200 x 200.....	51
FIGURA 5.1. MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO CAMPO DE RURAL HILL, ILLINOIS (USA) (WIMER ET AL., 1982).55	
FIGURA 5.2. CARACTERÍSTICAS PETROFÍSICAS E RESPOSTAS DOS PERFÍS ELÉTRICOS PARA OS RESERVATÓRIOS DA ZONA AUX VASES (WIMER ET AL., 1982).....	57
FIGURA 5.3 . SEÇÃO ILUSTRANDO AS CORRELAÇÕES ENTRE POÇOS NA ZONA AUX VASES (WIMER ET AL., 1982).....	58
FIGURA 5.4 . MAPA ILUSTRANDO A DISTRIBUIÇÃO E A ESPESURA DOS ARENITOS DOS CORDÕES LITORÂNEOS E DOS CANAIS DE MARÉ NA SUBZONA INFERIOR DE AUX VASES (WIMER ET AL., 1982).....	60
FIGURA 5.5 . INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA DA SUBZONA INFERIOR AUX VASES DO CAMPO PETROLÍFERO DE RURAL HILL, MODIFICADA DE WEIMER ET AL.(1982).....	62
FIGURA 5.6 . ESTRATÉGIA DOS TRUNCAMENTOS PARA O MODELO EROSIVO À TRÊS FÁCIES.....	63
FIGURA 5.7 . MAPA BASE DAS 144 AMOSTRAS USADAS PARA CONDICIONAR A SIMULAÇÃO DAS FA GAUSSIANAS. AMOSTRAS COLETADAS EM MALHA DE 400 x 400 M DE LADO.....	64

FIGURA 5.8 . VARIOGRAMA 2D DA FÁCIES DE CANAL (F_1). A LINHA CONTÍNUA REPRESENTA O VARIOGRAMA TEÓRICO E A LINHA COM PONTOS O VARIOGRAMA EXPERIMENTAL.	66
FIGURA 5.9 . VARIOGRAMAS DA FÁCIES F_1 (CANAIS NW/SE). LINHA COM PONTOS: VARIOGRAMA EXPERIMENTAL; LINHA CONTÍNUA: AJUSTE TEÓRICO. À <u>ESQUERDA</u> : OS VARIOGRAMAS DA INDICATRIZ, À <u>DIREITA</u> : A TRANSFORMADA DO AJUSTE PARA A DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA CORRESPONDENTE.	67
FIGURA 5.10 . VARIOGRAMAS DA FÁCIES F_2 (LINHA COM PONTOS: VARIOGRAMA EXPERIMENTAL; LINHA CONTÍNUA: AJUSTE TEÓRICO). À <u>ESQUERDA</u> : VARIOGRAMAS DA INDICATRIZ DE F_2 ; À <u>DIREITA</u> : A TRANSFORMADA DO AJUSTE PARA A DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA CORRESPONDENTE.	69
FIGURA 5.11 . GAUSSIANAS SIMULADAS SEQÜENCIALMENTE. A FIGURA DA <u>ESQUERDA</u> CORRESPONDE AO SUBCONJUNTO $F_1 \cup \bar{N}_F$ E A DA <u>DIREITA</u> AO SUBCONJUNTO $F_2 \cup F_3$	70
FIGURA 5.12 . IMAGEM RESULTANTE DO TRUNCAMENTO ESTACIONÁRIO PARA O SUBCONJUNTO $F_1 \cup \bar{N}_F$. PROPORÇÕES UTILIZADAS 31 E 69% RESPECTIVAMENTE.	70
FIGURA 5.13 . IMAGEM RESULTANTE DO TRUNCAMENTO ESTACIONÁRIO PARA O SUBCONJUNTO $F_2 \cup F_3$ (F_3 DE COR CLARA). PROPORÇÕES UTILIZADAS 89,2 E 10,8% RESPECTIVAMENTE.	71
FIGURA 5.14 . IMAGEM FINAL, RESULTANTE DA COMPOSIÇÃO DAS DUAS ANTERIORES.	71
FIGURA 5.15 . PROBABILIDADES PARA A FÁCIES F_1 (CANAL) ESTIMADAS POR IK. ESSAS PROBABILIDADES SERÃO UTILIZADAS PARA O TRUNCAMENTO DA PRIMEIRA FA GAUSSIANA E RECUPERAÇÃO DO SUBCONJUNTO DE FÁCIES $F_1 \cup \bar{N}_F$	73
FIGURA 5.16 . PROBABILIDADES PARA A FÁCIES F_2 (AREIAS) ESTIMADAS POR IK. ESSAS PROBABILIDADES SERÃO UTILIZADAS PARA O TRUNCAMENTO DA SEGUNDA FA GAUSSIANA E RECUPERAÇÃO DO SUBCONJUNTO DE FÁCIES $F_2 \cup F_3$	74
FIGURA 5.17 . RESULTADO DO TRUNCAMENTO NÃO-ESTACIONÁRIO SOBRE A PRIMEIRA FA GAUSSIANA TENDO COMO RESULTADO AS FÁCIES: DE CANAIS (F_1) E SEU COMPLEMENTO (\bar{N}_F).	74
FIGURA 5.18 . RESULTADO DO TRUNCAMENTO NÃO-ESTACIONÁRIO SOBRE A SEGUNDA FA GAUSSIANA TENDO COMO RESULTADO AS FÁCIES: CORDÕES LITORÂNEOS (F_2) E A IMPERMEÁVEL (F_3).	75
FIGURA 5.19 . IMAGEM FINAL, COMPOSTA A PARTIR DAS DUAS IMAGENS ANTERIORES.	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 . MODELOS DOS VARIOGRAMAS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO NÃO-CONDICIONAL DAS FA GAUSSIANAS G_1 E G_2	42
TABELA 5.1 . MODELO ESTRUTURAL DA FÁCIES F_1 ENLOBANDO TODA A ÁREA.....	66
TABELA 5.2 . AJUSTES TEÓRICOS DOS VARIOGRAMAS DA INDICATRIZ DA FÁCIES F_1 E DO MODELO TRANSFORMADO.....	68
TABELA 5.3 . AJUSTES TEÓRICOS DO VARIOGRAMA DA INDICATRIZ DA FÁCIES F_2 E DO MODELO TRANSFORMADO.....	69
TABELA 5.4 . PARÂMETROS UTILIZADOS NA ESTIMATIVA DAS PROBABILIDADES POR IK.....	72
TABELA 5.5 . PROPORÇÕES GLOBAIS DA IMAGEM DE TREINO E AS RECUPERADAS NAS SIMULAÇÕES, COM TRUNCAMENTOS ESTACIONÁRIOS E NÃO-ESTACIONÁRIOS.....	76



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

SIMULAÇÃO PLURIGAUSSIANA TRUNCADA COM CONDICIONAMENTO

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Vitor Hugo Simon

O objetivo principal desse trabalho foi desenvolver um algoritmo para o Modelo de Simulação Estocástica Plurigaussiano Truncado e validá-lo para condições de geologia complexa. Para essa validação selecionou-se um reservatório pertencente à zona petrolífera de Aux Vases (Campo de Rural Hill, Illinois, USA). Da interpretação geológica 2D, descrita por WEIMER et al. (1982), foram retirados três conjuntos de amostras, com diferentes escalas de detalhamento. Os conjuntos de amostras foram usados para condicionar a simulação e refinar as estimativas da matriz de proporções, usada para truncar as funções aleatórias (FA) gaussianas. As proporções das fácies foram tratadas de forma não-estacionárias. O Modelo Plurigaussiano Truncado é uma extensão do Gaussiano Truncado (GT), onde se tem a possibilidade de usar várias FA gaussianas combinadas linearmente ou não. Essa particularidade dá ao modelo a possibilidade de simular diversas fácies com estruturas espaciais variáveis, aliada a simplicidade do GT. A referida interpretação, usada como modelo de validação, foi escolhida por apresentar um conjunto de canais de maré de direção NW/SE cortando uma seqüência de cordões litorâneos de direção NE/SW, intercalados por fácies impermeáveis. Essas características de estruturação espacial das fácies sedimentares serviram para avaliar adequadamente o modelo de simulação. Na simulação foram usadas duas FA gaussianas independentes e para a estratégia dos truncamentos usou-se o "modelo erosivo". Também foram rodadas simulações não condicionais utilizando FA gaussianas combinadas linearmente e com diferentes coeficientes de correlação. São comentadas as influências de alguns parâmetros (número de FA gaussianas, coeficiente de correlação, estratégia dos truncamentos, etc.) no resultado da simulação, assim como o significado físico desses parâmetros sob o ponto de vista geológico. Ao longo do trabalho é mostrado, passo a passo, através de um exemplo, a parte teórica do modelo, a partir do qual é possível montar um algoritmo para o Plurigaussiano Truncado. Como conclusão do trabalho, pode-se afirmar que, mesmo com um algoritmo simplificado e um modelo geológico bastante complexo, obtivemos bons resultados com a Simulação Plurigaussiana Truncada Condicionada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

CONDITIONAL TRUNCATED PLURIGAUSSIAN SIMULATION

ABSTRACT

MASTER DISSERTATION

Vitor Hugo Simon

The goal of this work was a development of an algorithm for the Truncated Plurigaussian Stochastic Simulation and its validation in a complex geologic model. The reservoir data comes from Aux Vases Zone at Rural Hill Field in Illinois, USA, and from the 2D geological interpretation, described by WEIMER et al. (1982), three sets of samples, with different grid densities were taken. These sets were used to condition the simulation and to refine the estimates of the non-stationary matrix of facies proportions, used to truncate the gaussian random functions (RF). The Truncated Plurigaussian Model is an extension of the Truncated Gaussian Model (TG). In this new model its possible to use several gaussian RF lining combined or not. This particularity gives to the model the possibility to simulate several facies with different spatial structures, associated with the simplicity of TG. The geological interpretation, used as a validation model, was chosen because it shows a set of NW/SE elongated tidal channels cutting the NE/SW shoreline deposits interleaved by impermeable facies. These characteristics of spatial structures of sedimentary facies served to evaluate the simulation model. Two independent gaussian RF were used, as well as an "erosive model" as the truncation strategy. Also, non-conditional simulations were proceeded, using linearly combined gaussians RF with varying correlation coefficients. It was analyzed the influence of some parameters like: number of gaussians RF, correlation coefficient, truncations strategy, in the outcome of simulation, and also the physical meaning of these parameters under a geological point of view. It was showed, step by step, using an example, the theoretical model, and how to construct an algorithm to simulate with the Truncated Plurigaussian Model. The conclusion of this work was that even with a plain algorithm of the Conditional Truncated Plurigaussian and a complex geological model it's possible to obtain a usefulness product.

1. INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo tem feito investimentos significativos na área de caracterização detalhada de reservatórios. Dentro dessa área, a caracterização do espaço entre poços usando ferramentas geoestatísticas (simulações) tem proliferado através de inúmeros projetos.

O interesse na simulação geoestatística tem origem na capacidade dessa ferramenta gerar, rapidamente, cenários estatisticamente equiprováveis, em 2D ou 3D. A ferramenta é apropriada para trabalhos de caracterização geológica, onde a informação tenha associada um certo grau de incerteza.

Convém destacar que a utilização de métodos estatísticos não exclui a necessidade do conhecimento geológico pois essas ferramentas são apenas instrumentos auxiliares que permitem ao intérprete expressar o grau de incerteza de alguns fenômenos, os quais podem ser tratados de forma probabilística. Baseado nisso pode-se afirmar que os métodos estocásticos são complementos que auxiliam na solução dos problemas, não podendo serem usados como substitutos do conhecimento geológico.

A ocupação tridimensional do espaço entre poços, na forma digital, é importante pois esse arcabouço será utilizado na simulação de fluxo, a qual é hoje uma ferramenta indispensável na avaliação de projetos de engenharia de petróleo.

A representação do espaço, por sua vez, depende muito da complexidade da imagem objetivo. Existem linhas de simulação estocástica que atendem perfeitamente bem a determinados casos enquanto que em outras situações o resultado é inadequado. Para chegar-se a um melhor resultado é conveniente utilizar métodos e algoritmos adequados às situações geológicas para as quais foram desenvolvidos.

Na presente dissertação foi estudada uma dessas linhas de algoritmos: o Gaussiano Truncado com sua evolução para o Plurigaussiano Truncado, cuja finalidade

é a simulação de variáveis categóricas, podendo essas serem: eletrofácies, tipos rochosos, ou qualquer outra variável classificável em categorias .

No Capítulo 2 é apresentada uma pesquisa bibliográfica sobre a trajetória do Gaussiano Truncado (GT), desde sua concepção por MATHERON (1987a) até sua evolução para o Plurigaussiano Truncado, com os trabalhos de GALLI et al. (1994) e LE LOC'H (1994). Nesse capítulo, também são apresentadas, passo a passo, as principais etapas do método de simulação GT, são discutidas algumas implicações nos resultados do GT em função do tipo de truncamento adotado, discutem-se os prós e os contras ao método GT, sob o ponto de vista de alguns autores da escola francesa e da escola americana.

Outro ponto abordado é a forma a ser assumida pelos truncamentos, os quais podem ser: estacionários (fixos para todo o domínio), variáveis por níveis estratigráficos ou variáveis em todas as dimensões do espaço simulado. Sobre essa última forma dos truncamentos BEUCHER et al. (1992) e XU; JOURNAL (1993) apresentaram trabalhos práticos sobre o tema.

No Capítulo 3 discute-se especificamente o Plurigaussiano Truncado. É feito um pequeno histórico sobre os primeiros artigos publicados e os pontos mais importantes destacados nesses artigos. São discutidas as contribuições que o Plurigaussiano Truncado vem adicionar em relação ao GT e os pontos desfavoráveis. Ainda são ilustrados os principais pontos no desenvolvimento teórico do método, tanto para funções gaussianas dependentes como para independentes.

São apresentados, alguns exemplos de imagens de simulações não-condicionais, variando-se alguns parâmetros na covariância das gaussianas simuladas, assim como as formas dos truncamentos.

No Capítulo 4 é exemplificada, passo a passo, a parte tecnológica da simulação Plurigaussiana Truncada Não-condicional para três fácies, com truncamentos estacionários. Nesse exemplo são apresentadas imagens obtidas tanto por gaussianas

independentes como por dependentes. São feitos comentários sobre o efeito do coeficiente de correlação entre as gaussianas no resultado da simulação.

No Capítulo 5 é apresentada a forma condicional da Simulação Plurigaussiana Truncada. Foi analisado, a partir de uma imagem de treino, um reservatório petrolífero (Aux Vases Zone), descrito e ilustrado na literatura por WEIMER et al. (1982).

Também nesse capítulo descreve-se a modelagem estrutural (variografia) e o cálculo das proporções para as fácies estudadas (areias de cordões litorâneos, areias de canais de maré e fácies impermeáveis). Para tanto utilizou-se como base a imagem 2D da interpretação geológica da área, utilizando-se a técnica de transformar a imagem, adquirida na forma digital, através de um *scanner*, em indicatrizes das fácies. Para isso foram escritas rotinas em IDL (*Iterative Data Language*), as quais permitiram o tratamento da imagem.

Condicionadas a uma amostragem esparsa, sobre a imagem de treino, (malha de 400 x 400 m, entre amostras) executou-se a simulação das FA gaussianas, usando-se um algoritmo seqüencial (SGSIM-GSLIB, DEUTSCH; JOURNAL, 1992). A malha de simulação era 50 x 50 m, em um domínio de 4,9 x 4,9 km. Como informação complementar foi usada uma amostragem de 200 x 200 m para a estimativa das proporções locais das fácies. A estimativa foi através da krigagem das indicatrizes (IK-GSLIB) cuja finalidade foi simular uma informação indireta com escala de amostragem mais densa do que a das amostras utilizadas para condicionar a simulação. Foram testado truncamentos estacionários, comparando-se os resultados desses com os não-estacionários.estacionária.

Finalmente são apresentadas as principais conclusões e algumas sugestões de desenvolvimento futuro dentro da linha do Plurigaussiano Truncado.

2. GAUSSIANO TRUNCADO

2.1 HISTÓRICO

Os modelos de simulação estocástica condicionais, usando variáveis contínuas, com distribuição gaussiana, já são conhecidos há mais de 20 anos (MATHERON et al. 1987a). A dificuldade no tratamento das variáveis categóricas (fácies por exemplo) está no fato de que a transformação gaussiana das variáveis aleatórias (transformação de uma distribuição qualquer em uma distribuição pseudogaussiana) e sua inversa é perfeitamente possível quando se opera no campo das variáveis contínuas, pois as relações são bijetoras, entretanto, perde-se essa propriedade quando as variáveis são categóricas que uma vez transformadas não é mais possível retornar, através da inversa, à distribuição original.

JOURNEL; ISAACS (1984) simularam de forma condicional duas fácies a partir de uma variável contínua (teor de urânio), a qual sofreu transformação gaussiana. Posteriormente, a variável simulada foi transformada em variável categórica através de um truncamento nos teores. Até aquela data era o que se dispunha em termos de simulação estocástica relacionada à variáveis categóricas.

MATHERON et al. (1987a e 1987b) propuseram o método de simulação estocástica Gaussiano Truncado (GT), praticamente da forma como o conhecemos hoje. Nos referidos artigos é exemplificada a simulação de três fácies sedimentares, partindo-se das variáveis categóricas como condicionantes, passando-se por uma transformação gaussiana para levá-las ao campo das variáveis contínuas e após a simulação dessa variável contínua retorna-se ao campo das variáveis categóricas através de múltiplos truncamentos na FA gaussiana simulada. MATHERON destacou como vantagens do método, a simplicidade (reduzido número de parâmetros necessários à simulação comparado aos complexos algoritmos genéticos), a possibilidade de uso tanto em 2D

quanto em 3D e a possibilidade de condicionar a simulação independentemente do número de fácies a serem simuladas.

Com base na observação de que as curvas de proporções das fácies sedimentares têm variações muito maiores na vertical do que na horizontal, vários autores (RAVENNE et al., 1988, 1989 e 1992; MATHERON et al., 1987a; ADERALDO, 1994), em seus trabalhos, preferiram fixar os truncamentos da gaussiana para os níveis horizontais e tornar os verticais variáveis. Os truncamentos são obtidos por estimativas das proporções das fácies, diretamente dos dados amostrais, através de afloramentos análogos ou qualquer outra informação geológica disponível que possa ser direta ou indiretamente correlacionada com a probabilidade de ocorrência das fácies a serem simuladas.

BEUCHER et al.(1992) mostraram exemplos de simulações usando o GT, onde os truncamentos eram não-estacionários, tanto na horizontal quanto na vertical (3D). Como resultado dessa implementação obtiveram um melhor condicionamento da simulação à estruturação geral dos dados. No mesmo trabalho, os autores sugeriram que as proporções das fácies (3D) poderiam ser estimadas por krigagem dos dados somadas às hipóteses geológicas e informações de sísmica 3D.

XU; JOURNAL (1993) sugeriram truncar a FA gaussiana simulada, usando uma matriz de probabilidades cujos valores são variáveis no espaço. Essa matriz teria a vantagem de diminuir o efeito da covariância única para o conjunto das fácies simuladas. Nesse artigo é proposto o uso da krigagem da indicatriz (IK-GSLIB) sobre as amostras originais ou qualquer *soft information* (informações indiretas) obtidos de outras fontes para a estimativa das proporções das fácies.

O algoritmo GTSIM apresentado por XU (1993) e XU; JOURNAL (1993) foi validado, através de simulações, utilizando dados sintéticos e reais (3D). Foram feitas comparações com a Simulação Seqüencial da Indicatriz (SISIMPDF-GSLIB), onde os autores ressaltam não terem encontrado diferenças significativas entre os dois métodos, apesar do GTSIM ter condicionado melhor às proporções globais das fácies simuladas.

ADERALDO (1994) procedeu a simulação condicional 3D de três fácies em reservatórios de petróleo na Bacia Potiguar. Para tanto, o autor utilizou um algoritmo de simulação gaussiano seqüencial (SGSIM-GSLIB) onde foram introduzidas algumas modificações. Para os truncamentos foram utilizadas curvas de proporções verticais, (truncamento único para cada nível de profundidade), no qual o autor relatou problemas para condicionar os pontos amostrais.

Para contornar esse problema, o autor usou as proporções globais para retornar às fácies amostradas nos referidos pontos.

GALLI et al. (1994) discutem os prós e os contras ao GT, assim como as bases teóricas dos modelos variográficos possíveis de serem usados nesse método de simulação, em função da coerência matemática. Nesse mesmo artigo os autores lançam uma proposta de extensão do método, utilizando combinações lineares de FA gaussianas (funções aleatórias gaussianas) para representar conjuntos de fácies com diferentes modelos de covariância, ampliando a aplicabilidade do método em relação ao GT, permitindo modelar situações bem mais complexas (esse assunto será tratado no Capítulo 3).

2.2 METODOLOGIA DO GAUSSIANO TRUNCADO

O algoritmo de simulação Gaussiano Truncado pode ser resumido em 6 etapas principais. Na seqüência dessas etapas são apresentadas as formulações matemáticas, acompanhadas de ilustrações esquemáticas, as quais permitem uma melhor compreensão das diversas transformações necessárias à simulação. Como exemplo é apresentada uma situação esquemática a três fácies.

1^ª) **Etapa**: Dada uma situação inicial onde foram amostradas n fácies no domínio V . Por exemplo as fácies sedimentares F_1, F_2, \dots, F_n .

Seja p_i a proporção da fácies de ordem i no domínio V (proporção global da fácies i);

i : variando de 1 a n , então:

$$\text{prob}(F_i \in V) = p_i(V); i = 1, \dots, n \quad (2.1)$$

A expressão (2.1) traduz que a probabilidade de ocorrer uma determinada fácies pertencente ao domínio V é estimada pela proporção global dessa fácies, no referido domínio. Essa relação está fundamentada na concepção de que a freqüência relativa é a forma empírica de estimar probabilidades.

2^ª) **Etapa**: Monta-se uma curva de freqüência acumulada das proporções globais das fácies, a qual será usada como estimativa das probabilidades das fácies no domínio da simulação (V). Essa operação está representada graficamente na Figura 2.1.

Conforme (2.2), $\pi_i(V)$ é o valor acumulado das proporções das variáveis categóricas e está contido no intervalo $[0,1]$.

As variáveis categóricas seguem um ordenamento preestabelecido, conseqüentemente (2.3) é verdadeiro.

$$\pi_i(V) = \sum_{j=1}^i p_j(V) \in [0,1]; i = 1, \dots, n \quad (2.2)$$

$$\pi_0(V) = 0 \leq \pi_1 \leq \dots \leq \pi_n \quad (2.3)$$

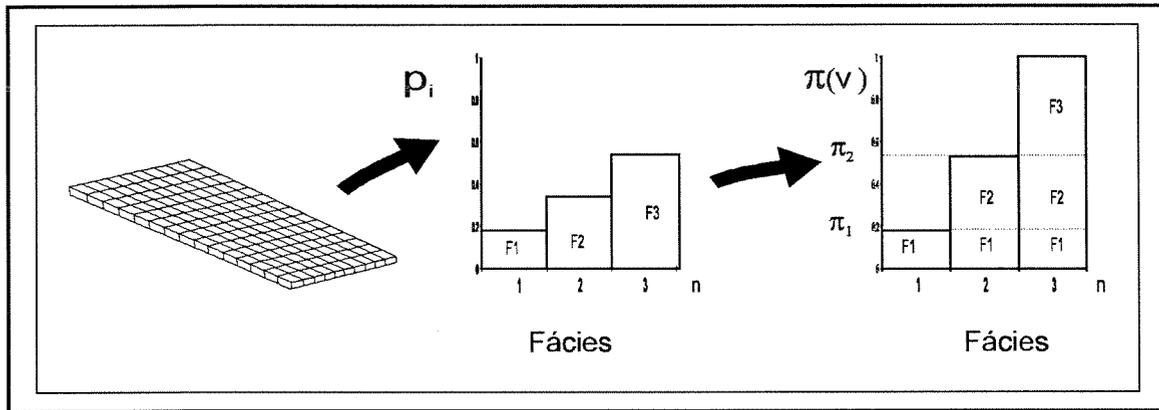


Figura 2.1. Ilustração das distribuições de probabilidades simples e acumulada das fácies segundo às proporções (exemplo para três fácies).

3^ª) **Etapa:** Determina-se os truncamentos globais a partir da distribuição gaussiana padronizada, cujos valores correspondem às probabilidades acumuladas (proporções) estabelecidas na distribuição experimental (2.2), comentada no item anterior. Essa operação é executada através de uma transformação gaussiana (2.4), representada graficamente na Figura 2.2.

$$t_i(V) = G^{-1}(\pi_i(V)), i = 1, \dots, n - 1 \quad (2.4)$$

Onde: $t_i(V)$ são valores da distribuição gaussiana padronizada, os quais determinam intervalos de probabilidade de ocorrência das fácies. Como esses valores são referentes a distribuição normal, logo os extremos são conhecidos:

$$t_0(V) = -\infty$$

$$t_n(V) = +\infty$$

$G^{-1}(\cdot)$: é a função inversa da gaussiana normal acumulada, onde o argumento é a probabilidade acumulada.

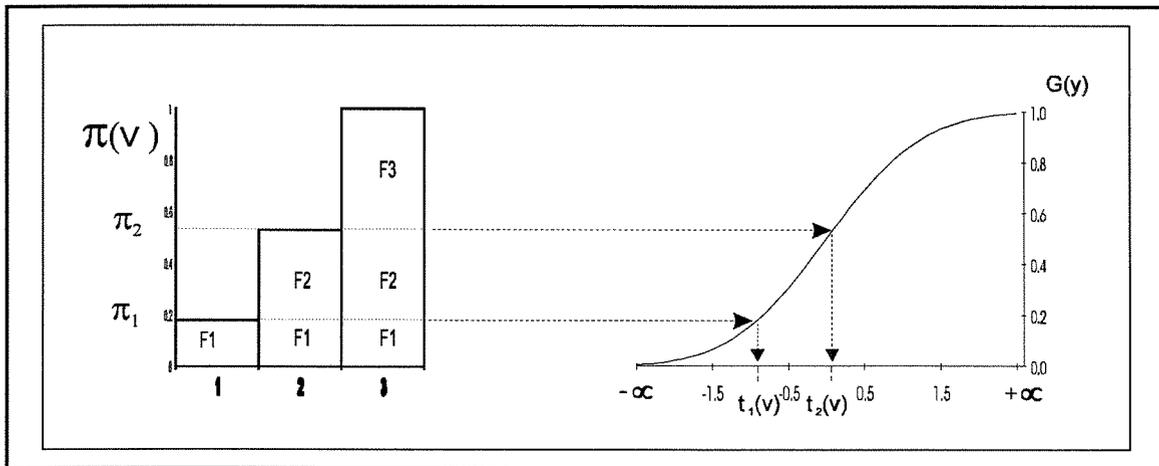


Figura 2.2. Representação gráfica da obtenção dos truncamentos globais $t_i(V)$ por transformação gaussiana.

4^ª) **Etapa:** Transformação do conjunto das amostras (fácies) em um conjunto contínuo com distribuição gaussiana padronizada. Cada ponto amostrado corresponderá a um valor de Y , conforme (2.5).

$$F_i(\mathbf{x}) \Rightarrow y(\mathbf{x}), \forall \mathbf{x} \in V \quad (2.5)$$

$F_i(\mathbf{x})$: variável categórica índice i ;

(\mathbf{x}) : vetor de posição (x, y, z) ;

$y(\mathbf{x})$: valor da gaussiana correspondente à amostra $F_i(\mathbf{x})$.

Qualquer que seja o algoritmo utilizado na transformação, a etapa de número 4 terá duas subetapas:

a) Definição do intervalo $(t_{i-p}; t_i]$, para cada fácies.

Conhecendo-se o intervalo de probabilidades para cada fácies, conseqüentemente conhece-se os limites (inferior e superior) dos valores da gaussiana, conforme (2.4). Conhecendo-se a fácies, conseqüentemente é conhecido o intervalo ao qual a variável gaussiana Y irá pertencer, conforme (2.6).

$$F_i(\mathbf{x}) \Rightarrow y(\mathbf{x}) \text{ tal que } t_{i-1} < y(\mathbf{x}) \leq t_i \quad (2.6)$$

b) Distribuição dos valores de $y(\mathbf{x})$ no intervalo $(t_{i-1}; t_i]$.

Essa operação consiste em transformar o conjunto das fácies amostradas, contidas em cada intervalo $(t_{i-1}; t_i]$, em valores de $y(\mathbf{x})$ correspondentes. A operação, teoricamente, deve ser feita de forma coerente, mantendo correspondência entre a estruturação da nova variável transformada e a estruturação original das fácies. Isso poderia ser conseguido se fosse mantida a covariância espacial das amostras.

Está representada, esquematicamente, na Figura 2.3 a transformação das fácies em uma distribuição pseudogaussiana padronizada. No exemplo das três fácies, cada ponto amostrado $F_i(\mathbf{x})$ é transportado para a nova distribuição $y(\mathbf{x})$ ocupando o mesmo lugar no espaço (\mathbf{x}) .

Essa operação é bijetora dentro do intervalo definido em (2.6), portanto: permite o retorno da distribuição contínua ao conjunto das fácies, honrando os dados originais.

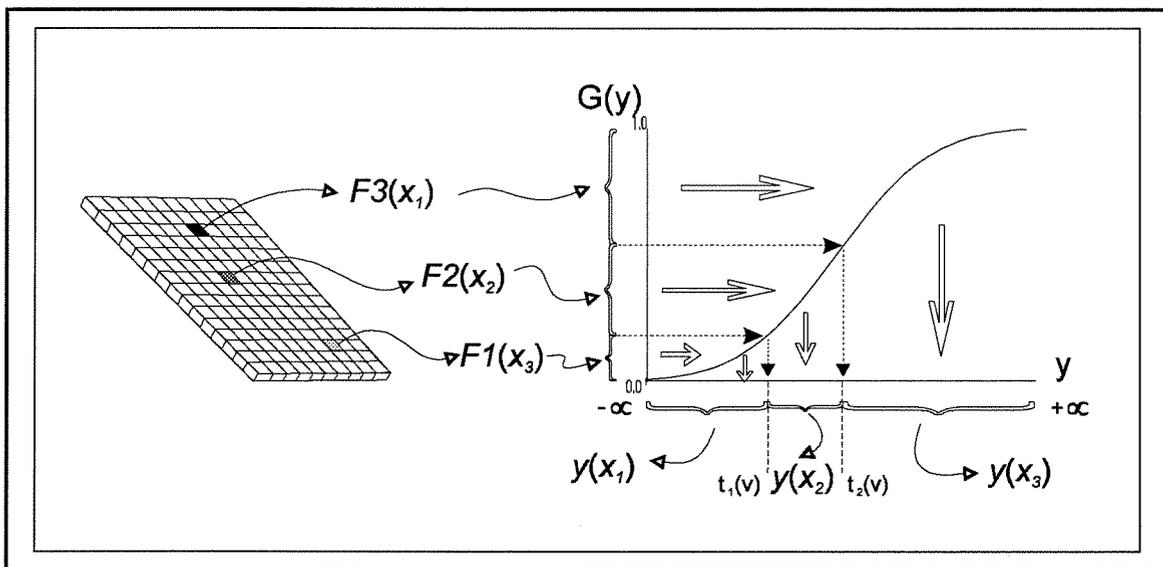


Figura 2.3. Representação esquemática da transformação das fácies em uma distribuição pseudogaussiana padronizada.

5^a) **Etapa:** Simulação condicional das variáveis contínuas.

Tendo-se transformado as amostras em uma distribuição pseudogaussiana, procede-se a simulação condicional usando-se um simulador adequado para variáveis contínuas. Entre os simuladores adequados pode-se citar o das Bandas Rotativas e o Gaussiano Seqüencial (SGSIM-GSLIB).

O variograma a ser usado na simulação deverá ser modelado a partir da inversão dos variogramas das indicatrizes das fácies. Esse assunto está melhor desenvolvido no item 2.3 (INVERSÃO DO VARIOGRAMA : Indicatriz x Gaussiana).

Na Figura 2.4 está ilustrada esquematicamente a seção **AB**, a qual, representa um corte sobre uma malha 2D na qual foi simulada com condicionamento uma FA gaussiana Y_s .

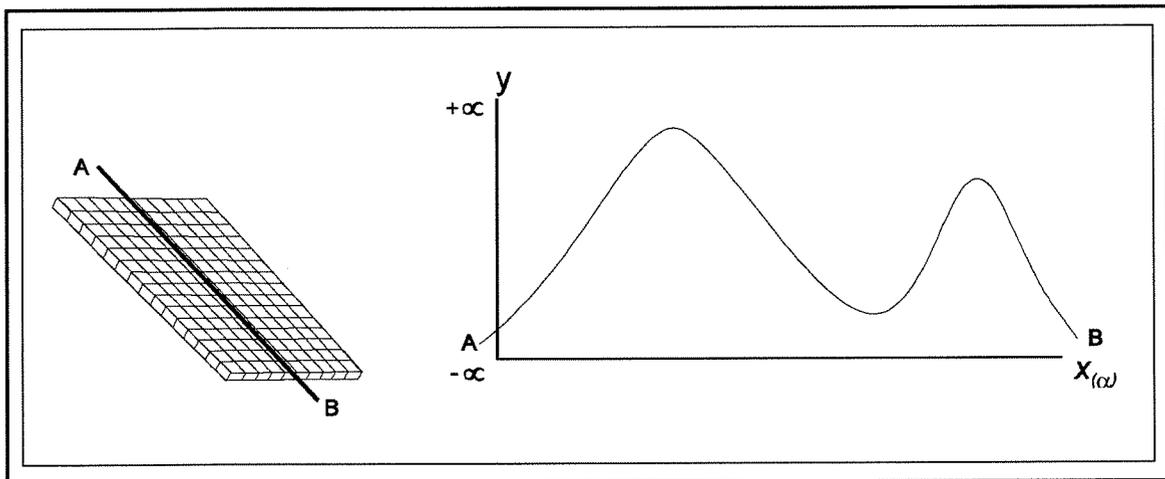


Figura 2.4. Ilustração esquemática da seção **AB**, representando um corte sobre a malha 2D na qual a variável $y_s(x)$, foi simulada de forma condicional.

6^a) **Etapa:** Retorno às fácies.

Nessa etapa trunca-se a variável contínua simulada de forma condicional ($y_s(\mathbf{x})$), conforme (2.7), usando-se os mesmos truncamentos ($t_i(V)$) já calculados em (2.4).

$$y_s(\mathbf{x}) \Rightarrow F_i(\mathbf{x}) \text{ tal que } F_i(\mathbf{x}) = \{t_{i-1} < y_s(\mathbf{x}) \leq t_i\} \quad (2.7)$$

Os truncamentos $t_i(V)$, quando calculados em função das probabilidades globais são chamados de estacionários. Essa situação é admitida quando não se espera grandes variações espaciais nas proporções das fácies.

Como resultado global da simulação, as proporções das F_n fácies no domínio V estão garantidas devido a Y_s ter uma distribuição pseudogaussiana, cujas proporções das fácies podem ser calculadas por (2.8)

$$p_i = \text{prob} (t_{i-1} < y_s \leq t_i) = G(t_i) - G(t_{i-1}) \quad (2.8)$$

Na Figura 2.5 está representado o mesmo corte **AB** da Figura 2.4, com os truncamentos $t_i(V)$ na forma estacionária.

Nesse caso, é perfeito o condicionamento da simulação às amostras já que a transformação das fácies em valores pseudogaussianos, e o retorno desses, foi feito sob os mesmos valores de truncamentos, calculados tendo-se por base as proporções globais das fácies.

Os truncamentos poderiam ser diferentes, se ao invés do domínio global (V) fossem levadas em consideração as probabilidades de ocorrência das fácies segundo um domínio local, o que seria denominado de truncamentos não-estacionários. Os truncamentos não-estacionários são importantes quando são esperadas variações significativas nas proporções das fácies em função da posição espacial. Esses truncamentos serão melhor discutidos no item 2.4.

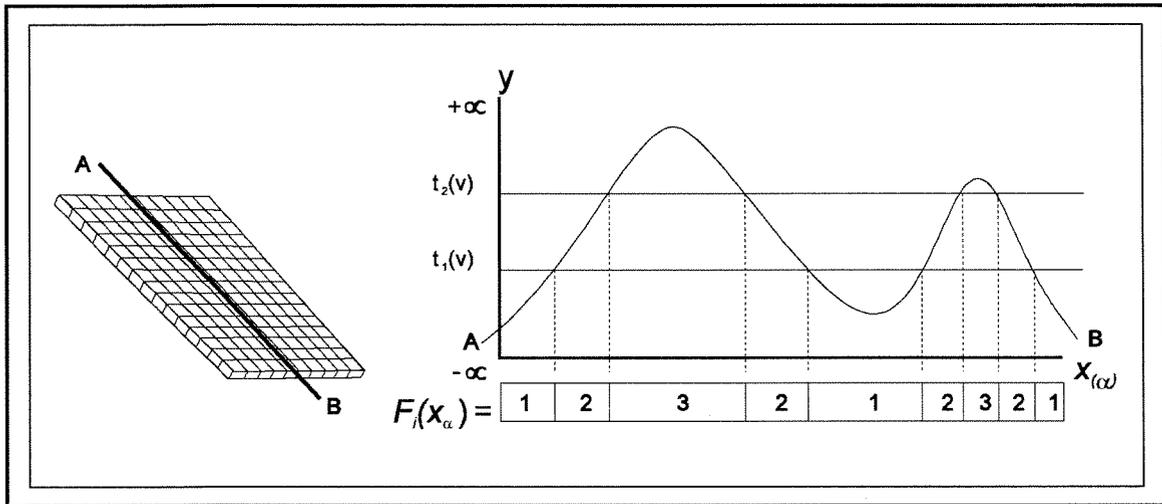


Figura 2.5. Representação do retorno da variável contínua $y_s(x)$ às fácies, através de truncamentos estacionários, sobre a variável contínua $y_s(x)$ simulada .

2.3 INVERSÃO DO VARIOGRAMA : Indicatriz x Gaussiana

É bastante intuitivo de se perceber que uma série de valores de truncamentos (referentes às diversas proporções) aplicados sobre uma gaussiana simulada terá como resultado uma série de imagens de indicatrizes com estruturas diversas. Essas estruturas se distinguem, umas das outras pelos diferentes alcances, quanto maior a proporção da fácies maior é o alcance da estrutura. Esse caso pode ser observado na seqüência de imagens da Figura 2.6.

Para obtenção dessas imagens, foi aplicado sobre uma gaussiana simulada, a seqüência de valores de truncamentos correspondentes às proporções de 15, 25 e 50%, respectivamente.

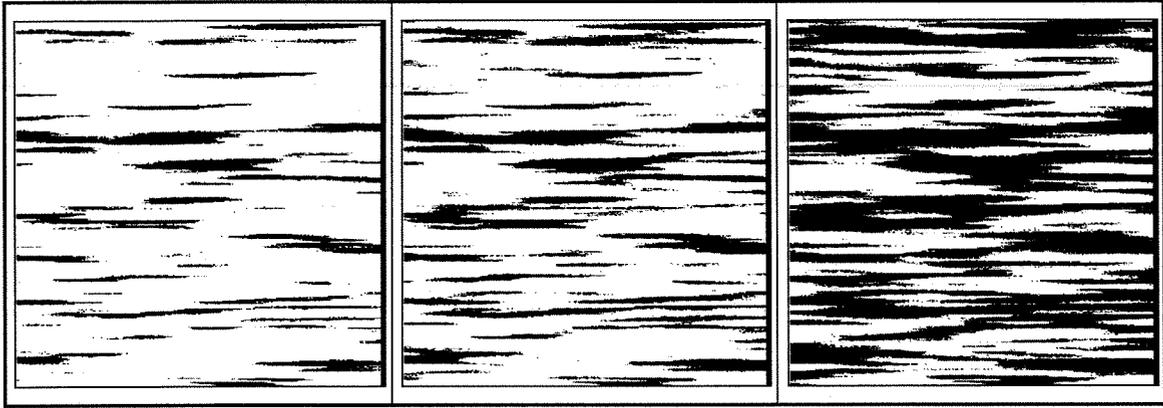


Figura 2.6. Imagens (malha 520x520), geradas a partir de truncamentos sobre uma única FA gaussiana com estruturação gaussiana e alcance de 100. Da esquerda para a direita, os valores dos truncamentos correspondem às proporções de 15, 25 e 50%.

Desse exemplo pode-se concluir que existe uma relação entre a estrutura da gaussiana, a proporção da indicatriz (obtidas através dos truncamentos) e a estrutura da indicatriz resultante.

Segundo GALLI et al. (1994) essa relação é definida através da covariância cruzada das indicatrizes como definido em (2.9).

$$C_{F_i F_j}(\mathbf{x}, \mathbf{x} + h) = \text{prob}(\mathbf{x} \in F_i \text{ e } \mathbf{x} + h \in F_j) \quad (2.9)$$

Por definição, as indicatrizes F_i e F_j são determinadas por truncamentos na gaussiana Y , conforme (2.10) e (2.11).

$$F_i = (S_{i-1} < Y \leq S_i) \quad (2.10)$$

$$F_j = (S_{j-1} < Y \leq S_j) \quad (2.11)$$

Aplicando-se (2.10) e (2.11) em (2.9) temos (2.12).

$$C_{F_i F_j}(\mathbf{x}, \mathbf{x} + h) = \text{prob}(S_{i-1} < y(\mathbf{x}) \leq S_i \text{ e } S_{j-1} < y(\mathbf{x} + h) \leq S_j) \quad (2.12)$$

Como Y goza das propriedades da multigaussiana pode-se escrever (2.12) como uma função de probabilidade da normal bivariada (2.13) onde ρ é a covariância de Y para um determinado h .

$$C_{F_i F_j}(\mathbf{x}, \mathbf{x} + h) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} \int_{S_{i-1}}^{S_i} \int_{S_{j-1}}^{S_j} e^{-\left(\frac{u^2+v^2-2\rho uv}{2(1-\rho^2)}\right)} dudv \quad (2.13)$$

Como vemos em (2.13) a covariância das indicatrizes, para um determinado h , depende dos limites de integração (truncamentos definidos pelas proporções) e da covariância de Y (ρ) que também é função de h .

Expandindo-se a equação (2.13) por polinômios de Hermite ou através de tabelas da normal bivariada (ZELEN; SEVERO, 1972), é possível calcular a covariância da gaussiana (ρ) em função de h e conseqüentemente o variograma dessa.

Na prática, é possível converter o variograma experimental de uma indicatriz no variograma teórico da gaussiana correspondente, conhecendo-se a proporção dessa indicatriz.

2.4 TRUNCAMENTOS

A utilização das proporções globais das fácies para o cálculo dos truncamentos da gaussiana simulada é a forma mais robusta de proceder os truncamentos. Essa forma, com truncamentos fixos para todo o domínio da simulação é chamada de estacionária.

A afirmação de que a forma estacionária para os truncamentos é a mais robusta é justificável já que: a transformação da covariância das fácies na covariância da variável contínua passa pela utilização das proporções globais (ver item 2.3); a transformação gaussiana e a transformada inversa são obtidas segundo os mesmos truncamentos, os quais são obtidos das proporções globais das fácies. Portanto, existe uma grande coerência em todas as etapas do processo de simulação.

A partir da observação de que os processos sedimentares são, em geral, algumas ordens de grandeza, mais contínuos (estacionários) no plano horizontal do que no vertical, alguns autores (MATHERON, 1987a; RAVENNE et al., 1992) sentiram a necessidade de trabalharem com truncamentos não-estacionários na vertical, adotando então as curvas de proporções verticais das fácies.

Esse tipo de abordagem é conveniente quando se espera grande continuidade horizontal das fácies, devendo essas manterem-se dentro de flutuações estatísticas aceitáveis, nesse plano. No entanto, situações como as anteriores não é uma constante para as seqüências sedimentares em geral. Para situações, onde ocorram variações laterais significativas das fácies ou o desaparecimento de alguma delas, as proporções nesse plano não podem ser tratadas como estacionárias. Portanto: é importante, nesse caso, que os truncamentos na horizontal não sejam estacionários. Para casos como esses, BEUCHER et al. (1992), XU; JOURNAL(1993) exemplificaram situações onde os truncamentos foram obtidos a partir das estimativas 3D das probabilidades de ocorrência das fácies. Ambos os autores sugerem, que além dos dados condicionantes (informações dos poços) também devam ser incorporadas, ao modelo, informações de interpretações geológicas e principalmente informações vindas da sísmica 3D.

Por hipótese, o algoritmo básico do GT foi concebido para trabalhar com truncamentos estacionários, o que não impede que com algumas alterações seja possível aplicar truncamentos não-estacionários, no entanto podem existir situações nas quais ocorrerão problemas quanto ao resultado da simulação obtida.

ADERALDO (1993) reportou a necessidade de introduzir ajustes no algoritmo do GT para conseguir condicionar o resultado da simulação às amostra, em função de estar utilizando curvas de proporções verticais.

Em função do uso de truncamentos não-estacionários podem ser comentados alguns tópicos:

a) Perda da robustez da covariância **única** em função de valores de truncamentos variáveis por horizonte estratigráfico.

É sabido que o valor da covariância em função de h também é função das proporções das fácies (ver item 2.3), conseqüentemente a modelagem estrutural em todo o domínio está diretamente ligada às proporções globais e não a variações nas proporções locais. Grandes variações nas proporções verticais das fácies podem resultar em distorções na continuidade das mesmas. A rigor, se as proporções das fácies são variáveis por níveis estratigráficos, seria necessário usar tantos modelos de covariância quantos fossem os níveis, o que seria impraticável. No entanto, espera-se que o algoritmo consiga repetir adequadamente a covariância a qual serviu de modelo, tendo por base as proporções globais.

b) Possibilidade da perda de sintonia da transformada gaussiana com a sua inversa.

A forma condicional do GT necessita que a transformação gaussiana dos pontos amostrados e o retorno ao campo das variáveis categóricas ocorram dentro de um mesmo intervalo de truncamento. Para que haja garantia de bijetividade entre a transformação gaussiana e a sua inversa, esse intervalo não pode sofrer variações entre uma operação e outra.

Utilizando-se truncamentos variáveis por níveis (curvas de proporções), para que não haja perda do sincronismo entre a transformada e a sua inversa, será necessário que a transformação gaussiana dos pontos amostrados seja feita levando-se em consideração as proporções dos níveis e não a globalizada. A conseqüência pela perda da sintonia do intervalo de truncamento com o intervalo de transformação das amostras é a necessidade de introduzir artifícios no algoritmo de simulação para obter-se o condicionamento aos dados. Além disso, se os intervalos forem muito distantes um do outro, ocorrerão anomalias no alcance das estruturas simuladas.

Esses itens são muito pouco comentados nos artigos publicados, já que a solução desses problemas, em algoritmos comerciais, envolveriam soluções práticas que do ponto de vista teórico podem ferir os mais puristas mas para as finalidades práticas são justificáveis, desde que não comprometam o conjunto.

XU; JOURNAL (1993) apontaram como solução para alguns desses problemas a substituição das proporções verticais por estimativas das probabilidades de ocorrência das fácies.

BEUCHER et al. (1992) apontou a krigagem como solução para a estimativa das proporções, melhorando a estruturação das variáveis simuladas. O uso de um interpolador exato obriga que a probabilidade, no ponto amostrado, seja 1.0 para a fácies amostrada, não dando espaço ao aparecimento de qualquer outra fácies, seja qual for o valor da gaussiana no ponto. Dessa forma resolve-se o problema das fácies não estacionárias (probabilidades variáveis), a dificuldade para condicionar no ponto amostrado ao mesmo tempo que permite o uso dos intervalos globais para a transformação gaussiana. Assim, preserva-se a coerência do algoritmo e o condicionamento da estrutura geral das variáveis.

Apesar das estimativas das probabilidades no espaço (3D) serem apontadas como a solução para alguns problemas, existem situações onde as estimativas das probabilidades podem causar problemas:

a) Fixação de uma fácies devido à alta probabilidade. Estimativas de probabilidades inadequadas, com valores altos para uma determinada fácies tendem a fixar essa fácies, não permitindo trocas para diferentes realizações. Ao contrário, as proporções estimadas sobre um domínio maior dificilmente assumem valores extremados, conseqüentemente não fixam as fácies para as diferentes realizações.

b) É necessário coerência entre as estimativas das proporções locais e as proporções globais das fácies. Essa condição é normalmente atendida nas estimativas por krigagem.

BEUCHER et al. (1992) sugere estender o raio de busca da krigagem para manter a média das proporções quando forem incorporadas informações adicionais ao conjunto de dados condicionantes.

2.5 PRÓS E CONTRAS AO GAUSSIANO TRUNCADO

É necessário considerar que qualquer método de simulação estocástica não é absoluto por si só. Certamente um único método não tem condições de resolver razoavelmente toda a gama de situações complexas na qual a natureza costuma se mostrar.

Também é importante ressaltar a distância que muitas vezes existe entre o conceito teórico de um método e as limitações impostas à sua implantação tecnológica, na forma de um algoritmo. Nem sempre os algoritmos conseguem ser fiéis aos conceitos matemáticos mais puristas. Para que os algoritmos sejam exequíveis, em termos computacionais, na maioria das vezes é necessário que sejam introduzidas simplificações.

O algoritmo do GT, à medida que foi sendo testado operacionalmente, como qualquer outro método, mostrou-se perfeitamente adequado para modelar determinadas situações geológicas e inadequado às outras como era esperado em função da sua própria concepção teórica.

Alguns autores emitiram opiniões sobre o método, em particular os da escola francesa (*Fontainebleu*) e os da escola americana (*Stanford*), são comentados vários aspectos observados a partir de suas experiências. Dentre esses, são raros os que citam o algoritmo utilizado. Sabendo-se que podem haver diferenças na implantação tecnológica do algoritmo, é razoável esperar que nem tudo o que é afirmado é válido para qualquer algoritmo do GT.

Os vários aspectos comentados pelos autores consultados podem ser agrupados da seguinte forma:

a) Ordenamento Seqüencial das Fácies.

Teoricamente, por efeito da FA gaussiana ser contínua, truncada por uma segunda função contínua, temos uma seqüência de fácies que ocorre de maneira

ordenada, não sendo possível que fácies fora da ordem, inicialmente estabelecidas, ocorram lado a lado (ver Figura 2.5).

XU; JOURNAL (1993, pg.: 15) argumentam que a forma seqüencial das fácies simuladas pode ser um ponto positivo para determinadas situações geológicas e que o ordenamento inicial das fácies é uma importante informação, pois essa mesma ordem tende a ser preservada no resultado final da simulação.

Como consequência dessa característica do GT, tendendo a preservar o ordenamento das fácies, o método tem ficado restrito à simulações onde o sistema deposicional tende a ser mais ordenado.

BEUCHER et al.(1992, p. 557) afirma que o modelo do GT não é adequado para todos os tipos de situações geológicas, sendo mais adequado para simular depósitos sedimentares onde as fácies ocorram em seqüência.

Existem pontos práticos a considerar quanto ao seqüenciamento das fácies que diferem substancialmente dos aspectos teóricos.

Teoricamente, a FA gaussiana é contínua em todo o domínio da malha de simulação. Na prática a simulação é feita em diversas escalas de *grids*, é intuitivo perceber que: à medida que refina-se a escala do *grid* de simulação aumenta-se a probabilidade do ordenamento seqüencial das fácies e nos *grids* mais grosseiros o ordenamento seqüencial tende a desaparecer.

Outra consideração deve ser feita a respeito dos truncamentos não-estacionários em 3D, os quais têm condições de modificar essa tendência de ordenamento, uma vez que vão influir diretamente na posição espacial das fácies, e não mais somente nas proporções globais, como nos truncamentos estacionários.

b) Covariância Única.

Refere-se ao fato de que as indicatrizes das fácies podem ter estruturas (covariâncias) distintas umas das outras e que por limitação do método essas são reduzidas a uma única estrutura da FA gaussiana a ser simulada.

XU; JOURNAL (1993, pg.: 2) citam que a covariância **única** teria o efeito de estruturar todas as fácies segundo a direção da estrutura escolhida para a variável gaussiana. No caso da simulação de um ambiente fluvial, estando a variável contínua direcionada conforme os canais, todas as outras fácies resultantes dos truncamentos também estarão direcionadas segundo os canais, sendo impossível gerar fácies com diferentes direções de anisotropia.

Logicamente, o problema aumenta ao passo que aumenta o número de fácies a serem simuladas. Para duas fácies o problema não existe, devido à covariância ser a mesma para uma dada fácies e seu complemento.

Essa situação é contornada recorrendo-se aos truncamentos não-estacionários, os quais minimizam o problema forçando uma reestruturação das fácies, condicionando melhor as estruturas.

c) Flexibilidade do Modelo.

Refere-se à capacidade do algoritmo incorporar informações através das curvas de proporções ou matrizes de probabilidades de ocorrência das fácies (3D), as quais podem ser obtidas de fontes de informações diferentes das inicialmente utilizadas na simulação da variável contínua.

RAVENNE; BEUCHER (1988) afirmam que, tendo-se uma idéia do ambiente deposicional é possível introduzir curvas de proporções das litofácies na simulação e modifica-las de acordo com os dados disponíveis e que essas mesmas curvas são importantes para recuperar, na simulação, a seqüência das litofácies.

Segundo GALLI et al. (1994) as curvas de proporções verticais são um simples mas poderoso instrumento para geólogos nos trabalhos com estratigrafia de seqüências.

Segundo LE LOC'H et al. (1994) o modelo do GT permite condicionar as simulações através de parâmetros geológicos como: proporções das litofácies. Estando a sísmica em condições de fornecer informações das proporções no espaço, essa informação poderá ser incluída de maneira consistente juntamente com informações de poços.

d) Velocidade do Algoritmo.

Segundo XU; JOURNAL (1993, pg.: 2), devido ao espaço das variáveis categóricas ter sido reduzido a uma única FA gaussiana, o GT torna-se muito rápido.

Segundo OMRE (1991) e GALLI et al. (1994) o método se destaca por sua rapidez, o que vem a ser muito importante quando trabalhamos com malhas muito grandes.

Segundo LE LOC'H et al. (1993) o algoritmo do Heresim¹ 3D é capaz de trabalhar com um número de celas que variam de 10 a 100 milhões, em uma estação de trabalho.

e) Base Teórica.

Todo o desenvolvimento teórico do GT foi feito utilizando conceitos estatísticos já há muito testados e consagrados.

Segundo GALLI et al. (1994), o GT é um dos poucos modelos de simulação de indicatrizes que tem solução teórica para a consistência dos modelos de variogramas e variogramas cruzados das indicatrizes, assim como solução para o seu condicionamento.

¹ Programa comercial de geoestatística o qual usa o algoritmo do GT para simulação.

3. MODELO PLURIGAUSSIANO TRUNCADO

3.1 HISTÓRICO

GALLI et al. (1994) apresentaram uma extensão do GT, na qual é proposto executar os truncamentos, não sobre uma gaussiana simulada, mas sobre uma combinação de n gaussianas simuladas(G).

Com essa estratégia, é possível trabalhar com um conjunto de fácies não seqüenciais e ao mesmo tempo evitar a covariância única para todo o conjunto das fácies (discutido no item 3.4). No mesmo artigo, também foram apresentadas as bases matemáticas do método, bem como dois exemplos teóricos, para 3 e 4 fácies, a partir de duas FA gaussianas, com e sem covariância cruzada.

LE LOC'H et al. (1994), em continuidade, apresentaram exemplos de variações nas formas dos truncamentos, assim como a combinação de diferentes modelos de covariâncias nas simulações das gaussianas. Esses exemplos referem-se exclusivamente a simulações não-condicionais com truncamentos estacionários.

Em resumo: o que os autores, anteriormente citados, propõem é a combinação de diversas variáveis (número de gaussianas, covariância, truncamentos, etc.) para chegar-se a uma melhor modelagem das complexas estruturas geológicas.

SIMON; REMACRE (1995) denominaram o modelo de simulação de Gaussiano Truncado Multivariado (GTM), já que GALLI et al. (1994) e LE LOC'H et al. (1994) denominavam-no genericamente de *multigaussiano*. O mesmo modelo foi denominado de Plurigaussiano Truncado (*Truncated Plurigaussian*) por LE LOC'H; GALLI (1996).

3.2 VARIÁVEIS DE MODELAGEM

As principais variáveis do Plurigaussiano Truncado, que através de ajustes e uma escolha adequada, propiciam ao método um melhor desempenho na modelagem das variáveis geológicas, são:

- ◆ - Número de gaussianas a serem simuladas.

Ao invés de uma única gaussiana, é proposto trabalhar no espaço n-variado, não existindo limitação teórica ao número de gaussianas a ser adotado.

- ◆ - Valor do coeficiente de correlação entre as gaussianas (ρ).

A variação desse parâmetro tem efeito nas proporções globais das fácies e na estruturação das mesmas.

- ◆ - Um modelo de covariância e anisotropia, para cada gaussiana simulada.

A possibilidade de se usar modelos de covariância e anisotropia diferenciados, a cada gaussiana, dá maior flexibilidade ao método na representação de sistemas geológicos, já que diferentes fácies podem ter modelos estruturais completamente distintos.

- ◆ - Estratégia dos truncamentos das fácies.

Refere-se à geometria dos truncamentos das gaussianas, no espaço n-variado. É através dessa geometria que são determinadas as transições entre as diversas fácies.

- ◆ - Variações nas proporções.

Nas variações das proporções, estão envolvidos os valores dos truncamentos e o coeficiente de correlação entre as gaussianas.

LE LOC'H et al. (1994) apresentam uma série de imagens 2D que lembram estruturações geológicas, geradas por simulações não-condicionais. No entanto, os

autores não se comprometem em associar quaisquer das imagens a processos geológicos específicos, deixando ao leitor a responsabilidade por qualquer associação dessa natureza.

3.3 CARACTERÍSTICAS DO PLURIGAUSSIANO TRUNCADO

Na intenção de contornar algumas características desfavoráveis do GT como: a tendência ao ordenamento seqüencial das fácies simuladas; covariância única, GALLI et al. (1994) propuseram o modelo Plurigaussiano Truncado como uma extensão do GT. A idéia era de beneficiar-se dos pontos favoráveis do GT e melhorá-lo quanto aos pontos desfavoráveis.

São várias as características do Plurigaussiano Truncado a serem comentadas:

1^o) Rigor Matemático.

Preserva o rigor matemático do GT, já que o mesmo é bem fundamentado matematicamente, possibilitando dar um tratamento robusto ao método. Como é baseado em FA gaussianas, goza de uma série de propriedades, entre elas:

- ◆ - qualquer combinação linear de gaussianas também é gaussiana;
- ◆ - a distribuição multivariada de gaussianas também é gaussiana;
- ◆ - conhecendo-se a matriz de covariância da função é possível determinar os truncamentos e as covariâncias das indicatrizes.

2^o) Potencial de Expansão.

O Plurigaussiano Truncado não pode ser considerado simplesmente um método mas uma família de métodos. Em função da sua capacidade de agregar informações, abre-se um leque de opções a serem investigadas:

- ◆ - Até quantas FA gaussianas poderão ser utilizadas, na prática?

♦ - Como o coeficiente de correlação entre as FA gaussianas poderá contribuir para melhorar a modelagem das fácies? A variação desse parâmetro é capaz de aumentar ou diminuir o *efeito de borda*² nas relações geométricas entre as fácies.

♦ - Qual a utilidade de trabalhar-se com truncamentos não retangulares, já que a solução matemática torna-se mais complexa?

3^o) Capacidade de Receber Informações Indiretas.

O Plurigaussiano Truncado não modificou a forma e a capacidade, em relação ao GT, de receber informações indiretas. Da mesma forma que no GT, as informações indiretas são introduzidas através das proporções das fácies.

4^o) Covariância Individualizada.

Com a possibilidade de serem utilizadas várias FA gaussianas em conjunto, cada qual com a sua estruturação, a simulação de sistemas geológicos ganhou potencial para representações mais realistas, sendo que: a obrigatoriedade de uma covariância **única** era um dos principais pontos das críticas ao GT.

Tendo-se a possibilidade de usar um único truncamento para cada FA gaussiana, atinge-se o máximo de eficiência do método, pois a covariância se restringe a somente uma única indicatriz e ao seu complemento.

5^o) Liberdade nas Transições entre as Fácies.

Como o anterior, a tendência do GT em seqüenciar as fácies simuladas é um ponto bastante discutido e criticado. No Plurigaussiano Truncado, com a adoção de diferentes estratégias de truncamentos é possível configurar as transições entre as fácies da forma mais adequada ao modelo geológico.

² O termo *efeito de borda*, aqui empregado tem o mesmo significado do termo correspondente empregado por RIVOIRARD, J. (1992) e refere-se a passagem contínua da fácies F_n para a F_{n+1} .

6^o) Crescimento da Complexidade dos Truncamentos com o Aumento do Número de FA Gaussianas.

À medida que se aumenta o número de FA gaussianas, cresce a complexidade da solução dos truncamentos, no espaço n-dimensional. Até duas FA gaussianas é bastante simples visualizar as transições entre as fácies, com três exige-se visualização em 3D e à medida que o número cresce torna-se um exercício bastante complexo dar coerência aos truncamentos.

7^o) Dificuldades na Construção do Algoritmo Geral.

Como o Plurigaussiano Truncado não tem um algoritmo fechado, são necessárias alterações a cada nova estratégia dos truncamentos, portanto: existe a dificuldade de montar um algoritmo comercial que torne disponíveis todas as potencialidades do método.

8^o) Custo Computacional.

À proporção que se incorpora maior número de FA gaussianas, perde-se velocidade no Plurigaussiano Truncado, que era uma das características importantes do GT.

3.4 MODELO GERAL DO PLURIGAUSSIANO TRUNCADO

Já que a cada modelo geológico é necessário montar uma estratégia diferente para tratar a situação, um modelo geral, para descrever o método, deve ter uma abordagem bastante ampla.

Segundo LE LOC'H; GALLI (1997) o modelo geral é definido por:

◆ - Número de FA gaussianas simuladas.

Podendo-se admitir, teoricamente, qualquer número de FA gaussianas, correlacionadas ou não.

◆ - Matrizes de covariância ou covariâncias cruzadas, as quais definem completamente o modelo das FA gaussianas podendo-se admitir qualquer modelo de variograma e variogramas cruzados válidos.

◆ - Truncamentos: a forma pela qual o conjunto das FA gaussianas será transformado em variáveis categóricas.

Como estamos trabalhando no espaço n-dimensional (no mínimo duas FA gaussianas), a probabilidade de ocorrência de cada fácies é representada por uma região desse espaço a qual é demarcada pelos respectivos truncamentos, podendo os mesmos serem tão complexos quanto se queira.

LE LOC'H (1994) propôs (3.1) como um modelo geral para representar as diversas fácies (F_i) obtidas pelos vários truncamentos (S_j^i), sobre as diversas gaussianas (Y_j) que podem ser correlacionadas ou não.

$$F_i = \left\{ \mathbf{x} \in \mathfrak{R}^3, S_{j-1}^i < Y_j(\mathbf{x}) \leq S_j^i, \begin{matrix} i=1,K,n \\ j=1,K,k \end{matrix} \right\} \quad (3.1)$$

Para um melhor detalhamento do método, decidiu-se escolher um modelo simples e desenvolvê-lo passo a passo, como ilustrado no item 3.4.1.

3.4.1 Detalhamento do Método

Como panorama geral, pode-se imaginar um cenário geológico composto por três fácies, cada fácies exibindo características estruturais bastante diferentes umas das outras. Suas relações geométricas não impõem transições preferenciais entre elas, além daquelas impostas pelas suas proporções globais.

Para o desenvolvimento do método, antes de tudo é necessário definir:

- ◆ o número de FA gaussianas a serem simuladas;
- ◆ estratégia dos truncamentos.

A escolha do número de FA gaussianas depende do número de estruturas que se pretende individualizar e a estratégia dos truncamentos é definida em função do número de fácies simuladas e das relações geométricas (seqüências e truncamentos) entre as mesmas.

Para representar três fácies optou-se por duas FA gaussianas, $N(0;1)$.

Para obter-se duas FA gaussianas (G_1 e G_2), que podem ser correlacionadas ou não, recorre-se a outras duas FA gaussianas independentes (X e Y), que por combinações lineares, geram G_1 e G_2 , conforme (3.2) e (3.3).

$$G_1 = Y \quad (3.2)$$

$$G_2 = \rho X + \sqrt{1 - \rho^2} X \quad (3.3)$$

Nesse ponto é necessário definir a estratégia dos truncamentos (Figura 3.1) que é o mecanismo pelo qual as FA gaussianas serão convertidas em fácies pela partição do plano definido por G_1 e G_2 . Teoricamente, essas partições podem ser bastante complexas, assim como o número de FA gaussianas pode ser ilimitado. Na prática é preferível trabalhar com o menor número possível de FA gaussianas pois isso facilitará muito a composição dos truncamentos. Certamente, os truncamentos mais simples e o menor número de FA gaussianas serão os mais práticos.

No caso da Figura 3.1, as partições foram escolhidas paralelas aos eixos G_1 e G_2 , de forma a facilitar o cálculo das probabilidades. A figura da esquerda representa a normal bivariada, a qual foi projetada sobre a figura da direita. Os círculos concêntricos representam intervalos de isoprobabilidades da normal bivariada. Os círculos mais centrais demarcam regiões de maior probabilidade, diminuindo os valores em direção as bordas da figura.

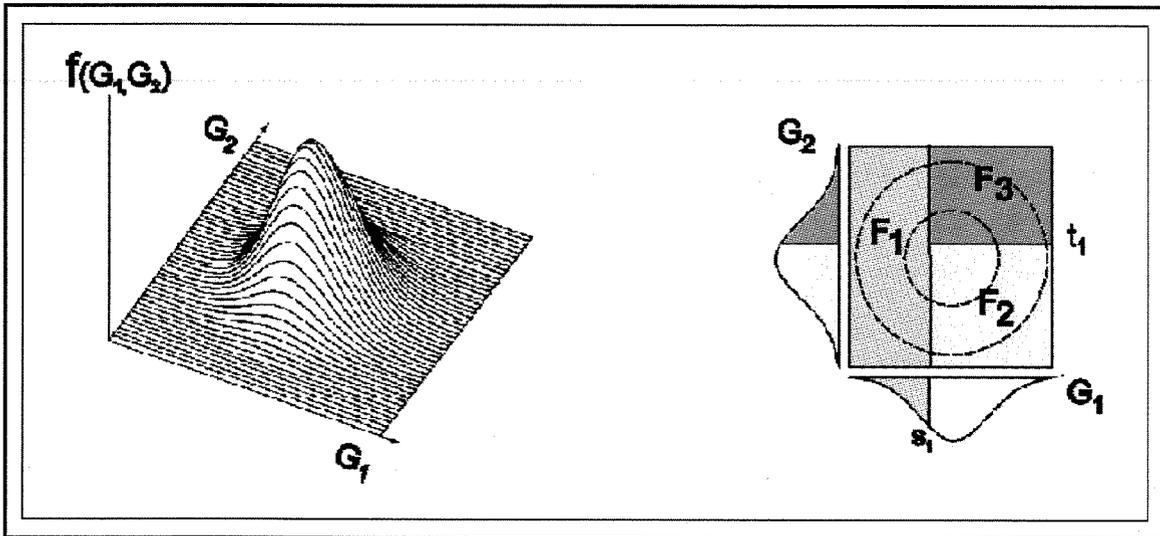


Figura 3.1 . Estratégia dos truncamentos para três fácies.

O significado das partições (**estratégia dos truncamentos**) pode ser melhor compreendido observando-se a Figura 3.1.

Sendo F_1 , F_2 , F_3 , três fácies a serem simuladas, os retângulos coloridos representam as relações geométricas, entre as fácies, esperadas na simulação. Nessa representação pode-se observar que todas as regiões que delimitam as fácies se tocam, portanto admite-se transições entre as mesmas.

O truncamento vertical s_1 , que separa F_1 das demais, indica que a mesma é definida somente por esse truncamento sobre G_1 e independe de G_2 (observar as distribuições marginais); por outro lado, o truncamento horizontal t_1 , que define F_2 e F_3 truncando G_2 não tem influência alguma sobre G_1 . Como a ordem de execução dos truncamentos é: primeiro sobre G_1 e após G_2 então F_2 e F_3 só irão ocorrer onde F_1 não ocorrer.

A proporção de cada fácies a ser recuperada na simulação é dada pela integral das linhas de isoprobabilidades delimitadas por cada retângulo de truncamento. Esse valor nada mais é do que a probabilidade calculada pela integral da normal bivariada dentro dos intervalos de truncamentos.

Portanto, a estratégia dos truncamentos define as relações geométricas e as proporções esperadas para o conjunto de fácies além das estruturações que estão implícitas em cada FA gaussiana simulada.

A inclusão de um coeficiente de correlação entre as FA gaussianas altera a forma das linhas de probabilidades em relação aos truncamentos, essa situação pode ser visualizada graficamente na Figura 3.2. As linhas de isoprobabilidades, antes circulares, tomam formas elípticas mudando as proporções esperadas para cada fácies, já que as linhas de isoprobabilidades modificaram suas configurações em relação aos intervalos de truncamentos. Para manter as proporções das fácies fixas é necessário modificar a posição (valor) de cada truncamento para um valor calculado em função do coeficiente de correlação entre G_1 e G_2 (ρ). Devido à importância desse assunto, o mesmo será melhor discutido no item 4.3.

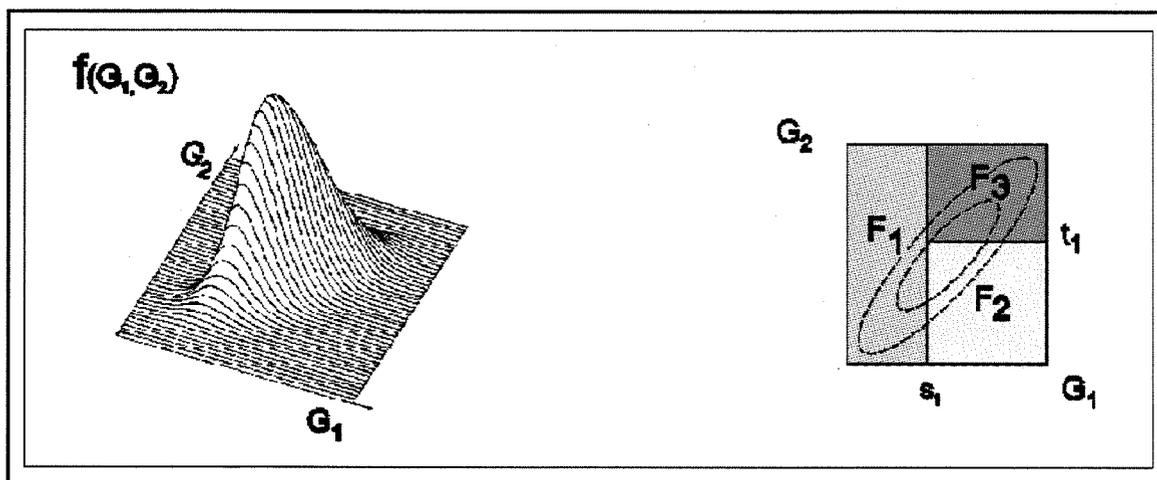


Figura 3.2 . Estratégia dos truncamentos para três fácies usando-se correlação entre as FA gaussianas.

Conhecendo-se o comportamento geológico das fácies (estruturas e seqüências) e o número de fácies a serem simuladas determina-se o número de FA gaussianas e desenha-se a estratégia dos truncamentos, os quais correspondem às relações geológicas esperadas no cenário a ser simulado.

No caso das proporções serem tratadas de forma estacionária ou não-estacionária, através das curvas de proporções, os valores dos truncamentos são facilmente calculados através do cálculo das probabilidades para a normal bivariada.

Para facilitar os cálculos, nesse exemplo, foram escolhidas formas retangulares, definidas por retas paralelas e ortogonais aos eixos da distribuição multivariada.

Para um caso geral, cada fácies tem sua probabilidade de ocorrência definida por um conjunto de quatro truncamentos (s_1, s_2, t_1, t_2), válidos para um determinado coeficiente de correlação (ρ), Essa situação está ilustrada na Figura 3.3, onde, s_1, s_2 são os truncamentos em relação a G_1 e t_1, t_2 a G_2 .

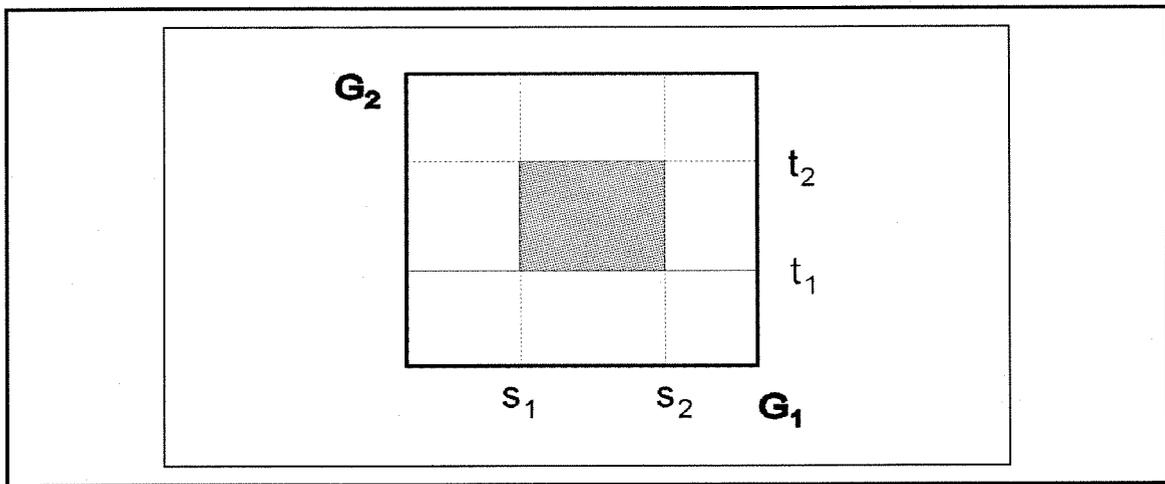


Figura 3.3 . Representação dos truncamentos relativos à probabilidade de ocorrência de determinada fácies.

A proporção de uma determinada fácies (p_i) é calculada pela probabilidade da normal bivariada (G) restrita aos intervalos de truncamentos e pode ser escrita como (3.4).

$$p_i = \text{prob} (s_1 < G_1 \leq s_2 \text{ e } t_1 < G_2 \leq t_2) \quad (3.4)$$

Explicitando (3.4) em função das FA gaussianas independentes, substitui-se (3.2) e (3.3) em (3.4), obtendo-se (3.5).

Explicitando Y em função de X em (3.5), temos: (3.6).

$$p_i = \text{prob} \left(s_1 < X \leq s_2 \text{ e } t_1 < \rho X + \sqrt{1 - \rho^2} X \leq t_2 \right) \quad (3.5)$$

Explicitando Y em função de X em (3.5), temos: (3.6).

$$p_i = \text{prob} \left(s_1 < X \leq s_2 \text{ e } \frac{t_1 - \rho X}{\sqrt{1 - \rho^2}} < X \leq \frac{t_2 - \rho X}{\sqrt{1 - \rho^2}} \right) \quad (3.6)$$

Como X e Y são FA gaussianas independentes, é possível calcular as probabilidades em função das distribuições marginais, logo: (3.6) pode ser escrito usando-se a função de densidade de probabilidade da gaussiana monovariada ($g(.)$) (3.7), ou usando a distribuição acumulada ($G(.)$) (3.8).

$$g(.): p_i = \int_{s_1}^{s_2} \int_{\frac{t_1 - \rho v}{\sqrt{1 - \rho^2}}}^{\frac{t_2 - \rho v}{\sqrt{1 - \rho^2}}} g(u) g(v) dudv \quad (3.7)$$

$$G(.): p_i = \int_{s_1}^{s_2} \left[G\left(\frac{(t_2) - \rho v}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) - G\left(\frac{(t_1) - \rho v}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) \right] g(v) dv \quad (3.8)$$

Portanto, é possível calcular a probabilidade de ocorrência (proporção) de uma determinada fácies, definida por um truncamento retangular, sobre a normal bivariada com qualquer coeficiente de correlação.

Na prática, o que precisa ser resolvido é o problema inverso. Deseja-se calcular os truncamentos conhecendo-se as proporções das fácies (p_i) e admite-se conhecer o coeficiente de correlação (ρ).

O problema deve ser solucionado em partes, resolvendo-se um truncamento por vez. Primeiramente retângulos onde um dos limites de integração é conhecido ($+\infty$ ou $-\infty$), caso contrário chega-se a uma indeterminação. Dessa forma é possível chegar-se a todos os truncamentos.

Para o caso da Figura 3.4, resolve-se primeiro para a proporção de F_1 conforme (3.9), invertendo-se para determinar s_1 , já que p_1 e ρ são conhecidos.

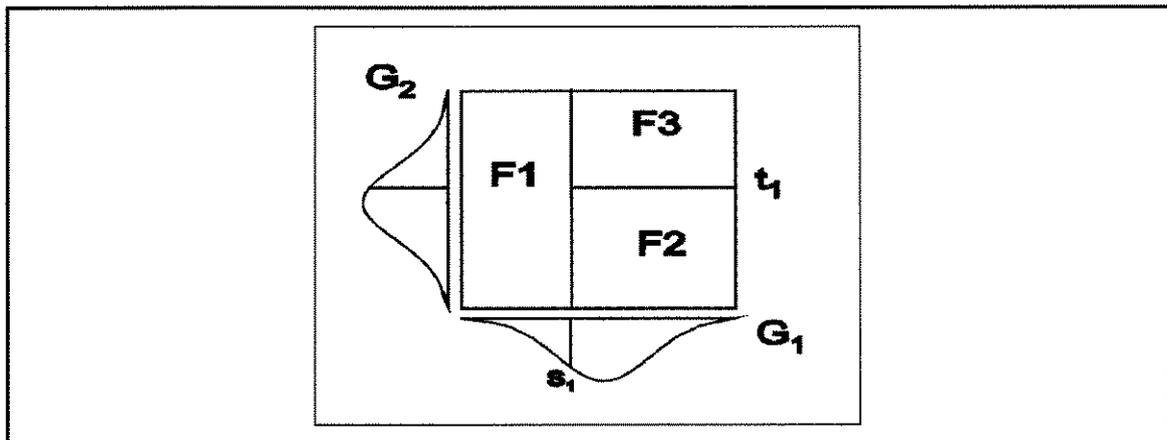


Figura 3.4. Estratégia dos truncamentos para três fácies.

$$G(\cdot): p_1 = \int_{-\infty}^{s_1} \left[G\left(\frac{(+\infty) - \rho v}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) - G\left(\frac{(-\infty) - \rho v}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) \right] g(v) dv \quad (3.9)$$

Aplica-se o mesmo procedimento para determinar t_1 em função da proporção de F_2 ou F_3 . Em (3.10) está exemplificado que para a proporção de F_2 , s_1 e p_2 são conhecidos. Dessa forma é possível obter-se todos os truncamentos teóricos que retornam as proporções das fácies no Plurigaussiano Truncado.

$$G(\cdot): p_2 = \int_{S_1}^{+\infty} \left[G\left(\frac{t_1 - \rho v}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) - G\left(\frac{(-\infty) - \rho v}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) \right] g(v) dv \quad (3.10)$$

3.5 ESTRATÉGIA DOS TRUNCAMENTOS E VARIAÇÕES NOS MODELOS DE COVARIÂNCIA

GALLI et al. (1994), em seu trabalho, ilustraram casos de simulações não-condicionais, não só relacionados a truncamentos retangulares como também exemplificou um modelo de truncamento não-linear, o qual tem sua representação analítica e gráfica ilustrada na Figura 3.5 e Figura 3.6. Essa estratégia dos truncamentos baseia-se em circunferências aninhadas caracterizando uma estruturação com um autêntico *efeito de borda*, isso é: teoricamente, a passagem de uma fácies a outra só é possível obedecendo a uma ordem fixa.

Variações na anisotropia e combinações de modelos de covariância são capazes de produzir imagens bastante complexas, mas algumas delas, geologicamente plausíveis. O conjunto de imagens, ilustrado no trabalho de GALLI et al. (1994), representado na, Figura 3.7, Figura 3.8 e Figura 3.9, foi gerado por duas FA gaussianas independentes e um modelo de estratégia dos truncamentos, semelhante ao da Figura 3.4.

É importante notar que, embora a Figura 3.8 e a Figura 3.9 tenham em comum o mesmo modelo de variograma, variações na anisotropia e nas proporções das fácies foram capazes de gerar cenários bastante diferenciados.

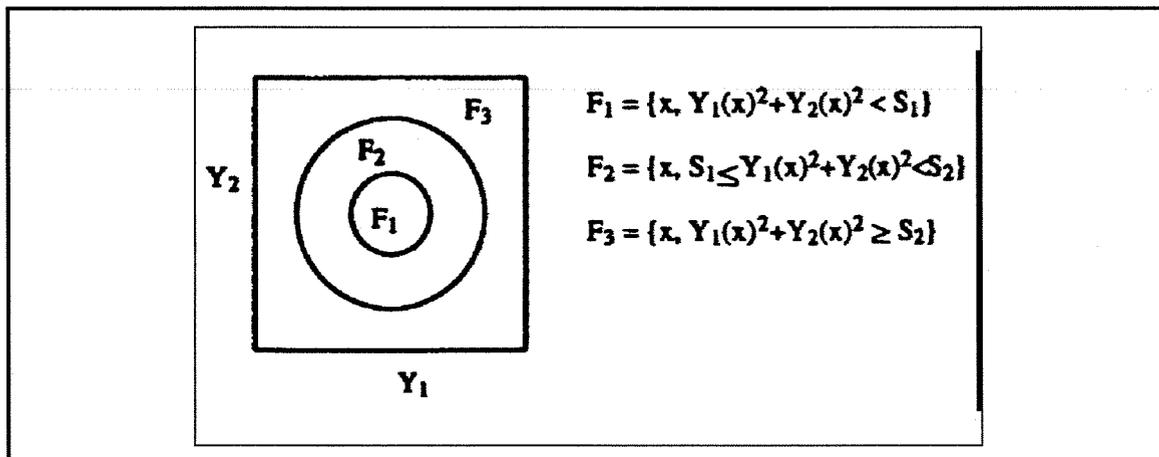


Figura 3.5 . Representação gráfica e analítica de truncamentos não-lineares (GALLI et al. (1994)).

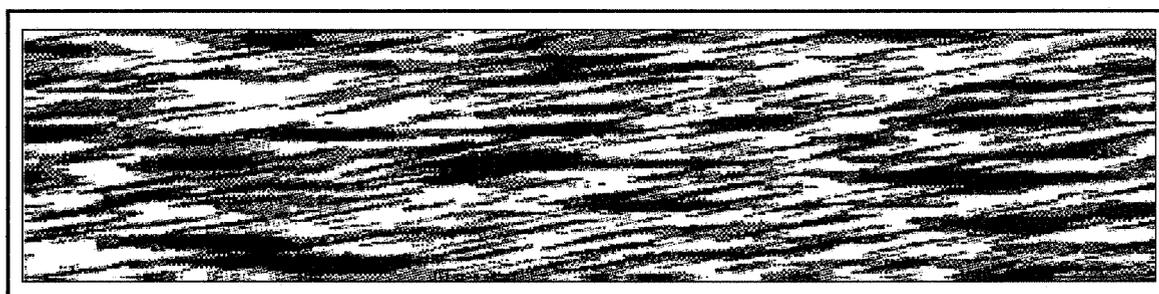


Figura 3.6 . Simulação usando duas gaussianas independentes e truncamentos circulares (GALLI et al. (1994)).

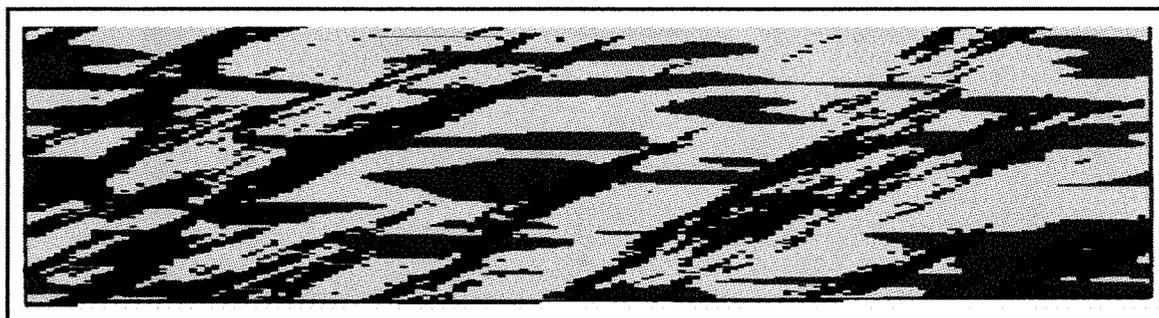


Figura 3.7 . Simulação usando o modelo variográfico exponencial e o esférico (GALLI et al. (1994)).

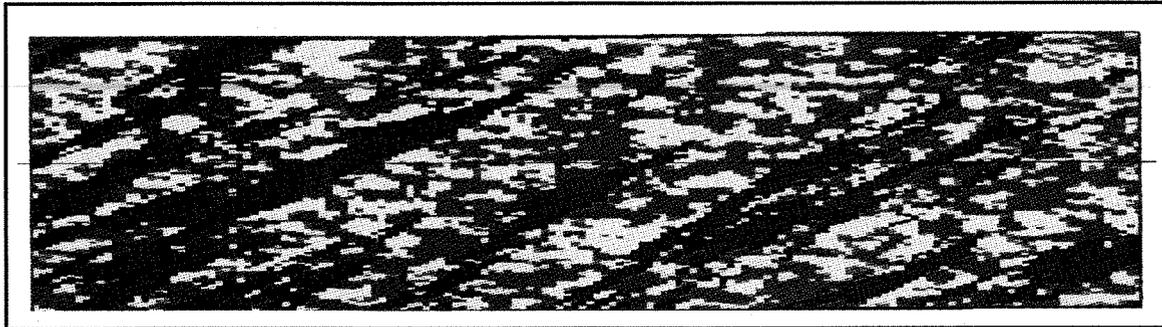


Figura 3.8 . Simulação usando o modelo variográfico exponencial e o gaussiano (GALLI et al. (1994)).

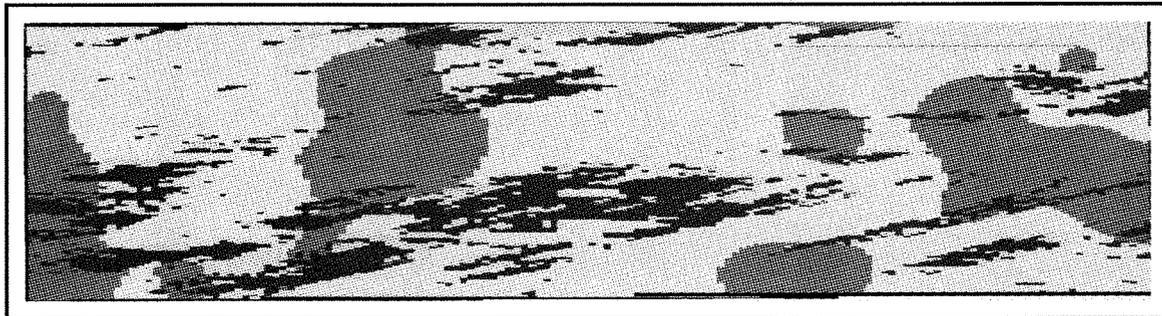


Figura 3.9 . Simulação usando o modelo variográfico exponencial e o gaussiano (GALLI et al. (1994)).

Sobre as imagens acima, o autor não comentou possíveis correlações com cenários geológicos, mas com um pouco de imaginação é possível lançar correlações entre os cenários da Figura 3.7, da Figura 3.8 e um corte de afloramento, onde a fácies marrom é o resultado de uma cimentação secundária intensa, devido à percolação de fluidos em um sistema de fraturas subparalelo cortando um sistema deposicional (fácies verde e amarela).

No cenário da Figura 3.9 pode-se traçar um paralelo com uma situação bastante comum em geologia. Pode-se dizer que o sistema é composto por duas fácies deposicionais, arenitos permeáveis (amarelo) e siltitos/folhelhos (azul) e uma fácies diagenética (ocre). É interessante notar que a diagênese foi diferenciada alterando somente a fácies permeável, gerando cimentações com formas esféricas.

A diagênese, somente na fácies amarela (da simulação), é consequência da fácies azul ter sido arranjada na estratégia dos truncamentos na posição da fácies que trunca ou erode (posição de F_1 na Figura 3.4).

As imagens apresentadas como ilustrações são apenas uma pequena amostra da diversidade de formas e estruturas que é possível compor usando o Modelo Plurigaussiano Truncado.

4. SIMULAÇÃO PLURIGAUSSIANA TRUNCADA NÃO-CONDICIONAL

O objetivo desse capítulo é exemplificar, passo a passo, a construção de imagens não-condicionais aplicando-se o Método Plurigaussiano Truncado.

São apresentados aspectos práticos envolvidos no método bem como os programas utilizados nas simulações e composição de imagens.

O Método Plurigaussiano Truncado, por combinar linearmente duas ou mais funções gaussianas, pode ser subdividido em função das relações entre as FA gaussianas como:

- ◆ Independentes ($\rho = 0$): não existe covariância cruzada entre as FA gaussianas, por não existir correlação estrutural entre as fácies.
- ◆ Correlacionadas: existe covariância cruzada entre as FA gaussianas, portanto existe interdependência estrutural entre as fácies.

4.1 CONDIÇÕES INICIAIS E PROGRAMAS UTILIZADOS

Como exemplo, as simulações condicionais e não-condicionais, que serão ilustradas nesse capítulo e no próximo, foram implementadas para três fácies. A estratégia dos truncamentos entre as fácies foi denominada de truncamento erosivo, conforme exemplificado na Figura 4.1. Nesse esquema dos truncamentos a fácies F_1 terá prioridade sobre as demais fácies. As fácies F_2 e F_3 serão simuladas no espaço complementar de F_1 .

As proporções terão comportamentos estacionários no espaço, isto é, os valores dos truncamentos serão calculados em função das proporções globais, previamente estabelecidas para cada fácies.

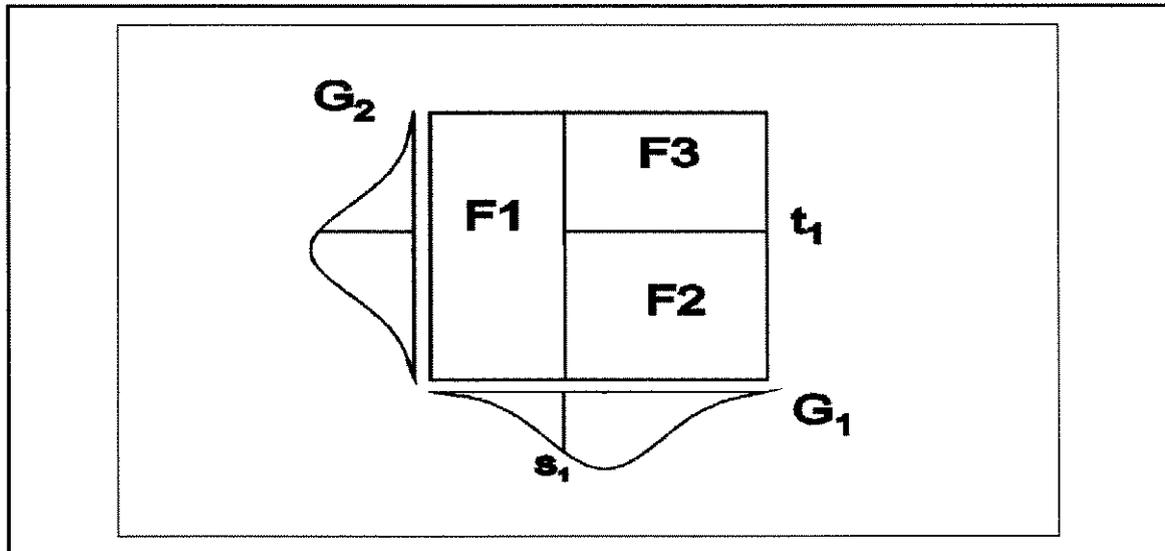


Figura 4.1 Representação esquemática da estratégia dos truncamentos, denominada de truncamento erosivo.

Para execução das simulações foi desenvolvida uma rotina principal, em linguagem IDL (*Interactive Data Language*). Essa rotina controla uma série de subrotinas, também em IDL, que por sua vez encarregam-se da execução dos truncamentos, composição e exibição das imagens. A rotina principal também cuida do gerenciamento do programa SGSIM, cuja finalidade é simular as gaussianas. O fluxograma da rotina principal encontra-se ilustrado na Figura 4.2.

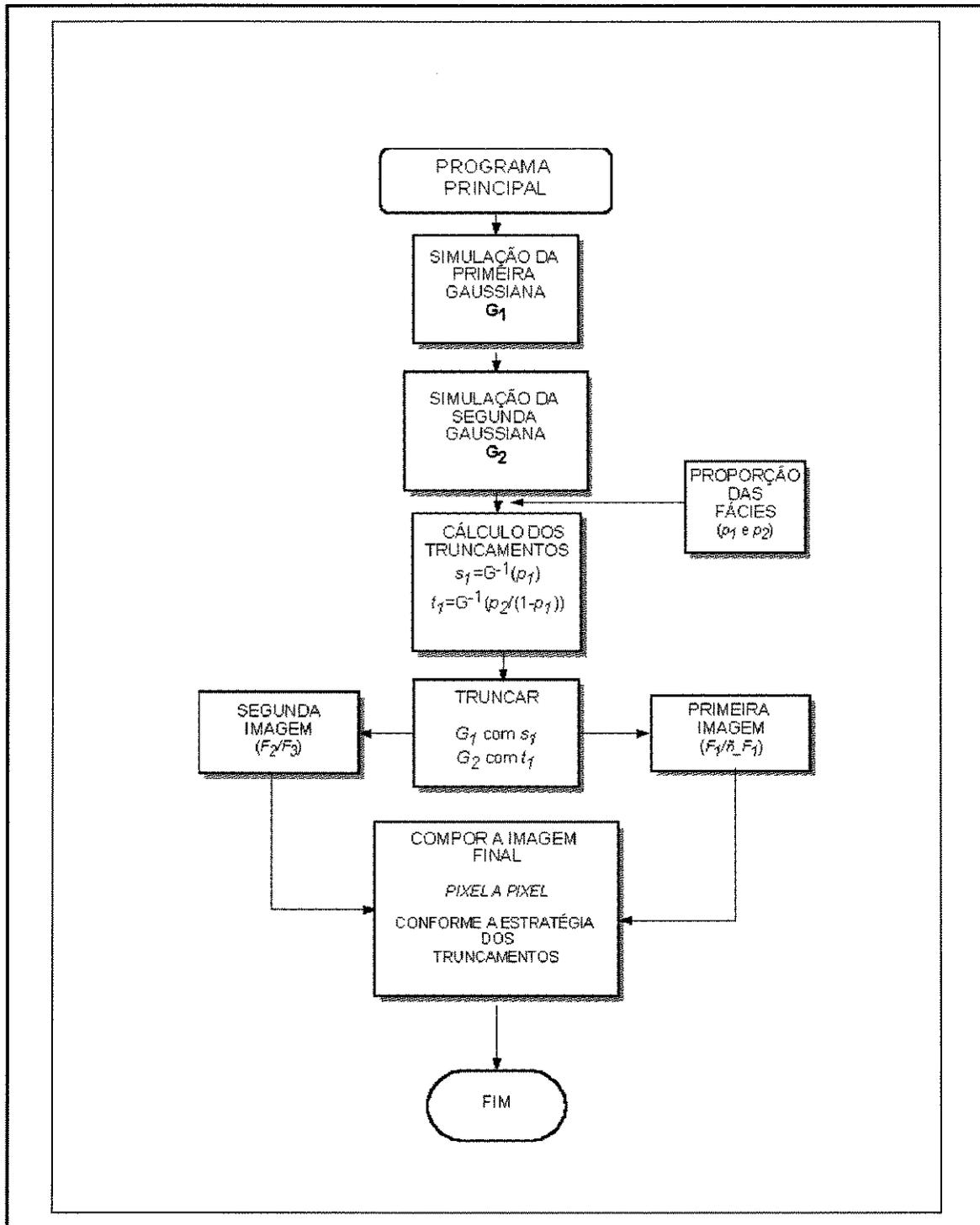


Figura 4.2 Ilustração simplificada do diagrama de fluxo da rotina de Simulação Plurigaussiana Truncada, desenvolvida em linguagem IDL.

4.2 SIMULAÇÃO POR GAUSSIANAS INDEPENDENTES

Será ilustrada, através de sete etapas, a metodologia para obtenção de uma imagem não-condicional utilizando-se o Modelo Plurigaussiano Truncado com FA gaussianas independentes.

Serão simuladas duas gaussianas independentes cujos modelos dos variogramas estão ilustrados na Tabela 4.1. A malha de simulação 2D a ser utilizada, no exemplo, mede 200 x 200 (unidades).

FA gaus.	Modelo Variográfico	Pepita	Alcance	Patamar	Razão de Anisotropia	Direção Principal
G_1	gaussiano	0,01	100	0,99	0,05	L-W
G_2	gaussiano	0,01	10	0,99	0,05	N45 ^o E

Tabela 4.1 . Modelos dos variogramas utilizados na simulação não-condicional das FA gaussianas G_1 e G_2 .

1^o) **Etapa:** Definir a estratégia dos truncamentos para as fácies e suas proporções globais, esperadas na imagem final.

As proporções definidas para cada fácies são:

◆ $F_1 = 70\%$;

◆ $F_2 = 25\%$;

◆ $F_3 = 5\%$.

A estratégia dos truncamentos e as proporções globais das fácies, para esse exemplo, estão representadas esquematicamente na Figura 4.3.

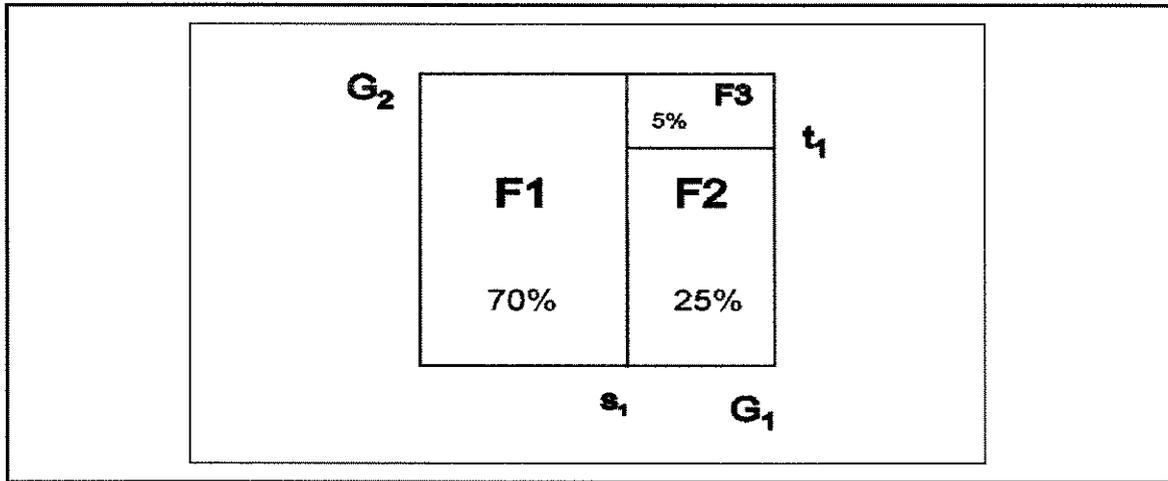


Figura 4.3 Estratégia dos truncamentos e proporções das fácies para a simulação não-condicional.

2ª) **Etapa:** Calcular os valores dos truncamentos que serão usados em cada gaussiana simulada. Os cálculos são feitos em função da estratégia dos truncamentos e das proporções finais das fácies.

Na estratégia apresentada na Figura 4.3, s_1 corresponde ao truncamento em G_1 e t_1 é o truncamento em G_2 .

As relações que definem a composição das fácies segundo os truncamentos são as seguintes e valem para o caso de gaussianas independentes ($\rho=0$):

$$F_1 = \{\mathbf{x}, G_1(\mathbf{x}) \leq s_1\} \quad (4.1)$$

onde F_1 depende apenas de G_1 e do truncamento de s_1 .

Em função da proporção p_1 (proporção de F_1) pode-se escrever (4.2):

$$p_1 = \text{prob}(-\infty < G_1 \leq s_1) \quad (4.2)$$

Como G_1 é uma distribuição gaussiana, (4.2) pode ser escrita em função da distribuição de probabilidades da gaussiana acumulada, como em (4.3).

Para o cálculo de s_1 , inverte-se a função de densidade acumulada ($G(\cdot)$), como em (4.4).

$$p_1 = G(s_1) \quad (4.3)$$

$$s_1 = G^{-1}(p_1) \quad (4.4)$$

As fácies F_2 e F_3 são definidas pelas relações (4.5) e (4.6), sendo que o espaço dessas fácies é dependente dos truncamentos em G_1 e G_2 .

$$F_2 = \{\mathbf{x}, G_1(\mathbf{x}) > s_1, G_2(\mathbf{x}) \leq t_1\} \quad (4.5)$$

$$F_3 = \{\mathbf{x}, G_1(\mathbf{x}) > s_1, G_2(\mathbf{x}) > t_1\} \quad (4.6)$$

Para determinar o valor de t_1 , procede-se da mesma forma como para o cálculo de s_1 ; escreve-se (4.5) em função de p_2 (probabilidade de F_2), como em (4.7).

Como G_1 e G_2 são FA gaussianas independentes, a probabilidade conjunta é o produto das parciais e o primeiro termo é o complemento de p_1 (ver (4.2)), então (4.7) pode ser escrita como (4.8) e (4.9).

Para calcular t_1 , inverte-se a FA gaussiana acumulada, como em (4.10).

O truncamento t_1 , aplicado em G_2 gera uma partição no subespaço complementar de F_1 , o qual, anteriormente, havia sido definido em função de s_1 .

$$p_2 = \text{prob}(s_1 < G_1 < \infty \text{ e } -\infty < G_2 \leq t_1) \quad (4.7)$$

$$p_2 = (1 - p_1) \cdot G(t_1) \quad (4.8)$$

$$G(t_1) = \frac{p_2}{1 - p_1} \quad (4.9)$$

$$t_1 = G^{-1}(p_2 / (1 - p_1)) \quad (4.10)$$

3^ª) **Etapa:** Simular independentemente a primeira gaussiana G_1 com o respectivo variograma (Tabela 4.1).

4^ª) **Etapa:** Proceder o truncamento de G_1 por s_1 . Na Figura 4.4 estão representados o diagrama dos truncamentos e a imagem resultante após o truncamento por s_1 . A fácies escura corresponde a F_1 (proporção de 70%) e a clara corresponde a fácies \tilde{n}_F (30%), cujo espaço será ocupado posteriormente por $F_2 \cup F_3$.

5^ª) **Etapa:** Simular independentemente a FA gaussiana G_2 , cujo modelo de covariância está na Tabela 4.1.

6^ª) **Etapa:** Proceder o truncamento de G_2 por t_1 , cuja representação esquemática e analítica pode ser observado à esquerda na Figura 4.5 e a imagem resultante desse truncamento pode ser observado à direita.

As fácies F_2 e F_3 apresentam proporções de 83,7% e 17,3% respectivamente. Esses valores correspondem às proporções relativas de F_2 e F_3 dentro do subespaço complementar de F_1 .

³ A simbologia \tilde{n}_F , será usada para representar o conjunto complementar de F .

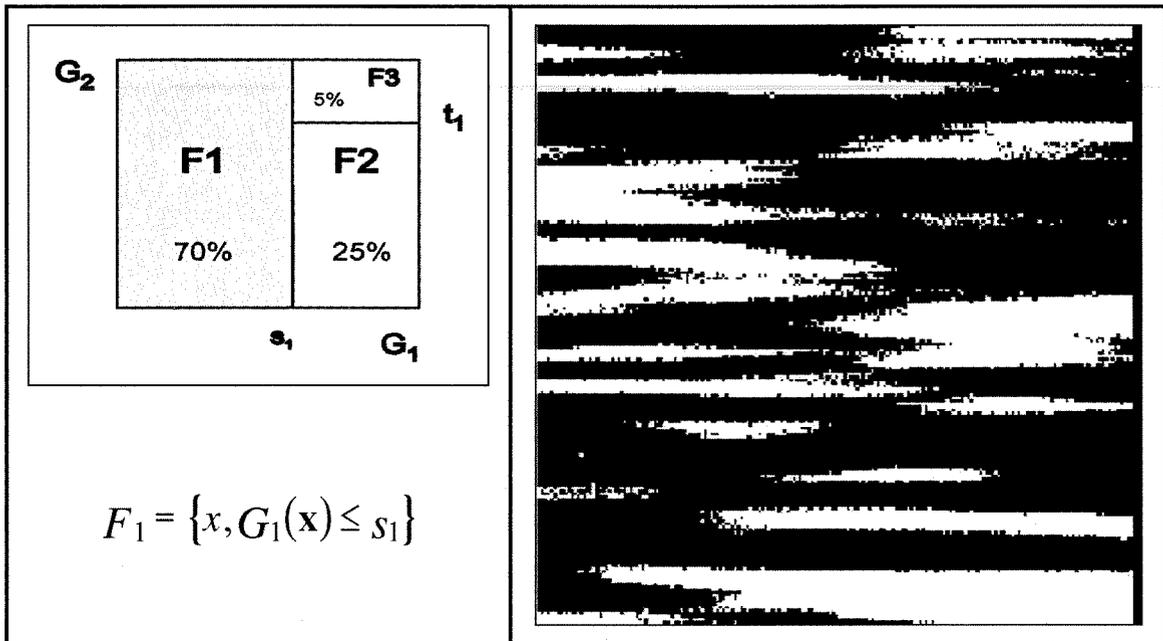


Figura 4.4 Representação gráfica e analítica do truncamento da gaussiana G_1 por s_1 . À direita, a imagem 2D (200 x 200) resultante do truncamento, fácies F_1 (escura) e $\tilde{n} F_1$ (clara).

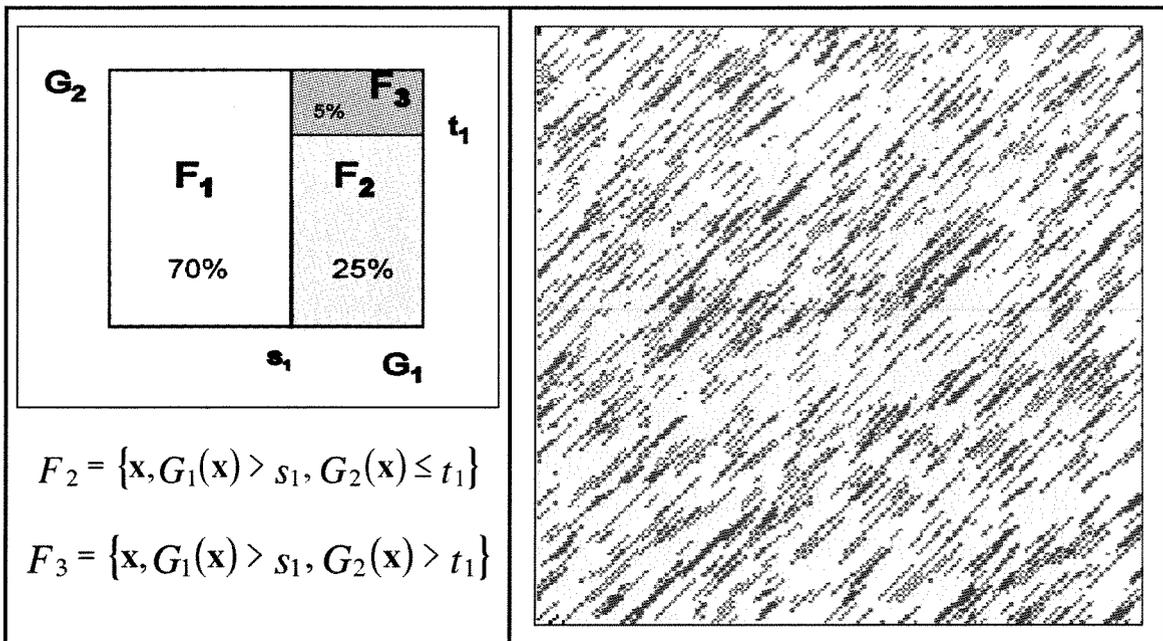


Figura 4.5. Representação gráfica e analítica referente ao truncamento de G_2 por t_1 e, à direita, a imagem (200 x 200) resultante do truncamento, determinando as fácies F_2 (amarela) e F_3 (verde).

7^h) **Etapa:** Executar a composição final das imagens.

Pela estratégia dos truncamentos, as fácies F_2 e F_3 irão ocupar o espaço complementar de F_1 . A composição final pode ser observada na Figura 4.6, na qual observa-se três fácies estruturadas com formas distintas.

A composição final das imagens é feita *pixel a pixel*⁴, segundo a estratégia dos truncamentos, onde F_1 tem preferência em relação a F_2 e F_3 . Portanto, as estruturas de F_1 truncam as estruturas de $F_2 \cup F_3$.

Em função desse comportamento, GALLI et al. (1994) denominou esse modelo da estratégia dos truncamentos (Figura 4.1) como modelo erosivo simplesmente pelo fato da fácies que ocupa a posição de F_1 (no modelo) interromper as estruturas de $F_2 \cup F_3$.

O nome dessa estratégia de truncamentos não é apropriado para o caso geral já que nem sempre essa estratégia pode ser correlacionada fisicamente a uma erosão como evento geológico. Exemplo para essa afirmação pode ser confirmado na Figura 4.6 onde a imagem resultante do truncamento, dito erosivo, mais se parece a uma seqüência de arenitos e folhelhos intercalados, cujos arenitos exibem estruturas internas semelhantes à estratificações cruzadas. Já, para o conjunto das imagens, que vão da Figura 3.7 à Figura 3.9, a mesma estratégia dos truncamentos sugere eventos geológicos ligados a preenchimentos de fraturas e cimentações secundárias, em seqüências de arenitos e folhelhos.

Uma justificativa plausível para a denominação modelo erosivo seriam as imagens geradas por simulação condicional que ilustram os itens 5.5 e 5.6, as quais realmente justificam o nome.

⁴ O termo *pixel a pixel* foi utilizado em função do resultado final da simulação estar referenciado a uma imagem e ter equivalência à malha de simulação.

Retornando ao resultado da simulação (Figura 4.6), do ponto de vista estrutural a imagem final é composta pelo conjunto de três fácies, estruturadas distintamente uma das outras, onde cada subconjunto manteve suas características estruturais e as proporções globais foram honradas.

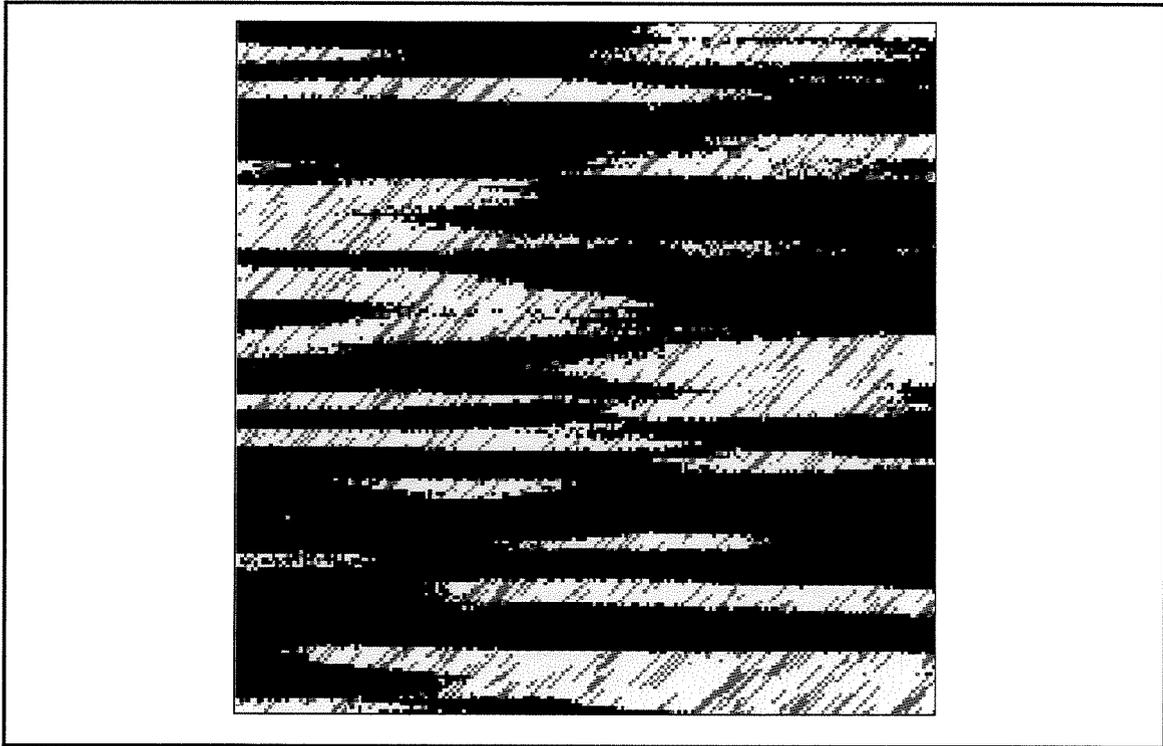


Figura 4.6. Composição final dos multitruncamentos, malha 200 x 200.

A imagem tem uma geometria bastante particular, onde as direções de anisotropia são bem marcadas e distintas. Essa é uma situação a qual não seria possível modelar usando-se um único modelo variográfico.

4.3 GAUSSIANAS CORRELACIONADAS

A Simulação Plurigaussiano Truncada usando-se FA gaussianas correlacionadas segue praticamente os mesmos passos descritos no item 4.2, com a diferença de ser necessário: fixar um coeficiente de correlação (ρ), executar a combinação linear entre as FA gaussianas e calcular os truncamentos, levando-se em consideração o ρ escolhido.

O sentido físico, no contexto geológico, de se usar gaussianas linearmente dependentes está relacionado à situações onde as diversas fácies mantêm entre si uma dependência estrutural (efeito de borda, por exemplo) ou no caso de uma das fácies modificar sua estruturação ao longo do domínio (modelo com ρ não-estacionário).

Os passos para executar a simulação não-estacionária são os seguintes:

1^a Etapa: Definir a estratégia dos truncamentos, em função do conhecimento geológico que se tem a respeito do sistema que será simulado.

2^a Etapa: Fixar um ρ e calcular os truncamentos, levando-se em consideração as proporções das fácies e o ρ escolhido.

Para esse cálculo inverte-se a expressão (3.8) ou recorre-se às tabelas referentes à normal bivariada com coeficiente de correlação, encontradas em ZELLEN; SEVERO (1972, Cap. 26).

Também em ZELLEN; SEVERO (1972, Cap. 26) é possível encontrar fórmulas para calcular probabilidades para truncamentos não-retangulares, tais como circulares e triangulares, muito embora a utilidade prática desses truncamentos não tenha sido avaliada.

3^a Etapa: Simular de forma independente duas FA gaussianas, cada qual com seu modelo de covariância. A escolha da covariância em relação a cada FA gaussiana segue o mesmo princípio discutido no item 4.2.

4^a Etapa: Gerar G_2 linearmente dependente, conforme (4.11).

$$G_2 = \rho Y + \sqrt{1 - \rho^2} X \quad (4.11)$$

5^a Etapa: Executar os truncamentos sobre as FA gaussianas G_1 e G_2 .

6^o) **Etapa:** Executar a composição *pixel a pixel* da malha de simulação, obtendo-se a imagem final.

Para a avaliação do efeito do coeficiente de correlação na estuturação das fácies recorreremos a uma seqüência de imagens: Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9. Essas imagens foram geradas simulando as FA gaussianas com os mesmos modelos utilizados no exemplo do item 4.2 só que agora foram usadas combinações lineares entre as FA gaussianas cujos valores para o coeficiente de correlação são: 0.0, 0.7, 0.97, respectivamente.

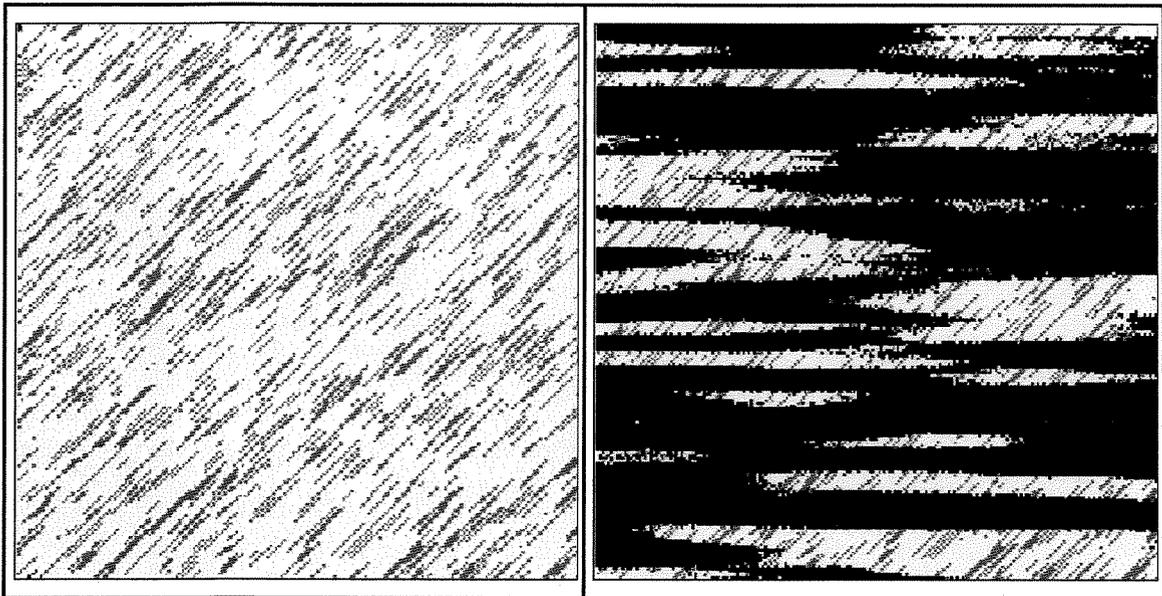


Figura 4.7 . A) Imagem da esquerda é o resultado de G_2 truncada por t_1 . B) Imagem da direita é o resultado da composição de duas FA gaussianas independentes ($G_1, G_2 ; \rho = 0$) truncadas por s_1 e t_1 , malha 200 x 200.

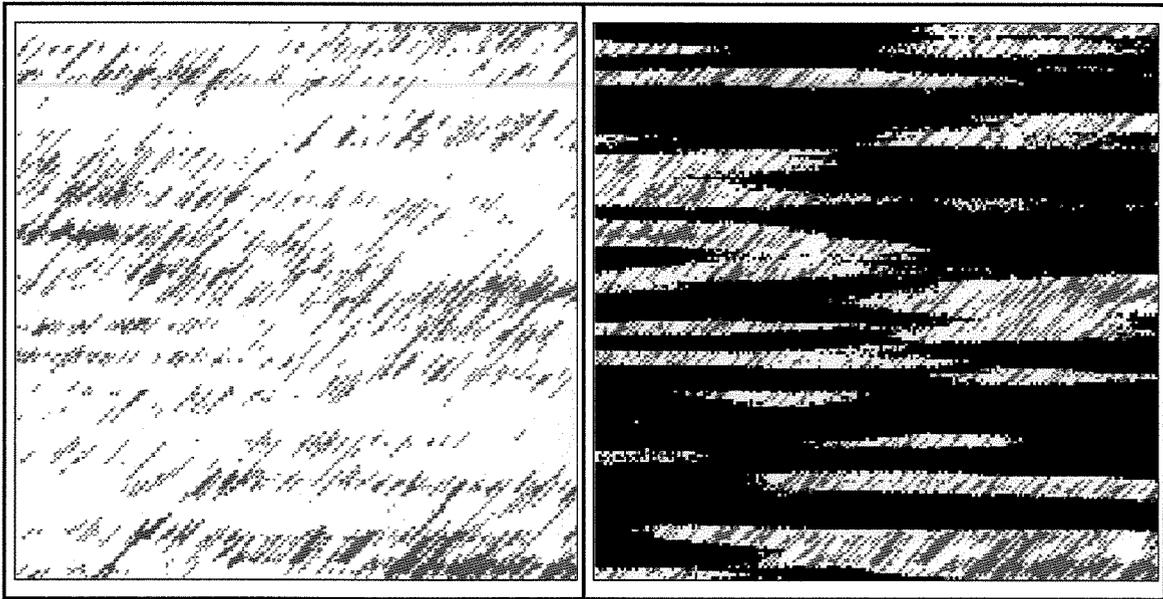


Figura 4.8 . A) Imagem da esquerda é o resultado do truncamento de G_2 por t_1 com $\rho= 0.7$; B) Imagem da direita é o resultado da composição de duas FA gaussianas truncadas, $(G_1; G_2; \rho= 0.7)$, malha 200 x 200.

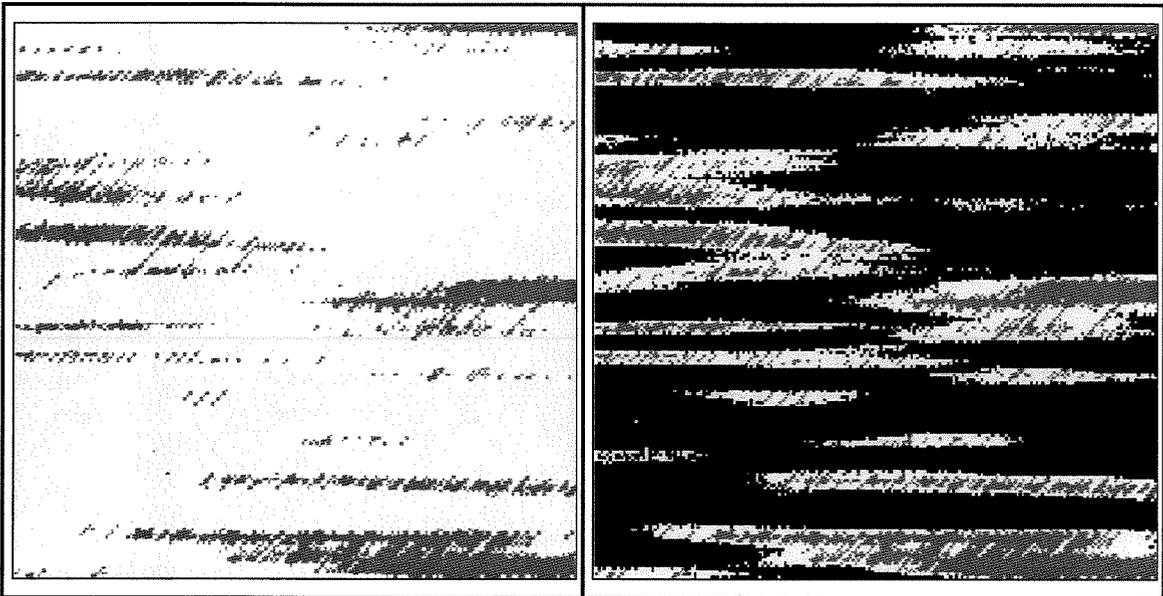


Figura 4.9 . A) Imagem da esquerda é resultante do truncamento de G_2 por t_1 com $\rho= 0.97$; B) Imagem da direita é o resultado da composição de duas FA gaussianas truncadas, $G_1; G_2; \rho= 0.97)$, malha 200 x 200.

Da análise dos conjuntos de imagens pode-se observar três aspectos importantes que ocorrem com a variação do coeficiente de correlação entre as FA gaussianas:

1^o) Alterações nas Proporções das Fácies.

Enquanto a proporção de F_1 fica inalterada, as proporções de F_2 e F_3 alteram-se. À medida que ρ cresce, de forma positiva, o quadrante de F_3 adquire maior densidade de probabilidade (Figura 3.2), com conseqüente aumento das proporções dessa fácies e redução de F_2 .

Na seqüência das imagens anteriores, à medida que ρ cresce, percebe-se uma mobilização de F_3 em direção ao subespaço complementar de F_1 . Como conseqüência, a proporção de F_2 cresce, pois deixa de ser truncada por F_1 .

2^o) Metamorfose Estrutural.

Observa-se na seqüência das imagens que vai ocorrendo uma transformação estrutural (metamorfose) em F_3 à medida que ρ cresce. Quanto maior o coeficiente de correlação entre G_1 e G_2 mais as estruturas de F_1 e F_3 se aproximam. No caso de ρ chegar ao valor 1, F_1 e F_3 terão a mesma estrutura, exceto pelos alcances pois esses estão relacionados às proporções das fácies, item 2.3.

3^o) Efeito de Borda.

O *efeito borda* é melhor visualizado quando ρ atinge valores mais elevados. No caso da Figura 4.9 percebe-se que entre F_1 (preto) e F_3 (verde), praticamente em todos os locais, F_2 (amarela) se encontra interposta. Esse *efeito de borda* é associado a *metamorfose estrutural*.

A aplicabilidade do coeficiente de correlação, para modelagem do efeito de borda, é bastante questionável, à medida em que a metamorfose estrutural compromete,

de maneira significativa, uma das estruturas e que a possibilidade de usar mais de um modelo de covariância é um dos grandes méritos do método.

Como são grandes as possibilidades das combinações entre as variáveis de modelagem utilizadas no Plurigaussiano Truncado, podem existir situações onde a variação do coeficiente de correlação possa contribuir de forma significativa para a modelagem das formas geológicas.

5. SIMULAÇÃO PLURIGAUSSIANA TRUNCADA COM CONDICIONAMENTO

Objetivo desse capítulo é testar a eficiência do Plurigaussiano Truncado Condicional em situações nas quais a geometria das fácies segue padrões estruturais completamente distintos, umas das outras.

Para atingir esse objetivo, recorreu-se a uma imagem de treino 2D, obtida a partir da interpretação geológica da subzona inferior Aux Vases, (WEIMER et al.; 1982). Para a interpretação geológica, o autor usou os dados dos poços perfurados no campo petrolífero de Rural Hill em Illinois (USA).

Dessa imagem foram retirados conjuntos de amostras, nos quais foram feitas análises variográficas, estimativas das proporções das fácies. Também, essas amostras foram usados para condicionar as simulações.

5.1 RESERVATÓRIOS AUX VASES, CAMPO DE RURAL HILL

Segundo WEIMER et al. (1982) os reservatórios petrolíferos pertencentes a Zona Aux Vases (Mississippian) no campo de Rural Hill (Illinois) constituem-se de arenitos de dois tipos genéticos: **cordões litorâneos** e **canais de maré**.

Essa zona é sotoposta e sobreposta por calcários oolíticos marinhos de águas rasas.

Os arenitos de cordões litorâneos foram depositados segundo o *trend* regional de Aux Vases (NE/SW) e os arenitos dos canais de maré são associados às planícies de maré e ocorrem como estruturas alongadas e confinadas, cortando os cordões litorâneos.

Os diferentes tipos de arenitos têm propriedades petrofísicas diferenciadas em função das texturas, estruturas deposicionais e cimentação.

A identificação de cada tipo é importante para a previsão das tendências deposicionais visando subsidiar futuras localções de poços e fazer previsões do comportamento dinâmico dos fluidos.

5.1.1 LOCALIZAÇÃO E CONTROLE DOS DADOS

O Campo de Rural Hill localiza-se na parte sudoeste da Bacia de Illinois (Figura 5.1). A Zona Aux Vases ocorre a uma profundidade média de 960 metros com uma espessura média de 12 m.

A Formação Aux Vases é um membro basal da Série *Upper Mississippian Chester*.

A interpretação geológica, segundo WEIMER et al. (1982), foi baseada na análise dos perfis elétricos de 167 poços e 49 intervalos testemunhados nessa zona.

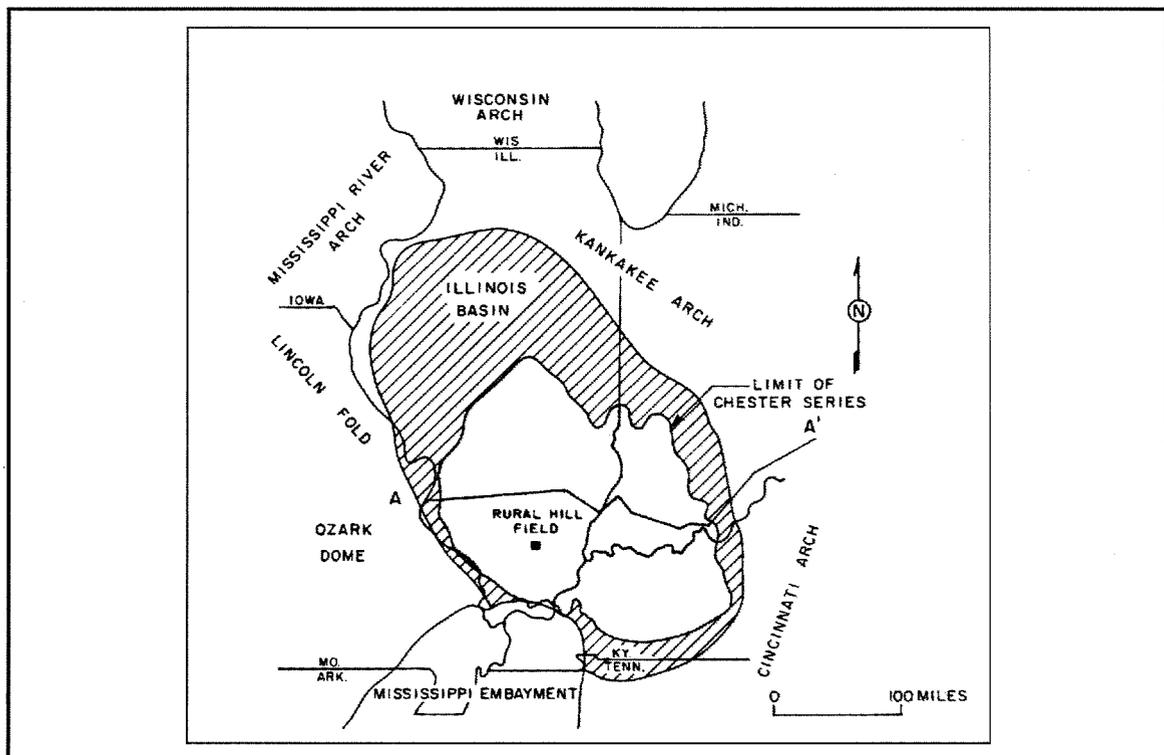


Figura 5.1. Mapa de localização do Campo de Rural Hill, Illinois (USA) (WIMER et al., 1982).

5.1.2 CARACTERÍSTICAS DOS RESERVATÓRIOS ARENOSOS

Segundo WEIMER et al. (1982), tanto os arenitos dos canais de maré quanto os dos cordões litorâneos exibem características similares como: maturidade textural, são ortoquartzíticos, tipicamente limpos, bem classificados, teor de argilas menor que 1%, conteúdo fossilífero de 2 a 3% e pequena quantidade de cimentação calcífera concentrada nas partes mais fossilíferas.

A diferenciação entre essas duas fácies⁵ é feita com base nas estruturas sedimentares, no tamanho médio dos grãos e na cimentação.

Os arenitos dos cordões litorâneos apresentam laminação horizontal a sub-horizontal e granulação fina. Ocorre invariavelmente cimentação por sílica, o que não acontece nos canais de maré, essa cimentação causa um pequeno aumento no tamanho original dos grãos.

Os arenitos dos canais de maré têm laminação cruzada e granulação muito fina.

5.1.3 CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS E FEIÇÕES DE PERFIS

Na Figura 5.2 pode ser observado que a cimentação por sílica reduziu a porosidade e a permeabilidade dos arenitos dos cordões litorâneos para os quais a análise dos testemunhos apontou uma porosidade média de 15% e uma permeabilidade ao ar que raramente ultrapassa 100 mD.

Para os arenitos dos canais de maré a porosidade média esta estimada em 21% e a permeabilidade tem variações que chegam a uma centena de milidarcys.

Devido a variação no tamanho dos grãos, a redução da porosidade e a redução da permeabilidade, as assinaturas dos perfis elétricos nas duas fácies arenosas são suficientemente diferentes para permitir distingui-las nos poços não testemunhados, tornando possível mapear suas distribuições laterais.

⁵Originalmente, Weimer não usou o termo fácies, mas o mesmo se aplica perfeitamente ao contexto e será usado para ligar a interpretação geológica à imagem usada para treino da simulação condicional.

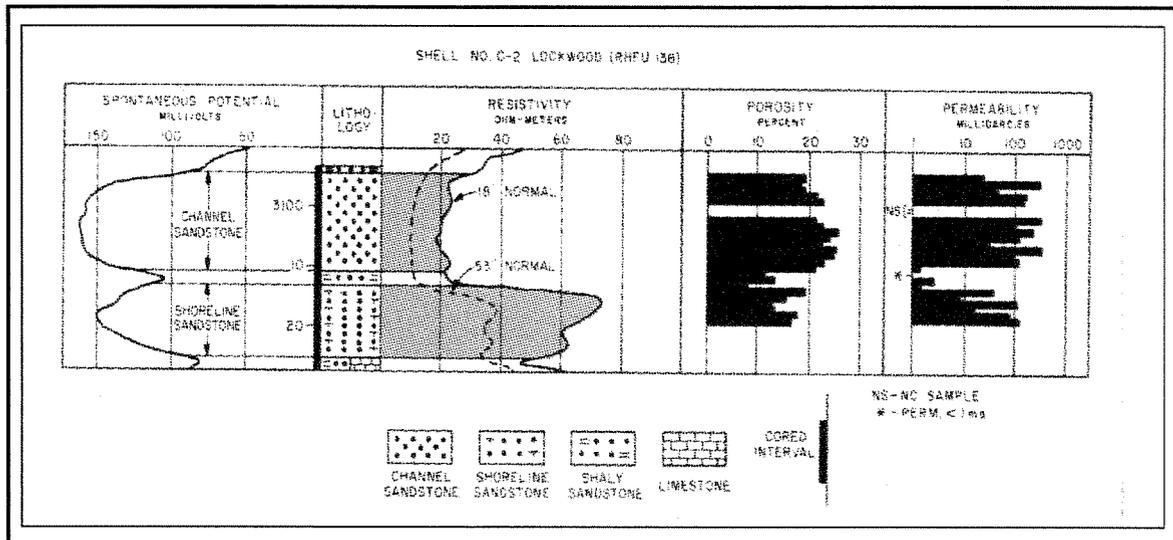


Figura 5.2. Características petrofísicas e respostas dos perfis elétricos para os reservatórios da Zona Aux Vases (WIMER et al., 1982).

5.1.4 ZONEAMENTO DOS RESERVATÓRIOS

Segundo WEIMER et al. (1982) a Zona Aux Vases é subdividida em outras duas subzonas: inferior e superior. Na Figura 5.3 pode-se observar uma seção estratigráfica com as duas subzonas.

A subzona inferior é composta por depósitos de cordões litorâneos e arenitos de canais de maré enquanto que a subzona superior é compostas por depósitos de canais de maré separados lateralmente (algumas vezes verticalmente) por depósitos impermeáveis de planícies de maré e depósitos de pântanos.

Em alguns poços, as subzonas são separadas verticalmente por camadas impermeáveis de folhelhos siltosos, arenitos cimentados ou calcários.

A correlação entre os poços foi feita por WEIMER et al. (1982), usando como datum um calcário lamoso pertencente ao calcário Ste. Genevieve.

5.1.5 DISTRIBUIÇÃO DAS FÁCIES

Fácies de Arenitos de Cordões Litorâneos

A presença de sedimentos de granulometria fina, folhelhos, arenitos laminados e com marcas de ondas, siltitos, próximos ao topo e a base dos depósitos indicam um ciclo de crescimento de energia em direção ao meio da seqüência e um decréscimo em direção ao topo.

Os arenitos dos cordões litorâneos ocorrem somente na subzona inferior de Aux Vases. A espessura máxima dos arenitos permeáveis, pertencentes a essa fácies é 6,1 metros. A distribuição espacial e as espessuras estão ilustradas na Figura 5.4.

Fácies de Canais de Marés

Na subzona inferior, o entrelaçamento dos depósitos de canais de maré e os de cordões litorâneos indicam contemporaneidade dos eventos deposicionais.

A subzona superior é composta por canais alongados e confinados, separados lateralmente por depósitos de planícies de maré e pântanos.

A espessura máxima de arenito (subzona inferior e superior combinadas) é 12,2 metros.

Segundo a interpretação de WIMER et al. (1982) a superposição dos depósitos de planícies de maré sobre os depósitos de cordões litorâneos indicam uma seqüência regressiva seguida por uma transgressão.

Fácies de Planícies de Marés e Depósitos de Pântanos

São depósitos interlaminados de arenitos muito finos, siltitos e argilitos, caracterizando um *fine upward* com aumento do teor de argilas.

Na parte superior, ocorre oxidação dos sedimentos e marcas de exposição subaérea. Esses depósitos são interpretados como provenientes de planícies de maré gradando em direção ao topo para depósitos de pântanos.

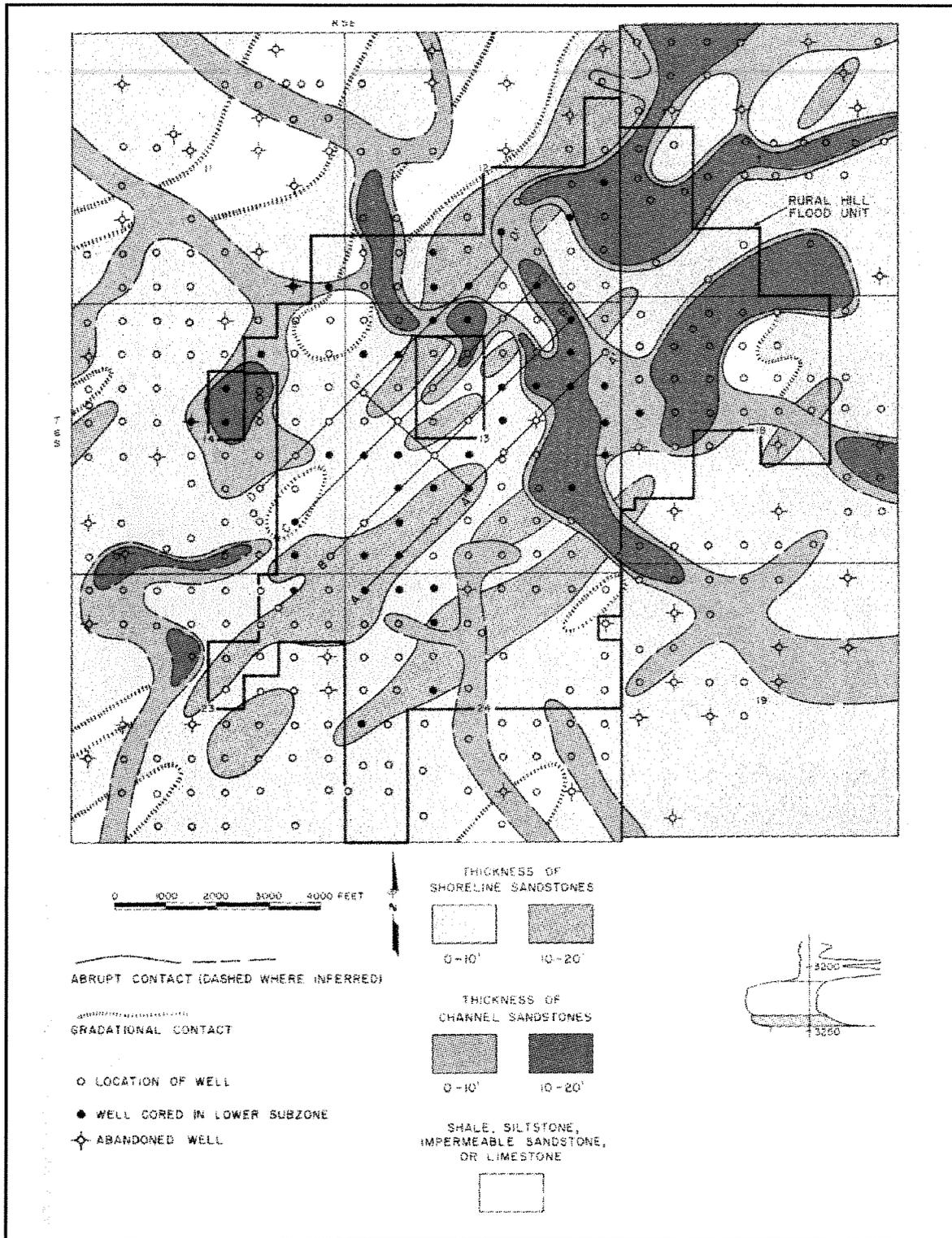


Figura 5.4 . Mapa ilustrando a distribuição e a espessura dos arenitos dos cordões litorâneos e dos canais de maré na subzona inferior de Aux Vases (WIMER et al., 1982).

O conteúdo fossilífero que ocorre nos canais de maré e cordões litorâneos também ocorre na parte inferior dos depósitos de planície de maré, diminuindo em direção ao topo e totalmente ausente nos depósitos de pântanos.

5.2 IMAGEM DE TREINAMENTO

Partindo-se de uma imagem é possível conhecer os parâmetros da população, eliminando-se dessa forma a necessidade das estimativas através de amostras que, em casos reais, dificultam a avaliação de desempenho do método de simulação, quando o objetivo for avaliar o método.

Apesar da imagem de treinamento ser completamente conhecida, não é exatamente um modelo sintético, nem tampouco uma foto de afloramento. Trata-se de uma interpretação geológica, baseada em poços de petróleo, na qual especialistas usaram todo o conhecimento acumulado em suas atividades profissionais para chegar a uma interpretação geológica, segundo um modelo coerente com o conhecimento da época.

Baseado nesse ponto de vista, pode-se classificar essa metodologia, de obtenção de parâmetros em modelos interpretados, como uma situação intermediária entre o estudos de afloramentos e a obtenção de parâmetros em amostras esparsas (poços). Mesmo recorrendo-se a afloramentos para a estimativa de parâmetros, a dificuldade de se obter dados confiáveis no plano x/y é grande e a possibilidade de se usar a interpretação geológica para tal deve ser considerada.

A imagem de treinamento (Figura 5.5), trata-se da digitalização da interpretação geológica de WEIMER et al. (1982) da subzona inferior de Aux Vases (Figura 5.4) A imagem cobre uma área de 4,9 km na direção E/W e 4,8 km N/S.

Nessa imagem digital padronizou-se as cores, usando-se um editor de imagens, dessa forma conseguiu-se atribuir uma cor a cada fácies a ser simulada.

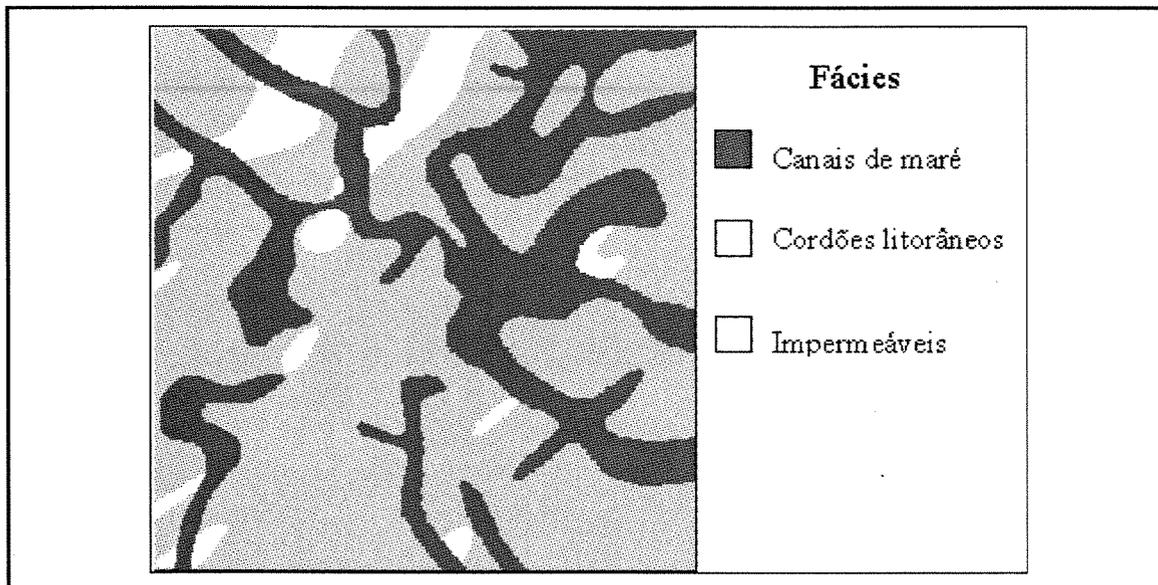


Figura 5.5 . Interpretação geológica da subzona inferior Aux Vases do campo petrolífero de Rural Hill, modificada de WEIMER et al.(1982).

Seguindo-se a interpretação geológica de WEIMER et al. (1982), foram adotadas três fácies a serem simuladas: fácies de canais de maré, fácies de cordões litorâneos e fácies impermeáveis.

A fácies de canais de maré cortam preferencialmente o trend NE/SW de forma ortogonal. Na direção NW/SE os canais são mais alongados e confinados, também estão presentes canais na direção NE/SW com formas, em geral, mais isotrópicas que as anteriores. A contribuição dessa fácies é 31% para as proporções globais.

A fácies mais contínua é a dos cordões litorâneos, a qual tem distribuição paralela ao *trend* regional NE/SW. É a fácies reservatório dominante, ocupando 61% em área das proporções globais.

Associada a essa fácies, seguindo o mesmo *trend*, ocorre a fácies impermeável, composta por siltitos, folhelhos, arenitos impermeáveis e calcários. Essa fácies ocupa 8% do global.

Usando-se uma rotina desenvolvida em IDL foi possível transformar a imagem digital em uma matriz de pontos, com coordenadas x/y e um valor numérico para cada

fácies. Dessa matriz de pontos (imagem de treino) foram retirados três conjuntos de amostras com malhas diferentes, para diferentes finalidades, as quais foram transformadas em indicatrizes das fácies.

Malhas das amostragens:

- ◆ malha 50 x 50 m: obtenção de parâmetros geoestatísticos;
- ◆ malha 200 x 200 m: estimativa das proporções das fácies;
- ◆ malha 400 x 400 m: amostras para condicionar a simulação.

A seleção dessa imagem não se deu ao acaso, baseou-se na forma geométrica de como as fácies estão estruturadas, pois essas ocorrem praticamente ortogonais e com forte anisotropia. Essa situação encaixa-se perfeitamente na proposta do Plurigaussiano Truncado de representar adequadamente conjuntos de fácies com estruturas bastante diferenciadas.

5.3 PREPARAÇÃO DOS DADOS E ESTRATÉGIA DE SIMULAÇÃO

Conhecendo-se o modelo geológico e a geometria das fácies, decidiu-se adotar como estratégia dos truncamentos o “modelo erosivo à três fácies”, cuja representação esquemática pode ser observada na. Figura 5.6.

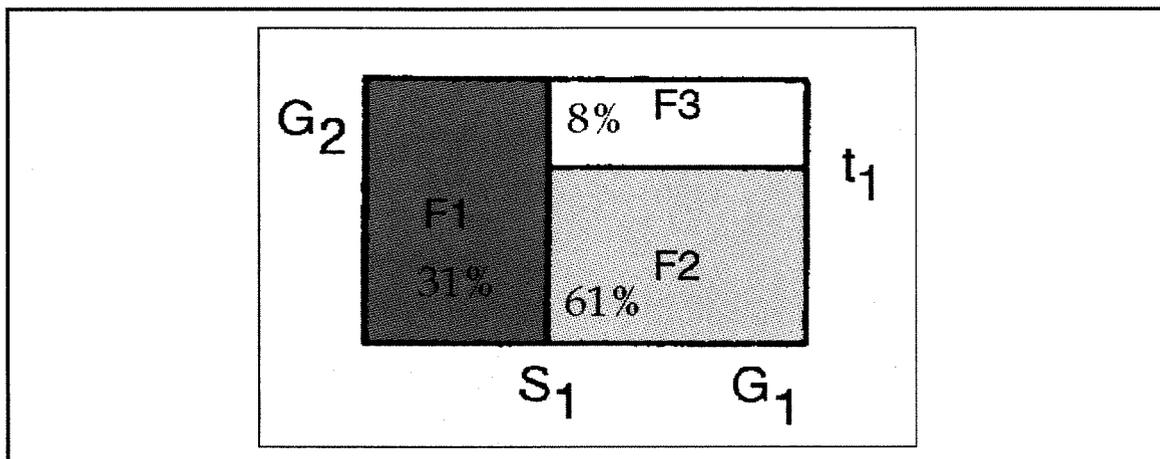


Figura 5.6 . Estratégia dos truncamentos para o modelo erosivo à três fácies.

A fácies F_1 (fácies truncante) foi atribuída à fácies dos canais de maré, a fácies F_2 corresponde às areias dos cordões litorâneos e a F_3 corresponde à fácies impermeável.

Definidas as relações entre as fácies, o próximo passo é investigar os parâmetros estatísticos da imagem. Para isso usou-se uma malha de amostragem de 50 x 50 m de lado num total de 10.000 amostras.

Em uma etapa seguinte, gerou-se uma amostra da imagem, em malha regular de 400 x 400 m de lado (144 amostras). Essa malha corresponde aproximadamente à malha de perfuração de poços para a exploração de óleo, no estágio de recuperação primária de um campo petrolífero. Esse conjunto de amostras é usado como informação condicionante à simulação das FA gaussianas. Um mapa base dessas amostras pode ser observado na Figura 5.7.

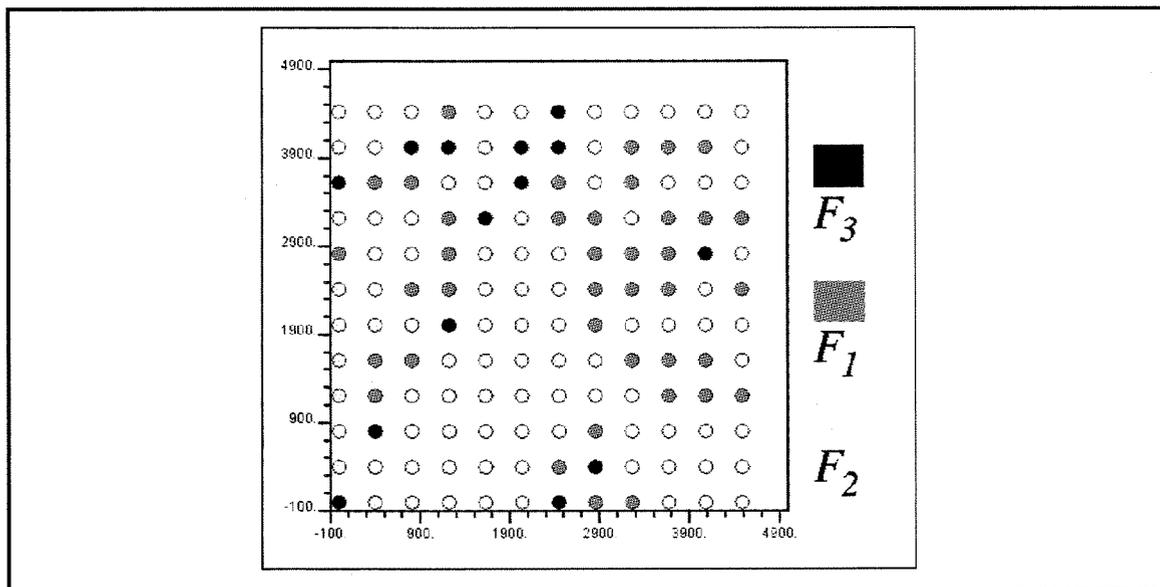


Figura 5.7 . Mapa base das 144 amostras usadas para condicionar a simulação das FA gaussianas. Amostras coletadas em malha de 400 x 400 m de lado.

As proporções foram estimadas a partir de uma malha amostrada com 200 x 200 m de lado. Essa malha teve a finalidade de representar uma informação indireta, amostrada de forma mais densa que a informação condicionante.

5.4 MODELAGEM ESTRUTURAL

Para a modelagem estrutural foram usadas amostras retiradas da malha de 50 x 50 m de lado, sendo que essas foram separadas em dois subconjuntos, conforme a estratégia dos truncamentos, discutido no item anterior.

◆ - fácies F_1 e \tilde{n}_F ;

◆ - fácies F_2 e F_3 .

No primeiro subconjunto as fácies F_2 e F_3 foram transformadas na fácies \tilde{n}_F e naquele último, a fácies F_1 foi retirada pois essa não traz nenhuma informação a respeito de F_2 ou F_3 .

Cada subconjunto sofreu transformação gaussiana usando-se a rotina *trans* (GSLIB), a qual transformou o conjunto de variáveis categóricas em um conjunto contínuo com distribuição pseudogaussiana.

Para o subconjunto das fácies F_1 e \tilde{n}_F chegou-se às seguintes proporções:

◆ - $F_1 = 31\%$;

◆ - $\tilde{n}_F = 69\%$.

Os variogramas (azimute 45° e 135°) da indicatriz da fácies de canal (F_1) estão ilustrados na Figura 5.8 e o respectivo ajuste na Tabela 5.1.

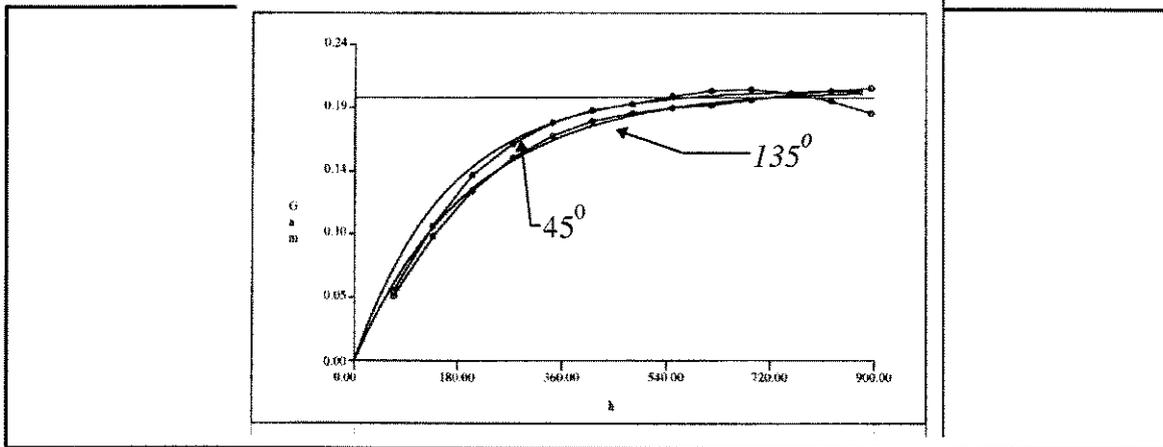


Figura 5.8 . Variograma 2D da fácies de canal (F_1). A linha contínua representa o variograma teórico e a linha com pontos o variograma experimental.

Fácies	Modelo Variográfico	Pepita	Alcance (m)	Patamar	Razão de Anisotropia	Direção Principal
F_1	exponencial	0,0	205	0,2	0,8	135°

Tabela 5.1 . Modelo estrutural da fácies F_1 englobando toda a área.

Segundo os variogramas da Figura 5.8, a fácies F_1 tem uma geometria com anisotropia baixa. No entanto, observando-se a Figura 5.5, é possível notar que a direção de maior continuidade dos canais é NW/SE, mas na direção NE/SW também ocorrem canais, esses com menor continuidade e uma anisotropia moderada. A falta de homogeneidade nas direções dos canais causou uma contaminação da razão de anisotropia e redução do alcance da estrutura.

Nesse momento é necessário fazer uma opção pelo modelo, já que a escolha de uma estrutura com baixa anisotropia e pequeno alcance seria inconsistente com a realidade geológica observada na imagem. O resultado da simulação usando-se uma estrutura com essas características tenderia a modelar formas circulares, bem diferentes da estruturação dos canais.

Em função disso decidiu-se por sacrificar os canais de direção NE/SW e trabalhar com um modelo que ressalte os de direção NW/SE.

Para retirar o efeito estrutural dos canais de direção NE/SW modelou-se os variogramas dos canais de direção NW/SE, na metade inferior da área (Figura 5.5), onde foi possível encontrar um modelo estrutural adequado à geometria dos canais.

Tendo-se obtido o modelo variográfico da indicatriz, foi executado a inversão desse variograma para o variograma da variável contínua com distribuição gaussiana (ver item 2.3). As bases teóricas dessa transformação estão descritas em GALLI et al. (1994).

Deve-se dar preferência à modelagem dos variogramas transformados, ao contrário da sugestão de XU (1993) onde o mesmo aconselha modelar o variograma a partir das indicatrizes das fácies transformadas para a distribuição pseudogaussiana.

Na transformação das indicatrizes em um conjunto pseudogaussiano é gerada uma pepita bastante significativa a qual é somada a estruturação da distribuição transformada, além do que, o variograma obtido da transformação do variograma da indicatriz é matematicamente coerente com as proporções das fácies.

Os variogramas da indicatriz de F_1 e a transformada do ajuste teórico, estão ilustrados na Figura 5.9. Os valores dos ajustes teóricos dos respectivos variogramas estão representados na Tabela 5.2.

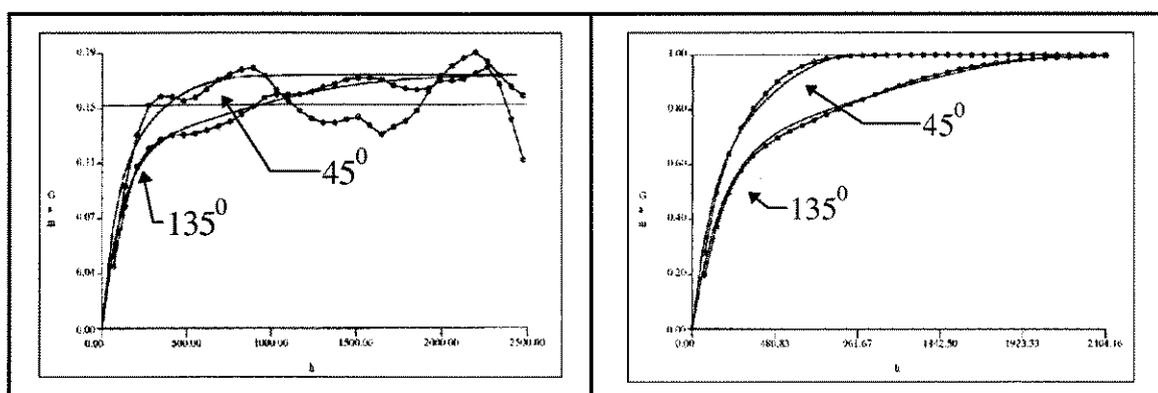


Figura 5.9 . Variogramas da fácies F_1 (canais NW/SE).Linha com pontos: variograma experimental; linha contínua: ajuste teórico. À esquerda: os variogramas da indicatriz, à direita: a transformada do ajuste para a distribuição gaussiana correspondente.

Fácies	Nº da Estrutura	Modelo	Pepita	Alcance (m)	Patamar	Razão de Anisotropia	Direção Principal
F_1 Indicatriz	1º	Exponencial	0,0	124	0,13	0,71	135º
	2º	Gaussiano	–	1114	0,04	0,38	135º
F_1 Transfor.	1º	Exponencial	0,0	180	0,73	0,66	135º
	2º	Gaussiano	–	1430	0,30	0,40	135º

Tabela 5.2 . Ajustes teóricos dos variogramas da indicatriz da fácies F_1 e do modelo transformado.

Em uma próxima etapa trabalhou-se com o espaço complementar de F_1 ($F_2 \cup F_3$). Para a modelagem dessas fácies recorreu-se novamente ao conjunto de amostras com malha 50 x 50 m, excluiu-se F_1 .

As proporções relativas a esse subespaço são:

◆ - $F_2 = 89,2\%$;

◆ - $F_3 = 10,8\%$.

Os variogramas experimentais da indicatriz de F_2 e a transformada do ajuste teórico estão representados na Figura 5.10. Os valores dos ajustes teóricos estão representados na Tabela 5.3.

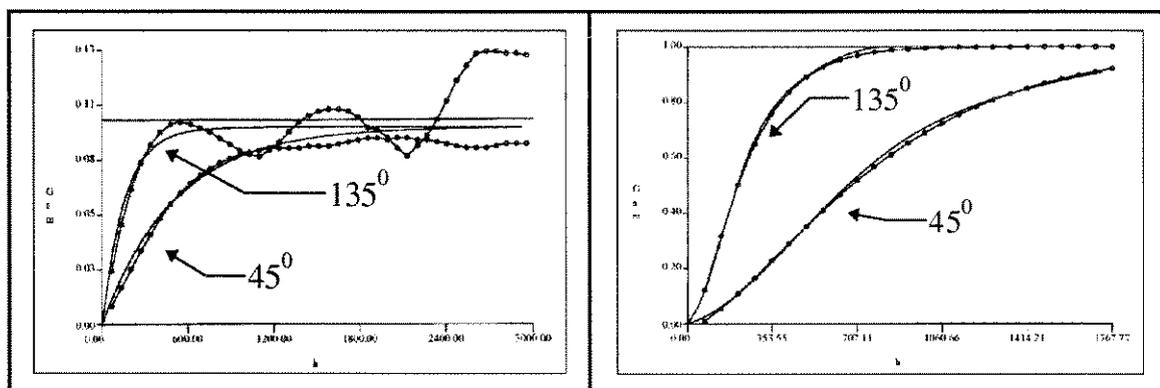


Figura 5.10 . Variogramas da fácies F_2 (linha com pontos: variograma experimental; linha contínua: ajuste teórico). À esquerda: variogramas da indicatriz de F_2 ; à direita: a transformada do ajuste para a distribuição gaussiana correspondente.

Fácies	Nº da Estrutura	Modelo	Pepita	Alcance (m)	Patamar	Razão de Anisotropia	Direção Principal
F_2 Indicatriz	1º	Exponencial	0,0	507	0,096	0,31	45º
F_2 Transfor.	1º	Gaussiano	0,0	655	0,50	0,32	45º
	2º	Esférico	—	2747	0,50	0,30	45º

Tabela 5.3 . Ajustes teóricos do variograma da indicatriz da fácies F_2 e do modelo transformado.

5.5 SIMULAÇÃO COM TRUNCAMENTOS ESTACIONÁRIOS

Usando o algoritmo seqüencial gaussiano (SGSIM) cada subconjunto ($F_1 \cup \tilde{n}_F; F_2 \cup F_3$) foi simulado independentemente, segundo uma malha de 98 x 98 celas com a dimensão de 50 x 50 m por cela. Uma das realizações, relativa a cada FA gaussiana simulada, pode ser vista na Figura 5.11.

Em uma etapa seguinte foram truncadas, de forma estacionária, as FA gaussianas simuladas para serem recuperadas as fácies.

Executou-se o truncamento estacionário de cada FA gaussiana, relativo às proporções globais de cada subconjunto. O resultado desses truncamentos podem ser observados na Figura 5.12 e Figura 5.13. A composição final da imagem resultado, combinando *pixel a pixel* as duas imagens anteriores, está ilustrada na Figura 5.14.

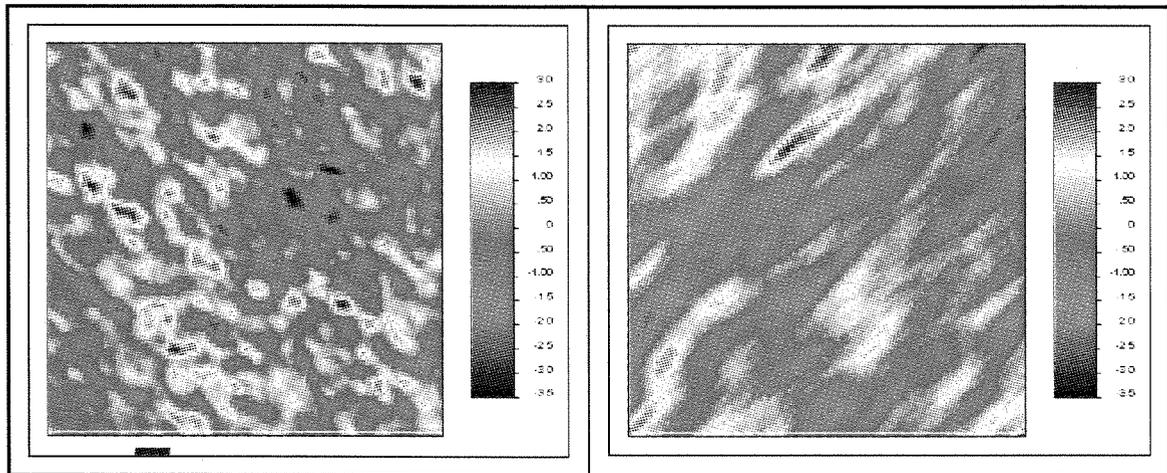


Figura 5.11 . Gaussianas simuladas seqüencialmente. A figura da esquerda corresponde ao subconjunto $F_1 \cup \tilde{n}_F_1$ e a da direita ao subconjunto $F_2 \cup F_3$.

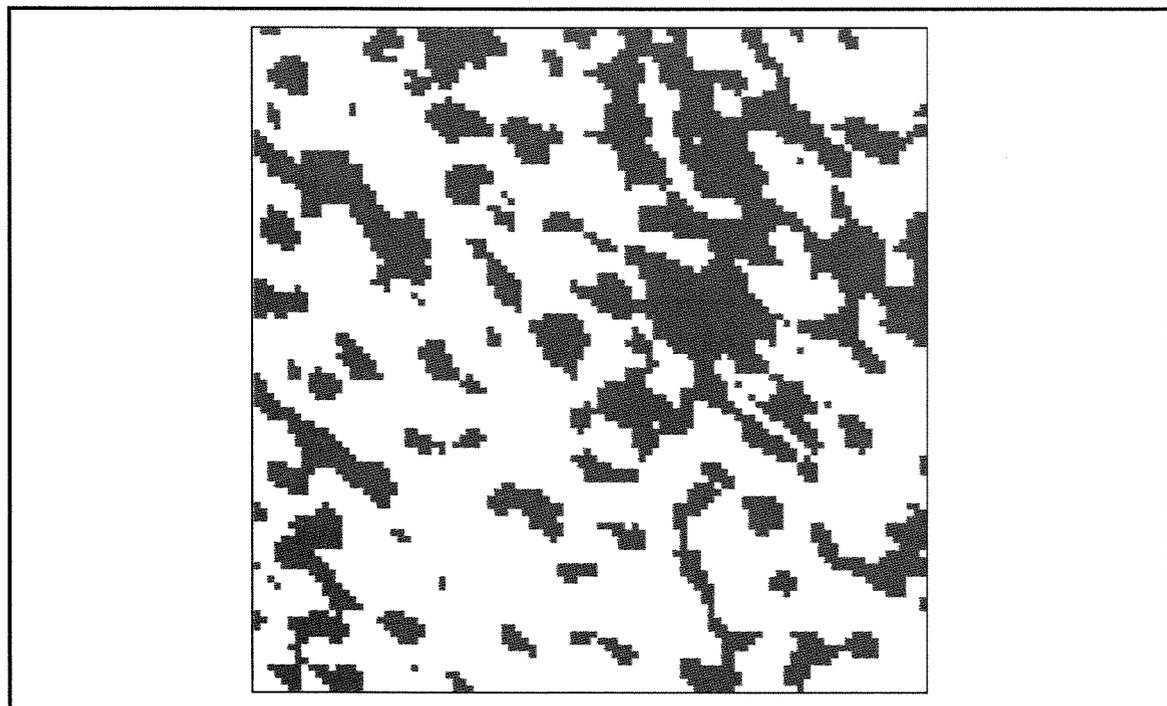


Figura 5.12 . Imagem resultante do truncamento estacionário para o subconjunto $F_1 \cup \tilde{n}_F_1$. Proporções utilizadas 31 e 69% respectivamente.

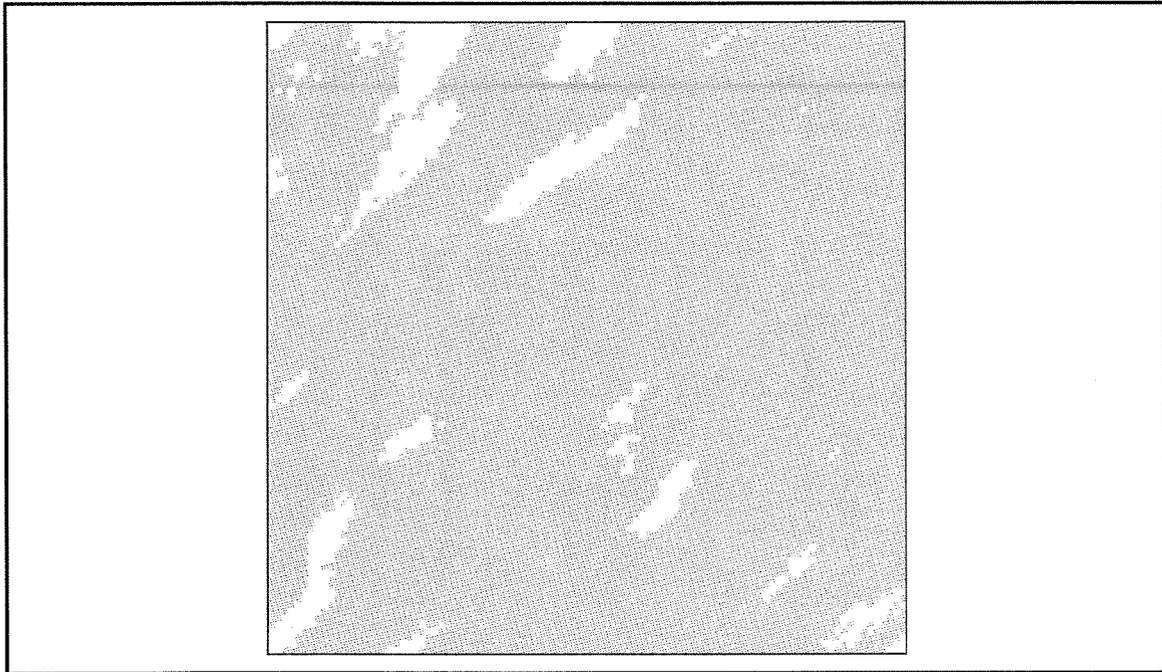


Figura 5.13 . Imagem resultante do truncamento estacionário para o subconjunto $F_2 \cup F_3$ (F_3 de cor clara). Proporções utilizadas 89,2 e 10,8% respectivamente.

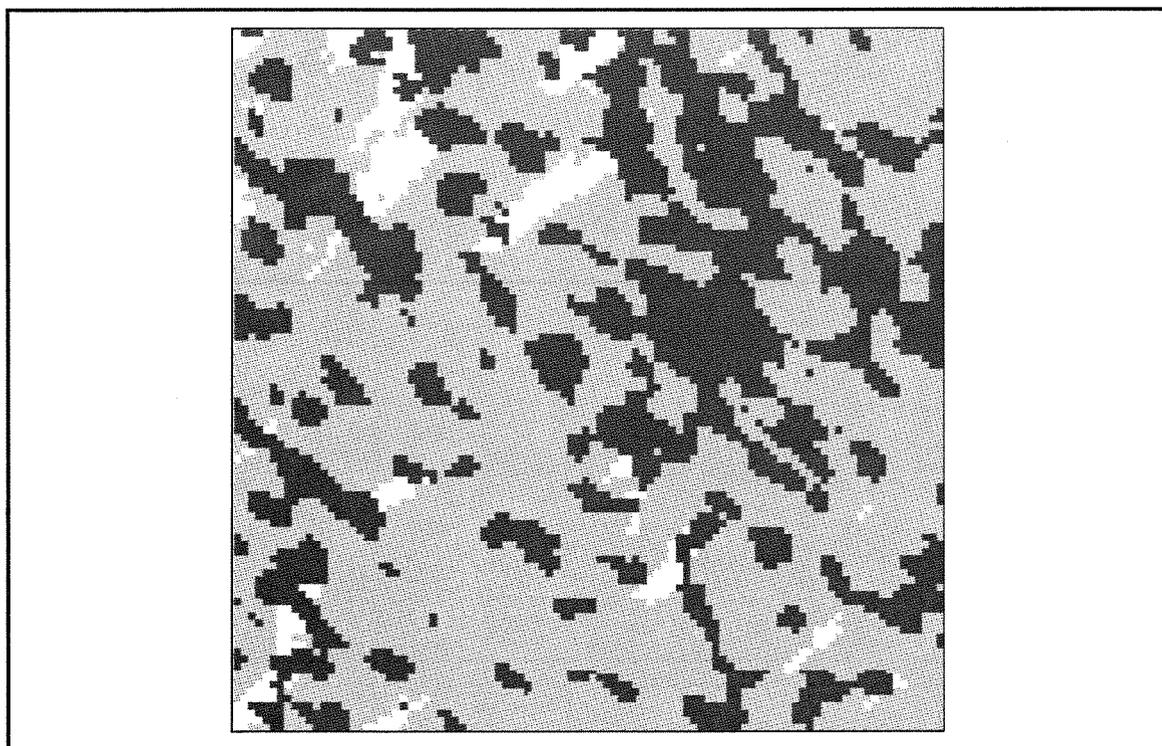


Figura 5.14 . Imagem final, resultante da composição das duas anteriores.

5.6 SIMULAÇÃO COM TRUNCAMENTOS NÃO-ESTACIONÁRIOS

Seguindo a proposta de XU; JOURNAL (1993) executou-se os truncamentos não-estacionários, baseados nas estimativas pontuais das proporções das fácies.

Usando-se como dado condicionante uma amostra em malha regular com 200 x 200 m de lado, retirada da imagem de treinamento, estimou-se a probabilidade da ocorrência de cada fácies em cada ponto a ser simulado. Essa amostragem, com o dobro da densidade em relação à utilizada para condicionar a simulação da gaussiana, teve a finalidade de simular a introdução de informações indiretas ao modelo com uma densidade maior que as amostras condicionantes (400 x 400 m).

Como as proporções serão tratadas de forma não estacionária, essas serão estimadas por IK, rotina que estava incorporada ao programa GTSIM⁶.

Foram utilizadas nessa simulação as mesmas FA gaussianas geradas no item anterior e para o cálculo das probabilidades utilizou-se IK cujos parâmetros estão listados na Tabela 5.4.

Fácies	Nº da Estrutura	Modelo	Pepita	Alcance (m)	Patamar	Razão de Anisotropia	Direção Principal
F_1	1º	Exponencial	0,50	500	0,50	0,4	135º
F_2	1º	Exponencial	0,50	500	0,50	0,32	45º

Tabela 5.4 . Parâmetros utilizados na estimativa das probabilidades por IK.

O propósito de usar um efeito pepita de 50% foi provocar uma homogeneização nas estimativas das probabilidades, já que a intenção é simular uma situação onde as probabilidades, embora vindas de uma densidade de amostragem maior que as condicionantes da simulação, teriam um suporte maior que essas, gerando estruturas

⁶ GTSIM: programa para simulação estocástica usando GT, desenvolvido por Xu e Journal (1993). Foi incluído na GSLIB 2.0 com supressão das rotinas para o cálculo das probabilidades e transformações gaussianas.

mais suavizadas. Os valores das probabilidades de ocorrência das fácies estimadas por IK, podem ser observadas na Figura 5.15 e Figura 5.16.

Na seqüência das figuras (Figura 5.17 à Figura 5.19) estão ilustrados os resultados dos truncamentos para os subconjuntos $F_1 \cup \tilde{n}_-F_1$ e $F_2 \cup F_3$, assim como a composição da imagem final, em função das anteriores.

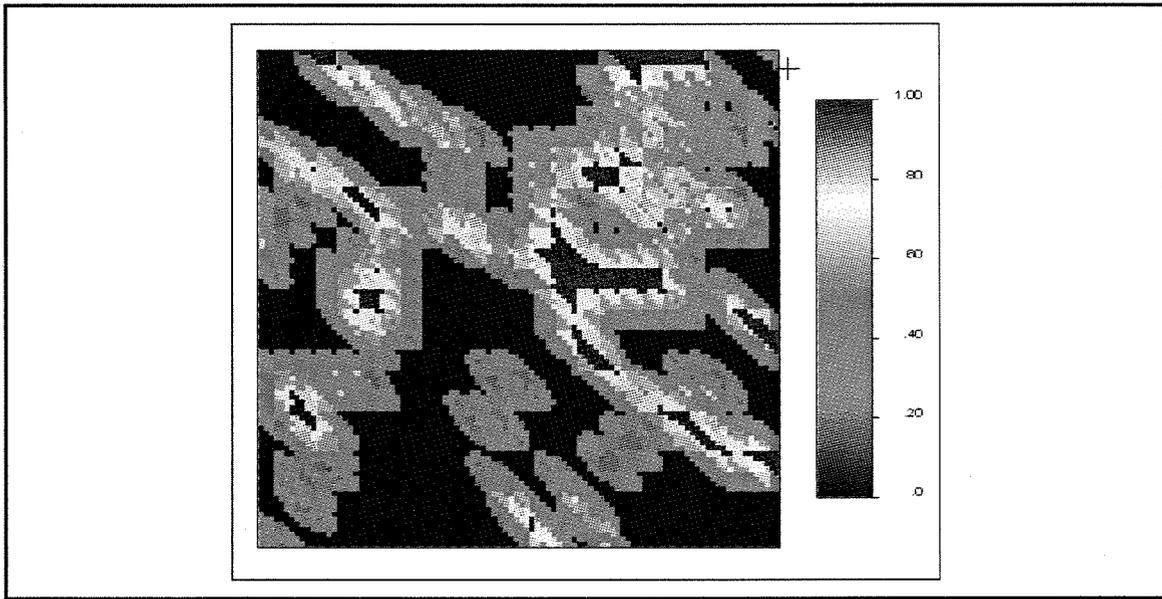


Figura 5.15 . Probabilidades para a fácies F_1 (canal) estimadas por IK. Essas probabilidades serão utilizadas para o truncamento da primeira FA gaussiana e recuperação do subconjunto de fácies $F_1 \cup \tilde{n}_-F_1$.

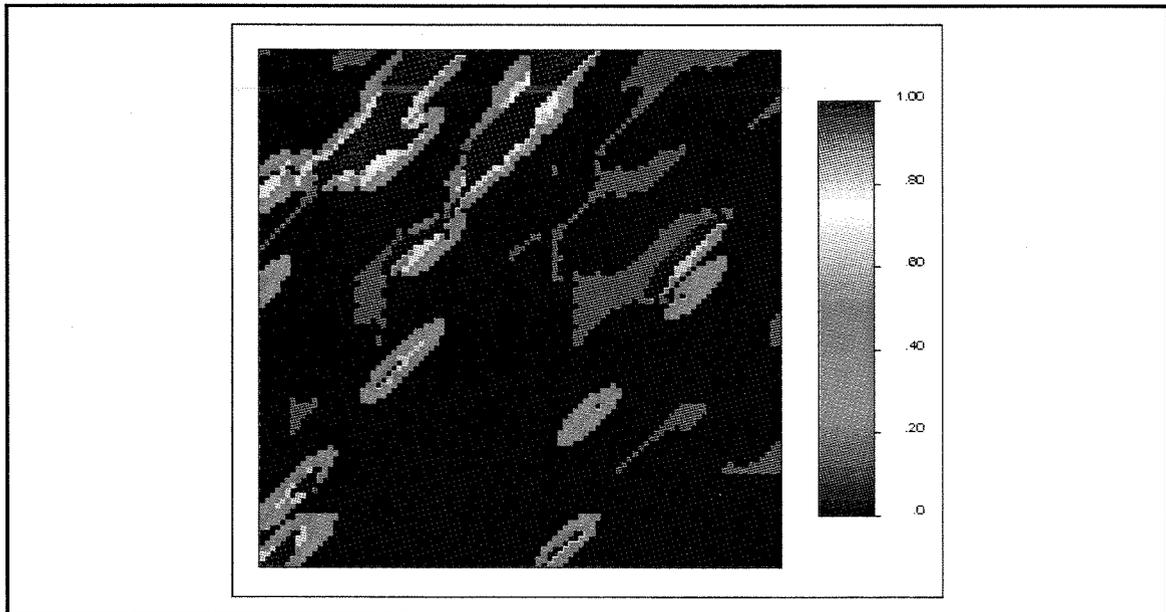


Figura 5.16 .Probabilidades para a fácies F_2 (areias) estimadas por IK. Essas probabilidades serão utilizadas para o truncamento da segunda FA gaussiana e recuperação do subconjunto de fácies $F_2 \cup F_3$.

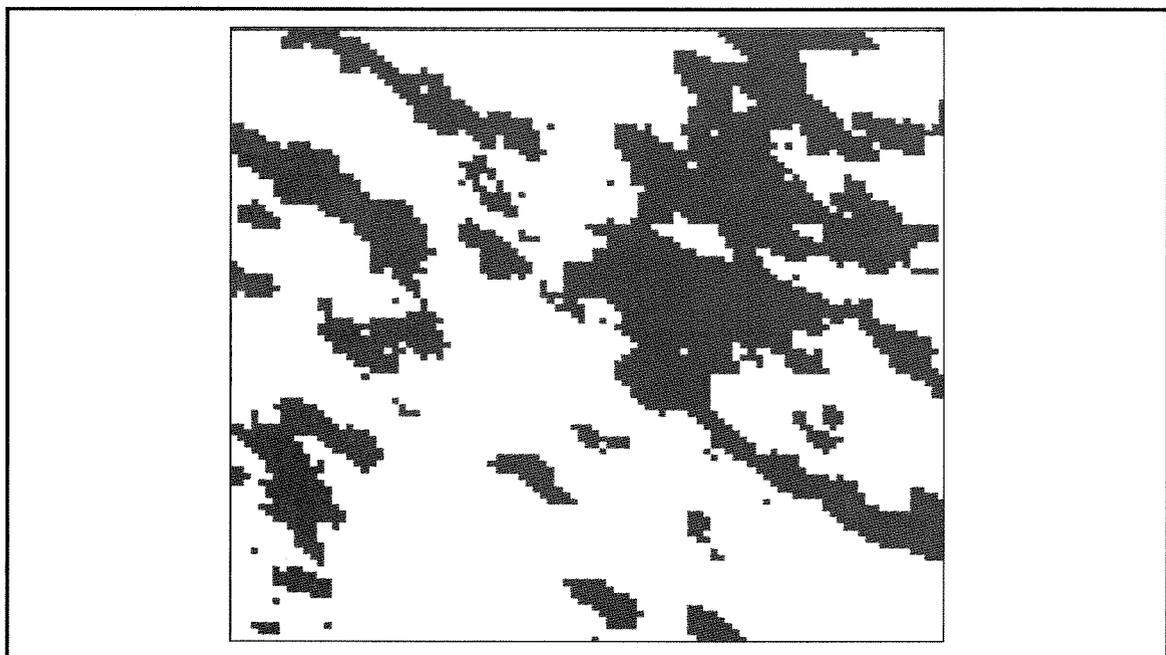


Figura 5.17 . Resultado do truncamento não-estacionário sobre a primeira FA gaussiana tendo como resultado as fácies: de canais (F_1) e seu complemento (\tilde{n}_{F_1}).

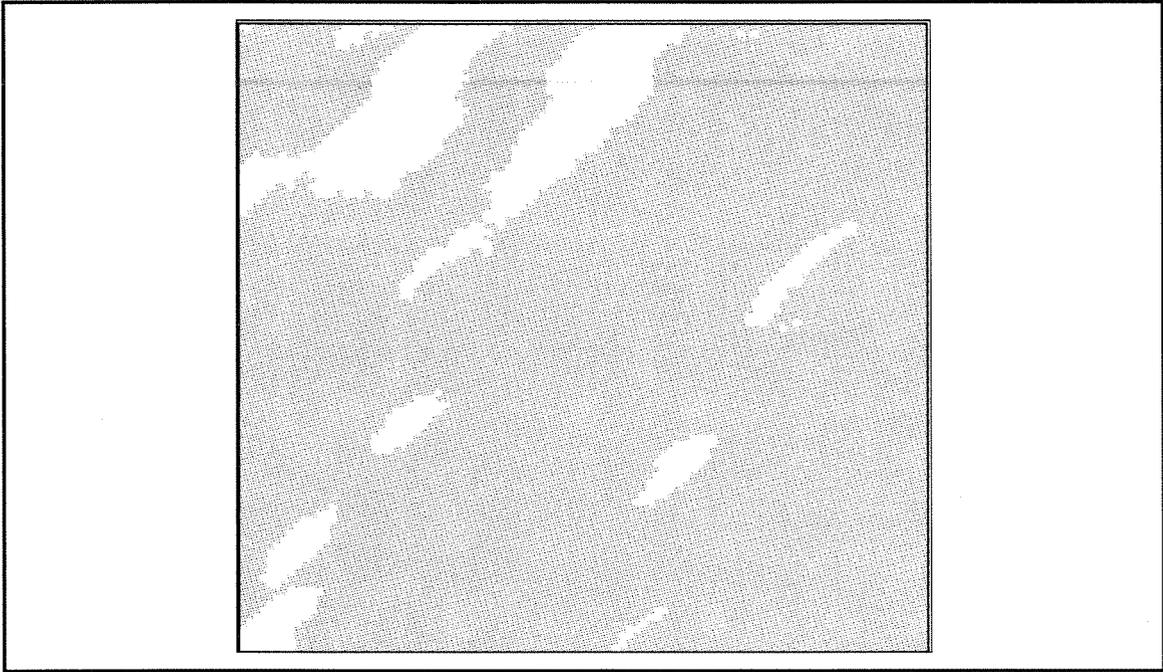


Figura 5.18 . Resultado do truncamento não-estacionário sobre a segunda FA gaussiana tendo como resultado as fácies: cordões litorâneos(F_2) e a impermeável (F_3).

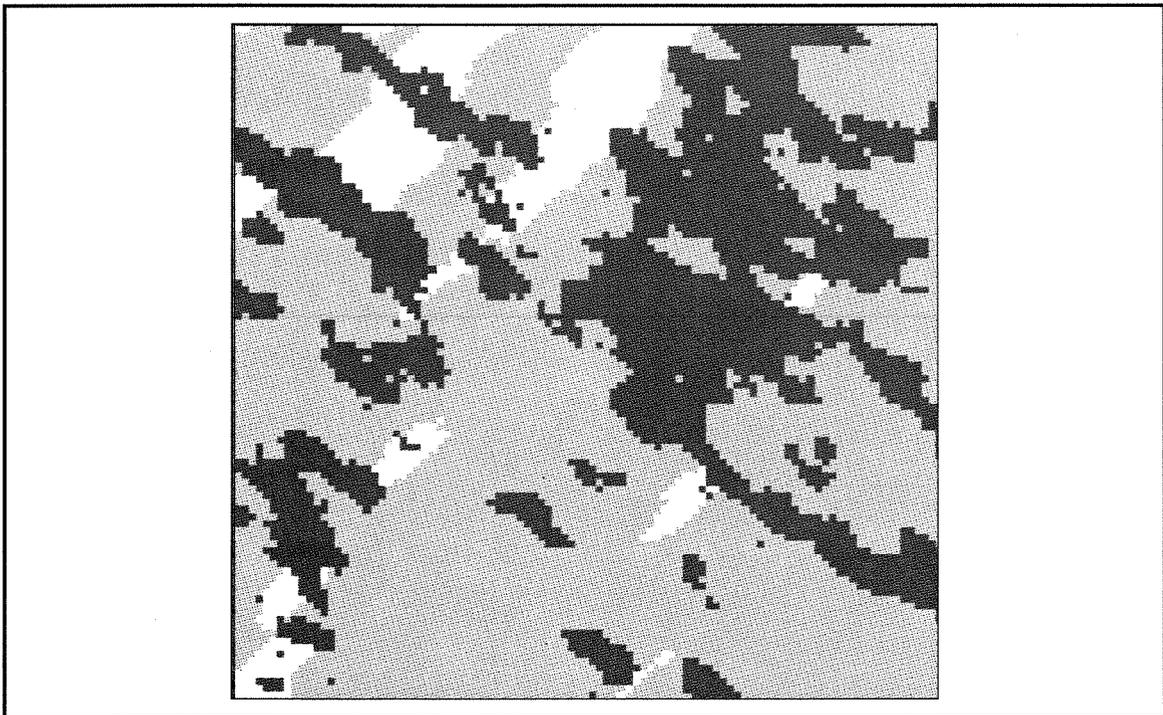


Figura 5.19 . Imagem final, composta a partir das duas imagens anteriores.

5.7 COMPARANDO RESULTADOS

Comparando-se a imagem final, obtida por truncamentos estacionários (Figura 5.14), com a imagem obtida por truncamentos não-estacionários (Figura 5.19), pode-se observar que nesta a modelagem estrutural das fácies foi significativamente mais próxima da imagem de treino do que naquela outra.

Apesar das proporções globais das fácies obtidas nas simulações serem muito semelhantes, nos truncamentos não-estacionários ocorreram mobilizações das fácies para os pontos de maior probabilidade, principalmente para as fácies de canal (F_1), aumentando em muito a conectividade do sistema.

As proporções globais das fácies, recuperadas nos truncamentos estacionários (item 5.5) e nos truncamentos não-estacionários (item 5.6), podem ser comparadas com as proporções da imagem de treino na Tabela 5.5.

Fácies	Imagem de treino	Truncamento estacionário	Truncamento não-estacionário
% F_1	31,0	32,0	31,4
% F_2	61,0	62,5	60,0
% F_3	8,0	5,5	8,6

Tabela 5.5 . Proporções globais da imagem de treino e as recuperadas nas simulações, com truncamentos estacionários e não-estacionários.

Também é importante notar que, quando comparamos a distribuição dos valores das probabilidades (Figura 5.15 e Figura 5.16) com as imagens resultantes dos respectivos truncamentos (Figura 5.17 e Figura 5.18), observa-se que a ocorrência das fácies é influenciada pelas altas probabilidades. No entanto, essas altas probabilidades não são absolutas na decisão da ocorrência da fácies no ponto. Existe uma concorrência entre a probabilidade e o valor da FA gaussiana na decisão se determinada fácies satisfaz ao ponto ou não.

6. CONCLUSÕES

O Modelo de Simulação Plurigaussiano Truncado mostrou bom desempenho na simulação de estruturas geometricamente complexas, mostrando na prática o que havia sido proposto na teoria, tanto nas simulações não-condicionais quanto nas condicionais.

A utilização de FA gaussianas correlacionadas na simulação Plurigaussiana Condicional é bastante complexa, em razão das mudanças na estruturação das fácies que ocorrem em função do coeficiente de correlação (metamorfose estrutural).

Para a utilização do coeficiente de correlação em simulações condicionais com truncamentos não-estacionários, seria necessário um algoritmo bem mais sofisticado, devido às dificuldades de condicionar as estruturas e todos os parâmetros que envolveriam o processo.

É através da estratégia dos truncamentos e das curvas de proporções não estacionárias que as relações geológicas mais importantes são incorporadas ao modelo de simulação.

Situações geológicas com estruturas complexas e amostragem esparsa dependem fundamentalmente de uma boa estimativa das proporções (não estacionárias), para chegar-se a um cenário geológico detalhado e realista.

O algoritmo desenvolvido é simples e tem bom desempenho nas simulações plurigaussianas. Esse algoritmo simula duas FA gaussianas não-condicionais tanto para FA gaussianas independentes quanto para as linearmente dependentes. Já, para a forma condicional, está apto a simular somente com FA gaussianas independentes. As proporções podem ser estacionárias ou não estacionárias. No caso das não estacionárias é necessário que a estimativa da probabilidade no ponto amostrado seja bem próxima de 1.0, para garantir o condicionamento no ponto.

Descarta-se a possibilidade de desenvolvimento de um algoritmo definitivo e fechado para o Modelo Plurigaussiano Truncado. Isso deve-se ao fato de que cada

situação geológica requer modificações específicas quanto ao número de FA gaussianas simuladas, número e geometria dos truncamentos.

Deve-se dar preferência à inversão do variograma da indicatriz para a gaussiana, usando-se a solução teórica em detrimento da modelagem da transformada gaussiana dos pontos amostrados, por ser matematicamente coerente e levar em consideração a proporção das fácies.

O objetivo desse trabalho foi atingido, já que as bases teóricas do modelo foram assimiladas, tendo havido desenvolvimento tecnológico através da construção e teste de um algoritmo de Simulação Plurigaussiana Truncada Condicional.

Sugere-se testar a transformação gaussiana, usando o algoritmo proposto por XU; JOURNAL (1994), o qual se propõe evitar a introdução de ruído aleatório (efeito pepita) na estrutura das variáveis transformadas.

Sugere-se prosseguir os estudos na área do Plurigaussiano Truncado Condicional, utilizando-se FA gaussianas correlacionadas e desenvolver um algoritmo para tal finalidade.

Sugere-se estudar: a aplicabilidade prática dos truncamentos com formas diferentes das retangulares, a implicação desses truncamentos na estruturação das fácies e o significado geológico para os mesmos.

Aprimorar o programa de Simulação Plurigaussiano Truncado nos seguintes itens:

- ◆ - interface com o usuário;
- ◆ - implementar truncamentos por níveis estratigráficos;
- ◆ - incorporar diferentes formas de truncamentos;
- ◆ - melhorar a passagem de parâmetros entre as rotinas em IDL e as em Fortran;
- ◆ - melhorar a transformada gaussiana procurando um algoritmo que não gere ruídos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADERALDO, R. C. *Análise de Espaçamento entre Poços Utilizando Modelagem Estocástica de Dados de Afloramento*. Campinas, SP, 1994. 123p, Dissertação de Mestrado em Geoengenharia de Reservatório, Universidade Estadual de Campinas.
- DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York, Oxford University Press, 1992. 340p.
- BEUCHER, H.; GALLI, A.; LE LOC'H, G.; RAVENNE, C.; HERESIM GROUP. Including a Regional Trend in Reservoir Modeling using the Truncated Gaussian Method. In.: Fourth Geoestistics Congress, 1992, Troia. *Proceedings*. GALLI, A.; BEUCHER, H.; LE LOC'H, G.; DOLIGEZ, B.; HERESIM GROUP. The Pros and Cons of the Truncated Gaussian Method. In.: ARMSTRONG, M.; DOW, P. A. *Geostatistical Simulations*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1994. p. 217-223.
- JOURNEL, A. G.; ISAAKS, E. H. Conditional Indicator Simulation: application to a Saskatchewan uranium deposit. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*. v. 16, n° 7, p. 685-718, Oct./1984.
- LE LOC'H, G.; BEUCHER, H.; GALLI, A.; DOLIGES, B.; HERESIM GROUP. Improvement in Truncated Gaussian Method Combining Several Gaussian Functions. In.: 4th EUROPEAN CONFERENCE ON THE MATHEMATICS OF OIL RECOVERY, 7-10th June, 1994. Roros. *Proceedings of ECMOR IV*. Norway.
- LE LOC'H, G.; GALLI, A. Truncated Plurigaussian Method: Theoretical and Practical Points of View. In.: BAAFI, E. Y.; SCHOFIELD, N. A. *Geostatistics Wollongong'96*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1997. v. 1, p. 211-222.

- MATHERON, G.; BEUCHER, H.; FOUQUE, C.; GALLI, A. Conditional Simulation of the Geometry of Fluvio-Deltaic Reservoir. *SPE*. Dallas, SPE#16.753, p. 591-99, Set/1987a.
- MATHERON, G.; BEUCHER, H.; FOUQUE, C.; GALLI, A.; RAVENNE, Ch. *Simulation Conditionnelle à Trois Faciès d'une Falaise de la Formation du Brent*. Centre de Géostatistique, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Fontainebleau. 1987b. 37p. CG N-37/87/G.
- OMRE, H. Stochastic models for reservoir characterization. *Recent Advances in Improved Oil Recovery Methods for North Sea Sandstone Reservoir*. 1991. 20p.
- RAVENNE, C.; BEUCHER, H. Recent Development in Description of Sedimentary Bodies in a Fluvio-Deltaic Reservoir and Their 3D Conditional Simulation. *SPE*, Houston, SPE#18310, p. 463-476, 1988.
- RAVENNE, C.; ESCHARD, R.; GALLI, A.; MATHIEU, Y.; MONTADERT, K.; RUDKIEWICZ, J. L. Heterogeneity and Geometry of Sedimentary Bodies in a Fluvio-Deltaic Reservoir. *SPE Formation Evaluation*. p. 239-49, 1989.
- RAVENNE, C.; GALLI, A.; BEUCHER, H.; ESCHARD, R.; GUÉRILLOT, D. *Outcrop Studies and Geostatistical Modeling of a Middle Jurassic Brent Analogue*. Centre de Géostatistique, École de Mines de Paris, Fontainebleau 1992. 24 p.
- RIVOIRARD, J. Relations Between the Indicators Related to a Regional Variable. In.: *FOURTH INTERNATIONAL GEOSTATISTICAL CONGRESS*. Lisboa, 1992. p. 273-84..
- SIMON, V. H.; REMACRE, A. Z. Fundamentos do Método de Simulação Estocástica Gaussiano Truncado Multivariado. In.: **Iº WORKSHOP SOBRE CARACTERIZAÇÃO E ENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS**. 1995. Campinas. Caderno de Resumos. UNICAMP. Centro de Estudos do Petróleo, p. 30-32.

- WEIMER, R. J; HOWARD, J. D; LINDSAY, D, R. Tidal Flats and Associated Tidal Channel. In.: SCHOLLE, P. A; SPEARING, D. *Sandstone Depositional Environments*. Tulsa, Oklahoma. AAPG, 1982. p. 222-45.
- XU, Wenlong. Truncated Gaussian Simulation (GTSIM) : an open software. In.: *SCRF #6*. Stanford Center of Reservoir Forecasting, School of Earth Sciences, 1993. numeração irregular.
- XU, Wenlong; JOURNEL, A. G. GTSIM: gaussian truncated simulations of lithofacies. In.: *SCRF #6* Stanford Center of Reservoir Forecasting: School of Earth Sciences, 1993. numeração irregular.
- XU, Wenlog; JOURNEL, A. G. Posterior identification of histograms conditional to local data. In.: *SCRF #7* Stanford Center of Reservoir Forecasting: School of Earth Sciences, 1994. numeração irregular.
- ZELEN, Marvin; SEVERO, Norman C. Probability Functions. In.: ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. *HANDBOOK OF MATHEMATICAL FUNCTIONS*; with Formulas, Graphics and Mathematical Tables. 9th ed. New York, Dover Publications, Inc., 1972. Cap. 26.