

DETERMINAÇÃO DE MAPA DE QUALIDADE DE UM RESERVATÓRIO UTILIZANDO SISTEMA *FUZZY*

L. Nakajima¹, C. C. Mezzomo², D. J. Schiozer³, I. R. Guilherme⁴

UNICAMP – FEM - Departamento de Eng. de Petróleo, Caixa Postal 6052
CEP 13081-970, Campinas, SP, Brasil

¹lincoln@dep.fem.unicamp.br

²cmezzomo@dep.fem.unicamp.br

³denis@dep.fem.unicamp.br

⁴UNESP, Caixa Postal 178 – CEP 13506 9000, Rio Claro, SP, Brasil

ivan@rc.unesp.br

Resumo - A principal tarefa da engenharia de reservatórios é o desenvolvimento e gerenciamento de campos de petróleo a fim de determinar a melhor estratégia de produção e recuperação de óleo e gás. Dependendo do caso, procura-se buscar a maximização da produção de hidrocarbonetos e de indicadores econômicos, ou realizar uma comparação entre projetos para que se trabalhe com projetos de maior retorno, ou mesmo realizar a exploração de campos com menores riscos envolvidos. Determinar a estratégia de produção é um processo que requer muito tempo e esforço. A complexidade da análise de eficiência deve-se, basicamente, ao grande número de variáveis envolvidas no processo de previsão de produção de campos de petróleo, o que exige, então, ferramentas de auxílio à decisão que na maioria das vezes trabalha com eliminação de alternativas menos atrativas e possibilita análises mais profundas de apenas um número possível de estratégias.

A fim de reduzir o esforço e o tempo de análise de eficiência, propõe-se usar o conceito de mapa de qualidade, isto é, uma representação bi-dimensional de regiões com potencial de produção em um reservatório. O conceito de lógica *fuzzy* é utilizado e um simulador numérico de reservatórios é empregado como ferramenta para determinação de uma base de conhecimento.

Palavras-Chave: mapa de qualidade; sistema *fuzzy*; otimização de estratégia.

Abstract - The main task of reservoir engineering is the development and management of petroleum fields in order to improve the profitability of a reservoir by raising production rates with minimum costs and risks or increasing ultimate reserves. The definition of production strategy is a time-consuming process that requires great efforts, because it involves a high number of parameters and objectives to be analyzed during production forecast like well location, number and type of wells, operational conditions, reservoir characteristics and economic scenario. The complexity of the problem demands tools to assist the decision-making process by discarding less attractive alternatives and providing analysis of a reduced number of solutions

In order to reduce time-consuming and analysis efforts, a bi-dimensional representation of regions with production potential in a reservoir is proposed. The concept of quality map is used and a commercial numerical reservoir simulator is utilized to determine a knowledge data base for a *fuzzy* logic concept.

Keywords: quality map, *fuzzy* logic, strategy optimization

1. Introdução

A determinação da estratégia ótima para desenvolver um campo requer muito tempo e esforço, pois envolve um grande número de combinações de variáveis, como propriedades do reservatório, localização, número e tipos de poços, condições operacionais, e cenário econômico. Pode-se dizer que a alocação dos poços é a etapa mais importante na definição de uma estratégia, pois a partir dela o reservatório apresentará um determinado comportamento que influenciará as decisões estratégicas futuras, e também a mais difícil, por depender do modelo construído através de variáveis geológicas, consideradas incertas. A complexidade desse tipo de problema exige a utilização de ferramentas de auxílio à decisão que na maioria das vezes trabalham com eliminação de alternativas menos atrativas e possibilitam análises mais profundas de apenas um número possível de soluções.

Uma ferramenta útil para auxiliar a alocação de poços é o mapa de qualidade. Este mapa é uma representação bi-dimensional de regiões com potencial de produção em um reservatório, proporcionando uma idéia de onde os poços poderão ser alocados para obter o máximo de produção. Entretanto, a construção de um mapa de qualidade não é uma tarefa simples, pois inúmeras variáveis que afetam a produtividade de um poço devem ser consideradas.

Este trabalho visa desenvolver um sistema inteligente que correlacione parâmetros geológicos do reservatório com uma possível produção a ser obtida. Uma vez que tais parâmetros são tidos como incertos, a teoria de lógica *fuzzy* mostrou-se mais recomendável para compor o sistema. Um simulador comercial de fluxo é utilizado montar a base de conhecimento. Este método será comparado a outro já desenvolvido na literatura, porém que utiliza simulação numérica para a construção do mapa de qualidade. Em ambos os métodos, o mapa destina-se à alocação de poços verticais. A fim de demonstrar a aplicação de um mapa de qualidade e seus benefícios, um exemplo de otimização de uma estratégia será apresentado.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Otimização de Estratégias de Produção

Otimização de estratégia de produção tem sido um importante tema na indústria de petróleo. A maioria dos estudos desenvolvidos sobre o assunto tem como principal objetivo a alocação de poços.

Aanonsen et al. (1995) propôs um método de alocação de poços sob incertezas geológicas baseado em superfícies de respostas e planejamento de experimento. Múltipla regressão e krigagem foram utilizadas para reduzir o número de simulações.

A localização de poços horizontais em relação aos contatos óleo-água e óleo-gás foi proposto por Wagenhofer and Hatzignatiou (1996). O trabalho consistia na avaliação do tempo de erupção simultânea de água e gás para definir a melhor posição do poço horizontal, proporcionando uma maior produção de óleo, pré-erupção. Vazão, viscosidade e fator volume de formação do óleo, diferença entre densidade do óleo e da água, comprimento do poço, razão mobilidade óleo-água e altura da coluna de água foram os principais fatores que afetaram a localização do poço horizontal.

Bittencourt e Horne (1997) desenvolveram um algoritmo híbrido baseado em métodos diretos como algoritmo genético, busca *Polytope* e busca Tabu. O algoritmo foi utilizado para determinar a re-alocação ótima de poços, através da avaliação de uma função-objetivo, envolvendo análises de fluxo de caixa. Na mesma linha de pesquisa, Güyagüler and Horne (2001) e Montes et al. (2001) também utilizaram algoritmo genético para otimizar a localização de poços.

Cruz et al. (1999) introduziram o conceito de mapa de qualidade que pode ser utilizado para comparar reservatórios, classificar realizações estocásticas e incluir características do reservatório no processo de decisão para o planejamento de uma estratégia de recuperação. O mapa é gerado através de simulações de fluxo com um único poço. Esta metodologia será discutida com mais detalhes a seguir.

2.2. Mapa de Qualidade – Método da Simulação de Fluxo

O método de construção do mapa de qualidade proposto por Cruz et al. consiste na realização de múltiplas simulações de fluxo, variando a posição de um único poço vertical em cada execução, de forma a cobrir toda malha do modelo do reservatório. A “qualidade” descrita é o volume acumulado de óleo produzido (N_p) na célula. A amostragem pode ser realizada aleatoriamente ou igualmente espaçada. O número de pontos a serem amostrados dependerá da heterogeneidade do reservatório, mas cerca de 10% do número total de células mostram-se suficientes. O restante dos pontos do reservatório deve ser interpolado. Apesar da possibilidade de reduzir o número de pontos a ser amostrado, este processo pode se tornar inviável para modelos de reservatórios grandes, onde apenas uma porcentagem do número total de células pode demandar um número muito grande de simulações, podendo inviabilizar o processo. Uma maior redução na amostragem pode prejudicar o resultado. O método utilizando a amostragem realizada em pontos igualmente espaçados será utilizado na comparação com o método proposto neste trabalho.

2.3. Sistema Fuzzy

A lógica *fuzzy* possibilita aproximar a decisão computacional da decisão humana, isto é, fazer com que uma máquina apresente decisões "abstratas", do tipo "mais ou menos", "talvez sim", e outras inúmeras variáveis que representam as decisões humanas. Respostas como um simples “sim” ou um “não” a determinadas questões pode ser insuficiente ou mesmo incorreta. A lógica *fuzzy* é fundamentada na teoria dos conjuntos *fuzzy* (Zadeh 1965).

No passado, a teoria das probabilidades era utilizada para tratar a deficiência, inerente à informação representada numa linguagem natural. Entretanto, os conjuntos *fuzzy* têm se mostrado mais adequados para tratar imperfeições da informação do que a teoria das probabilidades. Isto é feito utilizando-se variáveis lingüísticas *fuzzy*, na qual os valores associados a uma variável são conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, na engenharia de reservatórios, o valor do parâmetro porosidade é tratada de forma numérica para construção de um modelo numérico de um reservatório. Neste caso é necessário modificar a proposição binária por proposição *fuzzy*. A variável porosidade pode ser associada a conjuntos *fuzzy* Baixo, Médio e Alto. Desta forma podemos ter a seguinte proposição: *Porosidade é Baixa*, onde Baixa corresponde a um conjunto *fuzzy*. Para que o sistema entenda como tratar esses dados e proporcione a resposta desejada, é preciso fornecer a dedução lógica que governa essas informações nebulosas, ou seja, o conjunto de regras a partir do qual tem-se uma relação entre as informações de entrada e as informações de saída. Essa dedução lógica utilizando-se um conjunto de regras *fuzzy* é chamada de inferência *fuzzy*. Uma regra nebulosa tem a seguinte estrutura: *Se Porosidade é Baixa e NetPay é Baixo, então Volume é Baixo*. No sistema implementado utilizou-se os operador lógico “e” correspondendo ao mínimo, a implicação lógica definida por Mandani e a *defuzzificação* correspondendo ao centro de massa (Gomide, 1998).

O sistema *fuzzy* tem sido amplamente utilizado para lidar com problemas relacionados à tomada de decisões, que podem ser bastante complexos para serem solucionados de forma quantitativa. Sistemas *fuzzy* não necessitam de modelos computacionais ou equações matemáticas para determinar a relação entre parâmetros de entrada e de saída. Esta relação é definida, como foi discutido anteriormente, por simples regras baseadas em conhecimento.

3. Desenvolvimento do Sistema

O primeiro passo para o desenvolvimento do sistema *fuzzy* foi determinar os parâmetros a serem utilizados como dados entrada, a partir do qual o sistema geraria o mapa de qualidade. Devido às inúmeras variáveis relacionadas aos dados geológicos presentes em um modelo de reservatório, foi necessário realizar uma análise de sensibilidade para determinar quais fatores possuíam maior influência na produtividade de um poço vertical (Np), a fim de simplificar o modelo. Dessa análise, foram escolhidos os seguintes parâmetros: permeabilidade horizontal (Kh), saturação de óleo (So), espessura porosa (net pay) e porosidade (ϕ). Estes parâmetros são associados a variáveis nebulosas e a cada variável foi associado a conjuntos *fuzzy*. Os conjuntos nebulosos atribuídos a esses parâmetros são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de entrada – conjuntos *fuzzy*

Permeabilidade horizontal (mD)		Net Pay (m)		Porosidade		Saturação de Óleo	
0-200	Muito baixo	0-8	Muito baixo	0-0,1	Baixo	0-0,2	Baixo
200-400	Baixo	8-16	Baixo	0,1-0,2	Médio	0,2-1	Alto
400-600	Médio	16-24	Médio	0,2-0,3	Alto		
600-800	Alto	24-32	Alto				
800-1000	Muito alto	32-40	Muito alto				

O segundo passo foi determinar as regras *fuzzy* que correlacionassem os parâmetros de entrada escolhidos com o dado de saída. Entretanto, a relação entre esses parâmetros é bastante complicada, envolvendo modelos matemáticos complexos. Neste caso, a simulação numérica de reservatórios mostrou-se uma ferramenta adequada para determinar a correlação entre os parâmetros necessários para estabelecer as regras do sistema *fuzzy*. Um reservatório homogêneo, de malha 36x36x6, foi criado e um poço vertical, completado em todas as camadas, foi alocado no centro. A cada simulação executada, alterou-se o valor de um dos parâmetros, seguindo a Tabela 1, de forma a obter todas as combinações possíveis e seus respectivos resultados. Para cada regra foi necessária uma simulação. Neste sistema foram formuladas 79 regras *fuzzy*. Os valores do parâmetro de saída Np foram normalizados pelo maior valor obtido e os valores utilizados no conjunto *fuzzy* são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetro de saída – conjuntos *fuzzy*

Volume acumulado de óleo (normalizado)	
0-0,2	Muito baixo
0,2-0,4	Baixo
0,4-0,6	Médio
0,6-0,8	Alto
0,8-1	Muito alto

Apesar da necessidade de realizar inúmeras simulações para a formulação da base de conhecimento, é importante ressaltar que a realização de todo o processo é necessária apenas uma única vez. As regras são geradas de

forma a generalizar a relação entre os parâmetros de entrada e saída, podendo o sistema *fuzzy* ser utilizado para analisar qualquer reservatório, considerando as simplificações atribuídas ao sistema.

4. Comparação dos Métodos

Os dois métodos apresentados foram aplicados em um modelo de malha 36x36x6, com distribuições de permeabilidade horizontal, net pay, porosidade. A saturação inicial de óleo é uniforme de valor 0,82. A construção do mapa através do método da simulação de fluxo foi realizada amostrando-se 121 pontos de um total de 1296, espaçados regularmente. O restante dos pontos foi obtido através de uma interpolação linear. Os valores de N_p foram normalizados pelo maior valor obtido, para possibilitar a comparação com o outro método.

Os dados para obter o mapa através da lógica nebulosa foram submetidos a um pré-processamento antes de serem fornecidos para o sistema inteligente. A produtividade de um poço não depende apenas dos parâmetros relativos às células em que o poço está alocado, mas também das características ao seu redor, que definem sua área de drenagem. Dessa forma, os dados de uma célula são uma média dos valores dos parâmetros das células vizinhas e das respectivas camadas. Os dois mapas podem ser vistos na Figura 1.

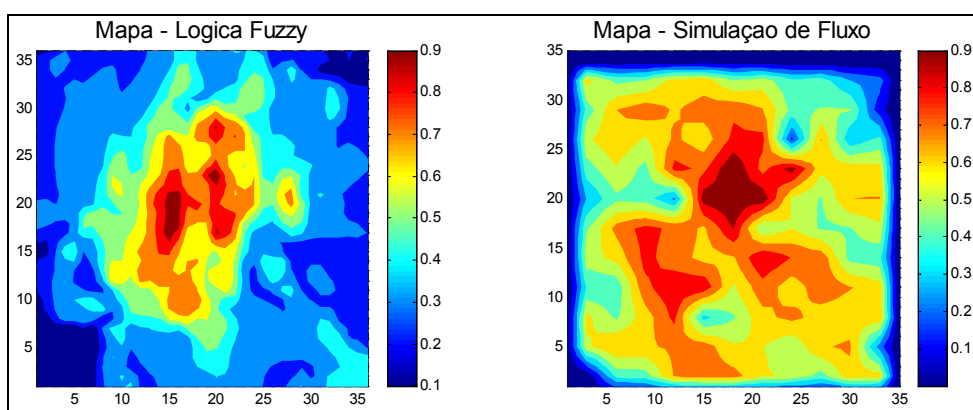


Figura 1 – Mapas de Qualidade

Como pode ser observado, o mapa obtido utilizando o sistema *fuzzy* apresenta regiões de potencial para produção reduzidas em relação ao outro mapa, implicando uma tendência mais conservadora. Esta tendência, entretanto, pode ser ajustada através da modificação das regras impostas ao sistema. Por outro lado, este mapa possui uma melhor definição, uma vez que todos os pontos da malha do modelo são utilizados.

O mapa obtido por simulação de fluxo apresenta maiores regiões com alto potencial de produção e também, valores intermediários. Porém, é preciso considerar a falta de precisão do mapa, que se deve à própria deficiência na amostragem dos pontos, necessitando de muitas interpolações. Apesar da diferença entre os mapas, pontos em comum podem ser observados. A região de maior potencial (em vermelho) concentra-se no centro do reservatório, enquanto o de menor (em azul), na periferia. Embora o sistema *fuzzy* apresente uma grande dependência nas definições dos conjuntos e regras *fuzzy*, este método mostrou-se bastante flexível, uma vez que não há a necessidade de realizar simulações, reduzindo tempo e esforço.

5. Aplicação do Mapa de Qualidade

Com o objetivo de demonstrar a utilidade do mapa de qualidade, duas estratégias de produção foram aplicadas e comparadas. A Estratégia 1 com uma configuração *five-spot* e a Estratégia 2 com os poços produtores e injetores alocados de acordo com o mapa de qualidade gerado pelo sistema *fuzzy*. Neste caso, os poços produtores foram alocados preferencialmente nas regiões com maior potencial de produção. Os poços injetores foram posicionados de acordo com a posição dos poços produtores. Foram utilizados, inicialmente, 32 produtores e 32 injetores. As duas estratégias podem ser vistas na Figura 2. A tabela abaixo apresenta algumas características do modelo utilizado.

Tabela 3 – Características do modelo adotado

Grid	36x36x6	Condições Operacionais			
		Produtores		Injetores	
Dimensão (m)	100x100				
Densidade óleo (°API)	25	Max. Vazão Óleo (m³)	1000	Max Vazão Água (m³)	1000
Pressão Ref. (kg/cm²)	322	Min. BHP (kg/cm²)	120	Max BHP (kg/cm²)	400

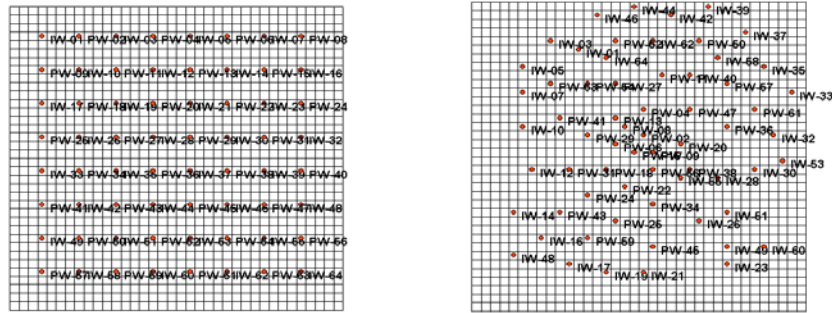


Figura 2. Distribuição inicial dos poços, estratégia 1 e 2, respectivamente.

Os poços produtores foram completados nas Camadas 1 a 5 e os injetores, nas Camadas 5 e 6. A abertura dos poços é realizada de 60 em 60 dias.

As estratégias passaram por um processo de otimização, com o objetivo de maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) do campo. Foram realizadas, basicamente, ações de exclusão e re-alocação de poços. Os resultados da otimização das duas estratégias podem ser vistos nas Figuras 3 e 4.

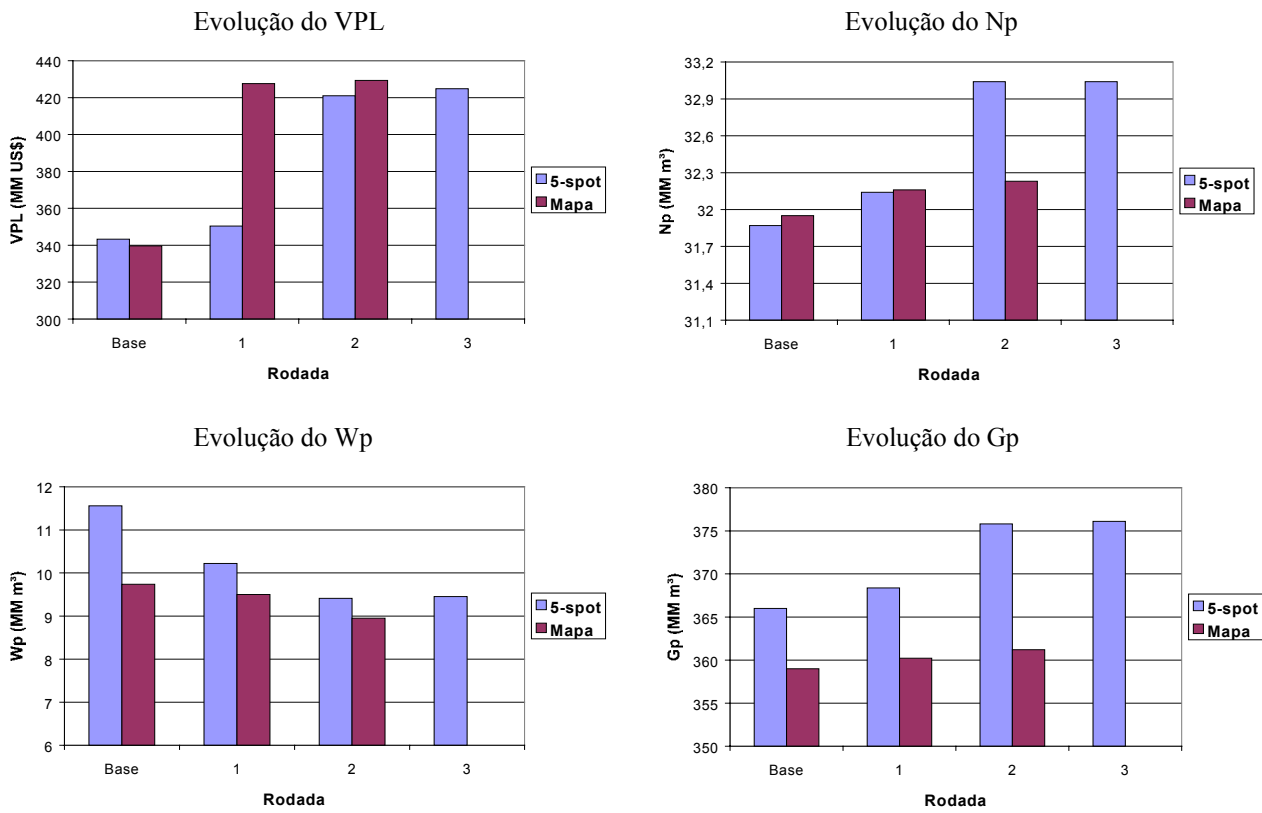


Figura 3. Resultados do processo de otimização.

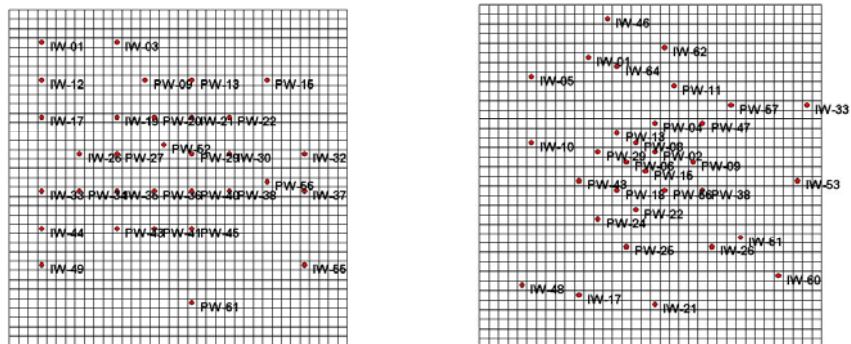


Figura 4. Distribuição final dos poços, estratégia 1 e 2, respectivamente.

As Figuras acima mostram as variações dos valores presentes líquido e volumes acumulados de óleo, água e gás de acordo com cada etapa de otimização. A estratégia base proposta a partir do mapa de qualidade mostrou-se mais próxima da estratégia ótima, necessitando de menos alterações para atingir um valor satisfatório de VPL. A distribuição final dos poços para as duas estratégias apresentou uma maior concentração dos poços produtores na região central do reservatório, enquanto os injetores foram preferencialmente alocados na periferia, como ilustrado na Figura 4. Uma vez que o mapa de qualidade informa o potencial de produção de regiões do reservatório, o processo de alocação de novos poços e re-alocação de poços com baixo desempenho é facilitado. Por exemplo, poços que não apresentam uma boa produtividade por estarem posicionados em um local de baixo potencial podem ser re-allocados, melhorando o seu desempenho. A utilização do mapa de qualidade para determinar a distribuição inicial dos poços pode facilitar o processo de otimização futuro, reduzindo o tempo e o número de simulações, uma vez que a estratégia já parte de uma solução boa, em relação ao posicionamento dos poços.

O uso do mapa de qualidade pode ser mais eficiente na geração de uma estratégia base para campos grandes e heterogêneos, reduzindo significativamente o número de simulações necessárias para a otimização de uma estratégia. Porém, esse conceito ainda precisa ser estudado com mais detalhes e testado em diferentes reservatórios, mas são várias as aplicações possíveis. Uma combinação das duas técnicas também pode ser utilizada. O conceito de lógica *fuzzy* pode ser considerado como uma estimativa inicial que depois pode ser ajustada com os resultados das simulações.

6. Conclusões

- O mapa de qualidade mostrou-se uma ferramenta útil no auxílio ao processo de tomada de decisões para o desenvolvimento de um campo de petróleo;
- Um sistema inteligente baseado na teoria de lógica *fuzzy* apresentou-se apropriado na construção do mapa de qualidade, pois permite considerar as incertezas associadas aos parâmetros geológicos;
- O uso da teoria de lógica *fuzzy* pode substituir a simulação numérica na geração do mapa de qualidade, o que torna o processo de definição de estratégia mais rápido, especialmente em campos grandes e heterogêneos. A combinação das duas técnicas deve ser estudada para a obtenção de melhores resultados;
- Embora este sistema dependa de regras de caráter subjetivo, ajustes podem ser realizados conforme dados adicionais são incluídos na base de conhecimento.
- O conceito apresentado neste trabalho deverá ser testado para diferentes tipos de reservatórios, mas a princípio, mostrou-se uma ferramenta promissora para auxiliar o processo de escolha e otimização de estratégia de produção.

7. Referências

- AANONSEN, S. I., EIDE, A. L., HOLDEN, L.: "Optimizing Reservoir Performance Under Uncertainty with Application to Well Location", SPE 30710, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, E.U.A., Out. 22-25, 1995.
- WAGENHOFER, T., HATZIGNATIOU, D. G.: "Optimization of Horizontal Well Placement", SPE 35714, Western Regional Meeting, Anchorage, Alaska, E.U.A., Mai 22-24, 1996.
- BITTENCOURT, A. C., HORNE, R. N.: "Reservoir Development and Design Optimization", SPE 38895, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, U.S.A., Oct. 5-8, 1997.
- GÜYAGÜLER, B., HORNE, R. N.: "Uncertainty Assessment of Well Placement Optimization", SPE 71625, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, U.S.A., 30 Sep. to 3 Oct., 2001.
- CRUZ, P. S., HORNE, R. N., DEUTSCH, C. V.: "The Quality Map: A Tool for Reservoir Uncertainty Quantification and Decision Making", SPE 56578, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, U.S.A., Oct. 3-6, 1999.
- MONTES, G., BARTOLOME, P., UDIAS, A. L.: "The Use of Genetic Algorithms in Well Placement Optimization", SPE 69439, SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, Mar 25-28, 2001.
- YEE, C. L.: "Sistemas Inteligentes na Exploração de Petróleo", Apostila - Departamento de Engenharia de Petróleo, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2000.
- ZADEH, L.A., "Fuzzy Sets", Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- GOMIDE, F., PETRYCZ, W., "An Introduction to Fuzzy Sets. Analysis and Design", The MIT Press, Cambridge, Spring-Verlag (1998).