UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Metodologia de Geração de Mapas de Qualidade com Aplicação na Seleção e Otimização de Estratégias de Produção

Autor: **José Sérgio de Araújo Cavalcante Filho**
Orientador: **Prof. Dr. Denis José Schiozer**
Co-orientador: **Dr. Rogério Favinha Martini**

12/05

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Metodologia de Geração de Mapas de Qualidade com Aplicação na Seleção e Otimização de Estratégias de Produção

Autor: **José Sérgio de Araújo Cavalcante Filho**
Orientador: **Prof. Dr. Denis José Schiozer**
Co-orientador: **Dr. Rogério Favinha Martini**

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo

Dissertação de mestrado apresentada à Subcomissão de Pós-Graduação Interdisciplinar de Ciências e Engenharia de Petróleo (FEM e IG), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Campinas, 2004
SP – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Cavalcante Filho, José Sérgio de Araújo
C314m Metodologia de geração de mapas de qualidade com aplicação na seleção e otimização de estratégias de produção / José Sérgio de Araújo Cavalcante Filho. --Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientadores: Denis José Schiozer, Rogério Favinha Martini
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Engenharia de reservatório de óleo. 2. Engenharia de petróleo. 3. Petróleo - Prospecção. 4. Recuperação secundária do petróleo. 5. Métodos de simulação. I. Schiozer, Denis José. II. Martini, Rogério Favinha. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Instituto de Geociências. V. Título.

Titulo em Inglês: Methodology of quality map generation with application in production strategies selection and optimization
Palavras-chave em Inglês: Quality map, Production strategy, Reservoir engineering, Strategy optimization, Numerical simulation
Área de concentração: Engenharia de Reservatórios
Titulação: Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo
Banca examinadora: Paulo Sérgio da Cruz, Armando Zaupa Remacre
Data da defesa: 16/12/2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Metodologia de Geração de Mapas de Qualidade com Aplicação na Seleção e Otimização de Estratégias de Produção

Autor: **José Sérgio de Araújo Cavalcante Filho**
Orientador: **Prof. Dr. Denis José Schiozer**
Co-orientador: **Dr. Rogério Favinha Martini**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Denis José Schiozer, Presidente
DEP/FEM/UNICAMP

Dr. Paulo Sérgio da Cruz
PETROBRAS

Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre
DGRN/IG/UNICAMP

200812246

Campinas, 16 de dezembro de 2005.

Dedicatória

Dedico este trabalho a meus pais, Cavalcante e Leônia, e a minhas irmãs, Liane, Débora e Camila.

Agradecimentos

À Deus, por tudo o que sou e por tudo que conquistei.

Aos meus pais, Cavalcante e Leônia, e minhas irmãs, Liane, Débora e Camila, que mesmo a longas distâncias sempre se fizeram presentes em todas as etapas de minha vida e de minha formação.

À Agência Nacional do Petróleo (ANP), pelo suporte financeiro na forma do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás (PRH-ANP), do qual participei como bolsista de graduação (PRH-ANP 31) e, na realização do presente trabalho, como bolsista de mestrado (PRH-ANP 15).

Ao Prof. Dr. Denis José Schiozer, pela orientação, estímulo e paciência ao longo da execução deste trabalho.

Ao pesquisador Dr. Rogério Favinha Martini, pela co-orientação, colaboração e estímulo, fazendo-se sempre presente em todas as etapas de execução deste trabalho.

Aos pesquisadores e analistas de sistema do Grupo de Pesquisa em Simulação Numérica de Reservatórios (UNISIM).

Ao Departamento de Engenharia de Petróleo (DEP), ao Instituto de Geociências (IG) e ao Centro de Estudos de Petróleo (CEPETRO) pelo apoio de todos os professores, funcionários e estagiários, que colaboraram direta ou indiretamente para a execução deste trabalho.

A todos os colegas do curso de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Aos amigos de república, Marcos, Alexandre, Rafael, Márcio, Tasso, Alex, Adaílson, Sérgio, André, Rui, Richard, Ezequiel, Kátia, Evilene e Débora, pela amizade e pelos divertidos momentos de descontração.

Resumo

CAVALCANTE FILHO, José Sérgio de Araújo, *Metodologia de Geração de Mapas de Qualidade com Aplicação na Seleção e Otimização de Estratégias de Produção.* Campinas, 2005, 106pp. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2005.

A definição e otimização de estratégias de produção são processos complexos por envolverem diversas variáveis e possuírem um grande número de cenários possíveis. Mapas de qualidade são importantes ferramentas de auxílio à decisão, capazes de representar várias propriedades do reservatório que influenciam na produção do campo, sendo, portanto, úteis no processo de definição e otimização de estratégias de produção, como mostrado por outros autores que verificaram um aumento de eficiência nos estudos onde foram utilizados. Estes mapas integram as variáveis geológicas e de fluido do reservatório permitindo a identificação de regiões de maior ou menor potencial de produção, tanto para campos novos quanto para campos maduros. O método de geração de mapas de qualidade mais utilizado na literatura usa simulações numéricas de reservatórios considerando apenas um poço produtor que é simulado pelo tempo necessário para representar a produtividade de cada região, e cuja posição muda a cada simulação de modo a cobrir toda a malha do reservatório. Este método exige um grande número de simulações e enorme esforço computacional. O objetivo deste trabalho é propor metodologias confiáveis a fim de acelerar o processo de geração do mapa de qualidade. No presente trabalho diversos métodos de geração são desenvolvidos e avaliados segundo suas vantagens e desvantagens após um rigoroso estudo. O método da *krigagem* é utilizado para interpolar os pontos não simulados dos mapas gerados. São utilizados diferentes modelos de reservatório e funções-objetivo (forma de avaliação do potencial de cada região), além de diversos métodos de geração, para a realização de uma análise completa e confiável dos métodos propostos. Os resultados mostram que, dentre os métodos testados, o método que abre diversos produtores e injetores simultaneamente apresentou a melhor relação tempo de geração/confiabilidade. Foi proposta ainda uma variação do mapa de qualidade capaz de identificar o motivo pelo qual certas regiões apresentaram baixo potencial aumentando ainda mais a utilidade da ferramenta.

Palavras Chave: Mapa de Qualidade, Estratégia de Produção, Simulação Numérica, Engenharia de Reservatórios.

Abstract

CAVALCANTE FILHO, José Sérgio de Araújo, *Methodology of Quality Map Generation with Application in Production Strategies Selection and Optimization.* Campinas, 2005, 106pp. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2005.

The definition and optimization of production strategies are complex processes that involve many variables and a great number of possible scenarios. Quality maps are important decision making tools capable of representing various reservoir properties which influence field production and, therefore, are important for the process of defining and optimizing production strategies, as demonstrated by other authors, who observed improvements in reservoir productivity in the cases they studied. These maps integrate geological and fluid variables, allowing for the identification of regions of greater or lower production potential, whether one is analyzing reservoirs in the development phase or mature fields. The most commonly used method to generate a quality map uses reservoir numerical simulations considering a unique production well, operating for enough time to represent the oil potential of each position. The well position is changed in each simulation run in order to cover all the reservoir grid area. This requires long running times and high computational effort depending on the problem features, thus rendering the process unfeasible. The objective of this work is to develop a reliable methodology which accelerates the generation process. Therefore, several generation methods were developed in the present work and the best technique was selected after a thorough analysis. The kriging interpolation method was used to interpolate the skipped points in all cases. Several reservoir models, quality map generation methods and objective functions (approach to evaluate the potential of each region) were used to validate the obtained results. Some methods have obtained a great reduction in the time and effort required to generate the maps. The results have shown that a method proposed in the present work, with fixed producers and injectors, is a reliable technique, yielding good results and presenting the best relation between generation time and reliability. In this work, a quality map capable of identifying the reason for the existence of regions with lower production potential was also proposed, improving the utility and application of this tool.

Key words: Quality Map, Production Strategy, Reservoir Engineering, Strategy Optimization, Numerical Simulation.

Índice

Dedicatória v
Agradecimentos vi
Resumo vii
Abstract viii
Índice ix
Lista de Figuras xiii
Lista de Tabelas xvi
Nomenclatura xix
Capítulo 1 1
Introdução 1
1.1 Motivação 2
1.2 Objetivos 3
1.3 Estrutura da dissertação 4
Capítulo 2 5
Fundamentação Teórica 5
2.1 Valor Presente Líquido (VPL) 5
2.2 Estratégia de Produção 6
2.3 Mapa de Qualidade 9
2.4 Técnicas Geoestatísticas – *Krigagem* 13
Capítulo 3 15
Revisão Bibliográfica 15
3.1 Estratégia de Produção 15
3.2 Mapa de Qualidade 18

3.2.1 Métodos de Geração do Mapa de Qualidade 25
3.3 Discussão da Revisão Bibliográfica 31
Capítulo 4 32
Metodologia 32
4.1 Elaboração de Modelos e Testes 33
4.2 Validação – Modelos Teóricos 33
4.2.1 Geração do Mapa de Qualidade 34
4.2.2 Comparação do Mapa Obtido com o Mapa de Referência 39
4.2.3 Análise do Método de Geração 41
4.2.4 Descarte do Método 41
4.2.5 Mudanças Possíveis nas Condições Operacionais dos Poços 41
4.2.6 Validação dos Métodos de Geração de Mapas de Qualidade 41
4.2.7 Análise das Funções-Objetivo 42
4.3 Aplicação – Modelo de um Campo Real 42
4.3.1 Geração do Mapa de Qualidade 42
4.3.2 Definição de Estratégias de Produção Iniciais para Análise dos Diferentes Mapas de Qualidade 43
4.3.3 Estudo das Regiões de Baixa Qualidade 44
Capítulo 5 46
Aplicações 46
5.1 Caso 1A e Caso 1B – Reservatórios Teóricos Homogêneos (Óleo Leve) 47
5.1.1 Caso 1A 47
5.1.2 Caso 1B 47
5.2 Caso 2A e Caso 2B – Reservatórios Teóricos Heterogêneos (Óleo Leve) 48
5.2.1 Caso 2A 48
5.2.2 Caso 2B 48
5.3 Caso 3A e Caso 3B – Reservatórios Teóricos Heterogêneos (Óleo Pesado) 48
5.3.1 Caso 3A 48
5.3.2 Caso 3B 49
5.4 Caso 4A e Caso 4B – Modelo de Campo Real 49
5.4.1 Caso 4A 49

Capítulo 6 52
Resultados - Validação 52
6.1 Modelos Teóricos Homogêneos – Óleo Leve (Caso 1A e Caso 1B) 52
6.1.1 Método por Varredura com 1 Produtor 52
6.1.2 Método por Varredura com um Grupo de 4 Produtores 54
6.1.3 Método por Varredura com um Par Produtor/Injetor 56
6.1.4 Método por Produtores Fixos 57
6.1.5 Método por Produtores e Injetores Fixos 64
6.1.6 Método Analítico 66
6.2 Modelos Teóricos Heterogêneos – Óleo Leve (Caso 2A e 2B) 66
6.2.1 Método por Varredura com 1 Produtor 66
6.2.2 Método por Varredura com um Grupo de 4 Produtores 67
6.2.3 Método por Varredura com um Par Produtor/Injetor 69
6.2.4 Método por Produtores Fixos 70
6.2.5 Método por Produtores e Injetores Fixos 71
6.2.6 Método Analítico 72
6.3 Modelos Teóricos Heterogêneos – Óleo Pesado (Caso 3A e 3B) 74
6.3.1 Método por Varredura com 1 Produtor 74
6.3.2 Método por Varredura com um Grupo de 4 Produtores 75
6.3.3 Método por Varredura com um Par Produtor/Injetor 78
6.3.4 Método por Produtores Fixos 78
6.3.5 Método por Produtores e Injetores Fixos 80
6.3.6 Método Analítico 81
6.4 Tabela de Comparação dos Métodos 81
6.5 Análise da Função-Objetivo 84
6.6 Discussão dos Resultados 87
Capítulo 7 91
Resultados – Aplicação 91
7.1 Caso 4A 91
7.1.1 Geração do Mapa de Qualidade 91

7.1.2 Definição de Estratégias de Produção Inicial para Análise dos Diferentes Mapas de Qualidade 95
7.1.3 Estudo das Regiões de Baixa Qualidade 99
7.2 Discussão dos Resultados 100
Capítulo 8 103
Conclusões 103
8.1 Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros 106
Referências Bibliográficas 108

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Valor presente líquido. 6
Figura 2.2 – Etapas do processo de otimização (Fonte: MEZZOMO, 2005). 9
Figura 2.3 – Geração do mapa de qualidade usando um simulador numérico. 10
Figura 2.4 – Produtores perfurando reservatórios de corpos lenticulares. 12
Figura 3.1– Fluxograma principal do processo de otimização de estratégias de drenagem para campos de petróleo em produção (Modificado de GUIMARÃES, 2005). 23
Figura 3.2 – Modelo físico do poço horizontal (Fonte: BABU e ODEH, 1989). 26
Figura 3.3 – Variação da posição do poço para cada etapa de simulação. 27
Figura 3.4 – Exemplo de mapa de qualidade com poços produtores (pretos) e injetores (brancos) (Fonte: NAKAJIMA, 2003). 30
Figura 4.1 – Etapas de Metodologia. 32
Figura 4.2 – Fluxograma da metodologia de estudo dos modelos teóricos. 34
Figura 4.3 – Variação da posição do grupo de poços. 35
Figura 4.4 – Geração do mapa de qualidade com um par de poços – produtor (·) e injetor (o). 36
Figura 4.5 – Distribuição uniforme de poços produtores na malha do reservatório. 37
Figura 4.6 – Poços produtores (•) e injetores (o) distribuídos de forma intercalada no reservatório. 38
Figura 4.7 – Poços produtores (•) e injetores (o) distribuídos no reservatório segundo a configuração *five-spot*. 38
Figura 4.8 – Gráficos de validação cruzada: (a) e (b) representam, respectivamente, um alto e um baixo grau de correlação entre os mapas de qualidade comparados. 40
Figura 4.9 – Fluxograma da metodologia de estudo do caso de um campo real (Campo de Namorado modificado). 43

Figura 4.10 – Formatação condicional dos dados da função-objetivo normalizada (FO_{norm}). 45
Figura 5.1 – Modelo teórico de reservatório homogêneo – Caso 1A. 47
Figura 5.2 – Modelo teórico de reservatório homogêneo – caso 1B. 47
Figura 5.3 – Modelo teórico de reservatório heterogêneo – caso 2A. 48
Figura 5.4 – Modelo teórico de reservatório heterogêneo – caso 2B. 48
Figura 5.5 – Modelo do Campo de Namorado modificado. 49
Figura 5.6 – Mapas de porosidade e permeabilidade, respectivamente, do Campo de Namorado modificado (modelo de campo real). 51
Figura 5.7 – Modelo de reservatório com uma falha (transmissibilidade = 0). 51
Figura 6.1 – Posição dos poços para análise do mapa do caso 1B com grupo de quatro poços sendo deslocados de quatro em quatro blocos. 56
Figura 6.2 – Gráficos de produção de óleo e água referentes aos poços da Figura 6.1. 56
Figura 6.3 – Posição dos poços para análise do mapa do caso 1A gerado por abertura simultânea de poços (25 produtores). 58
Figura 6.4 – Gráfico de produção de óleo e água e gráfico de VPL referentes aos poços representados na Figura 6.3. 59
Figura 6.5 – Posição dos poços para análise do mapa do caso 1B gerado por abertura simultânea de poços (25 produtores). 60
Figura 6.6 – Gráficos de produção de óleo e água e de pressão (pressão média para o campo e BHP para os poços) referentes aos poços representados na Figura 6.5. 62
Figura 6.7 – Posição dos poços para análise do mapa do caso 3A, gerado por varredura com um grupo de 4 poços (1 em 1). 77
Figura 6.8 – Pressão média do campo com um grupo de 4 poços (Figura 6.7). 78
Figura 7.1 – Mapa de qualidade gerado com o método por varredura (2 em 2 blocos). 91
Figura 7.2 – Mapa de qualidade gerado com o método dos produtores fixos (54 poços). 92
Figura 7.3 – Mapa de qualidade gerado com o método por produtores e injetores fixos (54 produtores e 48 injetores – *five-spot*). 92
Figura 7.4 – Mapa de qualidade gerado com o método analítico. 92
Figura 7.5 – Gráfico de validação do mapa de referência (varredura de dois em dois blocos) e do mapa gerado com produtores fixos. 94

Figura 7.6 – Gráfico de validação do mapa de referência (varredura de dois em dois blocos) e do mapa gerado com o método analítico 94
Figura 7.7 – Análise de sensibilidade do número de poços no método de geração por produtores fixos. 95
Figura 7.8 – Análise de sensibilidade do número de poços no método de geração por produtores e injetores fixos. 96
Figura 7.9 – VPL e Np das melhores estratégias de produção geradas usando cada mapa de qualidade. 97
Figura 7.10 – VPL e Np médio de todas as estratégias de produção geradas usando cada mapa de qualidade. 97
Figura 7.11 – Mapas gerados para o caso com falha selante com os diferentes métodos estudados. 98
Figura 7.12 – Mapas gerados com diferentes funções-objetivo por varredura (2 em 2). 98
Figura 7.13 – Mapas gerados com diferentes funções-objetivo usando produtores e injetores fixos (54p48i). 99
Figura 7.14 – Mapa de qualidade gerado por produtores e injetores fixos usando o valor de corte de água máximo definido pela Equação 6.2 99
Figura 7.15 – Mapas de qualidade com análise das regiões de baixa qualidade; as regiões de cor azul claro ($FO'_{norm}<0$) representam regiões com baixa qualidade devido a alta produção de água e as regiões de azul escuro ($FO'_{norm}>0$), regiões de baixa qualidade devido a deficiência de pressão. 100

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Proposições Nebulosas (Fonte: NAKAJIMA, 2003)..... 30
Tabela 6.1 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração por varredura com um único poço. 53
Tabela 6.2 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração por varredura com um grupo de quatro poços. 55
Tabela 6.3 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração por varredura com um par produtor/injetor (2 em 2 blocos)..... 57
Tabela 6.4 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração por poços produtores fixos. 58
Tabela 6.5 – Mapas de qualidade gerados com o método por produtores fixos utilizando um BHP mínimo de fechamento dos poços reduzido na metade. 61
Tabela 6.6 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração por poços produtores fixos aplicando a restrição de vazão. 63
Tabela 6.7 – Gráficos de validação – método de abertura simultânea. 63
Tabela 6.8 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração por poços produtores e injetores fixos. 65
Tabela 6.9 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração analítico. 66
Tabela 6.10 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (2A e 2B) usando o método de geração por varredura com um único poço. 68
Tabela 6.11 – Gráficos de validação – método por varredura (4 em 4). 69
Tabela 6.12 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (2A e 2B) usando o método de geração por varredura com um grupo de quatro poços. 69

Tabela 6.13 – Gráficos de validação – método de varredura com grupo de 4 poços (caso 2A e 2B). 70
Tabela 6.14 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (2A e 2B) usando o método de geração por varredura com um par produtor/injetor (2 em 2 blocos). 71
Tabela 6.15 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (2A e 2B) usando o método de geração por poços produtores fixos. 71
Tabela 6.16 – Gráficos de validação – método dos produtores fixos (caso 2A e 2B). 72
Tabela 6.17 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (2A e 2B) usando o método de geração por poços produtores e injetores fixos. 73
Tabela 6.18 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (2A e 2B) usando o método de geração analítico. 74
Tabela 6.19 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (3A e 3B) usando o método de geração por varredura com um único poço. 76
Tabela 6.20 – Gráficos de validação – método de varredura (4 em 4). 77
Tabela 6.21 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (3A e 3B) usando o método de geração por varredura com um grupo de quatro poços. 77
Tabela 6.22 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (3A e 3B) usando o método de geração por varredura com um par produtor/injetor (2 em 2 blocos). 79
Tabela 6.23 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (3A e 3B) usando o método de geração por poços produtores fixos. 79
Tabela 6.24 – Gráficos de validação dos pontos estimados – método de abertura simultânea. 80
Tabela 6.25 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (3A e 3B) usando o método de geração por poços produtores e injetores fixos. 82
Tabela 6.26 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (3A e 3B) usando o método de geração analítico. 82
Tabela 6.27 – Comparação entre os métodos de geração. 83
Tabela 6.28 – Comparação entre os métodos de geração (continuação). 84
Tabela 6.29 – Análise da função-objetivo usando os métodos por varredura e por produtores e injetores fixos e os modelos dos casos 3A e 3B. 86
Tabela 6.30 – Mapas de qualidade gerados com o método de produtores e injetores fixos em diferentes cenários econômicos. 87

Tabela 7.1 – Número de simulações utilizadas para geração do mapa de qualidade em cada método. 93
Tabela 7.2 – Estratégias e números de poços. 96

Nomenclatura

Letras Latinas

a	comprimento do reservatório (direção x)	ft ou m
B	fator volume de formação	Bbl/STB ou Rm^3/Sm^3
b	largura do reservatório (direção y)	ft ou m
C	valor presente do capital de investimento depois do imposto de renda	US$
C_H	fator geométrico	-
Gp	volume acumulado de gás produzido nas condições padrão	m^3
C_o	custo de produção de óleo por poço	US$
C_w	custo de produção de água por poço	US$
c_o	custo de produção de óleo por barril	US$/bbl
c_w	custo de produção de água por barril	US$/bbl
FO_{norm}	função-objetivo normalizada	-
FO'_{norm}	função-objetivo normalizada após formatação condicional	-
h	espessura da formação	ft
i	taxa de interesse	-
k_x	permeabilidade absoluta na direção x	mD
k_y	permeabilidade absoluta na direção y	mD
L	comprimento do poço	ft ou m
m	médio	-
$M_{referência}$	valor de qualidade do mapa considerado referência	-
$M_{estudado}$	valor de qualidade do mapa gerado pelo método estudado	-

n	número total de blocos da malha na horizontal	-
n_p	número de poços	-
Np	volume acumulado de óleo produzido nas condições padrão	m^3
P_o	preço do óleo	US$/bbl
p_r	pressão média do reservatório	psi ou Pa
p_{wf}	pressão no fundo do poço	psi ou Pa
Qo	produção diária de óleo	m^3/dia
Qoi	produção de óleo inicial	m^3/dia
Qom	vazão média de óleo	m^3/dia
r_w	raio do poço	ft ou m
S_r	pseudo fator de película	-
t	tempo de simulação	dias
V	preço do óleo no poço depois do imposto de renda	US$
V_{ois}	volume de óleo *in situ*	m^3
$W_{cmáx}$	corte de água máximo	%
Wi	volume acumulado de água injetada nas condições padrão	m^3
Wo	número ótimo de poços	-
Wp	volume acumulado de água produzida nas condições padrão	m^3
x_0,y_0,z_0	posição do poço	-

Letras Gregas

α	adimensional	-
β	adimensional	-
μ	viscosidade	cP

Siglas

ANP	Agência Nacional do Petróleo

MQ	mapa de qualidade
MQF	mapa de qualidade final
MQI	mapa de qualidade inicial
TIR	taxa interna de retorno
TMA	taxa média de atratividade
VPL	valor presente líquido
VPr	valor presente das receitas

Capítulo 1

Introdução

A definição e otimização de estratégias de produção é uma tarefa complexa que envolve diversas variáveis e um enorme número de cenários possíveis. Para a realização dessa tarefa o engenheiro de reservatório deve levar em consideração, além dos fatores econômicos, diversos mapas de propriedades do reservatório, tais como saturação inicial de fluidos, permeabilidade, porosidade, volume de óleo *in situ,* entre outras, conhecidas como propriedades estáticas. Desta forma outros parâmetros importantes, como os fatores dinâmicos de interação entre as propriedades do fluido e da rocha durante o escoamento, não são levados em conta. Com o intuito de considerar estas interações dinâmicas no processo de definição e otimização de estratégias de produção e para diminuir a subjetividade intrínseca destes processos observa-se a necessidade da existência de ferramentas apropriadas de auxílio à decisão, como por exemplo, o mapa de qualidade.

O mapa de qualidade é uma ferramenta capaz de identificar as regiões de maior ou menor potencial produtivo do reservatório, o que consiste em uma tarefa complexa (devido aos inúmeros parâmetros que afetam o fluxo em meios porosos) e de grande interesse para os engenheiros de reservatório. Não é fácil predizer o comportamento do reservatório durante a produção, mesmo quando todos os parâmetros podem ser visualizados separadamente, especialmente quando se lida com reservatórios com alto grau de heterogeneidade. Por isso, o método de geração do mapa de qualidade deve levar em consideração, também, as características dinâmicas dos reservatórios e dos fluidos.

Alguns autores têm estudado e utilizado o conceito do mapa de qualidade, obtendo sempre um aumento de eficiência (produtividade) nos estudos de otimização de estratégia de produção onde este é aplicado. Resultados como estes indicam o grande potencial desta ferramenta havendo, portanto, a necessidade de um maior desenvolvimento e aperfeiçoamento de sua geração e utilização.

A geração do mapa de qualidade é um fator importante para aplicação do mesmo, pois um mapa gerado sem confiabilidade pode proporcionar resultados incoerentes e aumentar as incertezas das estratégias de produção definidas pelo engenheiro de reservatórios. Além do mais, o tempo usado na geração do mapa não pode ser muito elevado, pois este passa influenciar o tempo total de otimização de estratégias de produção. O método de geração atualmente conhecido, proposto por CRUZ *et al.* (1999), possui a vantagem de avaliar cada célula do modelo de simulação, porém pode necessitar de um número elevado de simulações, o que pode inviabilizar o processo dependendo da complexidade do modelo em estudo. Surge então a necessidade de desenvolver métodos mais rápidos e que mantenham, pelo menos, um grau de confiabilidade próximo ao do método acima citado.

Outra dificuldade na definição e otimização de estratégias de produção é como considerar os aspectos econômicos na alocação e distribuição de poços produtores e injetores sobre o reservatório. Com este intuito pode-se construir o mapa de qualidade usando uma função-objetivo de origem econômica (VPL, por exemplo), o que possibilita a escolha da alocação de poços não considerando apenas a produção de óleo, mas também o cenário econômico e até mesmo a velocidade de produção.

1.1 Motivação

Em alguns trabalhos recentes, o conceito do mapa de qualidade é citado e utilizado, mostrando a aplicabilidade destes mapas para os processos de seleção e otimização de estratégias de produção. Cabe salientar, porém, que esta é uma ferramenta relativamente nova e faz-se necessário um maior esforço para o desenvolvimento dessa metodologia.

Dentre outros motivos para estudar o mapa de qualidade pode-se citar:

- Altos investimentos e custos nas operações marítimas, o que requer um maior nível de certeza nas decisões tomadas;
- A importância do posicionamento dos poços nos projetos de óleo pesado, pois um mau posicionamento dos poços pode inviabilizar economicamente a realização de um projeto;
- A redução de custos e o aumento da produção de óleo, que se pode atingir utilizando uma estratégia de produção eficiente;
- A dificuldade de se construir estratégias iniciais de produção, que são pontos de partida para o processo de otimização;
- O fato de que esta ferramenta pode auxiliar no processo de otimização em si; e
- A necessidade de se diminuir o número de simulações utilizadas para geração do mapa de qualidade evitando assim a inviabilização do mapa para modelos complexos ou muito grandes.

O número de trabalhos publicados na literatura a respeito de mapas de qualidade ainda é pequeno, por isso são muitas as possibilidades a serem exploradas no desenvolvimento dessa ferramenta e na sua aplicação em processos de escolha e otimização de estratégias de produção.

1.2 Objetivos

Como descrito anteriormente, o método de geração do mapa de qualidade por simulação numérica existente na literatura necessita de um elevado esforço computacional e um grande número de simulações. Portanto, dentre os objetivos do presente trabalho pode-se citar:

- Acelerar o processo de geração do mapa de qualidade propondo novos métodos e modificações do método já existente na literatura;
- Usar injeção na geração do mapa de qualidade, uma vez que este recurso está presente em grande parte das estratégias construídas na realidade e ainda não existe, até o presente momento, nenhum trabalho na literatura que tenha testado esta hipótese;

- Avaliar estes diferentes métodos de geração de mapas de qualidade, suas vantagens e desvantagens, a fim de auxiliar o engenheiro da área de reservatórios na definição do método mais adequado para seu caso específico;
- Garantir um grau de confiabilidade satisfatório aos mapas de qualidade gerados pelos métodos propostos; e
- Testar a eficiência dos mapas de qualidade gerados por diferentes métodos, através da construção de estratégias de produção inicial guiadas principalmente por esta ferramenta.

1.3 Estrutura da dissertação

O Capítulo 2, de fundamentação teórica, apresenta os conceitos básicos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

O Capítulo 3, de revisão bibliográfica, apresenta um breve histórico dos trabalhos relacionados às técnicas de elaboração de estratégias de produção e ao mapa de qualidade. São descritos também métodos de geração existentes na literatura.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada no presente trabalho, orientando o leitor com relação aos passos seguidos na pesquisa.

No Capítulo 5 está descrita a aplicação, ou seja, as características dos exemplos e casos estudados (modelos teóricos e modelos derivados de um campo real).

No Capítulo 6 estão apresentados os resultados da etapa de validação dos métodos de geração do mapa de qualidade.

No Capítulo 7 estão apresentados os resultados da etapa de aplicação dos métodos de geração do mapa de qualidade.

No Capítulo 8 constam as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os conceitos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho. Primeiramente são definidos conceitos básicos de indicadores econômicos usados neste trabalho, seguidos em seqüência pelos conceitos de mapa de qualidade e da técnica geoestatística da *krigagem*, usada para interpolação dos pontos não simulados na geração do mapa de qualidade.

2.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O primeiro aspecto importante na avaliação da qualidade de cada região do reservatório é a forma como ela será medida. Se apenas os aspectos técnicos forem levados em consideração, o potencial pode ser medido pela produção acumulada de óleo, por exemplo; uma outra opção seria ter uma função penalidade para aspectos não adequados como produção de água, por exemplo. Outra opção é levar em consideração aspectos econômicos e calcular a qualidade de cada região através de um indicador como o valor presente líquido (VPL).

A engenharia econômica existe a fim de fornecer critérios para uma comparação consistente entre opções de investimento tecnicamente viáveis. Utilizando estas técnicas a atratividade de cada alternativa pode ser estimada, auxiliando a gerência a selecionar os projetos economicamente viáveis e mais rentáveis (MEZZOMO, 2001).

As análises econômicas de projetos de desenvolvimento de campos petrolíferos são de extrema importância, uma vez que quantificam seu sucesso monetário e determinam sua viabilidade. NEVES (2004) conclui que a otimização de estratégias usando indicadores como a produção de óleo (Np) ou até a produção de óleo atualizada no tempo (Np atualizado) deve estar sempre acompanhada de outros indicadores econômicos, visto que podem resultar em desempenho financeiro não satisfatório.

Existem diversos indicadores econômicos que podem ser usados a fim de determinar e comparar a rentabilidade de diferentes projetos. O indicador econômico usado no presente trabalho é o valor presente líquido (VPL) que, segundo NEVES (2004), representa o somatório das entradas e saídas líquidas atualizadas de um fluxo de caixa numa referida data (Figura 2.1), geralmente quando são realizados os investimentos iniciais. Para o cálculo deste indicador, utiliza-se a taxa mínima de atratividade (TMA) como taxa de desconto. Em termos financeiros, o VPL representa o resultado da realização de um projeto e é muito útil quando se deseja comparar projetos com custos e receitas diferenciados.

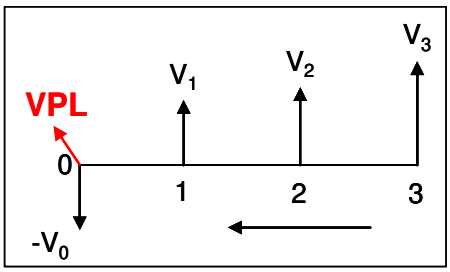


Figura 2.1 – Valor presente líquido.

Outro indicador econômico testado neste trabalho para a construção do mapa de qualidade é o valor presente das receitas (VPr). Este indicador é semelhante ao VPL, porém não considera os custos e despesas, ou seja, apenas os lucros são transportados para o tempo inicial.

2.2 Estratégia de Produção

A distribuição dos poços na superfície do reservatório que define uma estratégia de produção eficiente deve ser capaz de obter um equilíbrio entre os itens abaixo:

- Maximizar o VPL;
- Maximizar a produção de óleo durante um intervalo de tempo de produção em que o projeto é economicamente viável;
- Oferecer boas condições de injetividade, para se obter boa produtividade resultando em vazões de produção economicamente atrativas;
- Ainda visando o aspecto econômico, fazer a escolha recair sobre um esquema onde a quantidade de poços novos a serem perfurados seja a mínima possível, aproveitando aqueles já existentes no local, principalmente quando o caso da aplicação for um campo já desenvolvido (otimização da produção); e
- Minimizar os riscos envolvidos.

A obtenção de uma estratégia de produção eficiente para um determinado campo envolve estudos complexos e demorados, tanto dos aspectos físicos do reservatório (permeabilidade, presença de falhas e canais, limites do reservatório, mecanismo de produção do campo, etc.) quanto de aspectos econômicos (variação do preço do óleo), além da dependência dos recursos operacionais disponíveis, que são limitados. Deve-se atentar à dificuldade da escolha de uma estratégia ideal, tendo em vista que existem inúmeras alternativas a serem testadas e diversas incertezas envolvidas no processo.

MEZZOMO (2001) cita vários fatores que precisam ser combinados a fim de promover uma extração de hidrocarbonetos otimizada com menores riscos e perdas. São eles:

- Determinação da quantidade e localização de poços produtores e injetores;
- Avaliação das propriedades do reservatório;
- Definição das condições operacionais; e,
- Cenário econômico.

Baseado em experiências anteriores, em mapas de saturação, de permeabilidade, de pressão e outros mais obtidos nas etapas anteriores de coleta de dados geológicos, o engenheiro de reservatórios pode propor uma estratégia de produção inicial, fruto de um estudo teórico que apresenta certo grau de subjetividade. Desta maneira o engenheiro estipula o número e tipos ideais de poços (vertical ou horizontal, produtor ou injetor, etc.) para dimensionar as facilidades

de produção, além de escolher a configuração de injeção (periférica, par produtor/injetor, etc.) ideal para o seu projeto.

Analisando apenas mapas de propriedades estáticas do reservatório o engenheiro não consegue perceber as interações dinâmicas entre fluido e rocha durante a produção (escoamento). A captação destas interações possui extrema importância, pois ajuda o engenheiro a entender em que regiões do reservatório o fluido escoa preferencialmente, ou seja, quais seriam as locações de maior potencial para os produtores.

Segundo MEZZOMO e SCHIOZER (2003) e MEZZOMO (2005), o objetivo de uma estratégia de produção eficiente é a maximização de uma função-objetivo, como por exemplo: VPL, taxa interna de retorno (TIR), índice de retorno de investimento, ou uma combinação delas. Esta função-objetivo deve representar matematicamente o objetivo global do projeto e ser avaliada de acordo com a variação dos parâmetros de entrada do modelo de simulação numérica. Os autores descrevem uma metodologia, aplicada a campos em estágio de desenvolvimento inicial, que inclui um processo de otimização robusto usando as previsões geradas pelos simuladores a fim de avaliar esta função-objetivo. A metodologia desenvolvida se aplica desde a vida inicial do campo, quando se tem poucas informações e o nível de incerteza é alto, e evolui com o desenvolvimento do campo até a definição de uma estratégia eficiente. Objetiva-se selecionar o melhor padrão de produção/injeção a fim de obter um melhor desempenho do reservatório. Em algumas etapas presentes em sua metodologia (principalmente nas etapas 7, 8 e 9, mostradas nas Figura 2.2) pode-se enquadrar o mapa de qualidade como ferramenta de análise e auxílio à decisão.

Em outro trabalho, SCHIOZER e MEZZOMO (2003) desenvolvem uma metodologia para o planejamento do desenvolvimento de um campo de petróleo com poços horizontais usando simulação numérica de reservatórios sob incerteza, considerando restrições técnicas e econômicas. A metodologia proposta não conduz a um resultado único, e sim a diferentes alternativas que devem ser analisadas durante o gerenciamento do campo. As alternativas resultantes sofrem menor influência das incertezas e da variação do cenário econômico, representando assim um menor risco.

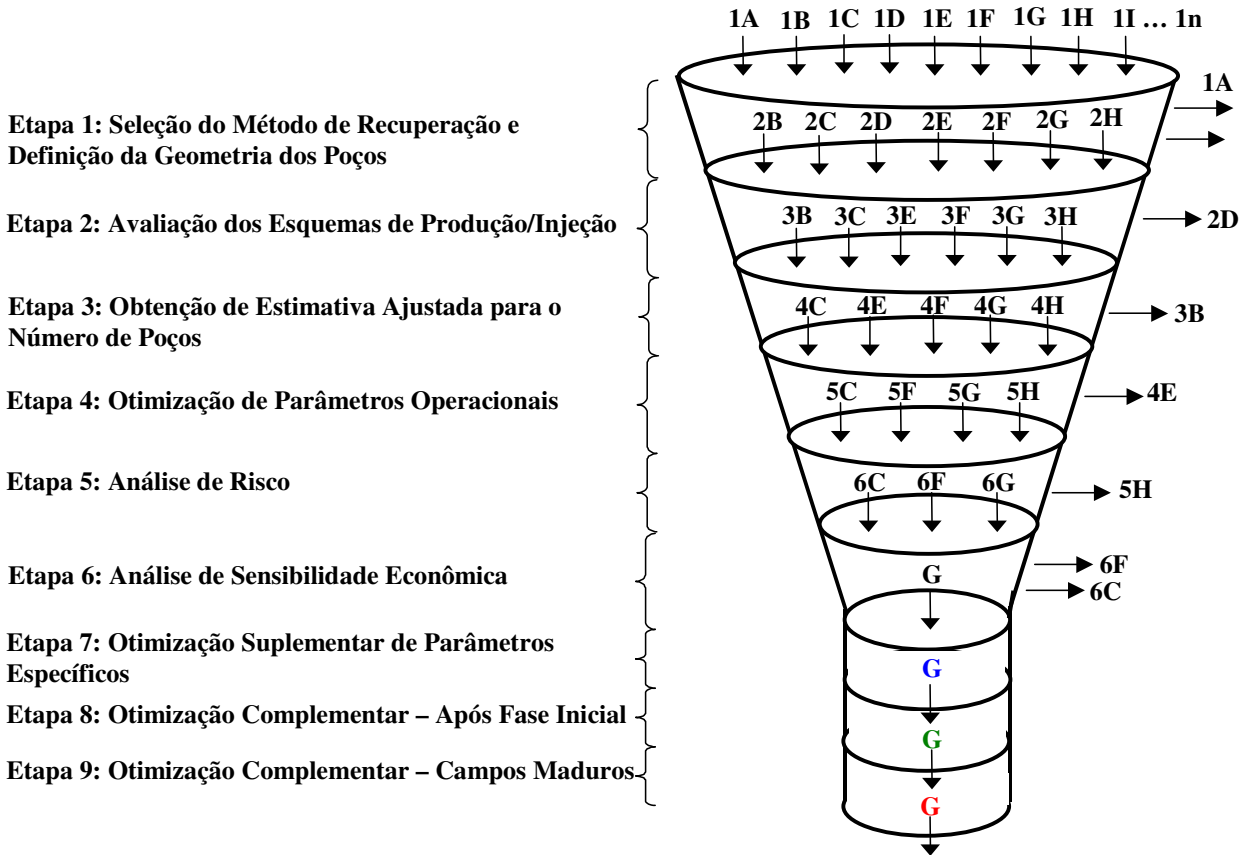


Figura 2.2 – Etapas do processo de otimização (Fonte: MEZZOMO, 2005).

A alocação e definição do número de poços (produtores ou injetores), etapas fundamentais para a obtenção do máximo retorno econômico e que apresentam alta complexidade devido às incertezas geológicas, econômicas e tecnológicas, podem determinar o comportamento do reservatório influenciando em decisões estratégicas futuras. O mapa de qualidade possui aplicação também nestas etapas promovendo a obtenção de soluções mais precisas e eficientes.

2.3 Mapa de Qualidade

O mapa de qualidade é uma ferramenta que, usando um simulador numérico, integra todas as propriedades estáticas da rocha e do fluido, mais as interações dinâmicas que ocorrem entre elas durante o escoamento (Figura 2.3). Dessa forma, o potencial produtivo de cada região de um dado reservatório de petróleo é medido e representado na forma de um mapa, onde o engenheiro

de reservatórios pode identificar as regiões de maior e menor potencial para alocação de poços produtores ou injetores. O grau de qualidade citado deve ser medido através de uma função-objetivo, tal qual o Np ou o VPL, calculado para cada poço alocado na região que este representa.

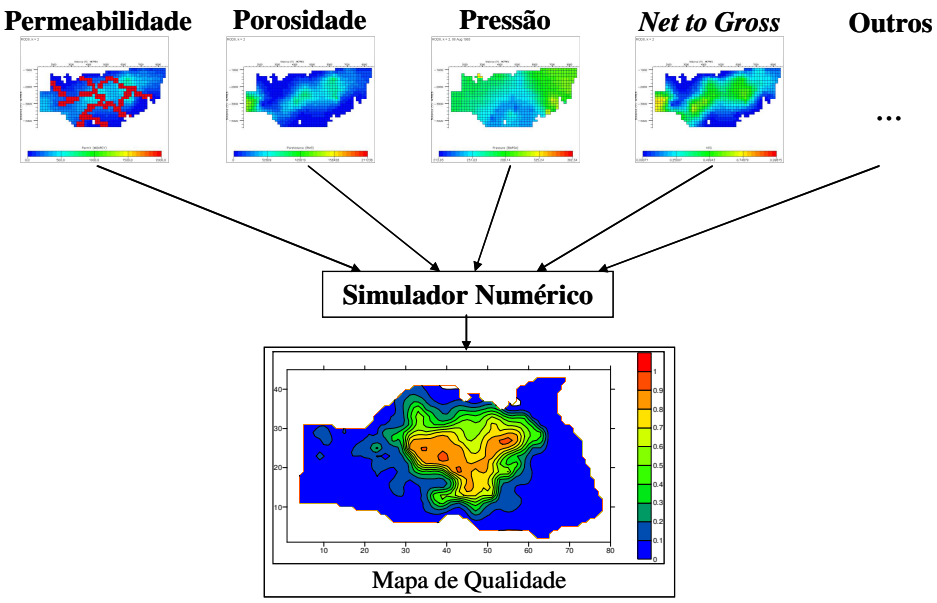


Figura 2.3 – Geração do mapa de qualidade usando um simulador numérico.

Segundo CRUZ *et al.* (1999), dentre as principais aplicações deste mapa pode-se citar:

- Determinação da melhor locação dos poços no reservatório, considerando ou não as incertezas presentes no processo e ajudando, desta forma, a aumentar a eficiência e rapidez do processo de otimização;
- Determinação de um cenário representativo quando se trabalha sob alto nível de incerteza, construindo um mapa para cada cenário e escolhendo aquele que apresente um resultado mais aproximado do mapa de qualidade médio (média aritmética dos mapas gerados para cada cenário);
- Classificação dos diversos cenários incertos para diversos propósitos pela soma do valor total das qualidades de cada ponto da malha do mapa de qualidade; e
- Comparações entre reservatórios diferentes, se forem usadas as mesmas condições de operação de poços e o mesmo tempo de simulação na geração dos mapas.

O método de geração que usa simulação numérica existente na literatura (CRUZ *et al.*, 1999), chamado neste trabalho de método por varredura, utiliza apenas um produtor vertical produzindo a alta vazão e por um longo tempo, completado em todas as camadas do reservatório. Este produtor deve ser simulado por toda a malha do reservatório tendo sua posição mudada a cada simulação, até "varrer" todos os blocos no plano XY. De posse dos dados de produção do poço nas diversas posições em que este foi simulado, calcula-se a função-objetivo que representa a qualidade do local e constrói-se o mapa de qualidade. Este método apresenta a vantagem de avaliar cada posição do reservatório, porém há a necessidade de um número elevado de simulações para geração do mapa (igual à quantidade de blocos do plano XY, se forem simulados todos os blocos da malha), o que pode, dependendo da complexidade do modelo estudado, tornar o processo inviável. Há ainda outros métodos de geração do mapa propostos na literatura que não utilizam simuladores numéricos, como o método por lógica *fuzzy*[1] e o método analítico (NAKAJIMA, 2003). Cabe salientar que o método de geração analítico, embora prático e de rápida geração, possui limitações por não considerar os aspectos dinâmicos considerados por um simulador numérico.

Uma particularidade da geração do mapa de qualidade usando poços verticais está representada na Figura 2.4. Pode-se observar que o poço 01 perfura e produz três dos reservatórios de corpos lenticulares que estão presentes na região, enquanto que o poço 02 perfura apenas um. A região onde se localiza o poço 01 apresentaria uma alta qualidade, superior à da região do poço 02, porém a existência dos diversos reservatórios não seria detectada. Apesar disso, muitos trabalhos na literatura têm obtido sucesso na alocação dos poços horizontais usando o mapa de qualidade gerado por produtores verticais. Estes mapas servem como uma aproximação da localização do poço horizontal em relação ao plano XY; quanto à direção do poço e ao seu posicionamento em relação às camadas do reservatório (eixo Z), é necessário que o engenheiro de reservatórios realize um processo de otimização mais aprofundado, executando um maior número de simulações e atente para casos como o dos reservatórios mostrados na Figura 2.4.

[1] Segundo Nakajima (2003), lógica *fuzzy* é uma técnica de inteligência artificial que visa aproximar a decisão computacional da decisão humana fazendo com que a máquina não apresente apenas soluções binárias, mas também decisões "abstratas" (do tipo "mais ou menos", "talvez sim", etc.).

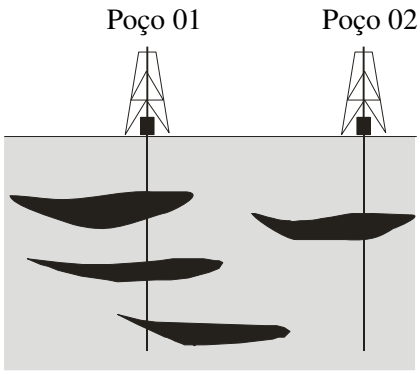


Figura 2.4 – Produtores perfurando reservatórios de corpos lenticulares.

Cabe salientar que neste caso o mapa de qualidade conjunto de todas as camadas continua válido para a visualização bidimensional do potencial de cada área. Para a alocação de produtores verticais a utilização deste mapa só faz sentido se a produção puder ser conjunta; caso a produção não possa ocorrer conjuntamente ou caso se opte por utilizar poços horizontais, uma alternativa seria a visualização do potencial de todas as camadas do reservatório através da construção de mapas de qualidade individuais para cada uma delas.

Uma possibilidade seria a geração do mapa de qualidade tridimensional, através da simulação de um poço vertical, ou mesmo horizontal, varrendo todos os blocos da malha do reservatório em todas as direções (X, Y e Z). Dessa forma a qualidade seria indicada tanto no plano XY quanto na direção Z da malha do reservatório. Entretanto, esse procedimento demandaria um esforço computacional muito maior sem grandes vantagens para a maioria dos casos práticos.

Uma vez que o mapa de qualidade representa um modelo que possui incertezas inerentes de outras etapas de caracterização e construção do modelo de simulação o ideal é que a geração desta ferramenta não demande um tempo ou esforço computacional exagerado a ponto de tornar sua utilização proibitiva; salienta-se a importância de uma boa precisão e correlação do mapa de qualidade obtido com o modelo estudado. A geração de um mapa de qualidade confiável, que possua uma representação suficientemente precisa do modelo de reservatório estudado apesar das incertezas, em um curto espaço de tempo torna esta ferramenta mais útil nas análises e no dia-a-dia de um engenheiro de reservatórios.

2.4 Técnicas Geoestatísticas – *Krigagem*

Alguns métodos testados neste trabalho não simulam todos os pontos da malha de simulação. Nestes casos, deve-se utilizar um método de interpolação para a obtenção do mapa em toda a malha. Estes métodos fazem uso de funções matemáticas para a estimativa das áreas não simuladas na malha do reservatório e devem fornecer resultados confiáveis e próximos da realidade dos dados para que os mapas gerados não percam precisão.

Segundo JOURNEL e HUIJBREGTS (1989), o problema da interpolação local é achar o melhor estimador dos valores médios de uma variável regionalizada sobre um domínio limitado. O conceito de interpolação global difere da local, pois a primeira considera distâncias maiores que os limites quase-estacionários, podendo assim esconder algumas heterogeneidades. A informação disponível usada na interpolação local se dá geralmente com um conjunto de dados e com uma informação estrutural (modelo de variograma caracterizando a variabilidade da zona estruturada).

No presente trabalho, o método de interpolação utilizado foi a *krigagem*, também conhecido como BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*). JOURNEL e HUIJBREGTS (1989) e DEUTSCH (2002) a definem como uma técnica de interpolação local que fornece a melhor estimativa linear imparcial para as características desconhecidas do estudo. Alguns trabalhos na literatura têm apontado algumas vantagens deste método quando comparados com outros métodos tradicionais.

Um experimento fatorial computacional, conduzido por ZIMMERMAN *et al.* (1999), compara a precisão da interpolação espacial da *krigagem* ordinária e universal com dois tipos de inverso ao quadrado da distância ponderado. O experimento considera quatro conjuntos de dados com diferentes características de amostragem: o tipo da superfície, o padrão de amostragem, o nível de ruído e a resistência a uma correlação espacial de pequena escala. A precisão da interpolação é medida pelo logaritmo natural do erro quadrático médio de interpolação. O resultado mais importante obtido é que os dois métodos da *krigagem* superam os métodos do inverso da distância. Obteve-se uma consistência superior no desempenho da *krigagem* sobre vários tipos de superfícies e padrões de amostragem e vários tipos de ruído e correlação espacial.

Além disso, este método possui outras vantagens não relacionadas ao desempenho, tais como a capacidade de se adaptar facilmente às estimativas de médias espaciais (*krigagem* de bloco) e o fato de levar em conta uma medida da variabilidade dos valores interpolados (variância da *krigagem*). A *krigagem* também se apresentou superior quando o padrão de amostragem é regular, o ruído, baixo e a correlação espacial, alta.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

No primeiro tópico deste capítulo estão apresentados alguns trabalhos que denotam a importância e a preocupação atual com a definição e otimização de estratégias de produção eficientes, assim como o tempo gasto neste processo (número de simulações utilizadas) e a aproximação do modelo numérico usando ferramentas de baixo custo. No segundo tópico estão descritos alguns trabalhos presentes na literatura que de alguma forma utilizaram o conceito de mapa de qualidade. Pode-se notar que poucos destes trabalhos atentaram de forma efetiva à proposição de novos métodos de geração e ao aperfeiçoamento dos já existentes.

3.1 Estratégia de Produção

Trabalhos recentes vêm demonstrando preocupação constante de seus autores em propor algoritmos e métodos capazes de tornar o processo de definição e otimização de estratégias de produção de campos de petróleo mais eficientes e rápidos, principalmente no que diz respeito à quantificação do número de poços ideal e à localização dos mesmos no reservatório.

O trabalho de CORRIE e INEMAKA (2001) apresenta um método analítico para estimar o número ótimo de poços de modo a maximizar o retorno econômico. Os autores determinam analiticamente o número ideal de poços calculando o máximo retorno econômico de uma equação que expressa o VPL do projeto sobre sua vida útil em função do número de poços em desenvolvimento (Equação 3.1). As simplificações usadas no modelo econômico são:

- Reservas constantes;
- VPL calculado depois da incidência de imposto de renda;

- Investimentos realizados no ano zero;
- Poços com a mesma taxa de produção de óleo inicial e com mesma taxa de declínio sobre o tempo;
- Taxa de declínio em função do número de poços, da produção de óleo diária inicial e das reservas totais; e
- Preço do óleo obtido na cabeça do poço.

$$W_0 = \frac{N_p \left\{ \ln(1+i)C - \left[365 Q_{oi} VC \ln(1+i) \right]^5 \right\}}{\left(-365 Q_{oi} C \right)} \qquad \text{Equação 3.1}$$

onde:

- W_0 é o número ótimo de poços;
- i é a taxa de desconto;
- C é o valor presente do capital de investimento depois do imposto de renda;
- Qoi é a produção de óleo inicial (diária); e
- V é o preço do óleo no poço depois do imposto de renda.

PEDROSO Jr. (1999) cita a localização dos poços como um dos principais fatores responsáveis por uma estratégia de produção eficiente. Em seu trabalho, o autor parte de um modelo geológico de reservatório e desenvolve uma metodologia para obter o número ideal de poços a serem perfurados e suas respectivas localizações. A metodologia proposta se aplica no desenvolvimento de campos produtores de hidrocarbonetos em estágio inicial de produção. Utiliza-se o recurso da computação paralela a fim de diminuir o tempo computacional consumido no processo.

WENCES *et al.* (2001) desenvolvem em seu trabalho uma ferramenta aplicável ao processo de otimização de estratégias de produção. A avaliação da distribuição de saturação móvel, da produtividade da célula e do VPL possibilita o número de previsões necessárias baseadas nos melhores casos. A metodologia se aplica quando o processo de caracterização do reservatório já foi concluído e, em fase preliminar, um modelo de simulação numérica já existe, sendo este calibrado por um ajuste de histórico, com um modelo de saturação e uma distribuição

de pressão próxima às condições reais de campo. Os próximos passos foram projetar e avaliar vários esquemas de produção a fim de determinar a melhor estratégia. A técnica é capaz de estimar o número ótimo de poços adicionais e as suas localizações na malha. Também é necessária a utilização de um indicador econômico.

GÜYAGÜLER e HORNE (2001) propõem um método que traduz a incerteza dos dados para a incerteza na decisão de alocação dos poços, em termos de valor monetário. A proposta é estimar o retorno esperado de qualquer decisão proposta, além do risco associado à mesma. Segundo os autores, ainda não há um método robusto que conte com a incerteza na localização de poços dentro de um contexto de otimização direta, usando um simulador numérico como ferramenta de análise. A teoria da utilidade é usada a fim de que o problema da otimização passe a ser a otimização de uma utilidade esperada, e não de uma função-objetivo. Interpreta-se o problema com relação à atitude do decisor diante do risco. Uma segunda metodologia é proposta, na qual se formula o problema da alocação dos poços através da otimização de uma função randômica, que não necessita do conhecimento a priori das probabilidades de retorno. Algoritmos genéticos são usados neste processo de otimização.

GÜYAGÜLER *et al*. (2002) usam algoritmos genéticos combinados com métodos auxiliares, tais como os métodos politopo (*polytope), krigagem* (*krigging*)*,* meta-modelos *(proxy)* e redes neurais, para melhorar o processo de otimização e tornar mais rápido o processo de posicionamento dos poços em projetos que utilizam injeção. Um estudo do posicionamento ótimo de injetores em Pompano, um campo marítimo do Golfo do México, é realizado utilizando o VPL como função-objetivo. Observa-se uma redução significativa no número de simulações e, conseqüentemente, no tempo computacional, com relação aos métodos que utilizam simuladores numéricos. A metodologia aplica-se, segundo os autores, em casos mais complexos, que demandem um tempo de simulação impraticável utilizando simuladores numéricos.

Conforme observado, alguns autores têm procurado aplicar algoritmos de otimização ao estudo de reservatórios; contudo, estes algoritmos geram um número elevado de simulações (freqüentemente da ordem de milhares). Por este motivo esta abordagem é viável apenas para modelos teóricos simples, pois casos reais demandariam muito tempo e esforço computacional.

Para contornar este problema, tem-se observado na literatura uma tendência em simplificar os modelos de reservatórios ao invés de reduzir o número de simulações, por exemplo, usando equações que forneçam respostas próximas às dos simuladores numéricos, porém em tempo muito menor e, possivelmente, com menor precisão.

Outra abordagem que tem sido adotada recentemente para auxiliar tanto na definição como na otimização de estratégias de produção, e que busca conciliar o potencial de técnicas de visualização à experiência de engenheiros de petróleo, é a geração e a utilização de mapas de qualidade.

3.2 Mapa de Qualidade

Alguns trabalhos da área de exploração já vêm usando mapas de qualidade, construídos através da combinação de dados geológicos, tais como porosidade, permeabilidade, saturação de óleo e outros, a fim de identificar em grandes áreas a probabilidade de existência ou não de hidrocarbonetos. Isto consiste em uma ampliação do conceito de mapa de qualidade estudado neste trabalho.

ZARGANI *et al.* (2003) citam que a integração espacial de dados geológicos tem sido utilizada em programas de exploração de petróleo para:

- Encontrar áreas onde a configuração geológica sugere que há a presença de hidrocarbonetos; e,
- Identificar regiões com alto potencial de hidrocarbonetos para investigações adicionais usando a área de previsão como um guia de exploração.

Em seu trabalho os dados geológicos são agrupados de acordo com sua importância na acumulação de petróleo. Cinco fatores principais são selecionados e usados na identificação de acumulações de petróleo: a rocha fonte, a rocha reservatório, o encapsulamento, a maturidade e a migração. Estes fatores principais são produzidos através da combinação de diversos fatores secundários, como por exemplo, a rocha reservatório, que engloba a porosidade, espessura, fácies de deposição, permeabilidade, etc. Estes fatores servem então como fonte de informação para a

construção de mapas que identificam regiões com a presença de acumulação de hidrocarbonetos. ZARGANI *et al.* (2003) também definem o mapa de favorecimento geológico, que consiste na combinação de toda informação disponível, desde observações geocientíficas a julgamentos subjetivos, a fim de representar uma medida quantitativa do favorecimento relativo à presença de acumulações de petróleo.

IERAPETRITOU *et al.* (1999) usam informações sobre o campo, incluindo a qualidade pontual e o geo-objeto, que expressam a produtividade e a conectividade do ponto. Baseado nessas informações formula-se o problema de seleção a localização dos poços verticais como um problema de otimização MILP (*Mixed-Integer Linear Programming*). Uma técnica de decomposição é então proposta a fim de direcionar problemas reais baseados na aplicação dos cortes restritivos de qualidade. Os autores caracterizam cada ponto (x, y, z) da malha por uma qualidade, que representa a produtividade, e por um geo-objeto, que representa a conectividade entre pontos (poços em potencial). Quando dois poços se apresentam em um mesmo geo-objeto, aplicam-se as restrições de distâncias de poços. A posição dos poços é definida em uma série de passos e entre estes são aplicados três cortes de poços, baseados em um critério de qualidade mínimo de cada ponto, ou seja, são selecionadas as localizações na malha que apresentam o maior índice de qualidade.

O primeiro trabalho a propor o conceito do mapa de qualidade, da forma como tratado neste trabalho, é o de CRUZ *et al.* (1999), que o define como uma representação bidimensional das respostas do reservatório e suas incertezas. O mapa de qualidade é obtido através da utilização de um simulador numérico, a fim de integrar todos os parâmetros que afetam o escoamento dos fluídos por reservatórios heterogêneos e garantir que todas as interações dinâmicas que ocorrem no meio possam ser levadas em conta. O método de geração proposto consiste basicamente em um poço produtor produzindo por um longo tempo de modo a extrair o máximo de óleo da região onde este está completado. Depois de simulado todo o reservatório, a quantidade de óleo produzida (Np) em cada região define a qualidade associada a ela. Os autores afirmam também que, modelando a incerteza geológica pela elaboração de diversos cenários estatísticos e construindo um mapa de qualidade para cada um deles, a incerteza pode ser integrada nos processos de decisão, como na localização dos poços.

GÜYAGÜLER (2002) usa em seu trabalho um esquema de otimização de estratégias de produção proposto por CRUZ (2000), onde o objetivo é a maximização da qualidade total calculada com os valores das qualidades totais dos poços. Para comparar os resultados obtidos realiza-se também uma otimização direta usando simulação numérica das posições dos poços. O autor conclui que o mapa de qualidade tem utilidade em uma aproximação inicial das posições dos poços ou como um método auxiliar no processo de otimização, porém, quando utilizado sozinho, não fornece resultados decisivos.

No trabalho de BADRU (2003) estuda-se a alocação de poços usando a ferramenta do mapa de qualidade (construído usando o método proposto por CRUZ *et al.,* 1999) em conjunto com outros métodos: politopo (*polytope*) e algoritmo genético. Sua metodologia é dividida em duas partes: o Mapa de Qualidade Básico (*Basic Quality Map* – BQM) e o Mapa de Qualidade Modificado (*Modified Quality Map* – MQM), que utiliza o resultado do primeiro método como dado de entrada.

No método BQM, a determinação dos valores da função-objetivo de uma configuração de poços proposta depende somente do inverso da distância ponderada em linha reta entre as células, ou seja, a função-objetivo é calculada usando o grau de proximidade entre as células. Desta forma, uma vez construído o mapa de qualidade, não se necessita de mais simulações no processo de otimização. O algoritmo de otimização central usa conceitos de algoritmo genético híbrido em conjunto com o método politopo (também conhecido como método *simplex*). Uma limitação deste método é que a avaliação da função-objetivo, baseada no inverso da distância ponderada em linha reta entre os pontos, pode desfavorecer boas localizações de poços. Possíveis razões deste fato são:

- A incapacidade do método de contabilizar interações dos poços, o que leva à ausência de mudanças nas localizações anteriores dos poços com a introdução de poços adicionais;
- A consideração de que a contribuição da qualidade das células, para a qualidade dos poços, é função do grau de proximidade da célula à localização do poço; e
- O uso da distância em linha reta na equação do inverso da distância ponderada.

Como o método BQM pode vir a produzir resultados não otimizados, se usado isoladamente como ferramenta de otimização, BADRU (2003) propôs acoplá-lo a uma ferramenta de otimização que trabalhe com uma função-objetivo verdadeira para avaliar as qualidades das localizações dos poços. O método MQM usa um simulador numérico e a técnica de análise das curvas de declínio para o cálculo da função-objetivo, além de utilizar o resultado da otimização do método BQM como entrada para o processo de otimização direta, que usa ferramentas como o algoritmo genético e politopo (*polytope*).

No trabalho de NAKAJIMA *et al.* (2004) o mapa de qualidade é utilizado para a definição da estratégia de produção inicial, de modo a garantir uma boa configuração inicial para o processo de otimização. Estuda-se a influência da definição de diferentes prioridades nas mudanças realizadas nos poços no processo de otimização de uma estratégia de produção, além do seu impacto no desempenho do reservatório. Neste trabalho demonstra-se que as escolhas realizadas definem o caminho seguido pelo processo de otimização e afetam o resultado final.

MARTINI *et al.* (2004) usam simulações numéricas para analisar o desempenho de diferentes estratégias de produção em um campo marítimo com injeção de água; estas estratégias incluem injeção periférica/produção central, esquema de injeção/produção *five-spot* e uma estratégia definida usando o mapa de qualidade. O processo de otimização é realizado com a ajuda de um sistema avançado de análise que propõe mudanças na estratégia analisando uma série de parâmetros do poço, do reservatório e do mapa de qualidade. Os resultados mostram que o mapa de qualidade melhora o processo de definição e de otimização da estratégia, levando a melhores resultados e usando menos simulações.

A metodologia de otimização usada por MARTINI *et al.* (2004) tem se mostrado bastante eficiente no caso de reservatórios de óleo convencional produzidos com injeção de água; MARTINI *et al.* (2005a) aplicam-na a um reservatório marítimo com óleo de 17^{o} API (953 kg/m^3) e viscosidade em torno de 30 cP (0,03 Pa-s); este tipo de óleo é considerado pesado pelo conceito adotado pela PETROBRAS, onde um óleo pesado é aquele mais denso ou mais viscoso que o óleo do campo de Marlim, que possui uma densidade de 19 a 21 °API e viscosidade entre 4 e 8 cP (PINTO *et al.*, 2003). O mapa de qualidade é gerado e utilizado para auxiliar na

otimização da estratégia, além de servir como mais um parâmetro de entrada para o sistema avançado de análise, que se encontra em constante desenvolvimento.

No trabalho de MAGALHÃES (2005) estuda-se a definição de estratégias de produção, com o auxílio do mapa de qualidade, considerando restrições operacionais das facilidades de produção. Mostrou-se que essas restrições devem ser consideradas ao longo do processo de otimização, pois possuem importante influência no resultado final do VPL obtido para a estratégia escolhida. Mapas de qualidade, gerados por lógica *fuzzy* (NAKAJIMA, 2003) e por simulação numérica, são utilizados para a definição de suas estratégias iniciais de produção e também como ferramenta auxiliar no processo de otimização.

GUIMARÃES (2005) estuda, em seu trabalho, campos em produção que apresentam dados de histórico de vários anos; o mapa de qualidade é utilizado em busca de áreas que apresentem potencial para perfuração de novos poços produtores e/ou injetores, na análise de áreas vizinhas a poços produtores (estudando o potencial de recompletação destes poços) e no auxílio à análise de conversão de poços produtores e injetores; tudo isso para campos em produção. Dois mapas são construídos: um mapa de qualidade inicial (MQI), gerado no final do período de histórico, e o mapa de qualidade final (MQF), gerado ao final do período de previsão de comportamento. Dentro da metodologia desenvolvida por GUIMARÃES (2005) para otimização da estratégia de drenagem de campos de petróleo em produção, apresentada na Figura 3.1, o MQI tem por objetivo mostrar as condições de drenagem do campo ao final do período de histórico e, junto ao MQF, comparar a evolução da drenagem da estratégia inicial com as diferentes estratégias desenvolvidas para o período de previsão. O MQF também é utilizado como critério de classificação de poços produtores. O índice de qualidade dos poços produtores horizontais é determinado pela média aritmética simples dos valores das qualidades dos blocos onde o poço estava completado.

COTTINI-LOUREIRO e ARAUJO (2005) usam a técnica dos cenários múltiplos (*Multiple Realization Approach*) e o mapa de qualidade, separados e combinados, na determinação das melhores locações para posicionamento de produtores no Campo de Maureen, localizado no Mar do Norte. A utilização isolada do mapa de qualidade, como parâmetro para

posicionamento dos produtores, resultou no segundo melhor resultado da análise, vencido apenas pelo resultado obtido da sua combinação com a técnica de cenários múltiplos.

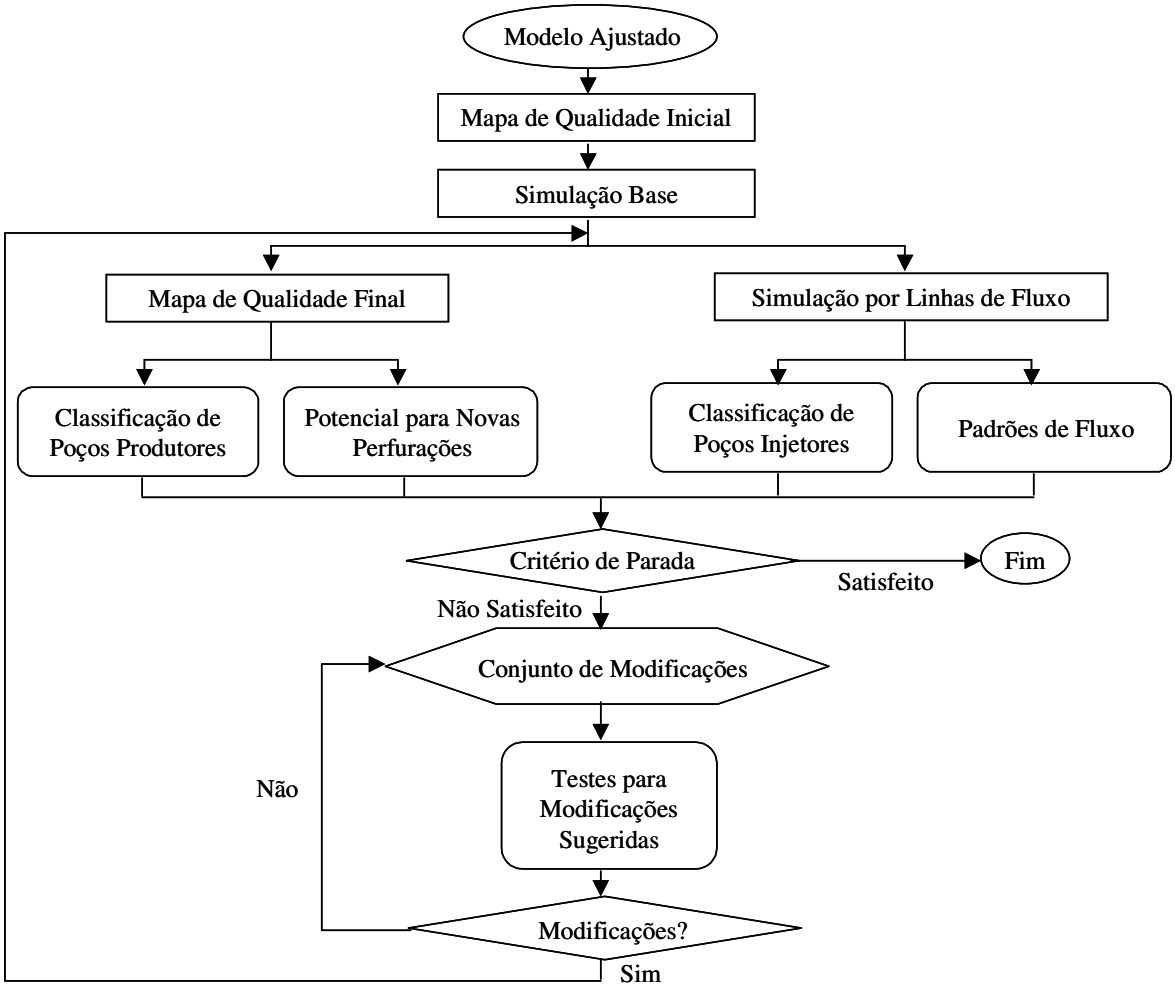


Figura 3.1– Fluxograma principal do processo de otimização de estratégias de drenagem para campos de petróleo em produção (Modificado de GUIMARÃES, 2005).

Dentre os poucos trabalhos que estudam os métodos de geração do mapa de qualidade, pode-se citar o desenvolvido por NAKAJIMA e SCHIOZER (2003), que fazem um estudo comparativo dos mapas de qualidade gerados por três diferentes métodos: simulação numérica (com a abertura simultânea de um grupo de poços), *fuzzy* e analítico. Os três mapas gerados são aplicados em um modelo derivado de um campo real da Bacia de Campos (Brasil). Para validar os mapas constrói-se uma estratégia de produção e faz-se uma otimização econômica usando cada mapa. Segundo os autores, os mapas gerados por lógica *fuzzy* e pelo método analítico são mais flexíveis, porém estes métodos ainda podem ser melhorados, uma vez que são adotadas

simplificações. Outro comentário dos autores é que o mapa gerado por simulação numérica deveria ter sido feito utilizando um poço com várias simulações (CRUZ *et al.*, 1999), porém este método não foi utilizado devido ao elevado tempo computacional necessário.

Dentre os diversos métodos de construção do mapa pode-se citar o método analítico (NAKAJIMA, 2003), baseado no modelo de BABU e ODEH (1989), e o método por simulação numérica (CRUZ *et al.*, 2004); além destes, trabalhos recentes têm apontado para métodos de geração que utilizem conceitos de inteligência artificial, como o método por lógica *fuzzy* proposto por NAKAJIMA *et al.* (2003).

CAVALCANTE FILHO *et al.* (2005a) comparam diferentes métodos de geração do mapa de qualidade usando simuladores numéricos. São utilizados dois reservatórios teóricos homogêneos e os métodos comparados são: (1) usando um produtor e (2) usando um grupo de quatro poços, simulados em diversas posições sobre o reservatório (método por varredura), e (3) usando produtores e injetores, uniformemente distribuídos sobre o reservatório e abertos simultaneamente. O método que utiliza produtores e injetores fixos apresenta os melhores resultados nesta análise.

No trabalho de CAVALCANTE FILHO *et al.* (2005b) diferentes métodos de geração do mapa de qualidade utilizando simulação numérica são estudados. Usou-se um único poço e um grupo de quatro poços percorrendo todo o reservatório em diversas simulações (método por varredura), além de dois métodos usando produtores fixos (com e sem injeção). Os pontos não simulados do mapa são gerados por *krigagem*. Os mapas obtidos sem utilizar injeção são comparados e validados por comparações visuais e através do cálculo de uma diferença relativa. É feita uma análise de eficiência da utilização dos mapas de qualidade gerados por poços fixos, onde o mapa gerado usando produtores e injetores fixos apresenta os melhores resultados.

3.2.1 Métodos de Geração do Mapa de Qualidade

Neste tópico, além do método de geração por simulação numérica proposto por CRUZ *et al.* (1999), são citados outros que utilizam diferentes princípios para geração do mapa de qualidade, tais como o método analítico e o método por lógica *fuzzy*.

- **Método Analítico**

O método analítico estudado por NAKAJIMA (2003) baseia-se na solução analítica para produtividade de poços horizontais proposta por BABU e ODEH (1989), apresentada na Equação 3.2. O cálculo é realizado até que todo o campo seja avaliado e a qualidade medida sob toda a área do reservatório é a taxa de produção de óleo do poço. A solução analítica considera que o poço está perfurado em um volume de drenagem em formato de caixa, como representado na Figura 3.2.

$$Qo = \frac{7{,}08 \cdot 10^{-3} b \sqrt{k_x - k_y}\left(\overline{p_r} - p_{wf}\right)}{B\mu\left[\ln\left(\frac{a^{1/2}}{r_w}\right) + \ln\left(C_H\right) - 0{,}75 + S_R\right]} \qquad \text{Equação 3.2}$$

onde:

- p_r é a pressão média do reservatório em psi,
- p_{wf} é pressão no fundo do poço em psi;
- k_x é a permeabilidade absoluta na direção x;
- k_y é a permeabilidade absoluta na direção y;
- B é o fator de formação de volume em bbl/STB;
- μ é a viscosidade em cP;
- C_H é o fator geométrico;
- r_w é o raio do poço em ft;
- a é o comprimento do reservatório (direção x) em ft;
- b é o comprimento do reservatório (direção y) em ft;

- S_R é o pseudo fator de película; e
- Qo é a vazão de produção de óleo.

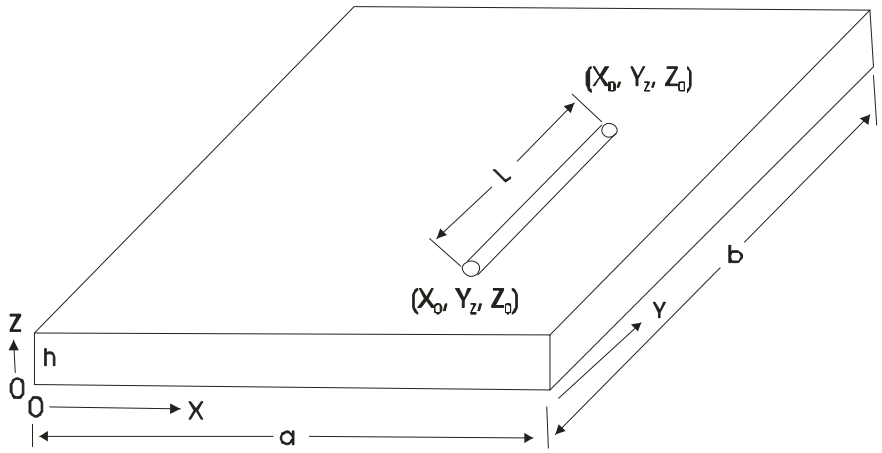


Figura 3.2 – Modelo físico do poço horizontal (Fonte: BABU e ODEH, 1989).

onde:

- h é a espessura da formação em ft;
- L é o comprimento do poço em ft; e
- x_0,y_0,z_0 é a posição do poço.

Este método precisa de um pré-processamento para organizar e preparar os dados a serem utilizados nas expressões. O primeiro passo no cálculo da taxa de produção é especificar o volume de drenagem, determinando suas dimensões e propriedades (área de drenagem horizontal, espessura do volume de drenagem e propriedades do volume de drenagem).

Depois de calculados os valores da taxa de produção para todo o reservatório (Equação 3.2), os resultados são normalizados pelo maior valor da taxa obtida. A saturação de óleo, que não consta na Equação 3.2, pode ser incluída como um peso multiplicador a fim de penalizar regiões com baixa saturação de óleo (NAKAJIMA, 2003). As simplificações adotadas no método analítico afetam os mapas gerados, mostrando que ainda é necessário aprofundar os modelos analíticos para que se possa obter mapas mais confiáveis.

BRANCO *et al.* (2005) utilizam em seu trabalho um mapa de qualidade integrado do reservatório relacionado com a eficiência da produção de óleo e que integra, usando uma equação analítica, alguns parâmetros estáticos e dinâmicos do reservatório, tais como a qualidade da rocha (permeabilidade absoluta e porosidade), a saturação móvel de óleo, a espessura porosa de óleo (*net pay*) e a distância ao contato óleo água.

- **Método por Simulação Numérica**

Desenvolvido por CRUZ *et al.* (1999, 2004), o método de geração do mapa de qualidade por simulação utiliza o resultado de diversas simulações de escoamento do fluido dentro do reservatório considerando a existência de apenas um poço produtor completado em todas as camadas de óleo, com fechamento automático da camada quando o limite estabelecido de corte de água (ou gás) é atingido. O tempo de produção, variável dependente do tamanho e das características físicas da rocha reservatório, deve ser suficiente para que o campo seja produzido até o abandono definitivo. Cada vez que um caso é simulado, a posição do poço produtor é alterada a fim de cobrir toda a área da malha horizontal que representa a rocha reservatório, como mostra a Figura 3.3.

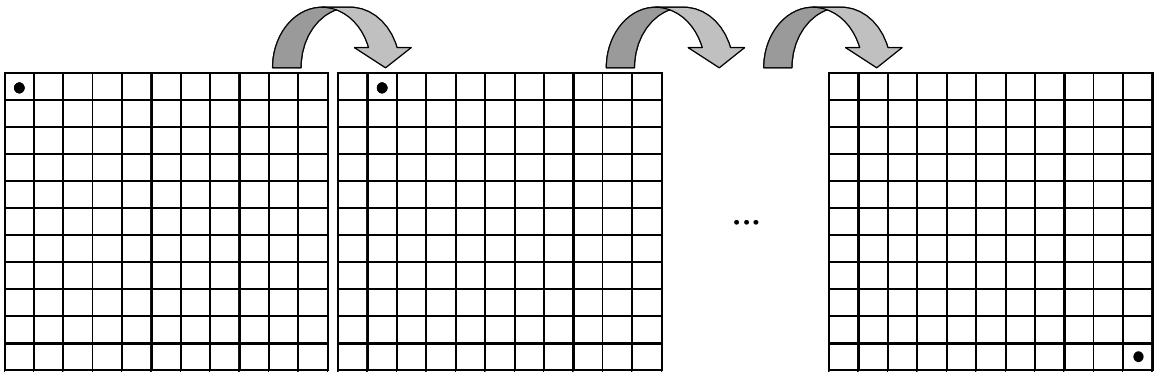


Figura 3.3 – Variação da posição do poço para cada etapa de simulação.

O termo "qualidade", adotado por CRUZ *et al.* (2004), corresponde ao total acumulado de óleo produzido, Np, após um determinado tempo de produção, porém outros indicadores podem ser utilizados, como por exemplo, o valor presente líquido (VPL).

De posse de diversos valores de produção acumulada para poços verticais em diferentes posições, a caracterização tridimensional de um reservatório, que envolve inúmeros parâmetros, é convertida em uma malha bidimensional de valores. A simulação realiza todas as interações entre as variáveis e retorna apenas o valor da qualidade (Np) para cada posição do poço produtor.

Para geração do mapa de qualidade completo para um determinado modelo de reservatório, o ideal é alocar o poço em cada célula da malha horizontal. Entretanto, quando se trabalha com grandes campos e com modelos variados de reservatório necessita-se de um enorme esforço computacional para simular todas as células dos diversos modelos. Em situações com restrições de tempo e/ou uso de simuladores, CRUZ *et al.* (2004) propõem uma alternativa viável que consiste em obter apenas alguns pontos para cada caso e interpolar o restante. A quantidade de pontos necessários depende da heterogeneidade e do tamanho da malha do modelo. Os pontos selecionados devem cobrir a área do modelo de forma a se obter uma representação adequada, ainda que aproximada, do potencial de produção do mesmo. Os pontos restantes (não obtidos com a simulação) são interpolados utilizando métodos geoestatísticos.

Com o objetivo de acelerar o processo de construção do mapa de qualidade, outros trabalhos sugerem sua geração com a abertura de um, dois e quatro grupos de poços produtores verticais e até usando um grupo de poços produtores horizontais, distribuídos de maneira a cobrir toda a área do reservatório (NAKAJIMA, 2003, NAKAJIMA e SCHIOZER, 2003, e MARTINI *et al*., 2005b). Quando se utiliza a abertura de um grupo de produtores verticais verifica-se um problema de rápida queda de pressão, dessa forma a maior produção é induzida para aqueles poços localizados nas regiões de melhor potencial (NAKAJIMA, 2003). O método que utiliza um grupo de produtores horizontais não apresenta bons resultados, o que pode ser explicado pela influência do direcionamento dos poços horizontais na produtividade (NAKAJIMA, 2003, e MARTINI *et al*., 2005b). O melhor resultado é obtido usando o método por simulação numérica com um poço produtor vertical, segundo um fator de correlação calculado NAKAJIMA (2003) e apresentado por MARTINI *et al.* (2005b).

- **Método por Lógica *Fuzzy***

O princípio fundamental da lógica *fuzzy* consiste em aproximar a decisão computacional da decisão humana, isto é, tornar a máquina capaz de apresentar decisões abstratas, tais como "mais ou menos", "talvez não"; e não apenas limitar a máquina a decisões binárias como "sim" ou "não".

Diferente dos métodos apresentados acima, o sistema *fuzzy* não requer modelos computacionais ou equações matemáticas para estabelecer uma relação entre os parâmetros de entrada e de saída. A relação entre os parâmetros de entrada e de saída é especificada por regras simples determinadas por uma base de conhecimento, obtidas através de simulação de reservatórios. Esta etapa demanda um esforço computacional razoável, contudo, uma vez definida a base de conhecimento (regras), não é mais necessário realizar simulações.

Para implementar este sistema o primeiro passo é a determinação das variáveis que serão utilizadas como dados de entrada. NAKAJIMA (2003) define como mais importantes na produtividade de poços horizontais os seguintes parâmetros: porosidade, espessura porosa, saturação de óleo, permeabilidades vertical e horizontal e distância do aqüífero e capa de gás.

O segundo passo consiste em substituir a proposição binária (valor de cada variável) por uma proposição nebulosa (modificadores lingüísticos como "muito", "mais ou menos", etc.), como se observa na Tabela 3.1 construída por NAKAJIMA (2003).

A fim de que o sistema possa interpretar os dados e fornecer respostas ao problema é preciso que haja uma dedução lógica para governar estas informações nebulosas. Essa dedução lógica ou conjunto de regras é chamado de inferência nebulosa. O método de inferência nebulosa aplicado por NAKAJIMA *et al.* (2003) possui a seguinte estrutura: "Se a porosidade é alta e espessura porosa é alta e permeabilidade é alta, então produtividade é alta".

A Figura 3.4 apresenta um exemplo de mapa de qualidade, gerado pelo método do sistema *fuzzy*; a escala colorida indica o fator de qualidade, que varia de 0 (ruim) a 1 (bom), ou

seja, as regiões com cor mais próxima do vermelho apresentam potencial de produção melhor que as demais.

Tabela 3.1 – Proposições Nebulosas (Fonte: NAKAJIMA, 2003).

Porosidade			**Espessura Porosa***	
0,2~1,0	Alto		0,6~1,0	Alto
0,1~0,2	Médio		0,3~0,6	Médio
0~0,1	Baixo		0~0,3	Baixo

Permeabilidade Horizontal (mD)			**Permeabilidade Vertical (mD)**	
1500~	Alto		300~	Alto
300~1500	Médio		100~300	Médio
0~300	Baixo		0~100	Baixo

Distância de Aqüífero (m)			**Distância de Capa de Gás (m)**	
30~	Alto		30~	Alto
10~30	Médio		10~30	Médio
0~10	Baixo		0~10	Baixo

Saturação de Óleo				
0,2~1,0	Alto		0~0,2	Baixo

*Valores Normalizados

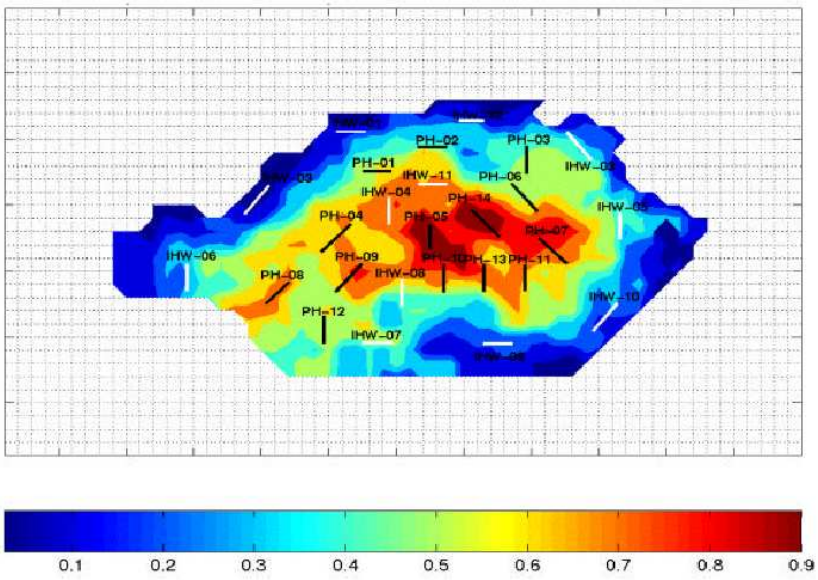


Figura 3.4 – Exemplo de mapa de qualidade com poços produtores (pretos) e injetores (brancos) (Fonte: NAKAJIMA, 2003).

3.3 Discussão da Revisão Bibliográfica

Apesar de seu potencial já ter sido demonstrado (CAVALCANTE FILHO, 2005b, COTTINI-LOUREIRO, 2005, CRUZ *et al.*, 2004, MARTINI *et al.*, 2005a, MARTINI *et al.*, 2005b, NAKAJIMA e SCHIOZER, 2003 e NAKAJIMA, 2003), mapas de qualidade aplicados ao desenvolvimento de estratégias de produção são ferramentas relativamente recentes e que ainda precisam ser estudadas com maior profundidade. Os trabalhos publicados na literatura até o momento mostram uma maior tendência em gerar o mapa através de simulação numérica. Para compensar o esforço computacional e o tempo maior exigido por este método, são propostas alternativas de simplificação, porém uma análise criteriosa dos mapas gerados ainda não foi realizada até o momento na literatura. Como parte dessa análise, é também necessário avaliar qual a melhor forma de comparação dos mapas gerados por diferentes métodos para um determinado reservatório.

O presente trabalho procura se concentrar no estudo de métodos de geração do mapa de qualidade por simulação numérica. A utilização do simulador na geração do mapa de qualidade tem se mostrado uma boa alternativa devido à melhor captação das interações dinâmicas entre rocha e fluido, assim como à capacidade de considerar uma maior quantidade de detalhes na geração do mapa de qualidade, quando definidos no modelo de simulação (restrições em condições operacionais dos poços, por exemplo).

Dentre os métodos de geração estudados neste trabalho é usado também um método analítico, onde algumas propriedades estáticas são utilizadas para, através do uso de uma equação analítica, quantificar a qualidade de cada região do reservatório. Mapa semelhante é utilizado no trabalho de BRANCO *et al.* (2005), citado anteriormente.

Capítulo 4

Metodologia

Para estudar os diversos casos e dar confiabilidade aos métodos de geração do mapa de qualidade propostos, a metodologia é dividida, de maneira geral, em três etapas (Figura 4.1). Na primeira etapa são definidos diferentes modelos de reservatório, diversos métodos de geração e três funções-objetivo, a serem estudados nas etapas seguintes. Na etapa de validação são usados modelos teóricos para estudar mais profundamente os métodos propostos, com o objetivo de identificar as características (vantagens, desvantagens e particularidades) de cada um. Na terceira etapa de aplicação os métodos que apresentam o melhor desempenho na etapa anterior são utilizados em um modelo de reservatório baseado em um campo real. Nos próximos tópicos, estão explicadas cada uma das etapas apresentadas na Figura 4.1.

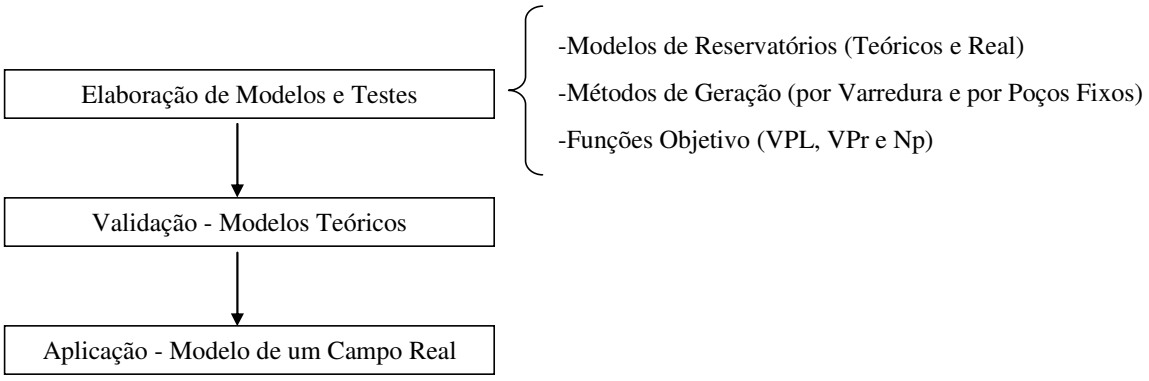


Figura 4.1 – Etapas de Metodologia.

4.1 Elaboração de Modelos e Testes

Como a validação dos métodos é uma tarefa difícil devido à subjetividade do processo, para garantir uma alta confiabilidade nos resultados obtidos é preciso estudar uma vasta combinação de diferentes modelos de reservatório, diversos métodos de geração e algumas funções-objetivo. Para comparar cada método é construída uma tabela onde são descritas as vantagens, as desvantagens e os testes que venham a confirmar a correlação do mapa de qualidade gerado com as características do modelo de reservatório estudado.

Para a elaboração e aplicação dos modelos e dos testes realizados são considerados os seguintes itens:

- Modelos de reservatórios teóricos homogêneos e heterogêneos (com barreiras e canais de permeabilidade), simétricos e assimétricos (com relação à geometria e a presença de aqüífero), com óleo leve e pesado e ainda um modelo de um campo real com óleo leve e pesado;
- Métodos de geração do mapa de qualidade, baseados nos métodos por simulação numérica, basicamente por varredura e por poços fixos, e variações destas metodologias onde foram utilizados grupos de poços e ainda injeção de água para manutenção da pressão do reservatório (recurso ainda não utilizado nos trabalhos da literatura para a geração do mapa de qualidade); e
- Funções-objetivo, a fim de avaliá-las na construção do mapa e em sua precisão.

4.2 Validação – Modelos Teóricos

Para validar os diversos métodos são usados modelos teóricos, empregando-se a metodologia de análise e seleção dos métodos apresentada na Figura 4.2.

O mapa gerado pelo método proposto por CRUZ *et al.* (1999), chamado neste trabalho de método por varredura, é definido como mapa de referência para os demais mapas obtidos.

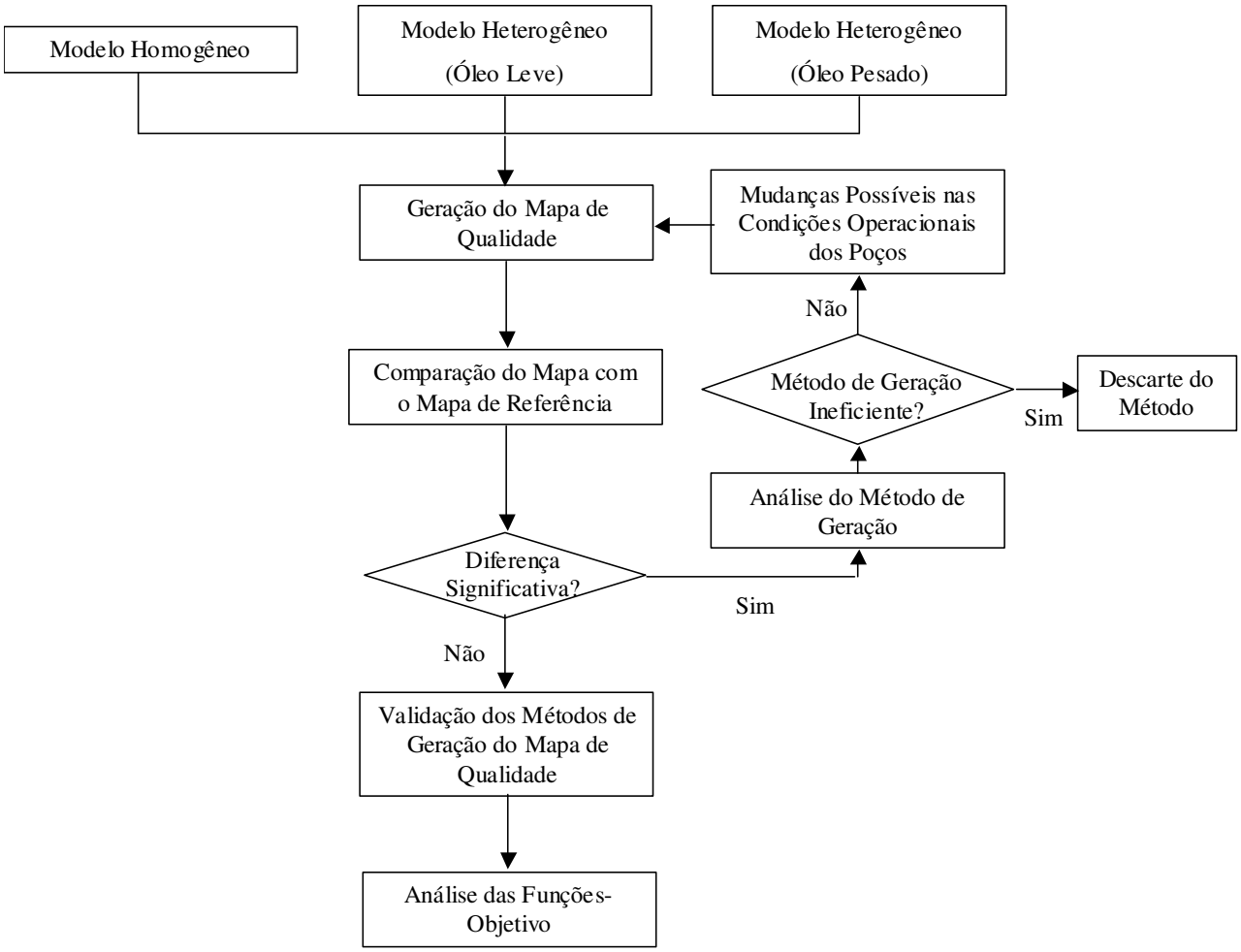


Figura 4.2 – Fluxograma da metodologia de estudo dos modelos teóricos.

4.2.1 Geração do Mapa de Qualidade

Variações da metodologia proposta por CRUZ *et al.* (1999) são estudadas a fim de se desenvolver uma técnica eficiente e que não necessite de um elevado tempo e número de simulações para a construção do mapa. Também são propostos e analisados métodos utilizando poços fixos (produtores e injetores) e um método analítico. Os métodos usados e analisados no presente estudo são descritos a seguir.

- **Método de Simulação Numérica por Varredura**

Neste caso, o poço varia de posição pelo reservatório a cada simulação, como representado na Figura 3.3. A cada simulação calcula-se a qualidade do poço (VPL ou outra função-objetivo utilizada), que corresponde à qualidade do bloco onde este se localiza.

Procurando diminuir uma possível desvantagem deste método, que é o alto consumo de tempo devido ao grande número de simulações e ao elevado esforço computacional exigido quando todos os pontos da malha são simulados, são testadas outras alternativas; por exemplo o deslocamento do poço (ou grupo de poços) pulando blocos (2 em 2, 4 em 4, e assim por diante) para diminuir o número de simulações. Nestes casos, onde não são simulados todos os pontos da malha, utiliza-se um método geoestatístico de interpolação para obter os demais pontos. Uma nova opção testada é a utilização de mais de um poço por rodada, ou grupo de poços, como exemplificado na Figura 4.3.

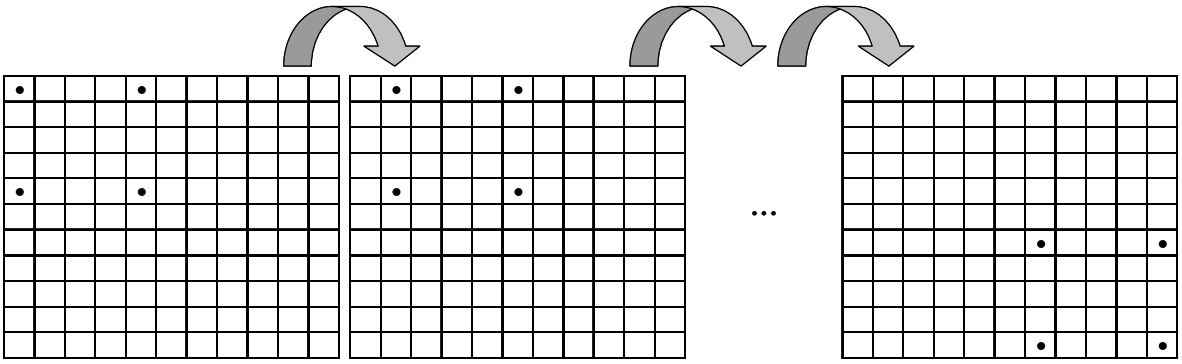


Figura 4.3 – Variação da posição do grupo de poços.

Outra variação do método de varredura testado é a adição de injeção usando um par de poços produtor e injetor, como representado na Figura 4.4. Este método leva em conta a influência de injeção na geração do mapa. Há neste método a necessidade de mais simulações do que o método por varredura convencional, pois para a confecção do mapa de qualidade é necessária a composição dos resultados de um conjunto de quatro mapas para garantir que todos os pontos da malha do reservatório sejam simulados. A sobreposição destes quatro mapas define uma configuração de poços do tipo *five-spot*.

Para a utilização do método descrito acima os produtores e injetores são completados em todas as camadas. A distância entre o produtor e os injetores é suficientemente grande para evitar uma demasiada influência do injetor sobre o produtor, o que pode ocasionar irrupção de água antecipada.

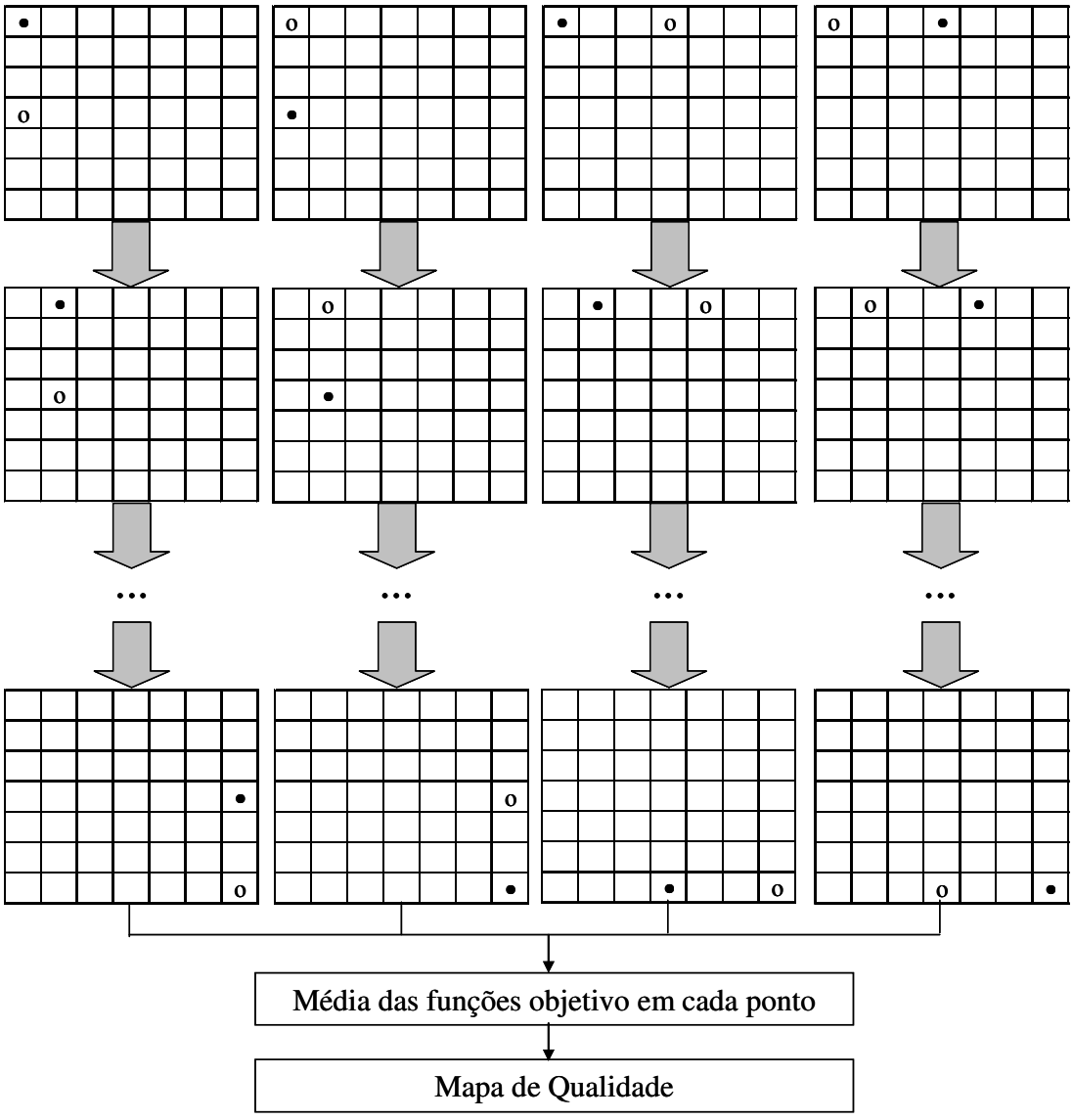


Figura 4.4 – Geração do mapa de qualidade com um par de poços – produtor (·) e injetor (o).

- **Método de Simulação Numérica por Poços Produtores Fixos**

Neste caso os poços são posicionados de maneira uniforme de modo a cobrir toda a malha do reservatório, começando a produção simultaneamente. O valor da qualidade dos poços (VPL ou Np, por exemplo) corresponde ao bloco onde estes se localizam. Como o restante dos pontos faltosos são interpolados, obtém-se o mapa com apenas uma simulação. Na Figura 4.5 pode-se observar um exemplo de um reservatório com poços produtores distribuídos de maneira uniforme.

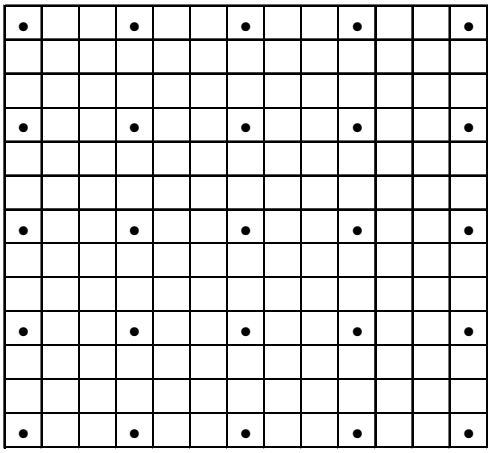


Figura 4.5 – Distribuição uniforme de poços produtores na malha do reservatório.

- **Método de Simulação Numérica por Poços Produtores e Injetores Fixos**

A utilização de injetores na construção do mapa de qualidade tem por finalidade auxiliar na manutenção da pressão no reservatório, especialmente quando muitos produtores são abertos simultaneamente. Além disso, cabe salientar que grande parte das estratégias de produção de campos reais utiliza injetores com o mesmo objetivo, a fim de otimizar a extração do óleo.

Neste método apenas os poços produtores fornecem valores de VPL, por isso apenas estes são usados na interpolação do restante do mapa de qualidade. Os poços injetores apenas servem como pontos de manutenção de pressão e, por apresentarem apenas custos, não cabe utilizá-los nos cálculos feitos para a construção do mapa.

São testadas duas configurações, uma com poços produtores (•) e injetores (o) intercalados entre si, numa configuração conhecida como *direct line* (Figura 4.6), e uma com os poços produtores (•) e injetores (o) alocados sobre a malha segundo a configuração *five-spot* (Figura 4.7).

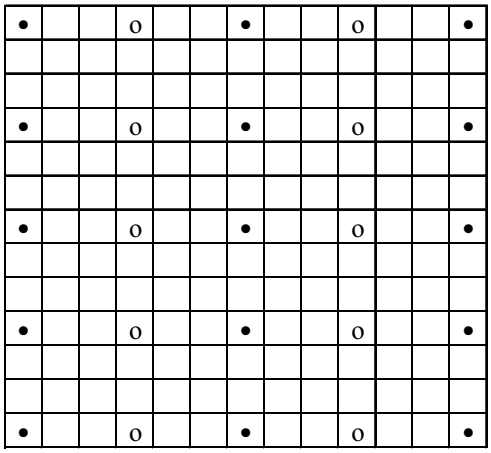


Figura 4.6 – Poços produtores (•) e injetores (o) distribuídos de forma intercalada no reservatório.

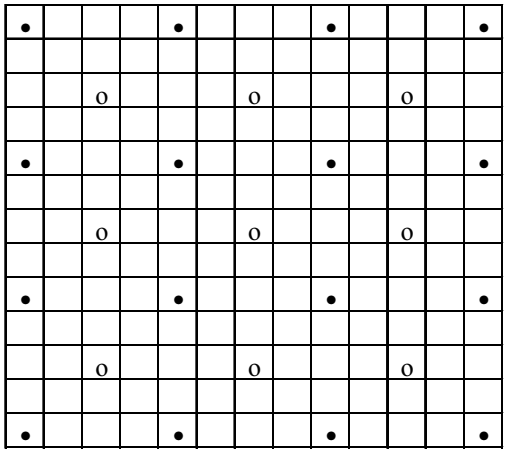


Figura 4.7 – Poços produtores (•) e injetores (o) distribuídos no reservatório segundo a configuração *five-spot.*

- **Método Analítico**

Este método consiste na geração do mapa de qualidade através da aplicação de uma equação analítica (Equação 4.1), que fornece basicamente o volume de óleo *in situ* multiplicado pela permeabilidade média de cada região do reservatório. Com base nesse mapa o engenheiro de

reservatório adquire uma noção da qualidade de cada região do reservatório. Este método é proposto como uma alternativa mais rápida que a geração de mapas por simulação, considerando, porém, apenas as propriedades estáticas da rocha reservatório.

$$\Gamma_{i,j} = \sum_{i}^{k} \frac{K_{i,j}}{k} \times \sum_{1}^{k} \Delta X_{i,j} \Delta Y_{i,j} \Delta Z_{i,j} \phi_{i,j} S_{o\,i,j} \qquad \text{Equação 4.1}$$

onde:

- Γ é o valor do potencial de certa região do reservatório;
- K é o valor da permeabilidade;
- ΔX é o tamanho do bloco no eixo X;
- ΔY é o tamanho do bloco no eixo Y;
- ΔZ é o tamanho do bloco no eixo Z;
- ϕ é o valor da porosidade;
- S_o é o valor da saturação de óleo; e
- Os subscritos i, j e k são, respectivamente, a posição de cada bloco em relação aos eixos x, y e z.

4.2.2 Comparação do Mapa Obtido com o Mapa de Referência

Somente a análise visual dos mapas de qualidade gerados não é capaz de fornecer um parâmetro definitivo e confiável de precisão do mapa de qualidade. Para quantificar a diferença entre os mapas, é definida uma diferença relativa entre os mapas obtidos com os métodos testados neste trabalho e o mapa de referência. A equação usada para o cálculo desta diferença é:

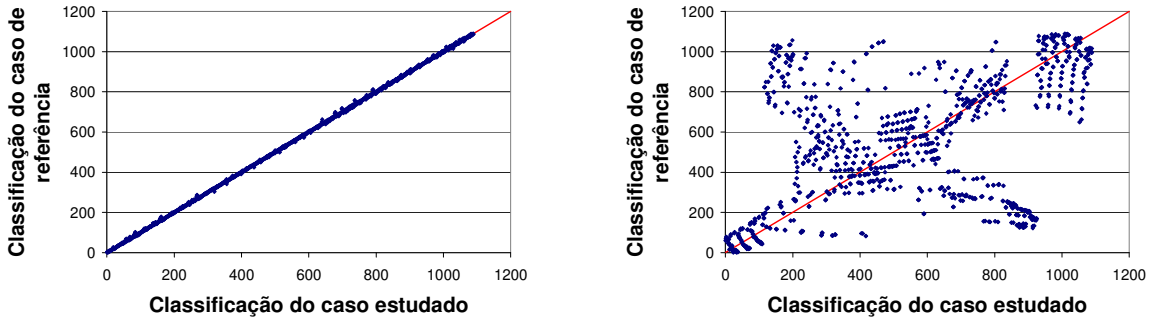
$$\varepsilon(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\left| M_{referência_i} - M_{estudado_i} \right|}{M_{referência_i}}}{n} \times 100 \qquad \text{Equação 4.2}$$

onde:

- ε é o valor da diferença relativa expresso em porcentagem;

- "i" é o índice relativo ao bloco de coordenadas XY na malha (na horizontal);
- $M_{estudado}$ é o valor de qualidade do mapa gerado pelo método estudado;
- $M_{referência}$ é o valor de qualidade do mapa de referência; e
- n é o número total de blocos da malha na horizontal.

Outra ferramenta de comparação utilizada em alguns casos é o gráfico de validação cruzada da ordem de classificação das qualidades. Este gráfico consiste em uma representação da classificação da qualidade do caso de referência com a classificação da qualidade dos casos estudados. Quanto mais estes pontos se aproximarem da bissetriz dos eixos, como mostrado no item (a) da Figura 4.8, maior o grau de correlação entre o mapa estudado e o mapa de referência. Pontos dispersos em relação à bissetriz dos eixos, como mostrado no item (b) da Figura 4.8, indicam um baixo grau de correlação entre os mapas. Por exemplo, seja um ponto XY, classificado em 10° lugar no caso de referência; se ele estiver classificado em 8° lugar no caso estudado, estará situado próximo à bissetriz; se estiver classificado em 600° lugar no caso estudado, ele estará bem longe da bissetriz.



(a) (b)

Figura 4.8 – Gráficos de validação cruzada: (a) e (b) representam, respectivamente, um alto e um baixo grau de correlação entre os mapas de qualidade comparados.

O objetivo de se utilizar a classificação da qualidade ao invés do seu próprio valor, é que os valores de qualidade não necessariamente têm que ser iguais, mas as regiões de maior e menor qualidade devem estar localizadas aproximadamente na mesma área.

Uma vez que a utilização da injeção altera as condições internas do reservatório influenciando assim na produção e, conseqüentemente, no VPL dos poços produtores, somente é calculada a diferença e são construídos os gráficos de validação cruzada para aqueles mapas gerados sem o uso deste recurso. Estes mapas de qualidade são analisados mais profundamente através da análise visual e da correlação do mapa obtido com o modelo de reservatório estudado.

4.2.3 Análise do Método de Geração

Caso a diferença entre os mapas seja significativa, análises adicionais são realizadas buscando compreender o funcionamento do método de geração e propor alterações a fim de tornar o método confiável. Para realizar esta análise são construídos gráficos como os de produção de óleo ou água contra o tempo, de corte de água contra o tempo, etc.

4.2.4 Descarte do Método

No caso de algum método se apresentar ineficiente na geração do mapa de qualidade devido a problemas diversos, como rápida queda de pressão, fechamento prematuro dos produtores ou alta influência entre poços, este pode ser considerado de baixa confiabilidade e descartado das análises futuras.

4.2.5 Mudanças Possíveis nas Condições Operacionais dos Poços

Caso a análise do método mostre que o problema da geração do mapa pode ser resolvido com algum tipo de mudança nas condições operacionais dos poços (taxa de produção de líquidos, corte de água máximo de produção, etc.), o mapa é novamente gerado com as modificações necessárias e reavaliado.

4.2.6 Validação dos Métodos de Geração de Mapas de Qualidade

Uma vez analisados todos os critérios propostos, são listados todos os métodos de geração com suas vantagens e desvantagens descritas, a fim de orientar trabalhos futuros que visem à utilização do mapa de qualidade com uma boa precisão e de acordo com suas necessidades.

4.2.7 Análise das Funções-Objetivo

Este trabalho propõe o uso do VPL como função-objetivo para a obtenção do mapa de qualidade, pois este considera, além do volume do óleo produzido, o cenário econômico, a velocidade de produção do mesmo (tempo) e os custos de perfuração e de produção ou injeção de água.

São testados ainda o VPr (ou Np atualizado), que considera somente as receitas ignorando os custos, e o Np, indicador físico que representa apenas o volume de óleo produzido sem considerar qualquer fator econômico.

4.3 Aplicação – Modelo de um Campo Real

Neste caso utiliza-se um modelo de campo derivado de um campo real (Campo de Namorado modificado), onde são estudados alguns métodos de geração selecionados na etapa posterior de validação. O fluxograma da metodologia para este estudo está presente na Figura 4.9 e é composto por um corpo base com duas ramificações que abrem espaço para algumas análises adicionais. As análises adicionais têm por objetivo comprovar resultados obtidos na etapa de validação usando agora o modelo de campo real.

4.3.1 Geração do Mapa de Qualidade

Definidos os métodos mais confiáveis, são gerados e comparados os mapas de qualidade a fim de aplicar os métodos propostos em um modelo de campo real. Antes de realizar a etapa de definição das estratégias iniciais são realizadas algumas análises adicionais descritas a seguir:

- Comparação dos Mapas de Qualidade Gerados – Os mapas obtidos são comparados utilizando técnicas descritas no item 4.2.2. Gerou-se o mapa de referência utilizando o método por varredura (CRUZ *et al.*, 1999); e
- Análise de Robustez – Para analisar a robustez dos métodos varia-se a quantidade de produtores e injetores utilizados na geração dos mapas. Essa análise é aplicada principalmente aos métodos de geração que utilizam poços fixos, com ou sem injeção.

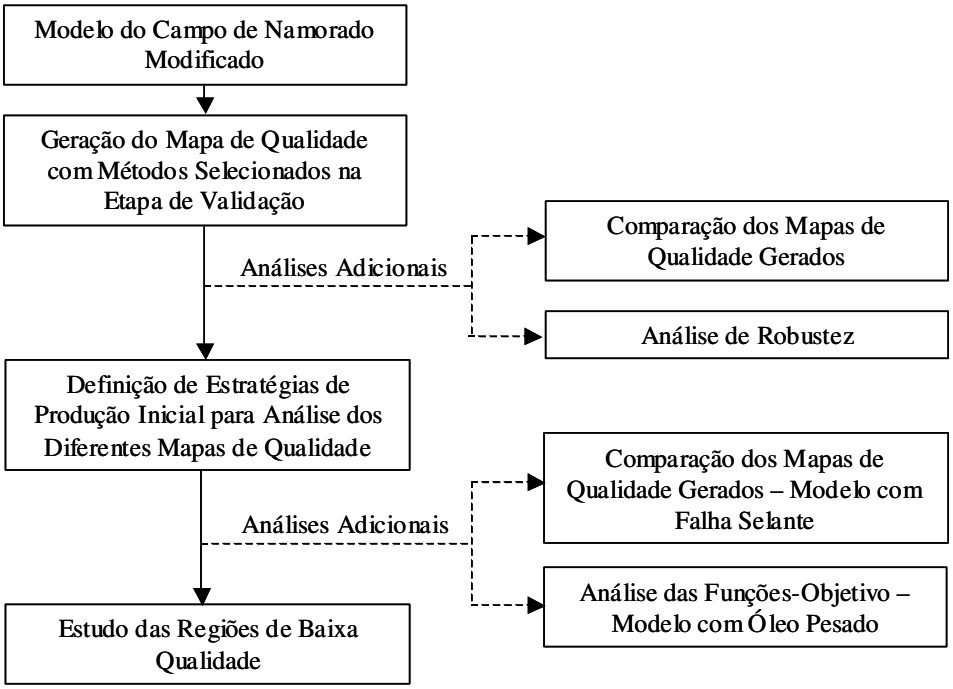


Figura 4.9 – Fluxograma da metodologia de estudo do caso de um campo real (Campo de Namorado modificado).

4.3.2 Definição de Estratégias de Produção Iniciais para Análise dos Diferentes Mapas de Qualidade

A fim de comparar a eficiência dos mapas de qualidade gerados com os métodos propostos são elaboradas diferentes estratégias de produção iniciais utilizando-os como parâmetro de referência. Esta etapa é importante, pois uma das finalidades dos mapas é auxiliar na definição de estratégias iniciais. Deve-se ressaltar que há certo grau de subjetividade no processo de definição destas estratégias, portanto, para diminuir essa subjetividade a construção das estratégias de produção inicial segue rigorosamente os critérios apresentados no capítulo a seguir (item 5.4.1).

As análises adicionais realizadas entre esta e a última etapa do corpo base da metodologia são:

- Comparação dos Mapas de Qualidade Gerados – Modelo com Falha Selante – Esta comparação é feita com o intuito de analisar a eficiência dos mapas de qualidade gerados na

identificação de uma falha selante presente em um modelo com todas as características de um campo real; e

- Análise das Funções-Objetivo – Modelo com Óleo Pesado – Como realizado na etapa de validação, além do VPL, são testados ainda o VPr e o Np usando o modelo de campo real com óleo pesado.

4.3.3 Estudo das Regiões de Baixa Qualidade

Com a análise do mapa de qualidade o engenheiro pode identificar, no reservatório, regiões de maior ou menor potencial produtivo. Uma região pode apresentar baixo potencial produtivo por duas razões principais: (1) devido à alta produção de água, ou seja, produtores localizados sobre aqüíferos ou em regiões onde os cones de água se formam com facilidade, e (2) baixa produção de óleo devido a uma deficiência de pressão na região, ocasionada devido à baixa eficiência do mecanismo primário de produção, pela presença de falhas ou outros tipos de heterogeneidades. Neste estudo propõe-se uma nova metodologia de tratamento da função-objetivo usada para a construção do mapa de qualidade. Baseada nos custos de produção de água e de óleo (Equação 4.3 e 4.4), esta tem por objetivo facilitar a identificação, no mapa de qualidade, dos motivos da ocorrência de uma região de baixa produtividade.

$$\alpha = \frac{C_w}{C_t}, \text{ onde: } C_t = C_w + C_o \qquad \text{Equação 4.3}$$

$$\beta \cong \frac{c_w}{c_t}, \text{ onde: } c_t = c_w + c_o \qquad \text{Equação 4.4}$$

onde:

- α e β são adimensionais;
- C_w, C_o e C_t são, respectivamente, os custos de produção de água, de óleo e total dos poços; e
- c_w, c_o e c_t são, respectivamente, os custos de produção por barril de água, de óleo e total.

Os parâmetros α e β são adimensionais calculados em função dos custos de produção de água e de óleo dos poços (respectivamente, C_w e C_o) e dos custos de produção por barril de água e de óleo (respectivamente, c_w e c_o). Depois de calculados os valores de α e β para todos os pontos do mapa deve-se aplicar a formatação condicional dos dados descrita na Figura 4.10. Recomenda-se que essa formatação condicional seja realizada apenas para as regiões com baixo potencial (no presente trabalho foi realizada para potenciais com valores de função-objetivo normalizada entre 0 e 0,5). O mapa de qualidade deve ser construído usando, ao invés da primeira função-objetivo normalizada obtida (FO_{norm}), a função-objetivo normalizada resultante da formatação condicional (FO'_{norm}). Valores de FO'_{norm} negativos indicam regiões de baixo potencial devido à alta produção de água, enquanto que valores positivos indicam baixa produtividade devido à deficiência de pressão.

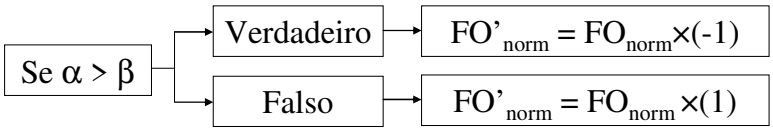


Figura 4.10 – Formatação condicional dos dados da função-objetivo normalizada (FO_{norm}).

A lógica deste procedimento consta no fato de que, como a constante β define um parâmetro que indica quando a produção de água está prejudicando a produção do poço, ou seja, quando a produção de água passa a ser maior que a de óleo a ponto de prejudicar o rendimento do produtor, sempre que a constante α exceder o valor de β sabe-se que o poço produz água a níveis não aceitáveis por motivos tais quais a presença de um aqüífero ou o excesso de injeção. Dessa forma o motivo da baixa qualidade de certas regiões pode ser diferenciada e identificada sobre o mapa de qualidade.

Capítulo 5

Aplicações

Neste capítulo estão descritos todos os modelos teóricos desenvolvidos para a primeira fase de validação, bem como o modelo do campo real utilizado na fase de aplicação. São descritas características como permeabilidade (heterogeneidades na forma de canais e barreiras), geometria dos reservatórios, posições dos aqüíferos (aqüífero de fundo e aqüífero lateral), e outras.

Quanto às condições operacionais dos poços produtores, utilizados na construção dos mapas de qualidade, inicialmente estas foram definidas segundo as seguintes considerações:

1. Longo tempo de produção (simulação), suficiente para que o reservatório produza o máximo possível;
2. Alta vazão de líquidos, a fim de permitir que o reservatório produza sempre o máximo de líquidos possível por todo o tempo de produção;
3. BHP mínimo para manter o reservatório acima da pressão de bolha, a fim de evitar a produção de gás; e
4. O poço é fechado por camadas seguindo um critério de corte de água máximo, dessa forma as camadas fecham gradativamente à medida que a água avança no poço.

5.1 Caso 1A e Caso 1B – Reservatórios Teóricos Homogêneos (Óleo Leve)

5.1.1 Caso 1A

Todas as propriedades da rocha reservatório são homogêneas e isotrópicas. A permeabilidade vertical da rocha é definida como 10% da permeabilidade horizontal (500 mD), que é a mesma tanto na direção X quanto na direção Y. A malha do reservatório é de 33x33 blocos, dividida em 10 camadas, resultando em um total de 10890 blocos. Um aqüífero de Fetkovich, posicionado no fundo do reservatório, é implementado com o fim de fornecer pressão ao reservatório. Na Figura 5.1 pode-se observar a geometria do reservatório. O óleo utilizado neste modelo é considerado leve, com 28^{o} API.

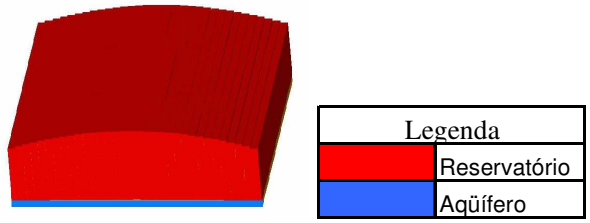


Figura 5.1 – Modelo teórico de reservatório homogêneo – Caso 1A.

5.1.2 Caso 1B

O caso 1B possui propriedades semelhantes ao caso 1A, diferindo somente na geometria e no posicionamento do aqüífero de Fetkovich utilizado para pressurização (aqüífero lateral). O modelo de reservatório é representado na Figura 5.2.

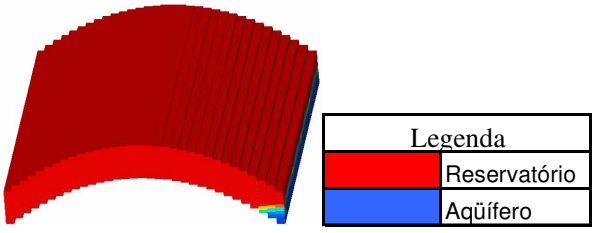


Figura 5.2 – Modelo teórico de reservatório homogêneo – caso 1B.

5.2 Caso 2A e Caso 2B – Reservatórios Teóricos Heterogêneos (Óleo Leve)

5.2.1 Caso 2A

Este caso possui as mesmas características do caso 1A (Figura 5.1), diferindo apenas pela presença de canais e barreiras de permeabilidade (Figura 5.3).

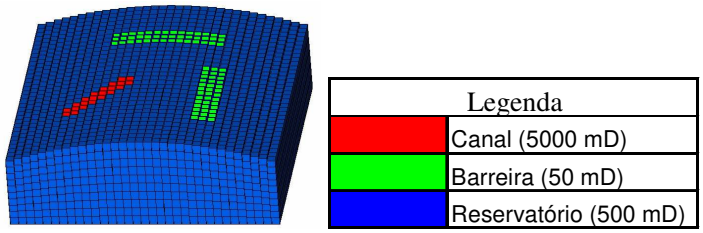


Figura 5.3 – Modelo teórico de reservatório heterogêneo – caso 2A.

5.2.2 Caso 2B

Este caso possui as mesmas características do caso 1B (Figura 5.2), diferindo apenas pela presença de heterogeneidades (Figura 5.4).

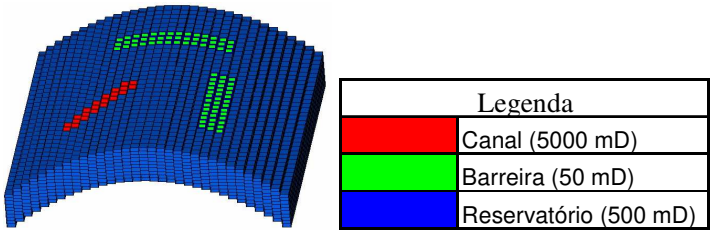


Figura 5.4 – Modelo teórico de reservatório heterogêneo – caso 2B.

5.3 Caso 3A e Caso 3B – Reservatórios Teóricos Heterogêneos (Óleo Pesado)

5.3.1 Caso 3A

Este caso possui as mesmas características do caso 2A (Figura 5.3), diferindo apenas pelas propriedades do fluido. O óleo utilizado neste modelo é um óleo pesado com 17 °API e viscosidade de 30 cP.

5.3.2 Caso 3B

Este caso possui as mesmas características do caso 2B (Figura 5.4), diferindo apenas pelas propriedades do fluido. O óleo utilizado neste modelo é um óleo pesado 17 ^{o}API e viscosidade de 30 cP.

5.4 Caso 4A e Caso 4B – Modelo de Campo Real

5.4.1 Caso 4A

Derivado do Campo de Namorado, Bacia de Campos, o presente modelo apresenta características típicas de campos reais tornando-se, portanto, um modelo adequado para aplicação e análise das metodologias testadas nos casos mais simples. Na Figura 5.5 está representado o modelo do campo.

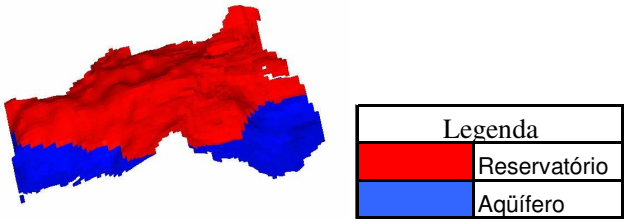


Figura 5.5 – Modelo do Campo de Namorado modificado.

Na Figura 5.6, observa-se o mapa de porosidade e de permeabilidade do modelo do Campo de Namorado modificado. No mapa de porosidade pode-se verificar que a porosidade na maior parte do campo varia entre 20 e 25% e no mapa de permeabilidade podem-se identificar a distribuição das regiões de baixa e alta permeabilidade. Trata-se, portanto, de um modelo com nível de heterogeneidades baixo, uma vez que não apresenta falhas, canais ou barreiras de permeabilidade.

- Definição de Estratégias de Produção Inicial para Análise dos Diferentes Mapas de Qualidade

Na etapa de definição das estratégias de produção inicial para comparar resultados obtidos com os diferentes mapas de qualidade, a fim de diminuir o grau de subjetividade do processo são definidos e seguidos, rigorosamente, os critérios abaixo:

- São definidas estratégias de produção inicial usando, basicamente, os mapas de qualidade como referência;
- Os poços utilizados são horizontais com comprimento máximo de 200 m;
- A menor distância entre cada poço foi de 300 m;
- Os produtores são alocados na camada de topo e nas regiões do mapa de qualidade com qualidade maior que 0,6;
- Os injetores são alocados nas camadas mais profundas e nas regiões do mapa de qualidade com qualidade menor que 0,3;
- Todos os poços, produtores ou injetores, são alinhados somente em relação ao eixo X ou Y da malha de simulação;
- Todos os poços são abertos simultaneamente;
- São definidas quatro estratégias de produção para cada mapa com diferentes números de poços; e,
- Considera-se o maior VPL de um total de cinco simulações, realizadas para cada uma das estratégias de produção geradas, a fim de verificar as condições de produção e garantir um comportamento coerente do reservatório e dos poços durante a simulação – total de 60 (4 estratégias × 5 simulações × 3 mapas de qualidade) simulações para a conclusão da análise.

- Modelo com Falha Selante

Para análises adicionais do estudo com o modelo de campo real, utiliza-se também um modelo com as mesmas características estruturais do caso 4A (Figura 5.5 e 5.6), porém com um maior nível de heterogeneidade. Uma falha selante (transmissibilidade igual à zero) é introduzida, como representado na Figura 5.7.

- Modelo com Óleo Pesado

Em uma outra análise adicional, onde se estudam diferentes tipos de funções-objetivo na geração do mapa de qualidade, utiliza-se um outro modelo semelhante ao modelo apresentado no item 5.4.1 (Figura 5.5 e 5.6), porém o diferencial é apenas tipo de óleo (óleo pesado, com densidade de 17^{o}API e com viscosidade de 30cP).

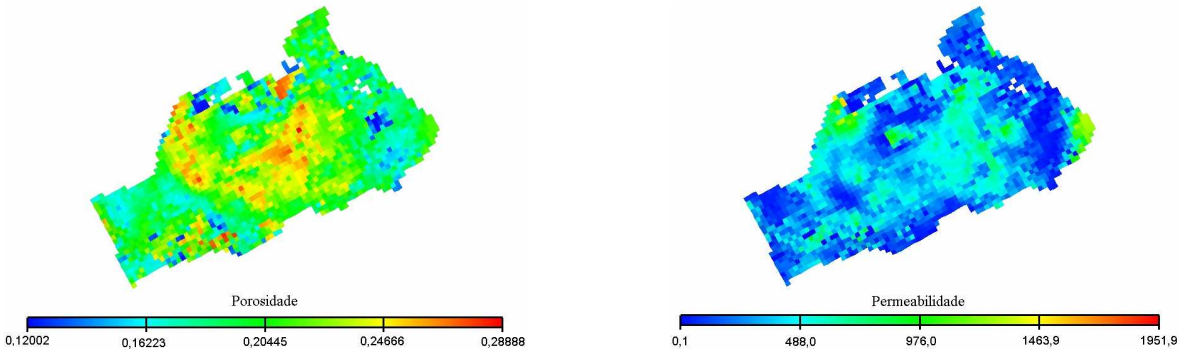


Figura 5.6 – Mapas de porosidade e permeabilidade, respectivamente, do Campo de Namorado modificado (modelo de campo real).

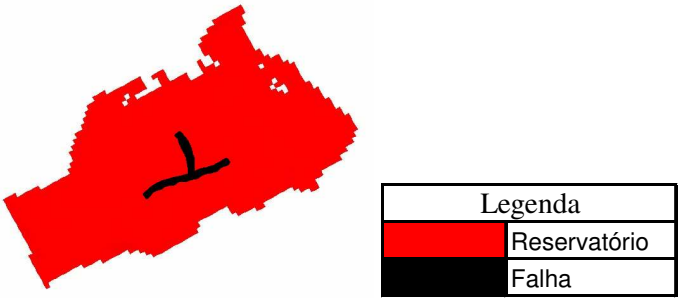


Figura 5.7 – Modelo de reservatório com uma falha (transmissibilidade = 0).

Capítulo 6

Resultados - Validação

Neste capítulo são apresentados os resultados da etapa de validação.

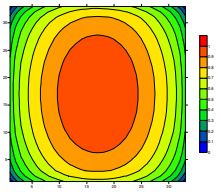
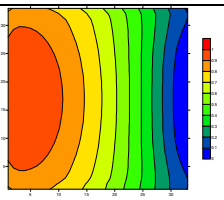
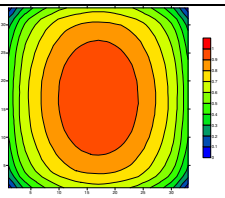
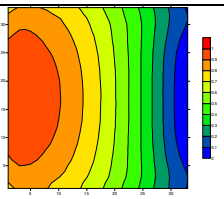
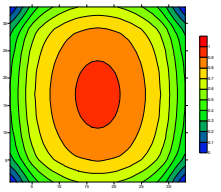
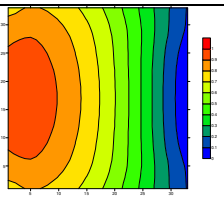
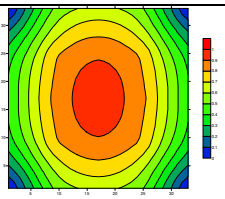
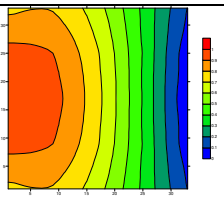
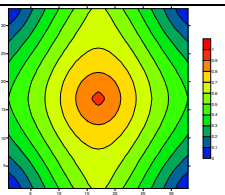
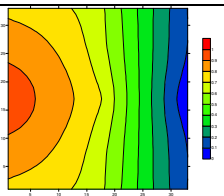
6.1 Modelos Teóricos Homogêneos – Óleo Leve (Caso 1A e Caso 1B)

6.1.1 Método por Varredura com 1 Produtor

A Tabela 6.1 mostra os mapas de qualidade gerados por varredura. Na primeira linha estão os mapas de referência, onde todos os pontos da malha são simulados. As linhas seguintes mostram os mapas gerados pulando 2 em 2 blocos, 4 em 4, 8 em 8 e 16 em 16 blocos.

Observando a Tabela 6.1, pode-se perceber que, à medida que o número de pontos simulados diminui, a diferença relativa dos mapas estudados em relação ao mapa de referência aumenta. Isso acontece por que quanto menos pontos simulados, maior a dependência do método de interpolação. Esta dependência é uma característica negativa, pois os pontos interpolados não representam fielmente o espaço do reservatório onde se localizam, por não sofrerem influência direta das propriedades do local. Por exemplo, caso os pontos obtidos estejam muito distantes uns dos outros, o método de interpolação pode mascarar alguma falha, canal ou barreira de permeabilidade que originalmente exista no reservatório, comprometendo a precisão do mapa de qualidade.

Tabela 6.1 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração por varredura com um único poço.

	Simulações	Caso 1A		Caso 1B	
		Mapa de Qualidade	ε	Mapa de Qualidade	ε
1 em 1 Mapa de referência	1089		0%		0%
2 em 2	289		1%		1%
4 em 4	81		3%		4%
8 em 8	25		11%		5%
16 em 16	9		32%		19%

O número de simulações de cada caso representa o tempo gasto e o esforço computacional requerido na geração de cada mapa. O mapa de referência apresenta um número superior aos demais casos, indicando uma relação diretamente proporcional entre tempo, esforço computacional e precisão do mapa obtido. Com os resultados gerados observa-se que, dependendo do tamanho da malha, do grau de precisão necessário e do tempo de simulação disponível para o estudo, um mapa de qualidade pode ser gerado com um esforço computacional relativamente baixo e uma precisão satisfatória. Nestes casos homogêneos, o mapa gerado com

um poço sendo deslocado de 8 em 8 blocos mostra a melhor relação entre número de simulações e valor da diferença relativa.

6.1.2 Método por Varredura com um Grupo de 4 Produtores

Na Tabela 6.2 pode-se observar os casos gerados com o método por varredura, onde, ao invés de um poço, é usado um grupo de quatro poços percorrendo toda a malha do reservatório. Os casos 1A e 1B apresentam mapas com a mesma tendência dos seus respectivos mapas de referência, porém as diferenças relativas calculadas resultam em valores elevados (acima de trinta por cento).

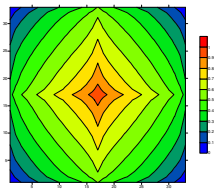
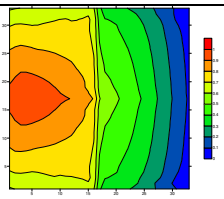
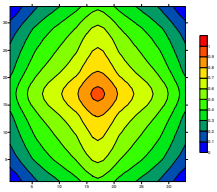
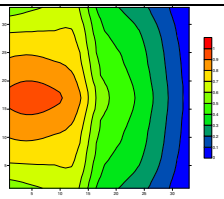
O problema deste método é a influência entre os poços, que devem estar posicionados a uma distância mínima capaz de evitá-la. Mesmo definindo esta distância mínima, a presença de três poços a mais acarreta em um comportamento diferente da distribuição de pressão com o tempo quando comparado com o mapa de referência (utilizando apenas um poço), o que justifica as diferenças observadas entre o mapa gerado e o mapa de referência. Realizando uma análise visual, verifica-se que a região vermelha (máxima qualidade) tem sua área diminuída e seu formato alterado em relação ao mapa de referência (em ambos os casos).

Um outro problema ocorre devido ao posicionamento dos poços no grupo sobre o reservatório a cada simulação. Como a configuração dos poços é quadrangular, as condições de simulação dos produtores são alteradas e estes passam a sofrer influência uns dos outros de uma forma diferente, isto é, não somente devido à distância entre eles, mas também à alteração da área de drenagem de cada poço. Esta influência diminui a eficiência do mapa de qualidade gerado tornando-o dependente, além das condições da rocha, do fluido e das interações dinâmicas entre eles durante o escoamento, da configuração e do número de produtores usados para a geração do mapa de qualidade.

Para estudar mais profundamente o método de geração por varredura com um grupo de quatro poços são construídos gráficos de produção de óleo e de água contra o tempo para um dos grupos de quatro produtores utilizados na geração do mapa, alocados nas posições indicadas pela

Figura 6.1. A comparação é feita com poços simulados sob as condições deste método e sob as condições do método por varredura com apenas um poço. O caso estudado é o 1B, com deslocamento do grupo de poços de quatro em quatro blocos.

Tabela 6.2 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração por varredura com um grupo de quatro poços.

	Simulações	Caso 1A		Caso 1B	
		Mapa de Qualidade	ε	Mapa de Qualidade	ε
1 em 1	289		37%		34%
4 em 4	25		37%		31%

Os gráficos de produção de água e óleo para os respectivos poços estão na Figura 6.2. Para o caso do grupo de quatro poços comprova-se que o poço PH-03 produz mais óleo que os outros e a água só vem a ser produzida mais tarde. O poço PH-01 é o segundo poço em produção de óleo, que ocorre mais lentamente, seguido dos poços PH-04 e PH-02.

Pode-se verificar também na Figura 6.2 que o fechamento dos poços posicionados na região central do reservatório (PH-02 e PH-04), depois de passados aproximadamente 2500 dias, acarreta em um sensível aumento da produção de óleo dos demais poços. Dessa forma percebe-se claramente a influência mútua entre os produtores durante a simulação. O fechamento dos poços ocorre quando estes atingem o limite máximo de corte de água definido na simulação (99% para o caso 1B).

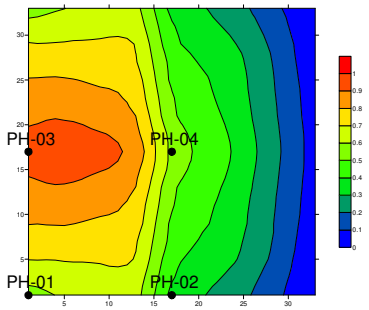


Figura 6.1 – Posição dos poços para análise do mapa do caso 1B com grupo de quatro poços sendo deslocados de quatro em quatro blocos.

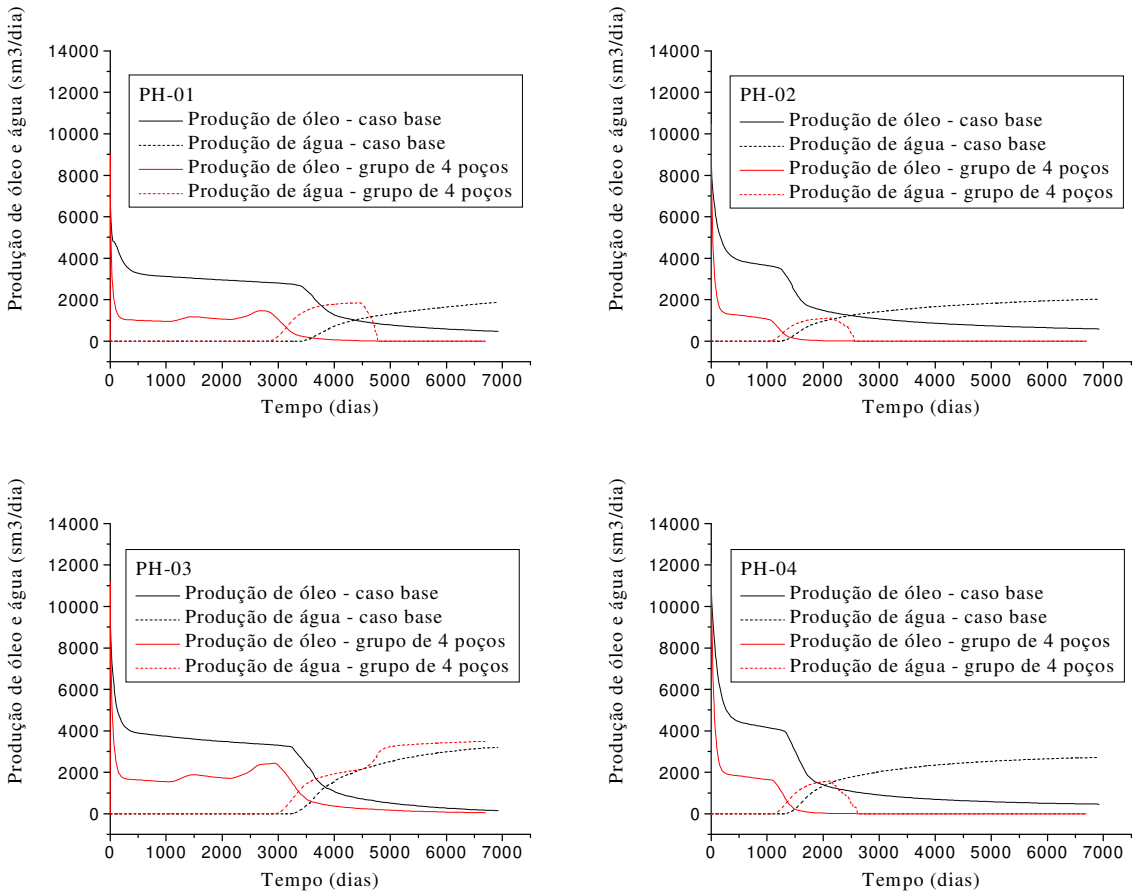


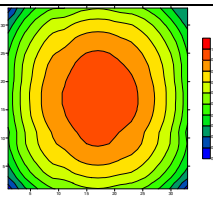
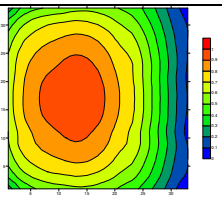
Figura 6.2 – Gráficos de produção de óleo e água referentes aos poços da Figura 6.1.

6.1.3 Método por Varredura com um Par Produtor/Injetor

Os mapas de qualidade gerados usando um par de poços produtor e injetor são apresentados na Tabela 6.3. O mapa do caso 1A apresenta um formato bem similar ao do mapa

de referência, porém, no caso 1B, há um deslocamento da região de alta qualidade na direção do centro do reservatório, devido à presença do poço injetor. O distanciamento entre os poços deve ser suficiente para que o injetor incremente a pressão do reservatório, porém sem alterar significativamente a área de drenagem do produtor. A distância usada entre o produtor e o injetor neste caso é de, aproximadamente, 1000 m.

Tabela 6.3 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração por varredura com um par produtor/injetor (2 em 2 blocos).

		Caso 1A	Caso 1B
	Simulações	Mapa de Qualidade	
Par prod./inj. (2 em 2)	748		

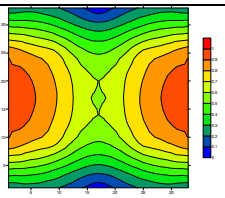
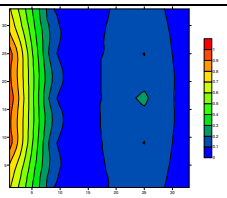
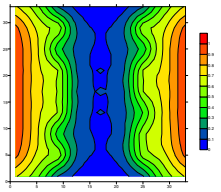
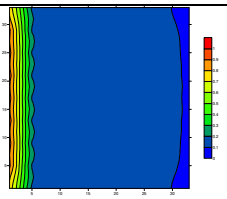
6.1.4 Método por Produtores Fixos

Os mapas gerados pelo método que usa produtores fixos, ou método por abertura simultânea de poços produtores estão representados na Tabela 6.4. Observa-se que os mapas apresentam um formato diferente e uma tendência inversa à dos seus respectivos mapas de referência (a região de boa qualidade no mapa de referência é a região de má qualidade dos mapas apresentados abaixo). Além disso, os valores da diferença relativa apresentaram-se altos.

As diferenças dos mapas podem ser explicadas devido à rápida queda de pressão do reservatório quando os vários produtores são abertos simultaneamente. Alguns poços em regiões críticas do reservatório (regiões mais espessas, como no caso 1A, ou mais altas, como no caso 1B) onde a influência da pressão exercida pelo aqüífero é sentida com menor intensidade, têm sua produção prejudicada (caso 1A) ou são fechados logo no início da simulação (caso 1B) devido à deficiência de pressão. Este fechamento antecipado é prejudicial à geração do mapa de qualidade, pois impede que os poços tenham a oportunidade de produzir por um tempo suficiente para demonstrar todo o seu potencial e refletir a verdadeira qualidade da região que estes representam. Cabe salientar que a qualidade da região está diretamente relacionada com todos os

parâmetros do reservatório e do fluido, inclusive a pressão, que exerce uma importante influência no escoamento do óleo.

Tabela 6.4 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração por poços produtores fixos.

	Simulações	Caso 1A		Caso 1B	
		Mapa de Qualidade	Dif.	Mapa de Qualidade	Dif.
25 prod.	1		41%		67%
81 prod.	1		72%		67%

Para observar e analisar o que acontece com os poços nos métodos de geração por abertura simultânea é feito um estudo de quatro poços, localizados como representado na Figura 6.3, para o caso 1A, e na Figura 6.5, para o caso 1B.

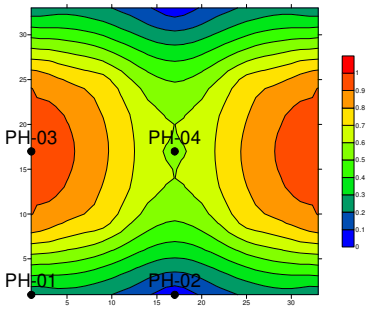


Figura 6.3 – Posição dos poços para análise do mapa do caso 1A gerado por abertura simultânea de poços (25 produtores).

Observando-se o gráfico de produção de óleo e de água (Figura 6.4), pode-se conferir que o poço PH-03 realmente produziu mais óleo, porém a produção de água também é muito superior à dos outros poços. Por se localizar na região mais estreita do reservatório, este poço recebe pressão do aqüífero de forma mais eficiente, produzindo óleo mais rápido e em maior quantidade.

Também por este motivo a água é produzida mais rapidamente e em maior quantidade. Ao se calcular o VPL para os poços verifica-se que, embora a produção de água do poço PH-03 seja a maior de todos os poços estudados, a quantidade de óleo produzida e a rapidez com que ela ocorre favorecem este poço tornando-o o poço de maior VPL (qualidade). O poço PH-04 apresenta o segundo maior VPL por possuir uma área de drenagem superior aos demais poços, porém, mesmo alocado na região de maior espessura do reservatório, este não apresenta o melhor VPL devido ao problema da pressão. O PH-01 apresenta o terceiro maior VPL por localizar-se numa zona favorecida de pressão (zona menos espessa e mais próxima do aqüífero), mesmo estando situado no canto do reservatório, onde a área de drenagem é menor que a dos demais poços. O PH-02, mesmo possuindo uma área de drenagem maior que o PH-01, apresentou o pior VPL de todos pelo mesmo motivo do poço PH-04 (problema de pressão). Com estes resultados pode-se observar a importância da pressão na geração de um mapa de qualidade condizente com a realidade do modelo em estudo.

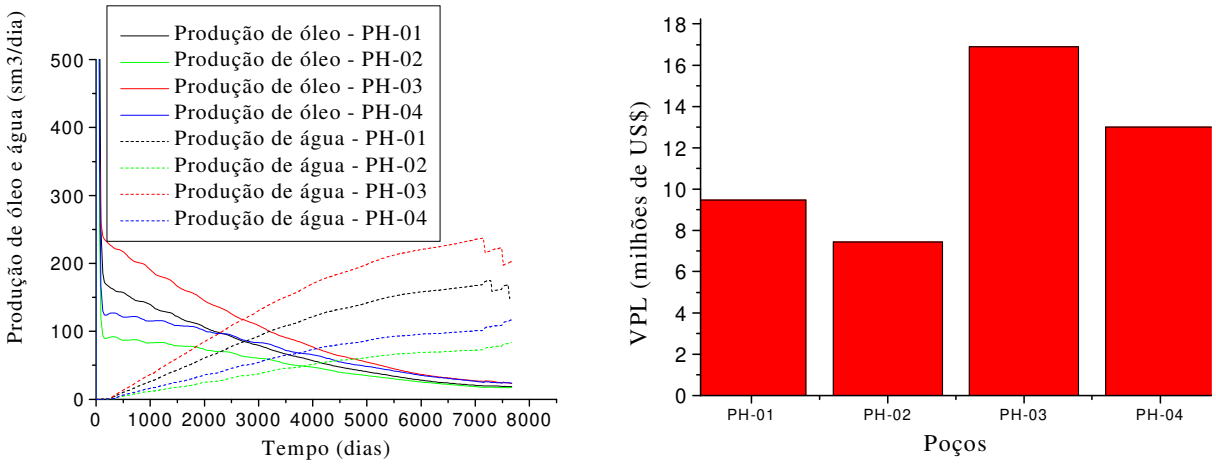


Figura 6.4 – Gráfico de produção de óleo e água e gráfico de VPL referentes aos poços representados na Figura 6.3.

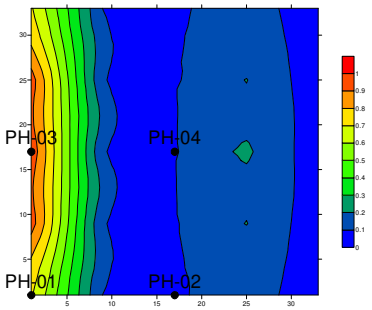


Figura 6.5 – Posição dos poços para análise do mapa do caso 1B gerado por abertura simultânea de poços (25 produtores).

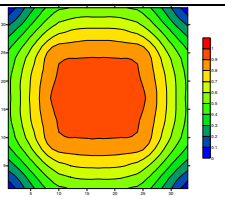
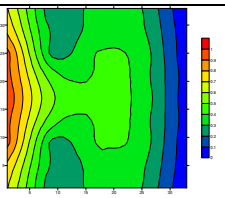
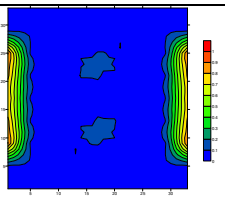
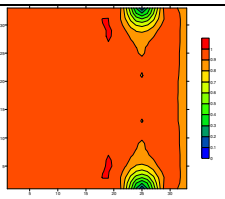
Para o caso 1B ocorre um outro problema devido à geometria do reservatório e a presença de apenas um aqüífero (posicionado na lateral direita do reservatório). Observando a Figura 6.6, pode-se analisar o comportamento dos poços estudados durante a simulação. Como o aqüífero não consegue fornecer pressão suficiente para todos os poços, o simulador muda o parâmetro de fechamento de alguns considerando o limite mínimo de pressão, e não o limite máximo de corte de água antes definido como padrão. Todos os poços posicionados na região mais alta do reservatório (PH-02 e PH-04), onde a pressão exercida pelo aqüífero é menor, são fechados logo no início da simulação (motivo pelo qual as suas curvas não são visíveis nos gráficos da Figura 6.6). Os poços PH-01 e PH-03, mesmo longe do aqüífero, permanecem abertos, pois a pressão do reservatório é maior que o limite mínimo de pressão de fundo de poço (BHP) nessa área devido ao auxílio do processo de drenagem gravitacional (ocasionada pela geometria anticlinal do reservatório).

O fechamento dos poços em regiões mais altas também impede uma maior queda da pressão do reservatório permitindo, desta forma, a atividade operacional dos poços mais distantes. Com o aqüífero longe, a produção de óleo destes poços é lenta, porém livre da presença de água, que só vem a ser produzida muito mais tarde. Os outros poços, localizados próximo ao aqüífero e cujas produções são mantidas com facilidade pela pressão, rapidamente passam a produzir água e são fechados mais cedo por atingir o valor de corte de água limite.

Na tentativa de solucionar o problema do fechamento de poços devido ao BHP o valor mínimo deste parâmetro é diminuído na metade e os mapas de qualidade são reconstruídos utilizando os modelos do caso 1A e 1B, como apresentado na Tabela 6.5. Como se pode observar

principalmente no caso 1A, a diminuição do BHP mínimo melhora os resultados para o mapa gerado com 25 produtores, porém quando se utiliza 81 produtores a queda de pressão novamente aparece e altera a configuração do mapa obtido. O mapa gerado com 81 produtores do caso 1B, mostra uma grande área de boa qualidade, porém isso ocorre devido a normalização do VPL ter resultado em valores muito próximos; na análise da simulação percebe-se o fechamento de grande parte dos poços por problema de pressão. Uma possível desvantagem desta alternativa consiste no fato de que a diminuição do BHP mínimo dos poços para valores abaixo da pressão de saturação ocasiona uma produção excessiva de gás, fato este que pode afetar o resultado do mapa de qualidade gerado; cabe salientar que na prática se objetiva evitar ou diminuir a formação e a produção de gás no reservatório mantendo a sua pressão em níveis acima da pressão de saturação.

Tabela 6.5 – Mapas de qualidade gerados com o método por produtores fixos utilizando um BHP mínimo de fechamento dos poços reduzido na metade.

	Simulações	Caso 1A		Caso 1B	
		Mapa de Qualidade	ε	Mapa de Qualidade	ε
25 prod.	1		12%		43%
81 prod.	1		84%		321%

Uma outra alternativa para evitar o problema da queda de pressão é através da diminuição da vazão dos produtores com a modificação das condições operacionais dos mesmos. Antes os produtores possuíam como parâmetro de produção uma vazão de líquidos elevada, a fim de garantir a máxima produção de cada poço. Agora esta produção é restrita e calibrada a fim de evitar o problema da rápida queda de pressão. A Equação 6.1 é usada para calcular a vazão máxima dos poços produtores (Q), dividindo o volume total de óleo *in situ* (V_{oi}) pela quantidade

de poços (n) vezes o tempo de produção em dias (t). O valor da vazão dos poços deve ser ligeiramente superior ao obtido com o cálculo descrito anteriormente.

Como se pode ver na Tabela 6.6, os mapas gerados com os produtores calibrados apresentam um comportamento condizente com o modelo estudado e a diferença relativa calculada é menor. Dessa forma verifica-se que o mapa gerado com produtores fixos, para este caso homogêneo estudado, apresenta resultados satisfatórios (melhores do que os obtidos com a diminuição do BHP para o caso 1A – 81 produtores) quando aplicada a restrição de vazão dos produtores descrita acima. Observando os gráficos de validação da Tabela 6.7 comprova-se que os mapas gerados apresentam uma boa aproximação com o mapa de referência (principalmente para o caso 1B). A maior dispersão de pontos ocorre no caso 1A com 81 produtores, indicando uma pior correlação com o caso de referência. Isso ocorre devido ao aumento do número de produtores, que ocasiona o reaparecimento do problema da queda de pressão. Este fato indica uma baixa confiabilidade dos mapas gerados por este método denotando uma baixa robustez com a variação do número de produtores usados para a geração do mapa de qualidade.

A calibração dos produtores mostra melhores resultados no controle do problema da queda de pressão que a diminuição do BHP; por isso apenas este recurso é utilizado nos testes realizados posteriormente com o método por produtores fixos.

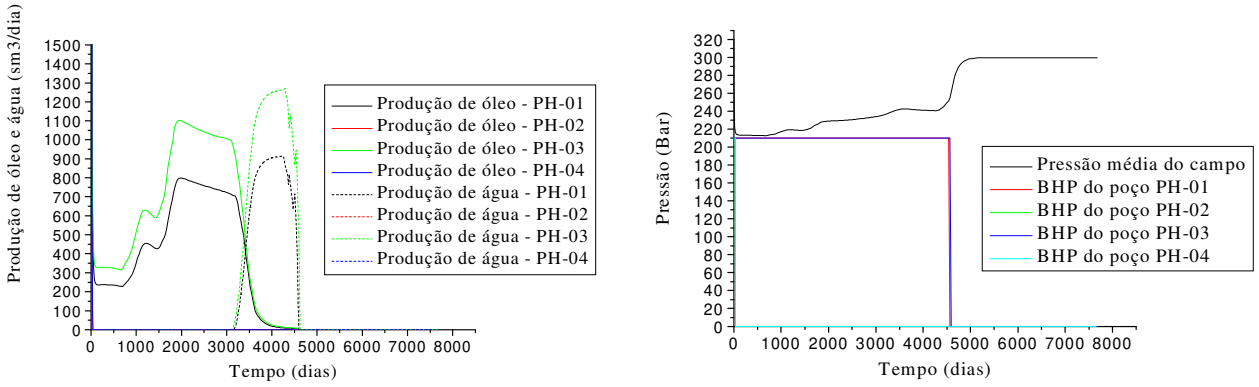


Figura 6.6 – Gráficos de produção de óleo e água e de pressão (pressão média para o campo e BHP para os poços) referentes aos poços representados na Figura 6.5.

$$Q = \frac{V_{oi}}{nt}$$ Equação 6.1

Tabela 6.6 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração por poços produtores fixos aplicando a restrição de vazão.

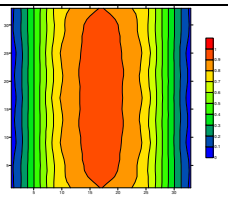
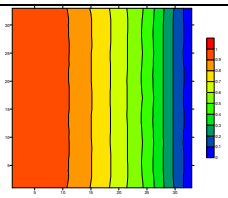
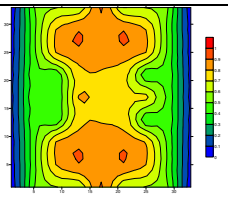
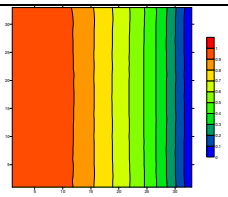
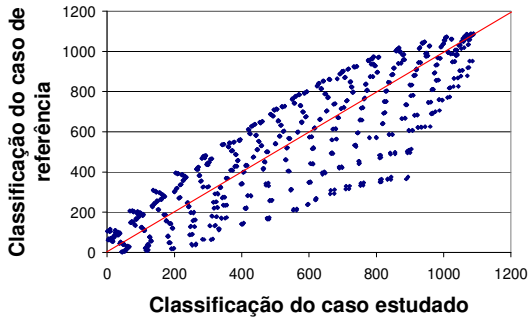
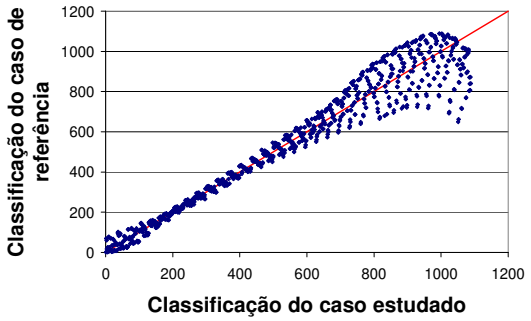
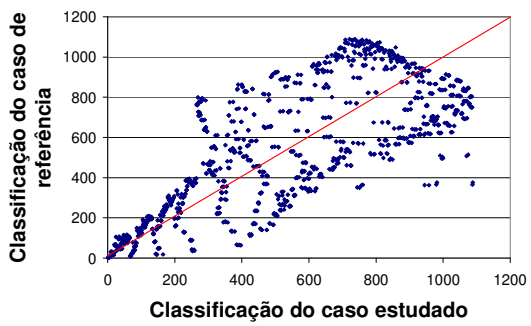
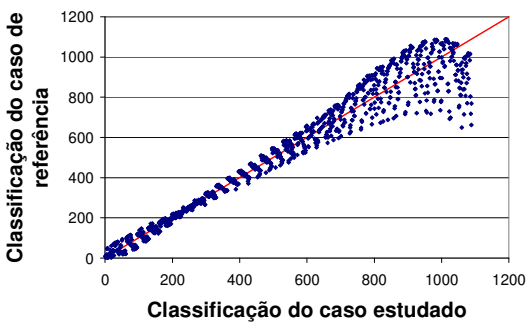
	Simulações	Caso 1A		Caso 1B	
		Mapa de Qualidade	ε	Mapa de Qualidade	ε
25 prod.	1		25%		18%
81 prod.	1		26%		20%

Tabela 6.7 – Gráficos de validação – método de abertura simultânea.

Caso 1A	Caso 1B
	
25 prod.	
	
81 prod.	

Testou-se anteriormente o fechamento simultâneo (manual) de todos os poços assim que o primeiro produtor é fechado. Este procedimento não é adequado, contudo, pois as simulações acontecem apenas durante algumas dezenas ou centenas de dias, enquanto se deseja fixar um longo tempo de produção a fim de garantir uma máxima produção dos poços. Uma alternativa para solucionar este problema de pressão é a adição de poços injetores entre os produtores.

6.1.5 Método por Produtores e Injetores Fixos

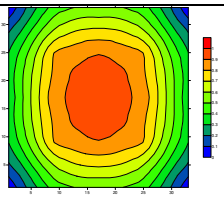
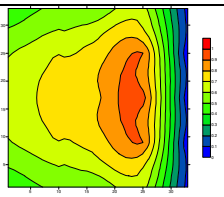
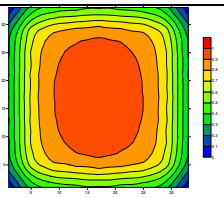
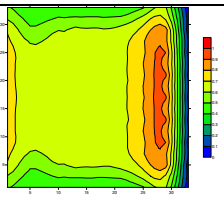
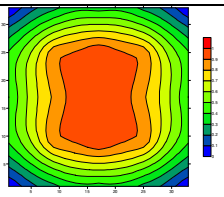
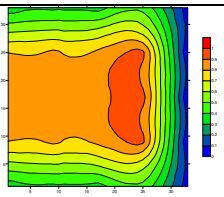
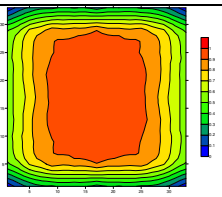
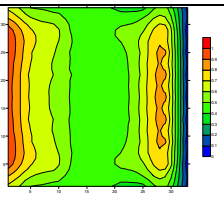
Nos mapas gerados com produtores e injetores (Tabela 6.8) o problema da queda de pressão, ocasionada pela abertura simultânea dos diversos poços, desaparece. Os mapas obtidos no caso 1A apresentam uma configuração mais próxima do mapa de referência do que os mapas gerados usando apenas produtores.

Na utilização deste método, apesar de o problema da queda de pressão ter sido resolvido, verifica-se um problema de pressurização exagerada do reservatório devido à utilização de um número elevado de injetores. Para evitar este problema é necessário construir os mapas de qualidade calibrando os injetores de modo a manter a pressão do reservatório ligeiramente acima da pressão de bolha. Para controlar a pressão do reservatório pode-se usar o comando GPMAINT (SIS, 2003), do software Eclipse®, dessa forma a taxa de injeção dos injetores é controlada de modo a manter a pressão no nível desejado.

O caso 1B apresenta mapas com uma inversão nas tendências, apresentando uma região de boa qualidade que no mapa de referência é de má qualidade. Esta diferença surge devido à utilização da injeção, recurso que aproxima a realidade do mapa de qualidade com a realidade da maioria das estratégias de produção definidas atualmente para reservatórios de petróleo. Convém estudar mais profundamente este método a fim de verificar se esta diferença com relação ao mapa gerado por varredura promove ou não uma vantagem na definição e otimização de estratégias de produção que utilizem este método de recuperação secundária. Neste caso não é calculada a diferença relativa nem são construídos os gráficos de validação cruzada dos mapas gerados com o mapa de referência, pois a utilização da injeção muda a natureza do escoamento dentro do reservatório, tornando a comparação injusta.

Observa-se na Tabela 6.8, mapas de qualidade gerados usando diferentes configurações e números de poços produtores e injetores. A configuração que apresenta resultados mais próximos do caso de referência e do resultado esperado para este modelo homogêneo é a *five-spot*, enquanto a intercalada muda sensivelmente o formato das regiões de maior qualidade. Com relação à variação do número de poços, sabe-se que quanto maior o número de poços produtores (mais pontos simulados), maior a precisão do mapa de qualidade. Este método mostra-se mais robusto do que o método por produtores fixos (devido à eliminação do problema da queda de pressão), pois os mapas gerados apresentam uma baixa variação em suas características visuais quando se aumenta o número de poços utilizados para geração do mapa de qualidade.

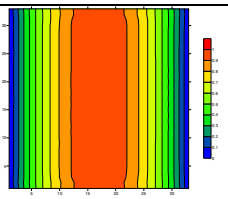
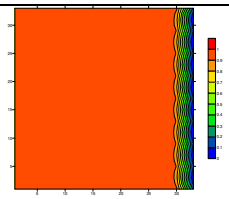
Tabela 6.8 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração por poços produtores e injetores fixos.

	Simulações	Caso 1A	Caso 1B
		Mapa de Qualidade	Mapa de Qualidade
Five-spot 25 prod. 16 inj.	1		
Five-spot 81 prod. 64 inj.	1		
Intercalado 25 prod. 20 inj.	1		
Intercalado 81 prod. 72 inj.	1		

6.1.6 Método Analítico

Os mapas de qualidade gerados com o método analítico estão representados na Tabela 6.9. Como se pode ver, os mapas apresentam características semelhantes ao mapa de referência, principalmente para o caso 1A. Para o caso 1B o mapa apresenta a região de maior qualidade cobrindo praticamente todo o reservatório, sendo a região de menor qualidade bem acima do aqüífero. Isto ocorre porque o mapa analítico não leva em consideração a produção dinâmica do reservatório com o tempo. Como o mapa de saturação de óleo usado para confecção do mapa é o inicial, a região onde se localiza o aqüífero indica baixa qualidade (devido à baixa saturação de óleo naquele momento), porém, no resto do reservatório, o efeito da expansão do aqüífero com o tempo não é percebido.

Tabela 6.9 – Mapas de qualidade para os casos homogêneos (1A e 1B) usando o método de geração analítico.

Simulações	Caso 1A	Caso 1B
	Mapa de Qualidade	Mapa de Qualidade
1		

6.2 Modelos Teóricos Heterogêneos – Óleo Leve (Caso 2A e 2B)

6.2.1 Método por Varredura com 1 Produtor

Na Tabela 6.10, apresenta-se os mapas obtidos para os modelos heterogêneos usando o método de geração por varredura com um único poço. Observando-se os mapas obtidos, a idéia de que quanto menos pontos simulados, menor a precisão do mapa, é reforçada. A partir do caso onde o poço é simulado de quatro em quatro blocos (oitenta e um pontos simulados) pode-se observar que a presença das barreiras e do canal de permeabilidade vai enfraquecendo e a diferença relativa ao mapa de referência aumenta devido à quantidade diminuta de pontos. Para uma melhor análise de correlação entre os mapas, são construídos os gráficos de validação para

os mapas gerados de quatro em quatro blocos (Tabela 6.11). O caso 2A apresenta pontos bem próximos à reta de validação, enquanto que o caso 2B apresenta os pontos afastados da bissetriz, denotando um baixo nível de correlação entre o mapa estudado e de referência. O mapa de qualidade pode ser gerado com muito menos simulações do que o mapa de referência e com valores bem baixos de diferença relativa usando o método por varredura pulando de dois em dois blocos. O restante dos pontos deve ser interpolado por um método geoestatístico confiável; no presente estudo é utilizada a *krigagem*.

6.2.2 Método por Varredura com um Grupo de 4 Produtores

A Tabela 6.12, estão apresentados os mapas gerados por varredura utilizando um grupo de quatro poços. As barreiras e o canal são identificados e as tendências de maior qualidade são semelhantes às do mapa de referência, porém a diferença relativa apresenta valores elevados. Isto é conseqüência do fato de que a média da qualidade do mapa gerado por este método é mais baixa (maior predominância de regiões verdes e azuis) do que a média da qualidade do mapa de referência (maior predominância de regiões vermelhas, laranjas e amarelas). Realizando uma análise visual dos mapas percebe-se que as barreiras e a região do canal são identificadas. As demais regiões apresentam níveis de qualidade muito próximos sem o devido ressalte das regiões de maior qualidade, principalmente no caso de simulações de um em um bloco.

Na Tabela 6.13, estão representados os gráficos de validação para os casos 2A e 2B, simulando todos os blocos (1 em 1) e pulando de 4 em 4 blocos. O caso 2A apresenta uma dispersão razoável, enquanto que o 2B apresenta uma dispersão mais acentuada em relação à reta de validação principalmente para o caso simulado de 1 em 1 bloco. O gráfico de validação do caso 2B de 4 em 4 blocos apresenta pontos próximos a bissetriz, mas principalmente devido à interpolação, pois poucos pontos são simulados sobre o reservatório, e não devido à eficiência do método de geração.

Cabe salientar mais uma vez que este método promove condições desiguais entre os poços durante a geração do mapa de qualidade, o que pode resultar em um mapa de baixa confiabilidade.

Tabela 6.10 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (2A e 2B) usando o método de geração por varredura com um único poço.

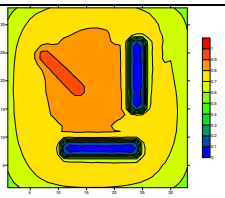
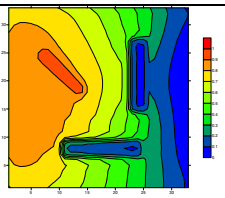
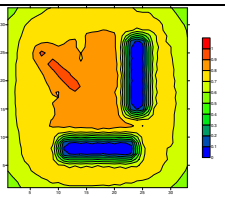
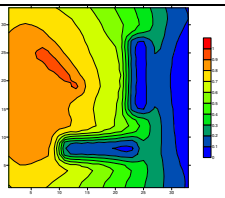
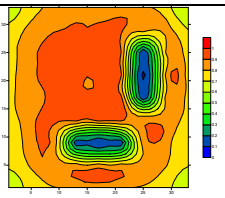
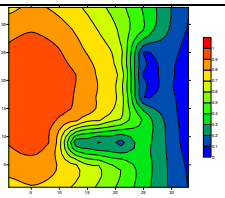
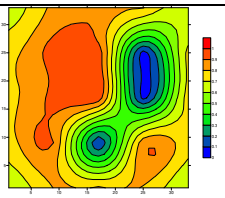
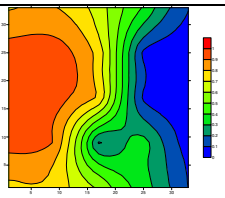
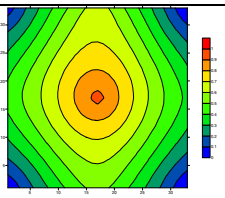
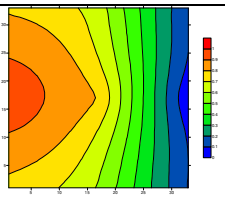
	Simulações	Caso 2A		Caso 2B	
		Mapa de Qualidade	ε	Mapa de Qualidade	ε
1 em 1 Mapa de referência	1089		0%		0%
2 em 2	289		8%		5%
4 em 4	81		46%		23%
8 em 8	25		46%		24%
16 em 16	9		103%		45%

Tabela 6.11 – Gráficos de validação – método por varredura (4 em 4).

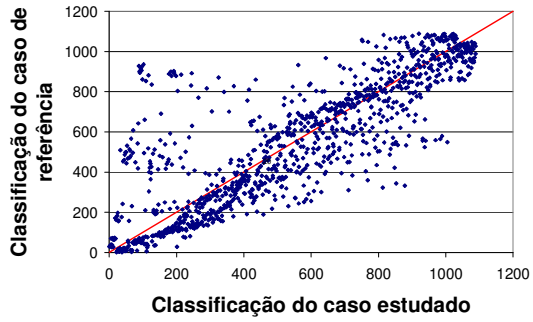
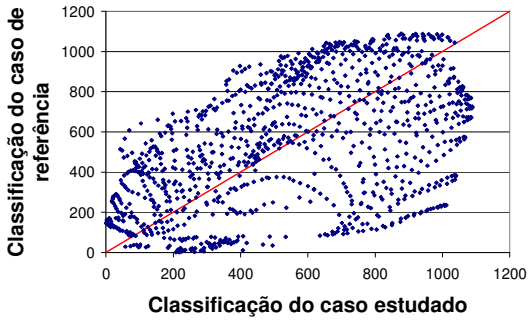
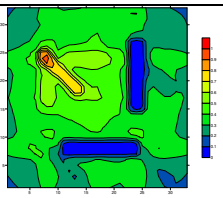
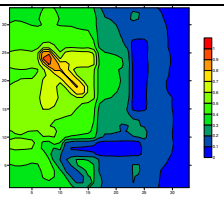
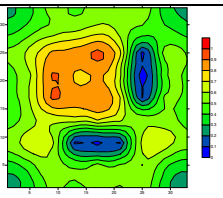
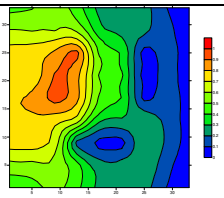
Caso 2A	Caso 2B
	

Tabela 6.12 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (2A e 2B) usando o método de geração por varredura com um grupo de quatro poços.

	Simulações	Caso 2A		Caso 2B	
		Mapa de Qualidade	ε	Mapa de Qualidade	ε
1 em 1	289		52%		46%
4 em 4	25		45%		35%

6.2.3 Método por Varredura com um Par Produtor/Injetor

Na Tabela 6.14, os mapas gerados com o par produtor/injetor apresentam uma tendência parecida com o mapa de referência, com a identificação da região do canal e das barreiras de permeabilidade para ambos os casos. Os mapas mostram as regiões de alta qualidade crescentes na direção do centro do reservatório, assim como esperado devido às características do modelo.

6.2.4 Método por Produtores Fixos

Na Tabela 6.15, pode-se ver que os mapas gerados com abertura simultânea de poços, aplicando a condição de restrição de vazão, apresentam uma definição razoável das barreiras e do canal, principalmente no caso 2A. No caso 2B os mapas se apresentam próximos aos mapas gerados para o caso homogêneo, ou seja, as heterogeneidades não são identificadas, mesmo assim a diferença relativa calculada dos mapas é baixa. Para uma análise mais aprofundada são mostrados os gráficos de validação cruzada (Tabela 6.16). Pode-se verificar que todos os gráficos de validação apresentam a nuvem de pontos bem dispersa e longe da linha diagonal de validação.

Mesmo para um modelo com fortes heterogeneidades este método mostrou-se pouco robusto, apresentando resultados de baixa qualidade.

Tabela 6.13 – Gráficos de validação – método de varredura com grupo de 4 poços (caso 2A e 2B).

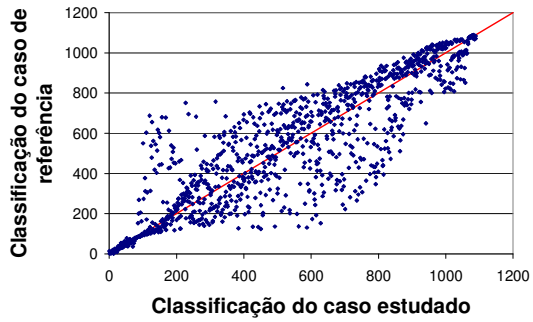
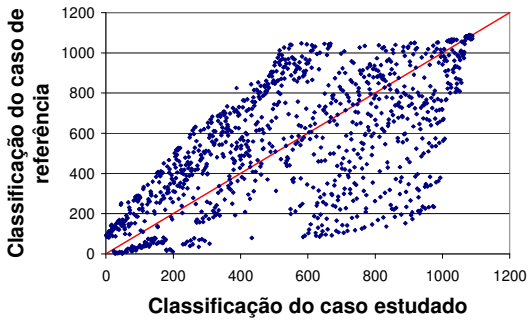
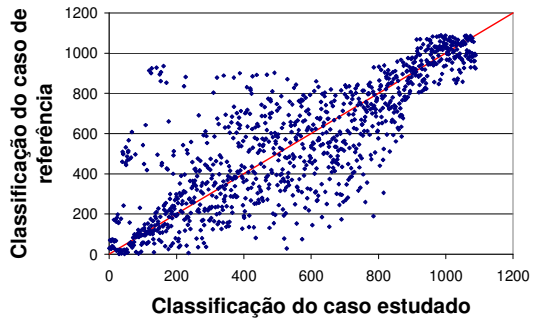
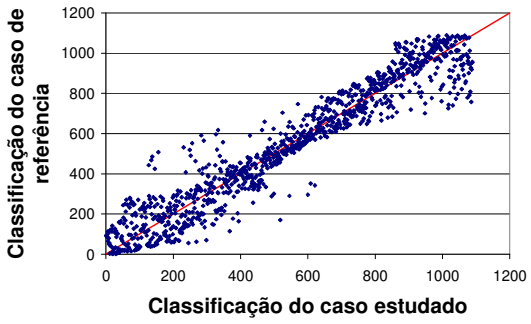
Caso 2A	Caso 2B
	
1 em 1	
	
4 em 4	

Tabela 6.14 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (2A e 2B) usando o método de geração por varredura com um par produtor/injetor (2 em 2 blocos).

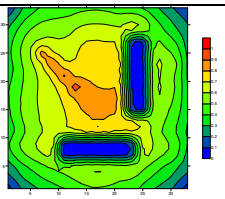
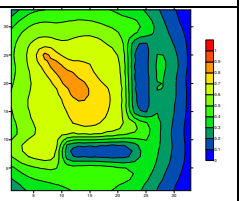
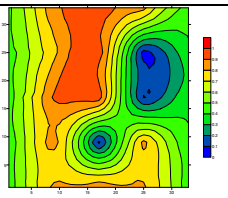
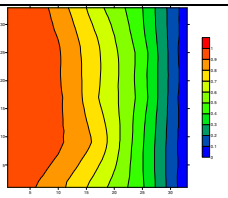
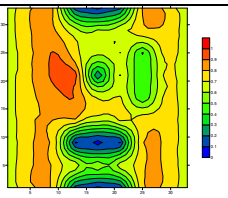
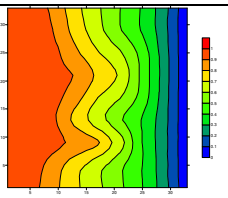
		Caso 2A	Caso 2B
	Simulações	Mapa de Qualidade	
Par prod./inj. (2 em 2)	748		

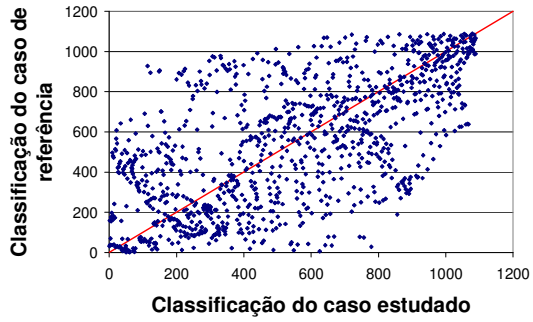
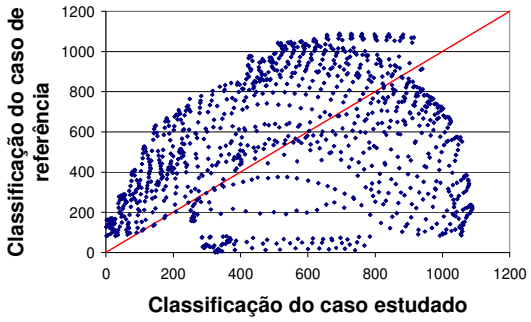
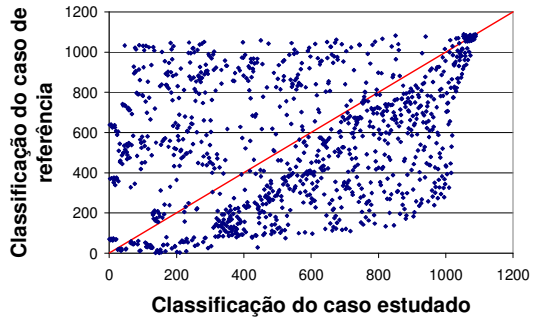
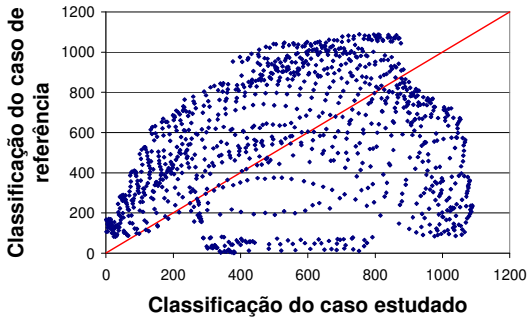
Tabela 6.15 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (2A e 2B) usando o método de geração por poços produtores fixos.

	Simulações	Caso 2A		Caso 2B	
		Mapa de Qualidade	ε	Mapa de Qualidade	ε
25 prod.	1		53%		26%
81 prod.	1		58%		27%

6.2.5 Método por Produtores e Injetores Fixos

De acordo com a Tabela 6.17, o método usando produtores e injetores novamente apresenta resultados de boa qualidade, identificando bem todas as heterogeneidades do reservatório (principalmente no caso 2A). O problema da pressão, como dito anteriormente, é eliminado com o uso da injeção. Realiza-se a calibração dos injetores para evitar uma pressurização exagerada do reservatório. Os melhores resultados, segundo a análise visual e a coerência do mapa de qualidade com o modelo teórico estudado, são obtidos usando a configuração *five-spot*. Com relação à variação do número de poços, novamente o método mostra-se mais robusto que o método por produtores fixos.

Tabela 6.16 – Gráficos de validação – método dos produtores fixos (caso 2A e 2B).

Caso 2A	Caso 2B
	
25 prod.	
	
81 prod.	

Pela análise visual dos mapas percebe-se que alguns mapas de qualidade identificam as barreiras com eficiência, porém o canal é identificado de forma diferente em alguns dos casos. Nota-se que a região de boa qualidade fica próxima ao canal e não em cima dele. Isto ocorre devido à alta permeabilidade do canal, que facilita a produção da água pelos produtores localizados acima do mesmo. Em uma estratégia de produção definida para um campo real isto também pode ocorrer, caso o aqüífero seja muito atuante ou haja um elevado número de poços produtores. Considerando este fato, a indicação da área do canal como de alta qualidade nos casos citados acima poderia ser errônea.

6.2.6 Método Analítico

Na Tabela 6.18, estão representados os mapas de qualidade gerados usando o método de geração analítico. Tanto o mapa do caso 2A quanto o mapa do caso 2B identificam com eficiência o canal de permeabilidade, porém as barreiras não aparecem. Isto ocorre devido à

grande diferença entre os valores máximos (canal) e mínimos (barreira) do VPL, que ocasiona uma suavização das diferenças entre os valores obtidos nos locais das barreiras e nas outras regiões do reservatório.

Como se pode observar, mesmo com algumas características adversas, como a geometria do reservatório e a posição do aqüífero, os dois mapas apresentam-se muito parecidos. Este fato indica uma baixa confiabilidade destes mapas devido à não captação de características importantes do reservatório.

Tabela 6.17 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (2A e 2B) usando o método de geração por poços produtores e injetores fixos.

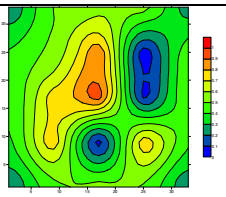
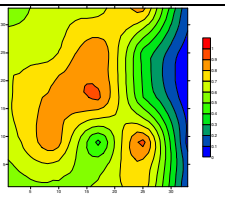
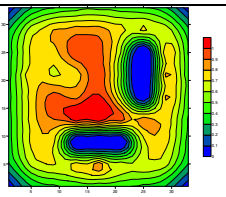
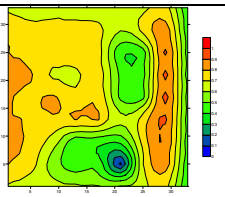
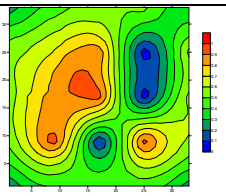
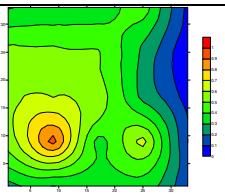
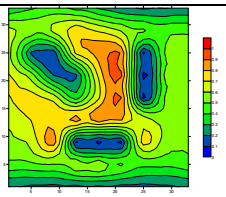
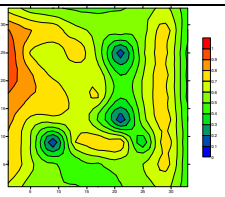
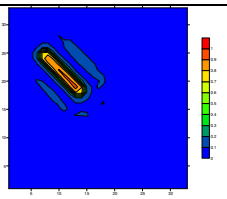
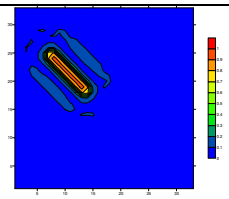
	Simulações	Caso 2A	Caso 2B
		Mapa de Qualidade	Mapa de Qualidade
Five-spot 25 prod. 16 inj.	1		
Five-spot 81 prod. 64 inj.	1		
Intercalado 25 prod. 20 inj.	1		
Intercalado 81 prod. 72 inj.	1		

Tabela 6.18 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (2A e 2B) usando o método de geração analítico.

Simulações	Caso 2A	Caso 2B
	Mapa de Qualidade	Mapa de Qualidade
1		

6.3 Modelos Teóricos Heterogêneos – Óleo Pesado (Caso 3A e 3B)

6.3.1 Método por Varredura com 1 Produtor

Na Tabela 6.19, pode-se notar que, quando o número de pontos simulados diminui e uma região de falha ou de barreira não é atingida (o que ocorre a partir dos mapas gerados de quatro em quatro blocos), a média de qualidade geral do mapa de qualidade obtido sobe (mudança da cor do mapa). Isto ocorre por que a escala de normalização muda e os valores interpolados são superestimados em relação ao mapa de referência, ocasionando uma diferença relativa muito alta. Observa-se que a análise isolada da diferença relativa não se mostra eficiente para certos casos, sendo necessária e importante a análise visual e do gráfico de validação.

Nos gráficos de validação cruzada, mostrados na Tabela 6.20, para o caso por varredura de quatro em quatro blocos, por exemplo, pode-se observar que, tanto no caso 3A quanto no caso 3B, a grande maioria dos pontos da nuvem encontra-se alinhada à linha diagonal de validação, indicando uma boa correlação do mapa de qualidade gerado com o mapa de referência (o que é coerente com a análise visual dos mapas, e contrário ao que indica o valor da diferença relativa). À medida que a distância entre os pontos simulados aumenta, cresce a imprecisão do mapa em relação ao mapa de referência, como se pode observar através de uma análise visual dos mapas.

6.3.2 Método por Varredura com um Grupo de 4 Produtores

Na Tabela 6.21 estão os mapas gerados pelo método de varredura com um grupo de quatro poços. A diferença relativa apresenta-se baixa para o deslocamento de um em um bloco, principalmente no caso 3A. Quando o número de pontos simulados diminui a média de qualidade geral do mapa de qualidade aumenta ocasionando um alto valor de diferença relativa, semelhante ao ocorrido no método por varredura com um poço. No caso 3B, os mapas de qualidade gerados apresentam uma diferença visual significativa em relação ao mapa de referência.

As diferenças relativas do caso com óleo pesado são baixas para deslocamento de um em um bloco, comparado a Tabela 6.12, porque a maior viscosidade do óleo proporciona vazões bem menores fazendo com que a pressão do campo caia muito devagar quando comparada à queda de pressão proporcionada pelo óleo leve. Na Figura 6.7 estão representados os poços usados para analisar a queda de pressão no reservatório. Observa-se na Figura 6.8 que a queda é muito acentuada para o óleo leve e menos acentuada para o caso com óleo pesado. Com essa queda de pressão menos acentuada, a influência de um produtor no outro diminui e o mapa gerado fica semelhante ao mapa de referência. Como os dados do óleo pesado foram retirados de CAMPAGNOLO (1992), a pressão inicial do reservatório para o caso com óleo pesado é menor que para o caso com óleo leve (Figura 6.8).

Observando os mapas gerados para o caso 3B, Tabela 6.21, pode-se verificar claramente a influência dos poços uns nos outros. Nota-se na região do lado direito do mapa (entre o aqüífero e a barreira de permeabilidade) uma região de alta qualidade, resultante da rápida produção de óleo proporcionada pela presença do aqüífero; a região central do mapa apresenta uma menor qualidade devido à sua lenta produção de óleo ocasionada pela dificuldade do aqüífero em transpor a barreira de permeabilidade e atingir o outro poço produtor do grupo.

Deve-se atentar que o número de simulações utilizadas neste caso é o mesmo usado no caso por varredura com um único poço de dois em dois blocos, que apresenta resultados mais confiáveis.

Tabela 6.19 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (3A e 3B) usando o método de geração por varredura com um único poço.

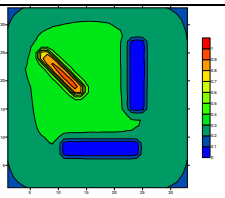
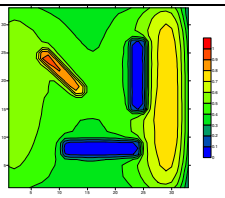
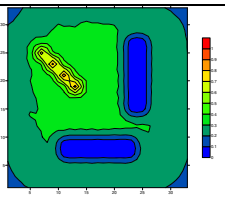
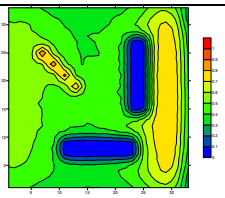
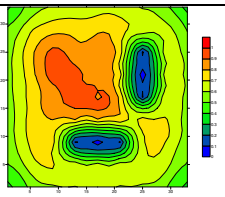
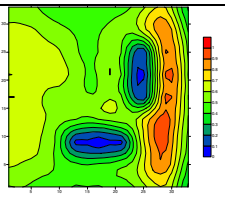
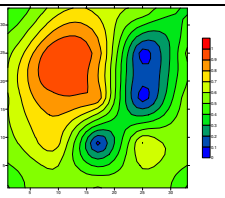
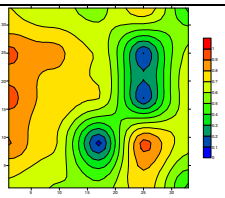
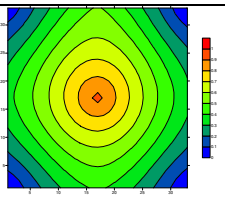
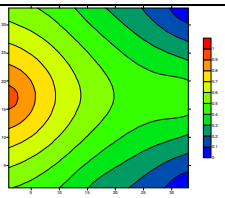
	Simulações	Caso 3A		Caso 3B	
		Mapa de Qualidade	ε	Mapa de Qualidade	ε
1 em 1 Mapa de referência	1089		0%		0%
2 em 2	289		9%		8%
4 em 4	81		236%		45%
8 em 8	25		215%		96%
16 em 16	9		315%		107%

Tabela 6.20 – Gráficos de validação – método de varredura (4 em 4).

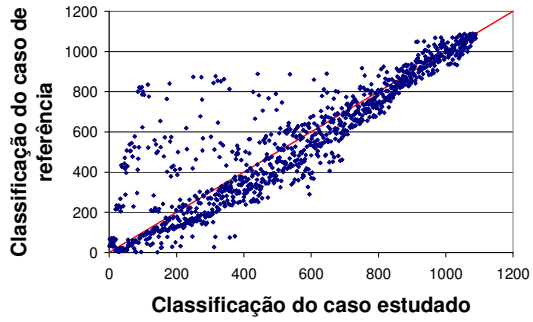
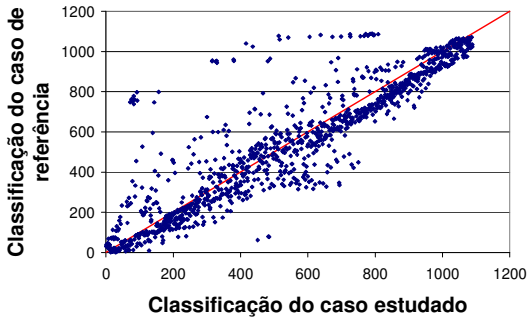
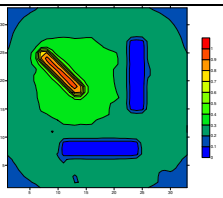
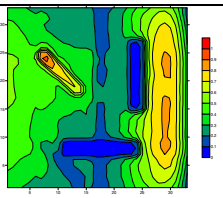
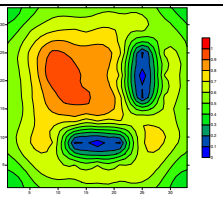
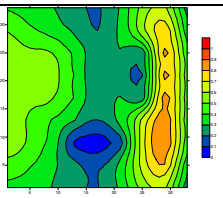
Caso 3A	Caso 3B
	

Tabela 6.21 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (3A e 3B) usando o método de geração por varredura com um grupo de quatro poços.

	Simulações	Caso 3A		Caso 3B	
		Mapa de Qualidade	ε	Mapa de Qualidade	ε
1 em 1	289		8%		22%
4 em 4	25		214%		43%

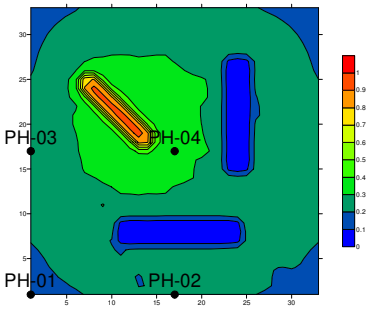


Figura 6.7 – Posição dos poços para análise do mapa do caso 3A, gerado por varredura com um grupo de 4 poços (1 em 1).

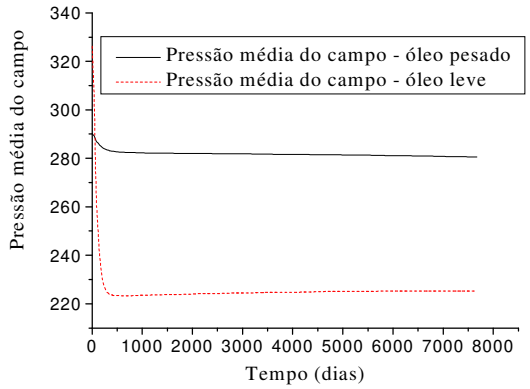


Figura 6.8 – Pressão média do campo com um grupo de 4 poços (Figura 6.7).

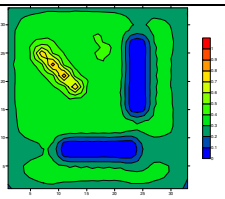
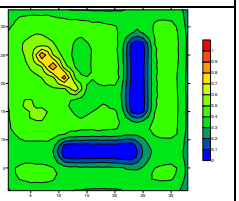
6.3.3 Método por Varredura com um Par Produtor/Injetor

Para o caso do óleo pesado, os mapas gerados usando o par produtor/injetor (Tabela 6.22) mostram a mesma tendência do mapa de referência, identificando o canal e as barreiras de permeabilidade. Há certa homogeneidade da qualidade nas regiões fora do canal e das barreiras.

6.3.4 Método por Produtores Fixos

Os mapas de qualidade gerados pelo método de geração por abertura simultânea de poços estão representados na Tabela 6.23. Para o caso 3A, o mapa gerado com 25 produtores apresenta resultados um pouco melhores, mas as diferenças relativas são elevadas (problema da normalização). Com 81 produtores, o caso 3A apresenta o mapa com a tendência próxima do mapa de referência (barreiras identificadas), porém já se pôde notar a influência da queda de pressão no mapa. No caso 3B, o problema da queda da pressão apresenta-se novamente em ambos os casos (25 e 81 produtores) mesmo depois de calibrados os produtores.

Tabela 6.22 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (3A e 3B) usando o método de geração por varredura com um par produtor/injetor (2 em 2 blocos).

		Caso 3A	Caso 3B
	Simulações	Mapa de Qualidade	
Par prod./inj. (2 em 2)	748		

Os resultados obtidos confirmam que o método de geração por abertura simultânea de produtores possui baixa robustez, podendo fornecer resultados não muito confiáveis dependendo da quantidade de produtores usados. Os gráficos de validação, mostrados na Tabela 6.24, mais uma vez apontam uma baixa correlação (pontos dispersos e longe da linha de validação) entre os mapas estudados (casos 3A e 3B) e o mapa de referência.

Tabela 6.23 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (3A e 3B) usando o método de geração por poços produtores fixos.

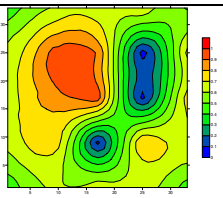
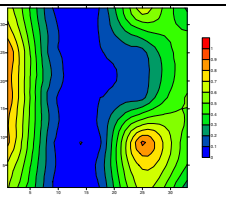
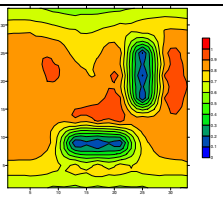
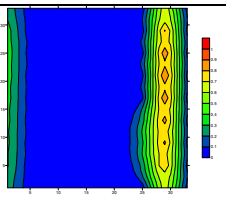
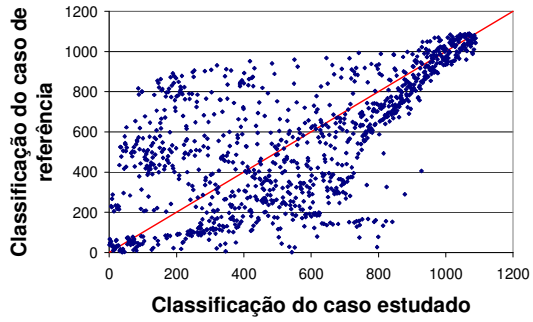
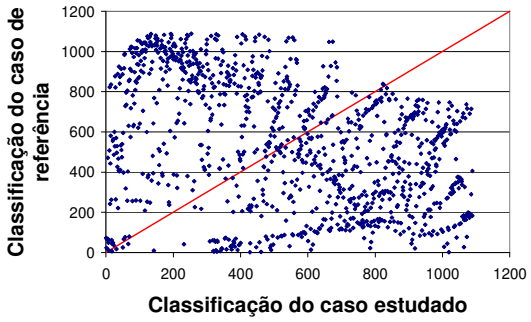
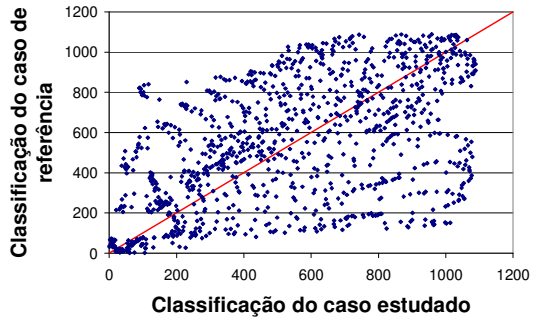
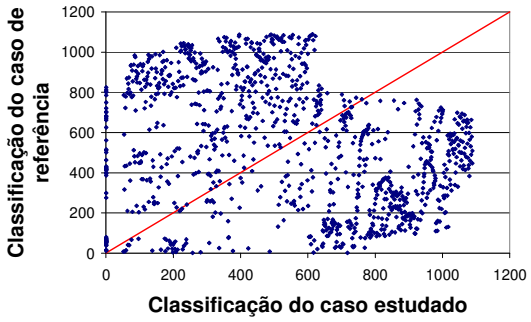
	Simulações	Caso 3A		Caso 3B	
		Mapa de Qualidade	ε	Mapa de Qualidade	ε
25 prod.	1		245%		72%
81 prod.	1		297%		71%

Tabela 6.24 – Gráficos de validação dos pontos estimados – método de abertura simultânea.

Caso 3A	Caso 3B
	
25 prod.	
	
81 prod.	

6.3.5 Método por Produtores e Injetores Fixos

Apresenta-se na Tabela 6.25 os mapas gerados por abertura simultânea com injeção. Visualmente os mapas identificam bem as barreiras e o canal. Os mapas de qualidade gerados para o caso 3B apresentam-se diferentes do mapa de referência devido ao uso da injeção, o que não significa que estes possuem baixa confiabilidade. Maiores estudos devem ser feitos para determinar as vantagens e desvantagens da utilização de mapas de qualidade gerados usando injeção na definição de estratégias de produção que utilizem este método de recuperação secundário.

Em alguns casos o canal se apresenta como região de baixa qualidade devido à elevada produção de água dos produtores localizados sobre o canal. Como os mapas gerados usando a configuração intercalada, com 81 produtores e 72 injetores, apresentam uma maior relação do

número de injetores/produtores, a região do canal é mostrada mais fortemente como uma região de baixa qualidade.

Os melhores resultados são obtidos com a configuração *five-spot* e o método mais uma vez se mostra pouco sensível à variação do número de poço (produtores e injetores) na geração do mapa de qualidade.

6.3.6 Método Analítico

Na Tabela 6.26, estão os mapas de qualidade gerados usando o método de geração analítico. Os mapas são muito parecidos com os mapas dos casos heterogêneos com óleo leve (Tabela 6.18), o que indica que, além de não captar diferenças entre a geometria e a posição de aqüífero dos modelos estudados, estes mapas também não são capazes de captar a diferença de densidade e viscosidade entre os fluidos. Este é mais um fato que reforça a idéia de baixa confiabilidade nos mapas gerados com este método para casos heterogêneos.

6.4 Tabela de Comparação dos Métodos

De acordo com os resultados obtidos nas análises apresentadas acima, foi elaborada uma tabela de comparação dos métodos propostos (Tabela 6.27), além de alguns testes que têm por objetivo avaliar a confiabilidade do mapa gerado.

Alguns dos métodos de geração propostos apresentam resultados considerados de maior qualidade e confiabilidade, sendo também mais velozes na geração dos mapas de qualidade. Os métodos que mais se destacam nas análises realizadas (com relação ao tempo de geração e à confiabilidade) são: método por varredura (2 em 2) e por produtores e injetores fixos (configuração *five-spot*).

Tabela 6.25 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (3A e 3B) usando o método de geração por poços produtores e injetores fixos.

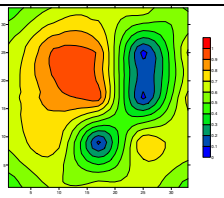
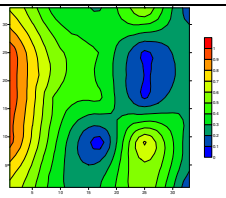
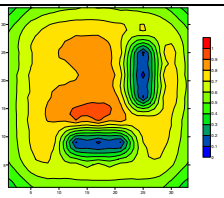
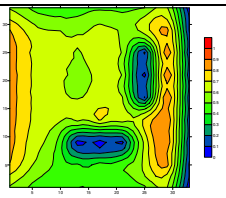
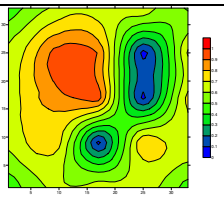
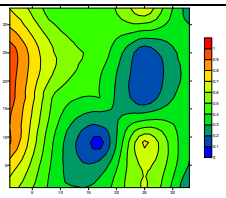
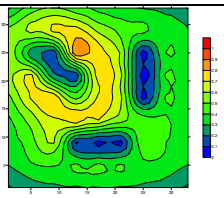
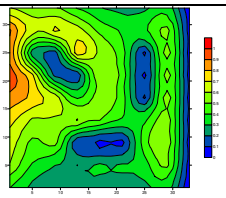
	Simulações	Caso 3A	Caso 3B
		Mapa de Qualidade	Mapa de Qualidade
Five-spot 25 prod. 16 inj.	1		
Five-spot 81 prod. 64 inj.	1		
Intercalado 25 prod. 20 inj.	1		
Intercalado 81 prod. 72 inj.	1		

Tabela 6.26 – Mapas de qualidade para os casos heterogêneos (3A e 3B) usando o método de geração analítico.

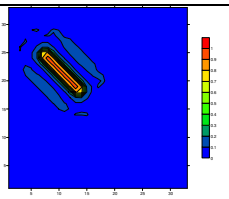
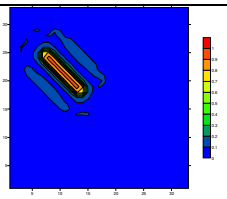
Simulações	Caso 3A	Caso 3B
	Mapa de Qualidade	Mapa de Qualidade
1		

Tabela 6.27 – Comparação entre os métodos de geração.

Método de Geração	Vantagens	Desvantagens	Testes de Confiabilidade e Sugestões
Varredura – um poço produtor	- Maior precisão	- Maior número de simulações para geração do mapa	- Verificar heterogeneidades
Varredura – um poço produtor (pulando blocos)	- Menor número de simulações para a geração do mapa	- À medida que o a quantidade de blocos pulados aumenta, diminui a precisão do mapa	- Verificar heterogeneidades
Varredura – grupo de quatro poços	- Simula mais pontos usando um número menor de simulações	- Características do fluxo dentro do reservatório alteradas devido à presença dos outros poços - O mapa passa a depender, além das características do modelo, da quantidade de poços e da disposição destes no grupo - Baixa confiabilidade	- Verificar coerência do mapa gerado com características do modelo - Definir distância mínima entre poços para evitar influência entre eles
Varredura – par produtor/injetor	- Considera a injeção na geração do mapa	- Necessita de um número maior de simulações (mais do que quando se utiliza apenas um produtor) - Enorme esforço computacional e tempo de geração	- Verificar a coerência do mapa gerado com as características do modelo
Produtores Fixos	- Utiliza poucas simulações para a geração do mapa	- Grande queda de pressão - Limitação do máximo de pontos simulados - Baixa robustez	- Calibrar produtores - Verificar heterogeneidades - Verificar o tempo, local, motivo e ordem de fechamento dos poços - Verificar a coerência do mapa gerado com as características do modelo

Tabela 6.28 – Comparação entre os métodos de geração (continuação).

Método de Geração	Vantagens	Desvantagens	Testes de Confiabilidade e Sugestões
Produtores e Injetores Fixos	- Utiliza poucas simulações para a geração do mapa - Simula mais pontos da malha (comparado com o método por produtores fixos) - Problema da queda de pressão é eliminado	- Pode ocorrer um problema de pressurização exagerada do reservatório - As condições de operação dos injetores devem ser calibradas a fim de garantir que a pressão permaneça constante e próxima à pressão de saturação	- Verificar a coerência do mapa gerado com as características do modelo
Analítico	- Bons resultados em modelos homogêneos - Não utiliza simulação (método de geração rápida) - Pode ser usado como uma primeira aproximação do mapa de qualidade	- Mostrou-se pouco eficaz na identificação de heterogeneidades fortes - Considera as propriedades (saturação de óleo, por exemplo) apenas no tempo inicial, não captando aspectos dinâmicos da produção, como o avanço do aqüífero	- Verificar heterogeneidades - O grau de heterogeneidade do modelo é inversamente proporcional à confiabilidade do mapa de qualidade gerado

6.5 Análise da Função-Objetivo

Para se realizar a análise das funções-objetivo usadas na construção dos mapas de qualidade foram utilizados apenas os modelos dos casos 3A e 3B que, devido à forte heterogeneidade e à presença de óleo pesado, são mais sensíveis a variações no tipo de função-objetivo utilizada.

Como se pode perceber na Tabela 6.29, a utilização de uma função-objetivo diferente gera diferenças sutis para o caso 3A e 3B, quando utilizado o método por varredura para a geração do mapa de qualidade. Nota-se que os mapas gerados com VPr e com Np apresentam maiores regiões de alta qualidade. Quando se utiliza o método por produtores e injetores fixos para o caso 3A, o mapa de qualidade gerado com o VPr e com o Np apresentam mínimas mudanças em

relação ao mapa de qualidade gerado com o VPL. Devido à assimetria do modelo 3B (localização do aqüífero e geometria do reservatório), a utilização do VPr e do Np como funções-objetivo gerou mapas de qualidade com características diferentes do mapa gerado com o VPL, ou seja, os mapas de VPr e Np apresentam regiões de maior potencial próximas à região de maior potencial indicada pelo mapa de referência (lado direito do reservatório, entre a barreira vertical e o aqüífero, conforme observado nos mapas gerados por varredura de 1 em 1 bloco), o que não aconteceu para o mapa de VPL.

Para verificar a variação do mapa de qualidade construído usando VPL como função-objetivo, este foi construído considerando agora cenários econômicos com diferentes preços para o óleo, como mostrado na Tabela 6.30. Como se pode observar, à medida que o preço do óleo sobe, o mapa de qualidade se aproxima dos mapas gerados com o VPr e com o Np. O motivo desta variação é o critério de fechamento dos poços, definido por um valor máximo de corte de água. Caso o produtor produza mais água que óleo por um determinado tempo, em um cenário econômico de preço baixo, o mesmo apresentará um valor de receita menor que o do custo de produção de água, gerando uma diferença negativa até atingir o corte de água definido como critério de fechamento. Como na realidade se deseja que a diferença entre receita e custo de produção dos poços seja sempre positiva, o corte de água máximo definido como critério de fechamento dos poços deve ser função do custo de produção de água, de óleo e do preço do óleo, garantindo assim o fechamento dos produtores antes deles começarem a gerar despesas. Para definir o corte de água máximo para fechamento dos produtores deve-se usar a Equação 6.2.

O mapa gerado considerando o preço de US$ 14 (Tabela 6.30) é um exemplo de mapa de qualidade de baixa confiabilidade, pois o corte de água definido como critério de fechamento é de 90%, diferente do valor ideal calculado pela Equação 6.2. Um corte de água de 90% seria a restrição ideal para um cenário econômico com o preço de óleo em torno de US$ 22, ou seja, os mapas gerados usando os preços de US$ 25 e 30 são exemplos de mapas confiáveis neste caso.

Mesmo com a tendência de o mapa de qualidade gerado com o VPL igualar-se aos mapas de qualidade gerados com o VPr e o Np à medida que o preço do óleo sobe (como se observa na Tabela 6.30), cabe salientar que o VPL considera, além do cenário econômico, os custos, a

velocidade de produção (tempo) e sua influência no reservatório. Por este motivo, o VPr e o Np podem ser as funções-objetivo mais apropriadas em alguns modelos de reservatórios ou em cenários econômicos incertos.

Cabe salientar que existem trabalhos da literatura (NEVES, 2004) onde se cita que a definição de estratégias de produção não deve ser feita apenas com a observação de indicadores físicos, como o Np, mas usando também indicadores econômicos. Decisões tomadas usando mapas de qualidade que utilizam o VPL como função-objetivo (qualidade) em sua construção também integram este aspecto econômico.

Tabela 6.29 – Análise da função-objetivo usando os métodos por varredura e por produtores e injetores fixos e os modelos dos casos 3A e 3B.

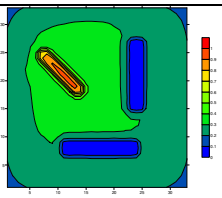
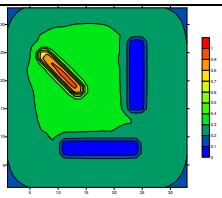
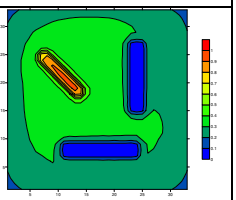
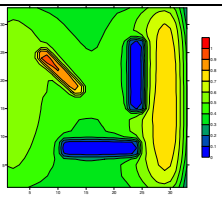
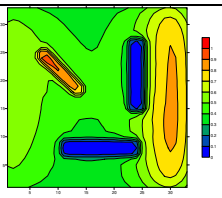
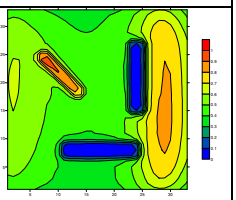
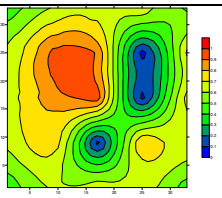
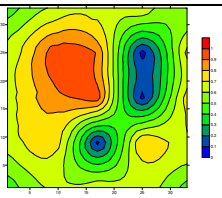
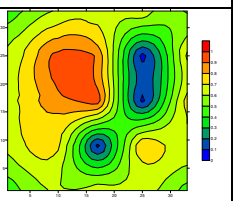
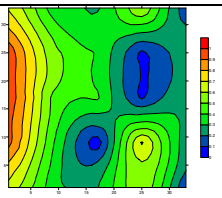
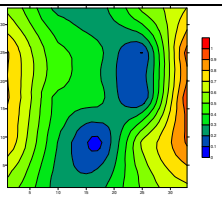
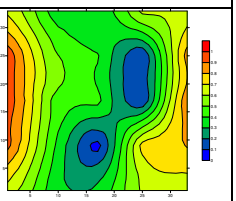
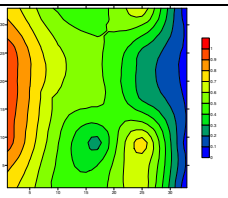
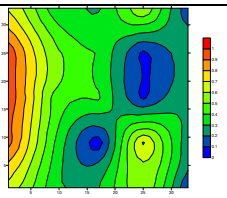
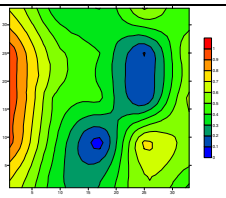
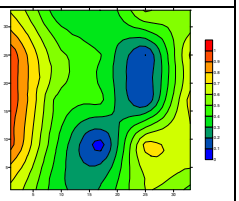
Método de Geração por Varredura (1 em 1)			
Função-Objetivo	VPL	VPr	Np
Caso 3A			
Caso 3B			
Método de Geração por Produtores e Injetores Fixos (25p16i)			
Função-Objetivo	VPL	VPr	Np
Caso 3A			
Caso 3B			

Tabela 6.30 – Mapas de qualidade gerados com o método de produtores e injetores fixos em diferentes cenários econômicos.

Método de Geração por Produtores e Injetores Fixos (25p16i)				
Preço do óleo	US$ 14	US$ 18	US$ 25	US$ 30
Caso 3B				

$$W_{cmáx} = \frac{P_o - C_o}{C_w + P_o - C_o} \qquad \text{Equação 6.2}$$

6.6 Discussão dos Resultados

De acordo com o apresentado na Tabela 6.27, observou-se que o método por varredura de 1 em 1 bloco forneceu um mapa com boa precisão, porém foi necessário muito tempo para a geração do mapa de qualidade. Usando este método pulando 2 em 2 blocos, pode-se obter um mapa de qualidade confiável diminuindo o número de simulações em até dois terços do número de simulações necessárias quando todos os blocos são simulados. Deve-se atentar ao nível de precisão necessário para cada modelo estudado.

O método por varredura usando um grupo de poços produz um mapa de qualidade de baixa confiabilidade, não sendo recomendado seu uso. A presença dos outros poços alterou as características do escoamento e o mapa passou a depender, não somente das características do reservatório, mas também da quantidade de poços e da configuração destes no grupo. Durante a realização do presente trabalho, foram testados ainda grupos de poços com seis e oito produtores, porém os resultados não foram incluídos por não se apresentarem aceitáveis pelos mesmos motivos apresentados acima, para o caso utilizando quatro produtores.

O método por varredura usando um par produtor/injetor apresentou resultados ligeiramente diferentes dos casos considerados como referência. Este método pode ser

classificado como confiável por ter gerado mapas de qualidade coerentes com as características dos modelos de reservatório estudados. Sua desvantagem, que pode torná-lo inviável, é a necessidade de um grande número de simulações (mais que o método por varredura de 1 em 1) durante o processo de geração, além do trabalho adicional no tratamento dos dados para construção do mapa. Maiores estudos precisam ser feitos a fim de comprovar sua confiabilidade.

Usando produtores fixos, os primeiros mapas obtidos apresentaram resultados bem adversos dos mapas de referência devido à rápida queda de pressão ocasionada pela abertura simultânea de diversos poços sobre o reservatório. Foi testada a diminuição do BHP mínimo de fechamento dos produtores, recurso esse que apresentou bons resultados quando foram utilizados 25 produtores, porém, com o aumento do número de produtores, novamente ocorreram fechamentos de poços devido à queda de pressão. Com a aplicação da restrição de vazão nos produtores, os mapas apresentaram resultados melhores do que aqueles obtidos com a diminuição do BHP mínimo no caso homogêneo, o que motivou a utilização deste recurso nos testes posteriores. Nos casos heterogêneos, os gráficos de validação apresentaram uma nuvem de pontos bem dispersa ao redor da bissetriz, porém os valores da diferença relativa não foram altos. Visualmente os mapas apresentaram, em alguns casos, uma tendência razoavelmente próxima em relação ao mapa de referência, entretanto, na maioria dos resultados dos casos 2B e 3B este método apresentou uma tendência adversa à do caso de referência. Pode ser usado em reservatórios com baixo nível de heterogeneidade, porém é necessário um maior cuidado em sua aplicação.

Com a adição de injetores entre os produtores, os mapas de qualidade apresentaram, em alguns casos, uma tendência mais próxima dos mapas de referência do que os mapas obtidos apenas com produtores fixos. Os melhores resultados para os casos estudados são obtidos usando a configuração *five-spot.* Alguns mapas gerados para os casos B (1B, 2B e 3B) apresentaram mapas diferentes do caso de referência devido ao efeito da injeção, a geometria assimétrica do reservatório e a posição do aqüífero. O artifício da utilização de injetores para manter a pressão eliminou o problema da rápida queda de pressão, permitindo a utilização de um maior número de produtores no processo de geração do mapa de qualidade (o que aumenta a precisão do mapa). Os injetores devem ser calibrados a fim de evitar uma pressurização exagerada do reservatório,

mantendo a pressão estável e sempre um pouco acima da pressão de bolha. Este método mostrou-se confiável e útil na maioria dos casos testados neste capítulo, sendo sua utilização recomendada para casos tanto homogêneos quanto heterogêneos.

O método analítico apresentou bons resultados para os modelos homogêneos, porém à medida que o grau de heterogeneidade do modelo aumentava, a confiabilidade do mapa de qualidade gerado diminuía. Nos casos heterogêneos os mapas de qualidade ficaram muito parecidos, ou seja, as diferentes características de cada modelo não foram identificadas. Este fato indica uma baixa confiabilidade dos mapas de qualidade gerados nestes casos, ressaltando que a consideração da dinâmica de escoamento através do uso do simulador torna o mapa de qualidade capaz de identificar características importantes dos modelos. Pode-se testar em trabalhos futuros a utilização do logaritmo da permeabilidade, ao invés de apenas o valor em si da permeabilidade, na equação analítica (Equação 4.1), a fim de aperfeiçoar a identificação de heterogeneidades nos mapas de qualidade gerados pelo método analítico.

Na análise das diferentes funções-objetivo, observou-se que, para o caso 3A, todos os mapas apresentaram tendências bem parecidas mesmo usando diferentes funções-objetivo, tanto para os mapas gerados por varredura quanto por produtores e injetores fixos. O caso 3B apresentou uma diferença entre mapas de qualidade gerados com as diferentes funções-objetivo quando é utilizado o método de geração por produtores e injetores fixos. O motivo dessa diferença foi a má definição do valor de corte de água máximo para fechamento dos poços. Recomenda-se que, para garantir a geração de um mapa de qualidade confiável na utilização do método por produtores e injetores fixos, o corte de água máximo seja calculado segundo a Equação 6.2, devido aos altos custos envolvidos. Observou-se que, em cenários econômicos de preços baixos, os mapas de qualidade gerados com VPL apresentaram-se diferentes dos gerados com Np e VPr. Como o VPL considera, além da produção de óleo, a velocidade de produção (tempo) e também os custos, este é mais confiável que as outras funções-objetivo estudadas quando são considerados cenários econômicos incertos. Cabe ainda salientar a importância da consideração dos aspectos econômicos na definição de estratégias de produção. Por estes motivos o VPL é indicado como função-objetivo mais confiável.

No próximo capítulo são utilizados apenas os métodos de melhor desempenho para análise e confirmação da eficiência dos mesmos em um modelo de reservatório com características de um campo real. São eles:

- Por varredura com um poço produtor (pulando 2 em 2 blocos); e,
- Por produtores e injetores fixos.

Além dos métodos mostrados acima, os métodos de geração de mapas de qualidade por produtores fixos e o analítico também são estudados nas etapas iniciais do próximo capítulo por serem métodos de geração rápidos e por apresentarem bons resultados em alguns casos particulares.

Capítulo 7

Resultados – Aplicação

Após a validação dos métodos propostos, faz-se neste capítulo uma aplicação dos métodos que apresentam o melhor desempenho em termos de velocidade de geração e confiabilidade do mapa de qualidade gerado.

7.1 Caso 4A

7.1.1 Geração do Mapa de Qualidade

Nas Figuras 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4 estão representados, respectivamente, os mapas de qualidade gerados com o método por varredura (2 em 2 blocos), por produtores fixos, por produtores e injetores fixos e pelo método analítico.

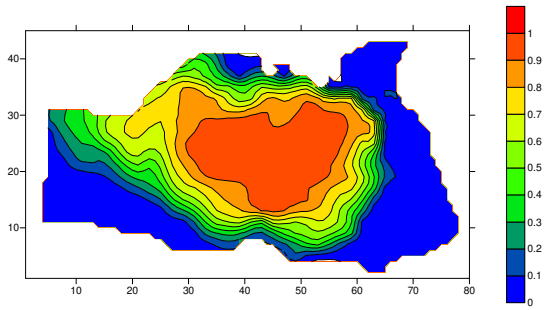


Figura 7.1 – Mapa de qualidade gerado com o método por varredura (2 em 2 blocos).

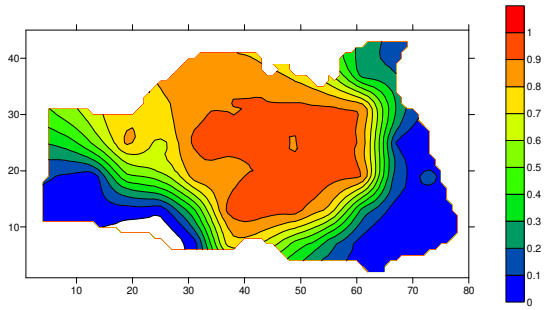


Figura 7.2 – Mapa de qualidade gerado com o método dos produtores fixos (54 poços).

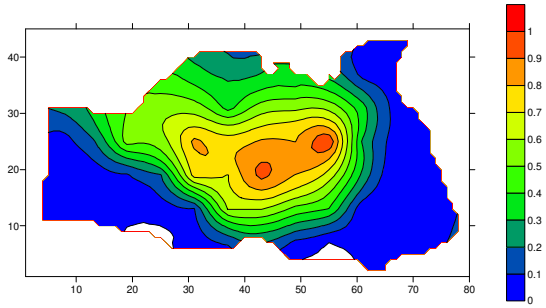


Figura 7.3 – Mapa de qualidade gerado com o método por produtores e injetores fixos (54 produtores e 48 injetores – *five-spot*).

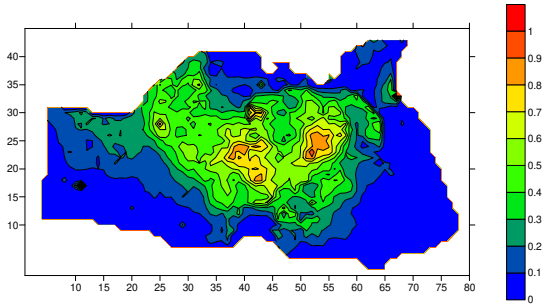


Figura 7.4 – Mapa de qualidade gerado com o método analítico.

- Comparação dos Mapas de Qualidade Gerados

Como se pode observar, os mapas gerados por varredura (Figura 7.1) e por produtores fixos (Figura 7.2) apresentam uma tendência semelhante, porém estes se diferenciam muito com relação ao número de simulações gastos na geração. O mapa de qualidade gerado por varredura, mesmo pulando de dois em dois blocos, necessita de 920 simulações para ser construído, enquanto que o mapa gerado com produtores fixos utiliza apenas uma simulação (Tabela 7.1). Embora o processo de geração do mapa de qualidade possa ser automatizado, a quantidade de

simulações define diretamente o tempo necessário para geração do mapa. Dependendo da complexidade do modelo (quando se possui um elevado número de blocos da malha em campos muito grandes ou quando se busca uma maior precisão, por exemplo), o tempo gasto em cada simulação pode chegar a horas.

O mapa de qualidade gerado por produtores e injetores fixos (Figura 7.3) possui regiões de maior qualidade com menor área, enquanto o mapa gerado pelo método analítico (Figura 7.4) apresenta estas regiões ainda menores. O método que usa produtores e injetores fixos necessita de uma simulação para geração do mapa de qualidade (assim como o método por produtores fixos), enquanto o método analítico não usa simulações (Tabela 7.1). Embora a não utilização de simulações seja uma vantagem em relação ao tempo gasto na geração do mapa, o método analítico compromete a confiabilidade do mapa de qualidade gerado quando são estudados modelos de reservatórios com alto grau de heterogeneidade. A necessidade de apenas uma simulação para geração do mapa de qualidade garante a consideração de aspectos dinâmicos na construção do mapa e não compromete em demasia o tempo gasto na geração da ferramenta. Além disso, a utilização da injeção tem se mostrado um recurso útil na geração do mapa de qualidade (como demonstrado no capítulo de validação). Cabe salientar que a função-objetivo usada na geração do mapa de qualidade com o método analítico é diferente dos outros mapas; no método analítico a função-objetivo é o volume de óleo *in situ* multiplicado pela permeabilidade média dos blocos, enquanto que nos outros métodos é o VPL.

Tabela 7.1 – Número de simulações utilizadas para geração do mapa de qualidade em cada método.

Método de Geração	**Número de Simulações**
Por varredura	920
Por produtores fixos	1
Por produtores e injetores fixos	1
Analítico	0

A Figura 7.5 mostra o gráfico de validação cruzada para os casos por varredura e por produtores fixos. Tanto a análise visual dos mapas de qualidade quanto a análise do gráfico permitem verificar um razoável nível de correlação entre os dois mapas.

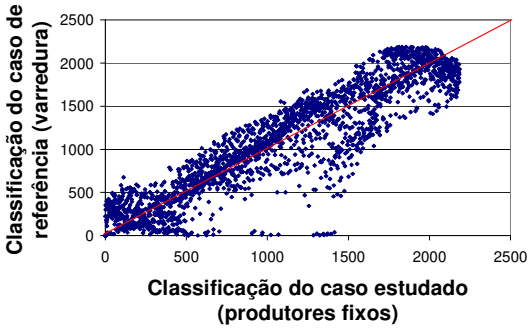


Figura 7.5 – Gráfico de validação do mapa de referência (varredura de dois em dois blocos) e do mapa gerado com produtores fixos.

O mapa de validação cruzada comparando o método por varredura e o analítico, representado na Figura 7.6, apresenta uma boa correlação entre os mapas, assim como no mapa de validação cruzada do mapa por produtores fixos. Somente alguns poucos pontos apresentam-se com o maior grau de distanciamento da bissetriz de validação do que os pontos do gráfico da Figura 7.5; como este modelo de campo real analisado não apresenta grandes heterogeneidades, era de se esperar que o mapa analítico não apresentasse diferenças muito grandes em relação aos mapas gerados por simulação.

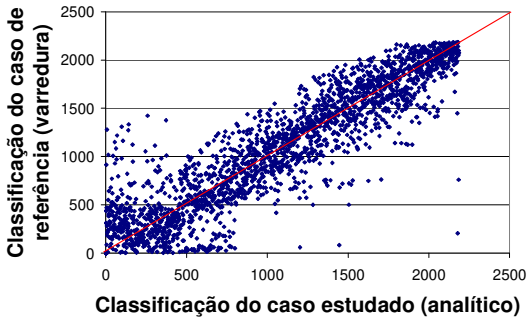


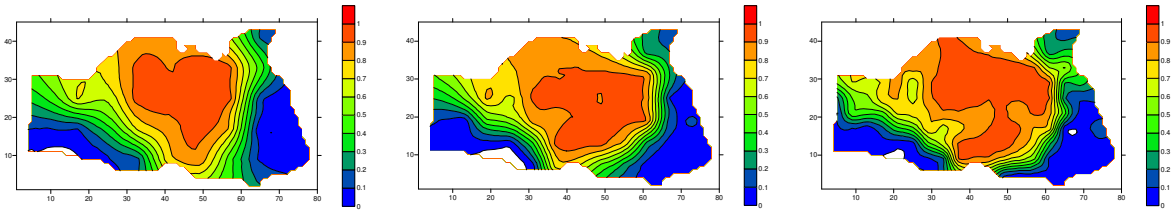
Figura 7.6 – Gráfico de validação do mapa de referência (varredura de dois em dois blocos) e do mapa gerado com o método analítico

O gráfico de validação cruzada não é construído para o mapa de qualidade gerado com produtores e injetores fixos porque, por ser gerado usando injeção, pode apresentar características diferentes daquele gerado por varredura; esta diferença, entretanto, pode não ser necessariamente um aspecto negativo (como no exemplo demonstrado no capítulo de validação, onde um canal de permeabilidade foi identificado como alta qualidade pelo mapa gerado por varredura, enquanto

que o mapa gerado com injeção o apresentou como uma região de baixa qualidade devido à alta produção de água).

- Análise de Robustez

Mesmo apresentando resultados similares ao método por varredura, o método por produtores fixos demonstra uma baixa robustez, devido ao problema da queda de pressão (como verificado na etapa de validação), fato também observado nas análises adicionais realizadas com o modelo de campo real (Figura 7.7).



32p 54p 126p

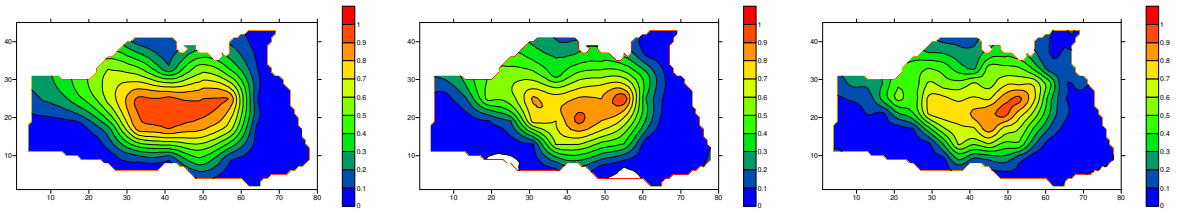
Figura 7.7 – Análise de sensibilidade do número de poços no método de geração por produtores fixos.

Os mapas de qualidade gerados com os produtores e injetores fixos apresentam uma maior robustez em relação à variação do número de poços utilizados, pois, como se pode visualizar na Figura 7.8, há uma pequena variação dos resultados. Isso comprova novamente o observado na etapa de validação com relação à vantagem deste método e sua capacidade de simular mais pontos do reservatório, uma vez que o problema da queda de pressão é eliminado.

7.1.2 Definição de Estratégias de Produção Inicial para Análise dos Diferentes Mapas de Qualidade

Com o intuito de realizar uma análise dos mapas de qualidade gerados são construídas quatro estratégias de produção iniciais, com diferentes números de produtores e injetores (Tabela 7.2), usando cada mapa de qualidade. Para cada estratégia realizaram-se cinco simulações a fim de garantir as condições ideais de escoamento entre poços e evitar incoerências (como poços completados em blocos inativos), totalizando 60 simulações para a realização desta análise. Devido aos baixos níveis de robustez e confiabilidade observados para o método de geração por

produtores fixos, este não é utilizado nesta análise. Para comparação e avaliação do desempenho das estratégias de produção são calculados os valores de VPL e Np de cada uma.



32p24i 54p48i 126p114i

Figura 7.8 – Análise de sensibilidade do número de poços no método de geração por produtores e injetores fixos.

Tabela 7.2 – Estratégias e números de poços.

Estratégias	**Número de Produtores**	**Número de Injetores**
7p9i	7	9
8p8i	8	8
9p7i	9	7
10p6i	10	6

Na Figura 7.9 pode-se observar que, tanto para o VPL quanto para o Np, as estratégias definidas usando os mapas de qualidade gerados pelo método analítico e por produtores e injetores fixos apresentaram sempre os melhores resultados. Pode-se observar que, embora o método analítico tenha apresentado em dois casos os melhores resultados de Np e VPL (7p9i e 9p7i, junto com o mapa gerado com produtores e injetores fixos), nos outros dois casos (8p8i e 10p6i) este apresenta os piores resultados; esta grande variação nos resultados pode indicar um maior nível de incerteza na utilização do mapa de qualidade gerado por este método. O mapa gerado pelo método por varredura apresenta o segundo melhor resultado (em valores de VPL e Np) em duas das estratégias geradas (8p8i e 10p6i), porém, o elevado número de simulações necessárias para a geração do mapa não justifica sua utilização.

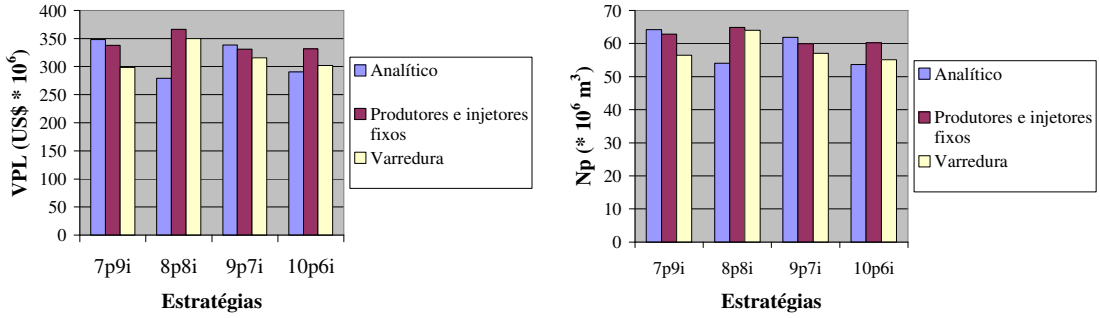


Figura 7.9 – VPL e Np das melhores estratégias de produção geradas usando cada mapa de qualidade.

Na Figura 7.10, pode-se ver a média dos valores do VPL e do Np de todas as estratégias de produção geradas usando cada mapa. Como se pode observar, a maior média é obtida usando o mapa de qualidade gerado pelo método de produtores e injetores fixos. Isto significa que o método apresenta melhores resultados na grande maioria das estratégias definidas.

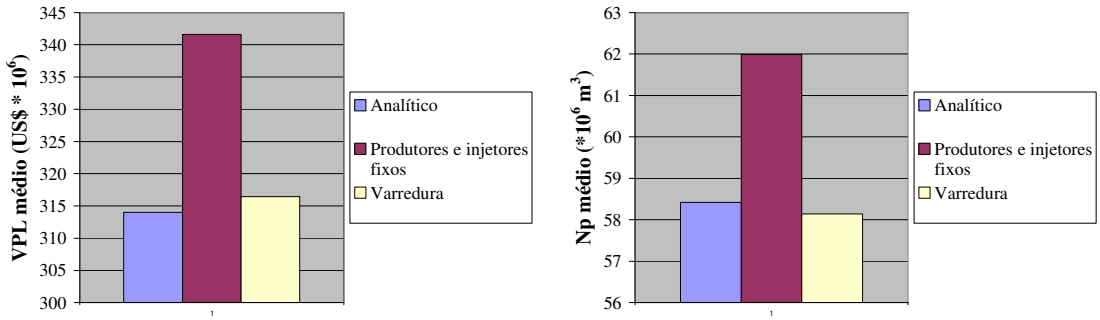
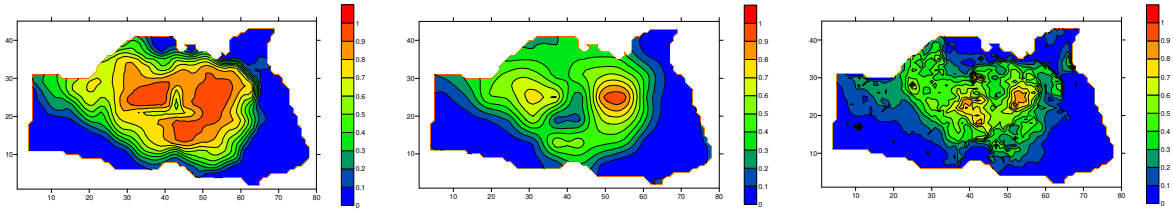


Figura 7.10 – VPL e Np médio de todas as estratégias de produção geradas usando cada mapa de qualidade.

- Comparação dos Mapas de Qualidade Gerados – Modelo com Falha Selante

Como na Figura 7.9 os valores de VPL e Np para os mapas gerados com o método de produtores e injetores fixos e com o método analítico são muito próximos, é inserida uma falha selante (transmissibilidade igual à zero) no modelo do Campo de Namorado modificado (Figura 5.7) para verificar a eficiência dos mapas de qualidade gerados pelos métodos propostos em modelos mais heterogêneos. Já na etapa de validação, o método analítico não apresentou bons resultados para modelos de reservatórios com heterogeneidades fortes.

Na Figura 7.11 são mostrados os mapas gerados para o modelo do Campo de Namorado com falha selante. Como se pode observar, os mapas de qualidade construídos usando o método por varredura e o por produtores e injetores fixos identificam a falha, enquanto o método analítico não identifica. Isso ocorre porque, como observado na etapa de validação, o método analítico funciona com confiabilidade apenas para modelos com baixo nível de heterogeneidade, por considerar apenas alguns dos parâmetros estáticos do reservatório e negligenciar o aspecto dinâmico do escoamento do fluido na rocha durante a produção. O estudo comparativo de mapas de qualidade não é realizado neste caso, uma vez que o objetivo deste trabalho é garantir a confiabilidade da geração dos mapas de qualidade.

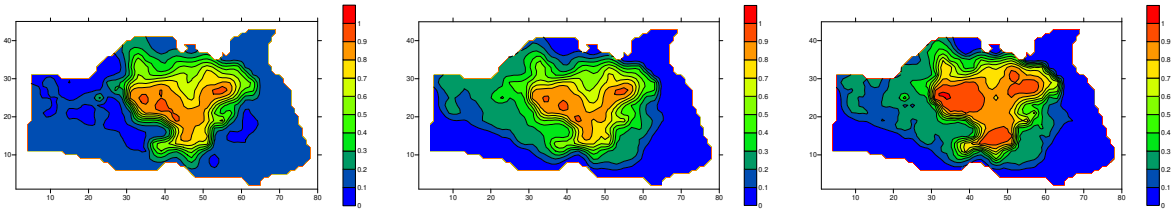


Varredura (2 em 2) | Produtores e Injetores Fixos (54p48i) | Analítico

Figura 7.11 – Mapas gerados para o caso com falha selante com os diferentes métodos estudados.

- Análise das Funções-Objetivo – Modelo com Óleo Pesado

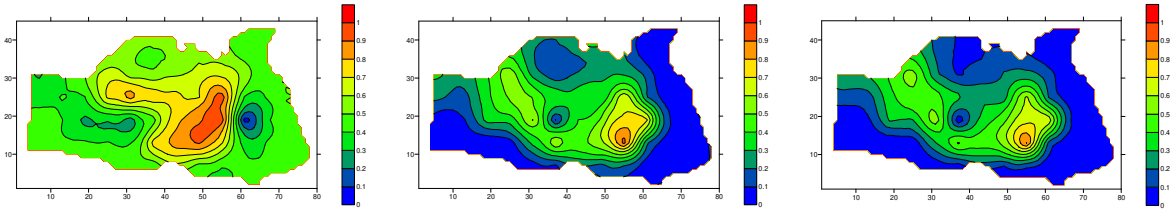
Em outra análise adicional são comparados os mapas de qualidade gerados por varredura e por produtores e injetores fixos usando outras funções-objetivo (respectivamente, Figura 7.12 e Figura 7.13). Verifica-se, no caso do mapa gerado com o segundo método citado acima usando o VPL como função-objetivo, um mapa com resultado diferente dos demais.



VPL | VPr | Np

Figura 7.12 – Mapas gerados com diferentes funções-objetivo por varredura (2 em 2).

Fato semelhante foi observado na etapa de validação e o motivo é a definição de uma restrição de fechamento de produtores usando um valor de corte de água máximo inapropriado. Aplicando a Equação 6.2 para calcular o corte de água máximo ideal para geração do mapa, é obtido o mapa mostrado na Figura 7.14. Como se pode observar, o mapa obtido possui maior semelhança com os mapas gerados usando as outras funções-objetivo, porém as regiões de maior qualidade apresentam-se ligeiramente diferentes. É recomendada a utilização do VPL como função-objetivo por considerar diversos fatores (cenário econômico, custos e tempo de produção) não considerados por outras funções-objetivo, além de fornecer resultados mais confiáveis em cenários incertos.



VPL VPr Np

Figura 7.13 – Mapas gerados com diferentes funções-objetivo usando produtores e injetores fixos (54p48i).

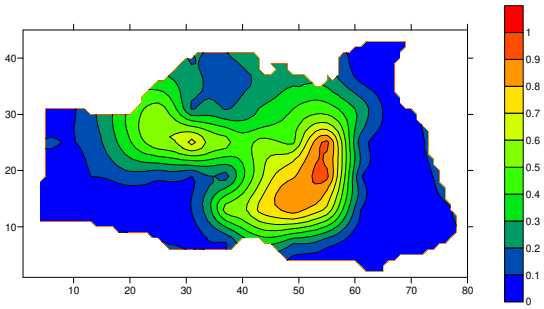
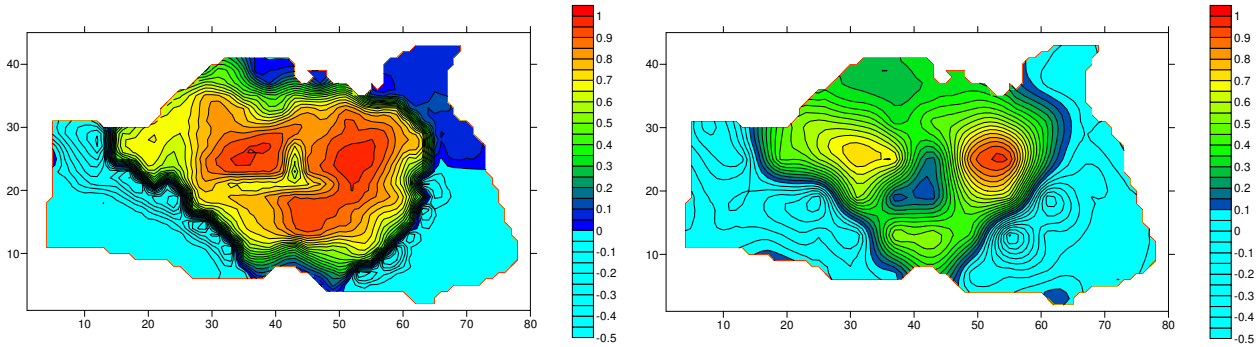


Figura 7.14 – Mapa de qualidade gerado por produtores e injetores fixos usando o valor de corte de água máximo definido pela Equação 6.2

7.1.3 Estudo das Regiões de Baixa Qualidade

Como exemplo da aplicação da metodologia de estudo das regiões de baixa qualidade, são gerados dois mapas de qualidade, usando o método por varredura e por produtores e injetores fixos (Figura 7.15). O modelo de reservatório utilizado neste estudo é o modelo do Campo de Namorado modificado com a falha selante (Figura 5.7), devido ao seu alto nível de

heterogeneidade. Comparando o mapa de qualidade gerado por varredura com as características do modelo (Figura 5.5), pode-se observar que as regiões próximas do aqüífero apresentam baixo potencial devido à alta produção de água (região em azul claro, com qualidade negativa). No mapa gerado com produtores e injetores fixos, a região de baixo potencial devido à alta produção de água é maior devido ao uso da injeção.



Varredura Produtores e Injetores Fixos

Figura 7.15 – Mapas de qualidade com análise das regiões de baixa qualidade; as regiões de cor azul claro ($FO'_{norm}<0$) representam regiões com baixa qualidade devido a alta produção de água e as regiões de azul escuro ($FO'_{norm}>0$), regiões de baixa qualidade devido a deficiência de pressão.

Estes exemplos são construídos utilizando o VPL como função-objetivo, porém um estudo semelhante poderia ser realizado usando o Np como função-objetivo e, ao invés dos custos de produção de água e de óleo, a própria produção de água e de óleo; a principal desvantagem da não utilização dos parâmetros econômicos é não considerar os custos relacionados com a produção de água, o que poderia alterar os resultados do mapa de qualidade gerado com os produtores e injetores fixos.

7.2 Discussão dos Resultados

Como observado nos casos teóricos, o método por produtores fixos apresentou robustez inferior à dos métodos por varredura e por produtores e injetores fixos também quando foi usado o modelo do campo real. A causa deste comportamento foi identificada ainda na etapa de validação, quando se verificou a influência da queda de pressão devido à abertura de muitos produtores simultaneamente. O método por produtores e injetores fixos mostrou-se mais robusto e confiável também na análise utilizando o modelo do campo real.

Na definição de estratégias iniciais para avaliação da utilização dos mapas de qualidade considerados confiáveis, os casos testados com a metodologia de alocação de poços utilizada apontam o método por produtores e injetores fixos e o analítico como melhores. Entretanto, quando se calculou a média dos resultados de todas as simulações executadas no estudo, o primeiro método apresentou-se mais eficiente (melhores resultados na maioria das estratégias definidas).

Nos resultados da análise adicional, através da adição de uma falha selante no modelo do campo real seguida da geração dos mapas de qualidade, verificou-se que o método analítico apresenta uma baixa confiabilidade quando aplicado em reservatórios com alto grau de heterogeneidade (como verificado no capítulo de validação).

Quando foi utilizado o método por produtores e injetores fixos, usando as diferentes funções-objetivo para gerar o mapa de qualidade, observou-se uma diferença significativa entre o mapa gerado com o VPL e os demais. A causa dessa diferença, já identificada na etapa de validação, foi a definição errônea do valor de corte de água máximo, que pode ser corrigido pela utilização da Equação 6.2 sempre que o VPL for utilizado como função-objetivo. Recomenda-se a utilização do VPL como função-objetivo, pois este considera, além da produção de óleo, a velocidade de produção e os custos.

Testou-se uma metodologia para construção do mapa de qualidade que possibilita a identificação dos motivos pelos quais certas regiões apresentam baixo potencial. Os mapas gerados apresentaram resultados coerentes identificando os motivos pelos quais cada região apresenta baixa qualidade. Esta informação poderia ser utilizada para auxiliar na alocação de poços injetores de duas maneiras: (1) na completação dos poços injetores na região do aqüífero (através da identificação das regiões de baixa qualidade devido a alta produção de água, que pode ser ocasionada pela presença de um aqüífero) ou (2) na alocação dos injetores em regiões de baixa qualidade devido a deficiência de pressão (para fornecer pressão e direcionar o fluxo, auxiliando assim na produção dos produtores localizados próximos).

Os exemplos testados neste trabalho apresentaram resultados satisfatórios, porém maiores estudos devem ser realizados a fim de pesquisar com mais detalhes a aplicação desta metodologia.

Capítulo 8

Conclusões

No presente trabalho, foram propostos e testados diversos métodos de geração de mapas de qualidade. O intuito principal foi diminuir o tempo computacional para a construção desta ferramenta, garantindo a confiabilidade necessária para a sua utilização no processo de seleção e otimização de estratégias de produção.

Verificou-se que a comparação e a análise da confiabilidade dos mapas não pode ser feita utilizando apenas um critério. Foram utilizados, dessa forma, diferentes critérios: a diferença relativa, o gráfico de validação, e usando também uma análise visual e a comparação das características do mapa gerado com as características intrínsecas do modelo.

O método atualmente empregado na geração de mapas de qualidade, proposto por Cruz *et al.* (1999) e chamado neste trabalho de **método por varredura**, apresenta a vantagem de analisar todas as regiões do reservatório usando o simulador, fornecendo mapas mais confiáveis, porém demanda um esforço computacional elevado devido ao grande número de simulações requeridas. Pode-se gerar o mapa de qualidade em menor tempo usando este método pulando blocos da malha para diminuir o número de simulações, porém o mapa perde precisão à medida que mais blocos são ignorados. O mapa pode ser gerado com uma boa precisão utilizando menos de um terço de simulações do que o caso de referência pulando dois em dois blocos; ainda assim o número de simulações é relativamente alto.

O método por varredura utilizando grupos de poços apresentou resultados de baixa confiabilidade, mostrando que este mapa torna o mapa de qualidade dependente também do número e da configuração dos poços produtores utilizados. Quando se usou um par produtor e injetor o resultado mostrou-se coerente com a realidade do modelo, porém o tempo gasto na geração e o trabalho adicional para construção da ferramenta tornam o método lento, não apresentando, assim, vantagens em relação ao método de varredura.

Dois métodos numéricos testados, método por produtores fixos e método por produtores e injetores fixos se destacaram por apresentar resultados rapidamente e com pequeno esforço computacional. Os resultados são, em geral, similares ao método proposto por Cruz *et al.* (1999) usando apenas uma simulação. Estes métodos, entretanto, necessitam de alguns testes e cuidados para que possam ser utilizados com confiabilidade, conforme demonstrado nos resultados.

Os mapas gerados pelo **método dos produtores fixos** apresentaram problemas devido à rápida queda de pressão que ocorre com a abertura simultânea de diversos poços sobre o reservatório. Para evitar esta queda de pressão, a vazão dos produtores deve ser calibrada de modo a garantir que os poços produzam por um tempo longo evitando o fechamento por problema de pressão; dessa forma os produtores podem mostrar todo o potencial da área que estes representam. Foi testada a diminuição do BHP mínimo dos produtores para controlar a queda de pressão, porém a calibração da vazão de líquidos apresentou melhores resultados. Uma desvantagem deste recurso é a alta produção de gás que ocorre quando a pressão do reservatório cai abaixo da pressão de bolha, o que pode acarretar em uma menor precisão do mapa de qualidade que busca medir o potencial de produção de óleo de um reservatório; além disso, em situações práticas, busca-se manter a pressão do reservatório sempre um pouco acima da pressão de saturação. Para os casos heterogêneos, o problema de rápida queda de pressão passa a ser menor e os mapas gerados com produtores fixos apresentaram uma boa tendência, identificando com sucesso as regiões de canais e barreiras do modelo e apresentando um valor de diferença relativamente baixo (principalmente para o caso B). O aumento do número de poços deve melhorar a precisão do mapa de qualidade, porém, pode agravar o problema de rápida queda de pressão, de modo que se deve buscar um equilíbrio entre estes dois fatores. Devido a esse problema, esse método tem uma menor confiabilidade.

O **método por produtores e injetores fixos** apresentou um melhor desempenho e uma maior robustez quando comparado ao de produtores fixos, permitindo um espaçamento menor na alocação dos poços, ou seja, uma maior amostragem de pontos (melhor precisão). As tendências dos mapas obtidos mostraram-se bem similares aos mapas gerados usando o método por varredura. O problema da queda de pressão foi completamente eliminado, porém deve-se atentar para o problema de pressurização exagerada do reservatório, que pode ser evitado através da calibração dos injetores com o objetivo de manter a pressão do reservatório estável e ligeiramente acima da pressão de bolha do reservatório. Os melhores resultados foram obtidos usando a configuração *five-spot*; acredita-se que esta seja a melhor configuração para esse método.

O **método analítico** apresentou bons resultados quando utilizado em modelos homogêneos ou com baixo nível de heterogeneidade. Para os modelos com heterogeneidades fortes, tanto nos casos teóricos quanto no caso do modelo real, algumas propriedades (heterogeneidades) não foram identificadas tornando os mapas gerados pouco confiáveis nestes casos. Devido a esta característica do método, sua utilização é recomendada apenas para modelos com baixo nível de heterogeneidade.

Estudos anteriores e testes feitos neste trabalho demonstram que o mapa de qualidade é útil na definição e otimização de estratégias de produção. No estudo comparativo dos mapas de qualidade, com a construção das estratégias iniciais de produção, o mapa de qualidade gerado com produtores e injetores fixos apresentou os melhores resultados. O mapa gerado com o método analítico também apresentou bons resultados, porém apresentou uma grande variação nos resultados e não pode ser generalizado por não funcionar em reservatórios com heterogeneidades muito fortes (falhas selantes ou canais e barreiras de permeabilidade), como demonstrado nos modelos teóricos e no modelo do campo real com a falha (transmissibilidade igual a zero). Como o mapa de qualidade é uma ferramenta auxiliar ao processo de otimização, as soluções de baixo custo computacional passam a ser mais atrativas visto que pequenas distorções no mapa podem ser corrigidas posteriormente no processo de otimização de estratégia de produção. Nesse sentido, o método por produtores e injetores fixos passa a ser uma solução bastante recomendada.

A utilização de uma função-objetivo adequada para a geração do mapa de qualidade mostrou-se um critério importante. Depois de testada a geração do mapa usando o VPL, o VPr e o Np, recomenda-se a utilização do VPL por levar em consideração, além da produção de óleo, os custos e a velocidade de produção. Entretanto, os resultados para os exemplos testados mostraram-se bem parecidos. A utilização do VPL como função-objetivo deve ser feita com cuidado quando se utiliza o método por produtores e injetores fixos, aplicando-se a Equação 6.2 para calcular o limite máximo de corte de água definido como parâmetro para fechamento dos poços produtores.

Maiores estudos devem ser realizados de modo a comprovar a eficiência dos mapas de qualidade gerados por métodos utilizando injeção de água na construção e otimização de estratégias de produção que também usem este método secundário de recuperação.

8.1 Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros

No presente trabalho foi desenvolvido e apresentado diversos aspectos importantes sobre a geração e utilização dos mapas de qualidade. Para dar continuidade ao desenvolvimento e aperfeiçoamento desta ferramenta, trabalhos futuros podem ser realizados atentando para os seguintes aspectos:

- Estudar e identificar os melhores critérios e técnicas de utilização do mapa de qualidade na definição de estratégias de produção, a fim de minimizar a subjetividade intrínseca do processo;
- Realizar estudos comparativos detalhados usando os diversos mapas de qualidade, gerados por diferentes métodos e usando diversas funções-objetivo, na definição e otimização de estratégias de produção;
- Estudar o método por produtores fixos analisando a influência dos parâmetros operacionais dos produtores para diminuir o problema da queda de pressão, dentre eles o BHP mínimo e a calibração da vazão de líquidos (pode-se testar a combinação destes dois fatores);
- Testar um método de geração de mapas de qualidade por produtores fixos em estágios, onde se busca aumentar a amostragem de pontos do reservatório movendo a configuração de poços

pré-definida algumas vezes sobre o reservatório (cada estágio corresponderia a uma simulação onde a posição dos produtores é variada em relação à posição original inicialmente utilizada);

- Analisar e aperfeiçoar a construção do mapa de qualidade usando o método analítico (equações analíticas) utilizando, ao invés de apenas a permeabilidade como peso para considerar as heterogeneidades presentes no campo, um peso que considere mais parâmetros (como o logaritmo da média das permeabilidades nas direções x, y e z, por exemplo);
- Realizar estudos comparativos com mapas de qualidade gerados por lógica *fuzzy* e por simulação numérica; e
- Estudar o conceito do mapa de qualidade dinâmico (mapa de qualidade gerado para diferentes intervalos de tempo em campos em produção) e sua utilização para acompanhamento e análise de diferentes etapas da produção de campos petrolíferos maduros.

Referências Bibliográficas

BABU, D.K. e ODEH, A.S. Productivity of a Horizontal Well. Artigo SPE 18298 - Reservoir Engineering, Vol.4, No.4, pp. 417-421, nov. 1989.

BADRU, O. **Well-Placement Optimization Using the Quality Map Approach**. Stanford, 2003. 61f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Petróleo (DPE), Universidade de Stanford, EUA, 2003.

BRANCO, C.C.M., PINTO, A.C.C., TINOCO, P.M.B., VIEIRA, P.M.F., SAYD, A.M., SANTOS, R.L.A. e PRAIS, F. The Role of the Value Information and Long Horizontal Wells in the Appraisal and Development Studies of a Brazilian Offshore Heavy-Oil Reservoir. Artigo SPE 97846 – SPE International Thermal Operations and Heavy oil Symposium, Calgary, Alberta, Canada, nov. 2005.

CAMPAGNOLO, E.A. **Determinação do Comportamento Volumétrico e Equilíbrio de Fases de um Óleo Asfaltênico Usando Equação de Estado**. Campinas, 1992. 148f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Petróleo, Unicamp, 1992.

CAVALCANTE FILHO, J.S.A., MARTINI, R.F., SCHIOZER, D.J. Metodologias de Geração de Mapas de Qualidade para Aplicação na Seleção e Otimização de Estratégias de Produção de Campos Petrolíferos. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador, Bahia Brasil, out. 2005a.

CAVALCANTE FILHO, J.S.A., MARTINI, R.F., SCHIOZER, D.J. Methodology for Generating Quality Maps with Application in the Selection and Optimization of Drainage Strategies of Oil Reservoir. 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, nov. 2005b.

CORRIE, R.D. e INEMAKA, S.A. An Analytical Solution to Estimate the Optimum Number of Development Wells to Achieve Maximum Economical Return. Artigo SPE 71431 – Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, EUA, out. 2001.

COTTINI-LOUREIRO, A. e ARAUJO, M. Optimized Well Location by Combination of Multiple Realization Approach and Quality Map Methods. Artigo SPE 95413 – Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, EUA, out. 2005.

CRUZ, P.S., HORNE, R.N. e DEUTSCH, C.V. The Quality Map: A Tool for Reservoir Uncertainty Quantification and Decision Making. Artigo SPE 56578 – Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, EUA, out. 1999.

CRUZ, P.S. **Reservoir Management Decision-Making in the Presence of Geological Uncertainty**. Stanford, 2000. 215f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Petróleo (DPE), Universidade de Stanford, EUA, 2000.

CRUZ, P.S., HORNE, R.N. e DEUTSCH, C.V. The Quality Map: A Tool for Reservoir Uncertainty Quantification and Decision Making. Artigo SPE 87642 – SPE Reservoir Evaluation and Engineering, Vol. 7, No.1, pp. 6-14, 2004.

DEUTSCH, C.V. **Geostatistical Reservoir Modeling**. Applied Geostatistics Series, Oxford:University Press, New York, EUA, 2002.

GUIMARÃES, M.S. **Metodologia para Otimização de Estratégias de Drenagem para Campos de Petróleo em Produção**. Campinas, 2005. 126f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Petróleo, Unicamp, 2005.

GÜYAGÜLER, B., HORNE, R.N., ROGERS, L. e ROSENZWEIG, J.J. Optimization of Well Placement in a Gulf of Mexico Waterflooding Project. Artigo SPE 78266 – Reservoir Evaluation and Engineering, Vol.5, No.3, pp. 229-236, abr. 2002.

GÜYAGÜLER, B. **Optimization of Well Placement and Assessment of Uncertainty**. Stanford, 2002. 132f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Petróleo (DPE), Universidade de Stanford, EUA, 2002.

GÜYAGÜLER, B. e HORNE, R.N. Uncertainty Assessment of Well Placement Optimization. Artigo SPE 71625 – SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, EUA, out. 2001.

IERAPETRITOU, M.G., FLOUDAS, C.A., VASANTHARAJAN, S. e CULLICK, A.S. Optimal Location of Vertical Wells: Decomposition Approach. AIChE Journal, Vol. 45, No. 4, pp. 844-859, abr. 1999.

JOURNEL, A.G. e HUIJBREGTS, Ch.J. **Mining geostatistics.** London: Academic Press, 600p, 1989.

MAGALHÃES, T.C.B. **Influência de Restrições Operacionais na Definição das Estratégias de Produção**. Campinas, 2005. 141f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Petróleo, Unicamp, 2005.

MARTINI, R.F., CAVALCANTE FILHO, J.S.A. e SCHIOZER, D.J. The Influence of Different Strategies on the Production of oil Fields Stimulated by Waterflooding. 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), Rio de Janeiro, Brazil, dez. 2004.

MARTINI, R.F., CAVALCANTE FILHO, J.S.A. e SCHIOZER, D.J. A Methodology for the Optimisation of Heavy Oil Production Strategies. 13th European Symposium on Improved Oil Recovery, Budapeste, Hungria, abr. 2005a.

MARTINI, R.F., SCHIOZER, D.J. e NAKAJIMA, L. Use of Quality Maps in Reservoir Management. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering, Vol. XXVII, No. 4, pp. 463-468, out-dez 2005b.

MEZZOMO, C.C.. **Otimização de Estratégias de Recuperação para Campos de Petróleo**. Campinas, 2001. 105f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Petróleo, Unicamp, 2001.

MEZZOMO, C.C. e SCHIOZER, D.J. Methodology for Water Injection Strategies Planning Optimization Using Reservoir Simulation. Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 42, No. 7, pp. 9-11, jul. 2003.

MEZZOMO, C.C.. **Seleção de Projetos de Desenvolvimento Integrada a Análise de Riscos**. Campinas, 2005. 178f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Petróleo, Unicamp, 2005.

NAKAJIMA, L., MEZZOMO, C.C., SCHIOZER, D. J. e GUILHERME, I. R. Determinação de Mapa de Qualidade de um Reservatório Utilizando Sistema Fuzzy. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, Brasil, jun. 2003.

NAKAJIMA, L. **Otimização de Desempenho de Poços Horizontais no Desenvolvimento de Campos de Petróleo**. Campinas, 2003. 124f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Petróleo, Unicamp, 2003.

NAKAJIMA, L. e SCHIOZER, D.J. Horizontal Well Placement Optimization Using Quality Map Definition. Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, jun. 2003.

NAKAJIMA, L., MARTINI R.F. e SCHIOZER, D.J. A Methodology for Reservoir Management Via Production Strategy Optimisation. Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, Brasil, out. 2004.

NEVES, F.R. **Análise da Influência de Indicadores Econômicos na Escolha da Estratégia de Produção**. Campinas, 2004. 129f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Petróleo, Unicamp, 2004.

PEDROSO Jr., C. **Otimização de Locações de Poços Usando Simulação Numérica de Reservatórios**. Campinas, 1999. 125f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Petróleo, Unicamp, 1999.

PINTO, A.C.C., BRANCO, C.C.M., DE MATOS, J.S., VIEIRA, P.M., DA SILVA GUEDES, S., PEDROSO Jr., C., DECNOP COELHO, A.C. e CECILIANO, M.M. Offshore Heavy Oil in

Campos Basin: The Petrobras Experience. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, mai. 2003.

SCHIOZER, D.J. e MEZZOMO, C. C. Methodology for Field Development Optimization with Water Injection. Artigo SPE 82021 – SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, Dallas, Texas, EUA, abr. 2003.

SIS. Eclipse Reference Manual 2003A. 1976f. Schlumberger Information Solutions, 2003.

WENCES, A., JESUS, A. e OSWALDO, H. How to Determine the Best Exploitation Strategy from a Reservoir Simulation Model. Artigo SPE 69437 - SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, mar. 2001.

ZARGANI, S.S., VAUGHAN, R.A. e MISSALLATI, A.A. Spatial Integration of Geological Datasets for Predictive Hydrocarbon Studies in Murzuq Basin, SW Libya. IEEE International Conference on Data Mining, Melbourne, Florida, EUA, 2003.

ZIMMERMAN, D., PAVLIK, C., RUGGLES, A. e ARMSTRONG, M.P. An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting. Mathematical Geology, Vol 31, No. 4, pp. 375-390, 1999.