

CONSTRUÇÃO DE MAPAS DE QUALIDADE DE RESERVATÓRIO PARA UM CAMPO GEOLOGICAMENTE COMPLEXO EMPREGANDO LÓGICA FUZZY E KRIGAGEM COMO MÉTODO DE ESTIMATIVA

Mateus A. Fernandes¹, Francisco A. M. Vila Nova²,
Francisco T. A. Costa³, Samia F. L. Furtado⁴

Copyright 2014, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2014**, realizado no período de 15 a 18 de setembro de 2014, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas no trabalho completo submetido pelo(s) autor(es). Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2014**.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a construção de mapas de qualidade de reservatórios de petróleo, a fim de auxiliar na identificação de regiões promissoras para receberem novos investimentos em perfurações e/ou intervenções em poços. O estudo é aplicado a um Campo maduro localizado *onshore* na bacia de Alagoas, que se destaca pela dificuldade para análises convencionais devido à alta compartimentação de seu volume *in place* em um número muito grande de reservatórios independentes. Possuindo este Campo um grande número de poços já perfurados, há uma grande dificuldade em se conseguir novas locações que apresentem um empilhamento de reservatórios ainda com boas perspectivas de produção. Todavia, estes poços podem fornecer informações para subsidiar a composição de um panorama da situação do Campo, inclusive no que se refere à qualidade dos reservatórios. Valores de porosidade, saturação de água e *net pay* – calculados a partir dos dados da perfilagem a poço aberto – juntamente com a atual depleção de cada reservatório compõem o banco de dados utilizado neste estudo, sendo todos estes valores georreferenciados de acordo com as coordenadas das interseções poço-reservatório. Esta informação diversificada é agregada através de um Sistema de Inferência Fuzzy, com seu raciocínio aproximado baseado em variáveis linguísticas e empregando a experiência humana. Para a obtenção de uma malha regular 3D com valores do índice de qualidade em cada célula, um recurso geoestatístico de interpolação/extrapolação é necessário, sendo neste caso utilizada a Krigagem (Processo Gaussiano de Regressão). Os Mapas de Qualidade obtidos são particularmente úteis ao ser levada em consideração a complexidade do Campo ao qual o estudo é aplicado e o fato de que o mesmo não dispõe de uma modelagem geológica completa.

Abstract

This work aims to build quality maps of petroleum reservoirs in order to assist in the identification of promising areas to receive new investments in drilling and/or workovers. The study is applied to a mature field located onshore in the Alagoas basin, known by the difficulty for conventional analysis due to the high compartmentalization of its original in place volume in a very large number of independent reservoirs. As this field possesses a large number of wells already drilled, there is a major difficulty in drilling new wells so that they find a stack of reservoirs in good conditions for production. However, these wells can provide information to support analysis of the current situation of the field, including reservoirs' quality. Values of porosity, water saturation and net pay – calculated using data obtained from open well logging – paired with the reservoirs' depletion comprise the database used in this study, and all these values are georeferenced according to the coordinates of the wells-reservoirs intersections. This diverse information is aggregated through Fuzzy Inference Systems, by using its approximate reasoning based on linguistic variables and employing human experience. To obtain a 3D regular mesh, with quality index values for each cell, the use of geostatistical interpolation/extrapolation is necessary, and the Kriging (Gaussian Process Regression) is used for that. The Quality Maps here obtained are particularly useful when it is considered the complexity of the studied play, specially knowing that there is not a complete geological model to describe it.

¹ Mestre, Engenheiro de Petróleo – PETROBRAS

² Geólogo – PETROBRAS

³ Especialista, Engenheiro de Petróleo – PETROBRAS

⁴ Mestra, Geóloga/Gerente Setorial – PETROBRAS

Atualmente o campo já conta com mais de 280 poços perfurados, prioritariamente verticais numa primeira campanha de perfuração (cerca de 150 poços) e direcionais em uma segunda campanha perfuração, a partir da qual houve uma mudança de paradigma, buscando-se sempre seguir os planos das falhas de modo a alcançar um maior empilhamento de reservatórios (Borba et al., 2004). A estratégia de produção consiste geralmente em produzir um intervalo por vez no empilhamento, evitando-se rateios de produção por zona, o que contribui para um melhor gerenciamento dos reservatórios. A Recuperação Secundária, realizada através de Injeção de Água e Injeção de Gás, já vem sendo empregada há alguns anos nos reservatórios de maior volume, mas é inviável naqueles com menor volume ou que já são submetidos a um influxo natural de água.

O aumento da maturidade do Campo traz consigo um aumento da dificuldade em se conseguir novas locações que apresentem um empilhamento de reservatórios com boas perspectivas de produção, fato fundamental na busca pela minimização dos riscos de novos poços resultarem secos ou com produtividade pífia. Sendo assim, é importante que sejam procuradas novas alternativas de estudo e recursos que auxiliem no gerenciamento do campo (Fernandes, 2012), facilitando as tomadas de decisões.

Neste trabalho buscou-se então utilizar informações obtidas a partir do grande número de poços já perfurado no Campo para compor um panorama da situação do mesmo no que se refere à qualidade dos reservatórios. Para isto, não apenas os dados originais de fluido e rocha são levados em consideração, mas também alguns dados dinâmicos, aqueles que são alterados após a produção. O objetivo é a construção de Mapas de Qualidade de reservatórios de petróleo, a fim de auxiliar na identificação de *sweet spots*, ou regiões do Campo com melhores características para uma boa produtividade, caracterizando-as como as mais promissoras para receberem investimentos em perfurações de novos poços e/ou intervenções nos poços já existentes (que ocorrem após estudos mais detalhados realizados posteriormente pela tríade geofísica, geologia e engenharia de reservatórios). O auxílio é bastante importante ao se considerar que, devido à complexidade do Campo, não há disponível um modelo geológico completo do mesmo.

O conceito de Mapas de Qualidade de reservatórios já vem sendo explorado há alguns anos, sendo que na literatura encontramos diversas metodologias para sua obtenção, entre elas as seguintes:

- Cruz et al. (1999) o fazem através de múltiplas simulações do mesmo reservatório, cada uma com um único poço produtor que a cada rodada tem a sua posição alterada de modo a cobrir todo o *grid* horizontal. Um índice de qualidade de cada posição (x,y) é dado pela produção acumulada do poço ali posicionado. Ao criarem mapas para várias realizações estocásticas do modelo geológico, os autores determinam o mapa de qualidade médio com o valor esperado de cada célula e um mapa de incertezas com os respectivos desvios-padrão. O uso indicado dos mapas criados é determinar boas posições para perfurações de poços verticais.
- Popa (2013) emprega Sistemas de Inferência Fuzzy, criando mapas a partir de dados de resistividade, saturação de óleo, espessura e temperatura do reservatório. A finalidade dos mapas é o posicionamento de poços horizontais.
- Maschio et al. (2008) calculam a qualidade de cada célula no *grid* do modelo geológico de forma analítica, através de uma equação envolvendo permeabilidade, porosidade, saturação de óleo e espessura. O mapa é aliado a um algoritmo de otimização combinatória para definir posições e vazões para poços injetores e produtores.
- Nakajima e Schiozer (2003) constroem três diferentes mapas de qualidade: um através de simulação, um por modelo analítico e um por modelo Fuzzy, o que permite uma comparação dos resultados dos diferentes métodos.

Na sequência apresenta-se a metodologia proposta neste trabalho para a construção dos Mapas de Qualidade de reservatório para o Campo de Pilar, que apresenta como diferencial o uso dos dados dinâmicos de depleção dos reservatórios. A metodologia é descrita a partir da obtenção dos dados de reservatório, passando pela agregação Fuzzy e pela interpolação por Krigagem. Posteriormente, são mostrados os resultados obtidos, acompanhados de sua análise técnica. Por fim, algumas considerações finais a respeito do trabalho e de futuros aprimoramentos são tecidas.

2. Metodologia da Construção dos Mapas de Qualidade de Reservatório

2.1. Obtenção dos Dados de Reservatório

No Campo de Pilar, após a perfuração de cada poço (ou mesmo durante, quando se emprega o LWD – *Logging While Drilling*) é corrido um conjunto de perfis a poço aberto que conta, entre outras, com as medições de densidade, neutrão, resistividade e raios gama. Esta suíte básica de perfis permite que se faça correlações entre poços para determinar as zonas estratigráficas, além de fornecer a base para a estimativa do fluido presente em cada reservatório atravessado e para os cálculos de porosidade, saturação de água e *net pay*. Além destes perfis, a maior parte dos poços é submetida ao RFT – *Repeat Formation Tester* – logo após a perfuração, de onde são obtidas as pressões estáticas dos reservatórios. Todas estas informações compõem o banco de dados utilizado neste estudo, que é complementado ainda pelos Registros de Pressão tomados em momentos posteriores à perfuração/completação do poço, normalmente já após alguma produção para que tenhamos um valor mais atualizado em relação ao do RFT.

2.2. Agregação dos Dados por um Sistema de Inferência Fuzzy

Para que sejam trabalhadas as relações entre os dados diversificados dos quais dispomos, com características e ordens de grandeza diversas, fez-se a opção pelo uso da Lógica Fuzzy (Zadeh, 1965), através de um Sistema de Inferência tal como proposto por Mamdani e Assilian (1975). Sistemas deste tipo são regidos pela forma de raciocínio aproximado conhecida como *Modus Ponens* Generalizado, se baseando em variáveis linguísticas e regras de implicação do tipo SE-ENTÃO, empregando a experiência humana para o desenvolvimento de algoritmos inteligentes capazes de lidar com dados heterogêneos e/ou imprecisos, nas mais variadas aplicações (Jang et al., 1997; Dubois e Prade, 1980).

No Sistema de Inferência concebido para este trabalho foram utilizados os dados brutos de *net pay*, porosidade e saturação de água, além da informação da pressão atual do reservatório na forma da variável taxa de depleção (calculada pela razão entre o valor mais recente e a pressão original, sendo esta última medida antes da produção do reservatório ou calculada pelo gradiente de pressão padrão do campo). Estes dados encontram-se todos ajustados por zona e georreferenciados, ou seja, cada ponto é atrelado a uma referência espacial (x, y, z).

Para a fuzzificação dos dados de entrada, cada variável foi segmentada em quatro categorias de valores: baixo, médio-baixo, médio-alto e alto, com limites ajustados com base em estatísticas no banco de dados (análise de histogramas de distribuição de cada variável), complementadas pela experiência dos profissionais (engenheiros e geólogos) que trabalham com o Campo. Funções de Pertinência sigmoidais foram definidas com base nestes valores e em combinações da Equação 1:

$$f(x, a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (1)$$

onde a e c são os parâmetros de ajuste. As funções obtidas são mostradas na Figura 3, sendo as bases para que sejam calculados os graus de compatibilidade que fornecem a crença nos antecedentes de cada uma das regras.

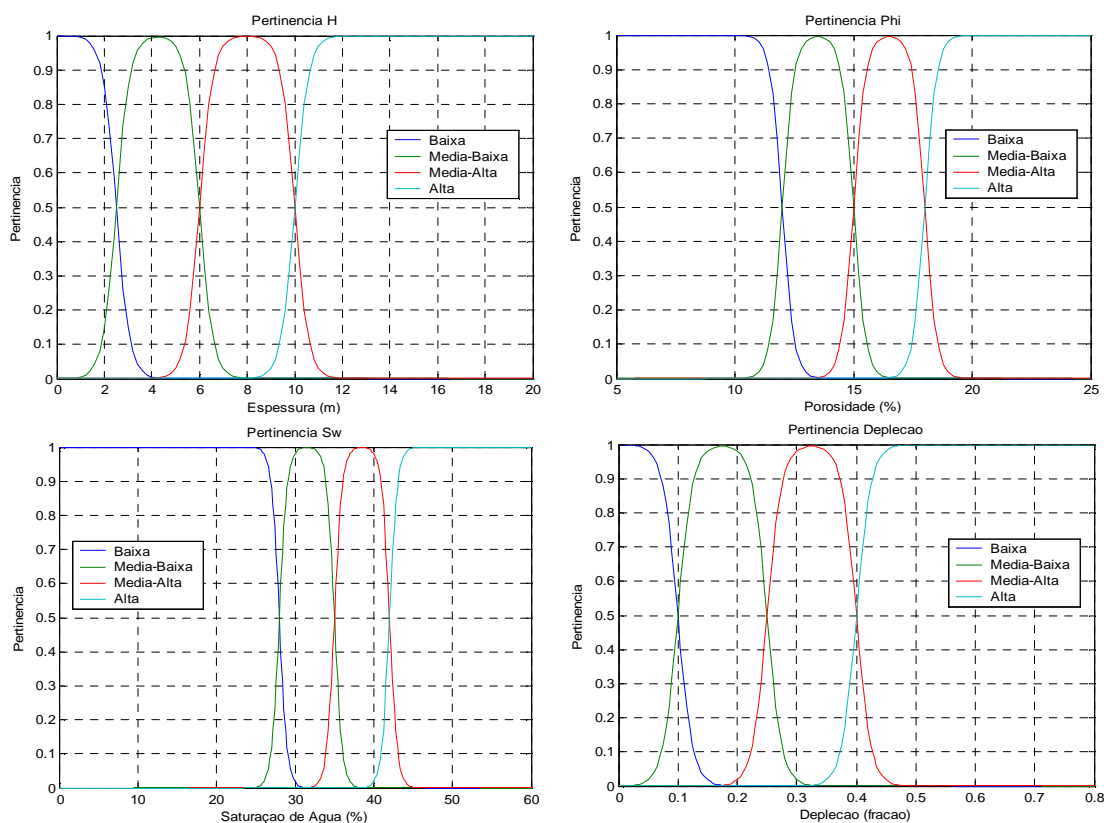


Figura 3. Funções de Pertinência para as variáveis empregadas.

Para a geração do conjunto de regras que definem o Sistema de Inferência, a experiência humana é a fonte de informação primária, sendo que a lógica fuzzy mostra aqui a sua principal vocação, permitindo que expressemos matematicamente o conhecimento que comumente lidamos na forma linguística. Desta forma, instituindo três classes de reservatórios – Bom, Médio e Ruim – é construída uma complexa base de regras para análise das variáveis. Uma amostra de algumas destas regras é mostrada na Tabela 1. Os operadores lógicos E e OU são implementados pelas funções *mínimo* e *máximo*, respectivamente.

Tabela 1. Amostra da Base de Regras Fuzzy.

<i>Net Pay</i>	Porosidade	Sat. Água	Depleção	Reservatório
Alto	Alta	Baixa	Baixa	Bom
Média-Baixa	Alta	Baixa	Média-Baixa	Bom
Baixa	Média-Alta	Média-Alta	Baixa	Médio
Média-Baixa	Média-Alta	Média-Baixa	Baixa	Médio
-	Baixa	Média-Alta	Média-Alta	Ruim
-	-	Alta	Média-Alta	Ruim

Com um conjunto de regras deste tipo, foram obtidos os fatores de ponderação para cada uma das classes de reservatório definidas. Exemplificando, um ponto poderá ser classificado como “Reservatório Bom” com grau de pertinência 0,636 e como “Reservatório Médio” com pertinência 0,364. Para que o sistema resulte em um valor único, deve-se então proceder com a defuzzificação, atribuindo funções de pertinência também para as classes de saída, que serão ponderadas pelos fatores recém-calculados para que em seguida o centroide da curva resultante seja calculado, originando um Índice de Qualidade para o Reservatório em cada ponto georreferenciado. A Figura 4 ilustra o Sistema de Inferência com todas as etapas descritas.

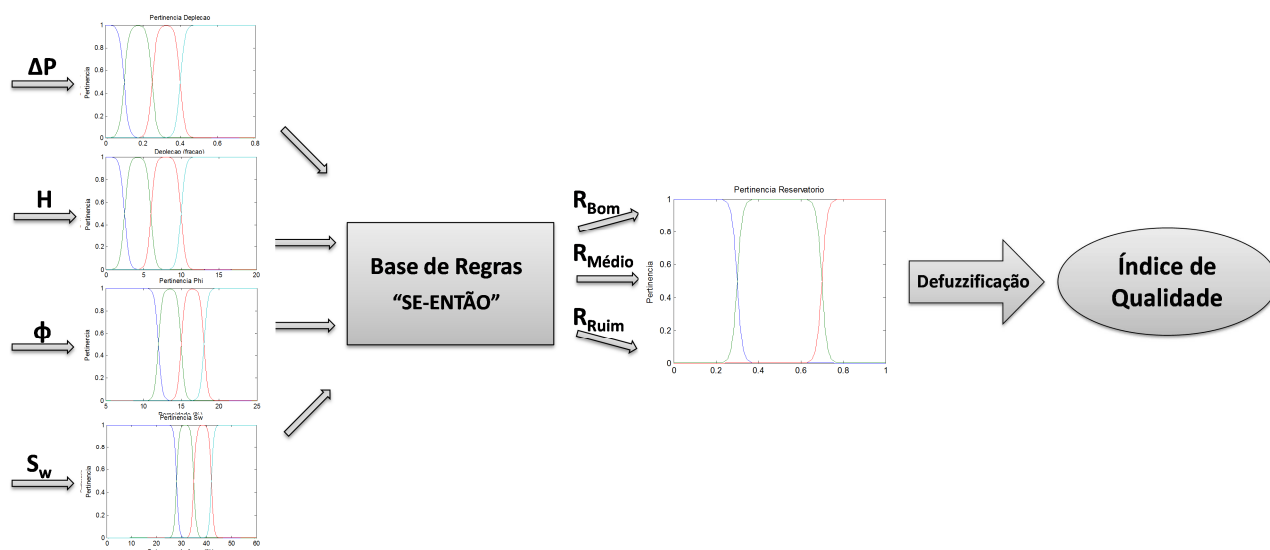


Figura 4. Sistema de Inferência Fuzzy empregado.

2.3. Interpolação utilizando Krigagem Simples

Sendo o banco de dados utilizado baseado em um número limitado de pontos dispersos desordenadamente no espaço, um recurso de interpolação/extrapolação deve ser empregado para a obtenção de uma malha regular 3D com valores para o Índice de Qualidade em cada célula, permitindo a construção dos Mapas de Qualidade. Para tal tarefa, busca-se uma ferramenta dentre aquelas disponibilizadas pela Geoestatística, que é o ramo da estatística que estuda modos de descrever a continuidade espacial de fenômenos naturais, com adaptações das técnicas clássicas de regressão para se aproveitar desta continuidade (Isaaks e Srivastava, 1989). Os métodos geoestatísticos são fundamentais para a modelagem de reservatórios de petróleo, com descrições espaciais de suas principais características. Deutsch (2002) fornece o embasamento teórico e explora as principais técnicas para esta modelagem geoestatística com foco em reservatórios.

O método escolhido para uso neste trabalho foi a Krigagem – ou Processo Gaussiano de Regressão, por se tratar do melhor estimador linear sem viés. A Krigagem é linear, porque suas estimativas são combinações lineares ponderadas dos dados disponíveis, sem viés, pois tenta manter nulo o resíduo médio e é considerado o melhor por almejar minimizar a variância dos erros (Isaaks e Srivastava, 1989). Este método permite assim uma interpolação com resultados mais exatos do que aqueles que seriam obtidos por *splines*, além de ser capaz de fornecer os mapas de desvio-padrão, em adição aos mapas das estimativas (Dubrule, 1984).

Para as estimativas por Krigagem, o conjunto de dados selecionado é inicialmente utilizado para a construção do variograma experimental, que serve como base para o ajuste de um modelo matemático de variograma que melhor represente as variações espaciais da variável analisada no conjunto de dados sob análise. Este modelo geralmente consiste em uma função (gaussiana, esférica ou exponencial) à qual são adicionados efeitos que permitem que os dados experimentais sejam reproduzidos. Esta função será responsável por fornecer o valor do variograma para qualquer

distância, o que é fundamental na estimativa por Krigagem, requerendo um ajuste cuidadoso, pois diversos fatores podem causar influências em sua confiabilidade (Oliver e Webster, 2014).

A Krigagem então é realizada baseando-se em um variograma modelado e no conjunto de dados original (em nosso caso, os Índices de Qualidade georreferenciados) para estimar o valor em cada ponto de uma malha previamente definida. Isto é feito na forma de uma regressão que computa a média ponderada dos valores conhecidos na vizinhança única para cada ponto, vizinhança esta que também requer uma cuidadosa definição, pois tem grande influência no resultado final da estimativa (Oliver e Webster, 2014). O método é descrito em detalhes por Isaaks e Srivastava (1989) e por Deutsch (2002).

Como etapa final, após a obtenção dos mapas interpolados é aplicado um filtro passa-baixas para uma pequena suavização das transições de qualidade. Os resultados obtidos são apresentados na seção seguinte.

3. Apresentação e Análise dos Resultados

Para melhor interpretação dos resultados, inicialmente apresenta-se, na Figura 5, um Mapa com o *Ring Fence* do Campo de Pilar e as indicações das áreas de ocorrência de reservatórios de hidrocarbonetos e da localização dos poços. Com estas distribuições em mente, a análise dos resultados do trabalho é iniciada a partir do Mapa de Qualidade bidimensional para todo o Campo, apresentado na Figura 6. Este mapa, apesar da grande heterogeneidade do Campo, indica alguns focos de reservatórios com boa qualidade nas áreas central e sudeste do campo e, com maior destaque, uma forte tendência de acumulação de reservatórios ainda com boas perspectivas de produção em uma região mais ao norte.

No intuito de segmentar a análise, construiu-se também os Mapas de Qualidade de algumas famílias de zonas estratigráficas do Campo de Pilar. Para tal, foram tomados os respectivos conjuntos de pontos isoladamente para serem submetidos à metodologia previamente descrita. As Figuras 7 e 8 ilustram esta análise para dois dos principais grupos de zonas do Campo: CSO-06 e CSO-10 (ambas subdivididas em mais de 15 zonas estratigráficas).

As zonas CSO-06, presentes em todas as regiões do Campo, contêm os melhores reservatórios, tanto em volume quanto em qualidades permo-porosas. Neste conjunto, mesmo levando em consideração o atual estágio de exploração, já com uma grande depleção na grande maioria de seus reservatórios, o mapa chama a atenção para alguns pontos com bons Índices de Qualidade.

Já as CSO-10, mais profundas e de ocorrência mais restrita às áreas central e sudeste, têm em geral reservatórios com qualidades inferiores, embora com bons volumes *in place*. Por se tratar de reservatórios em sua maioria também já depletados, as áreas com bons Índices de Qualidade são mais restritas.

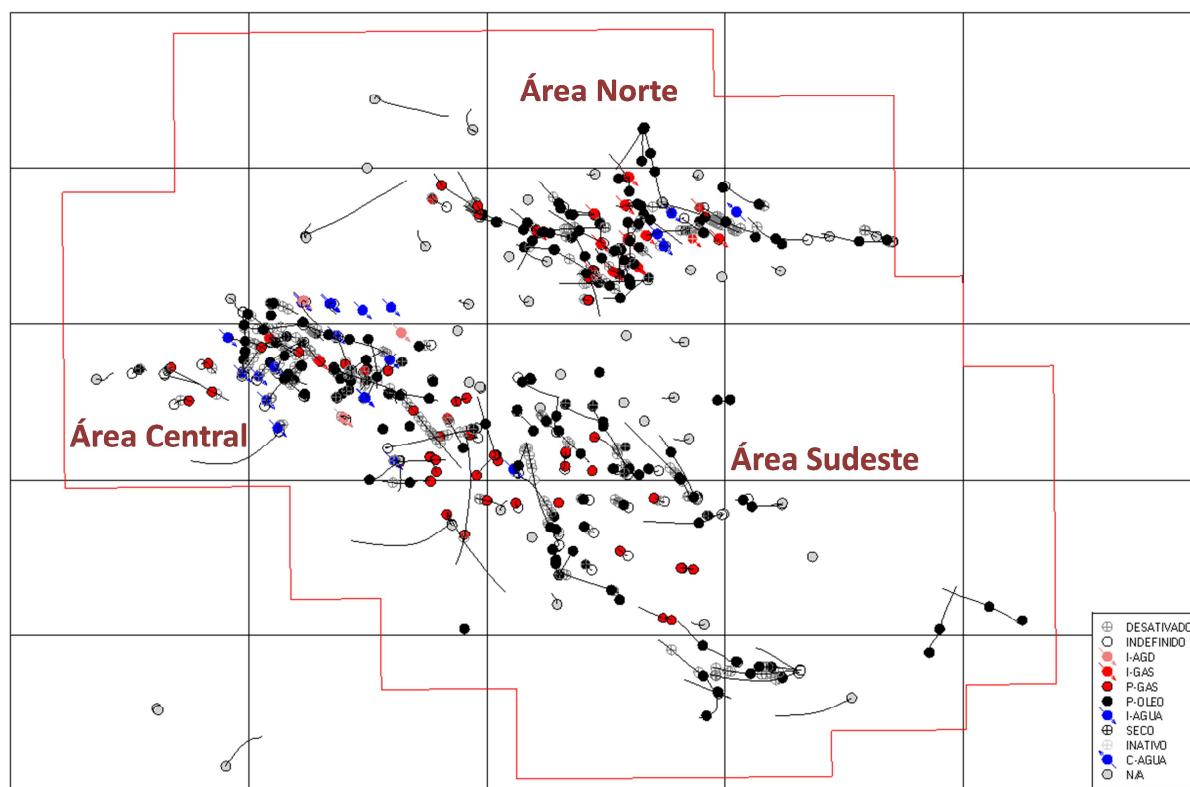


Figura 5. *Ring Fence* e localização de poços e de grupos de reservatórios do Campo de Pilar.

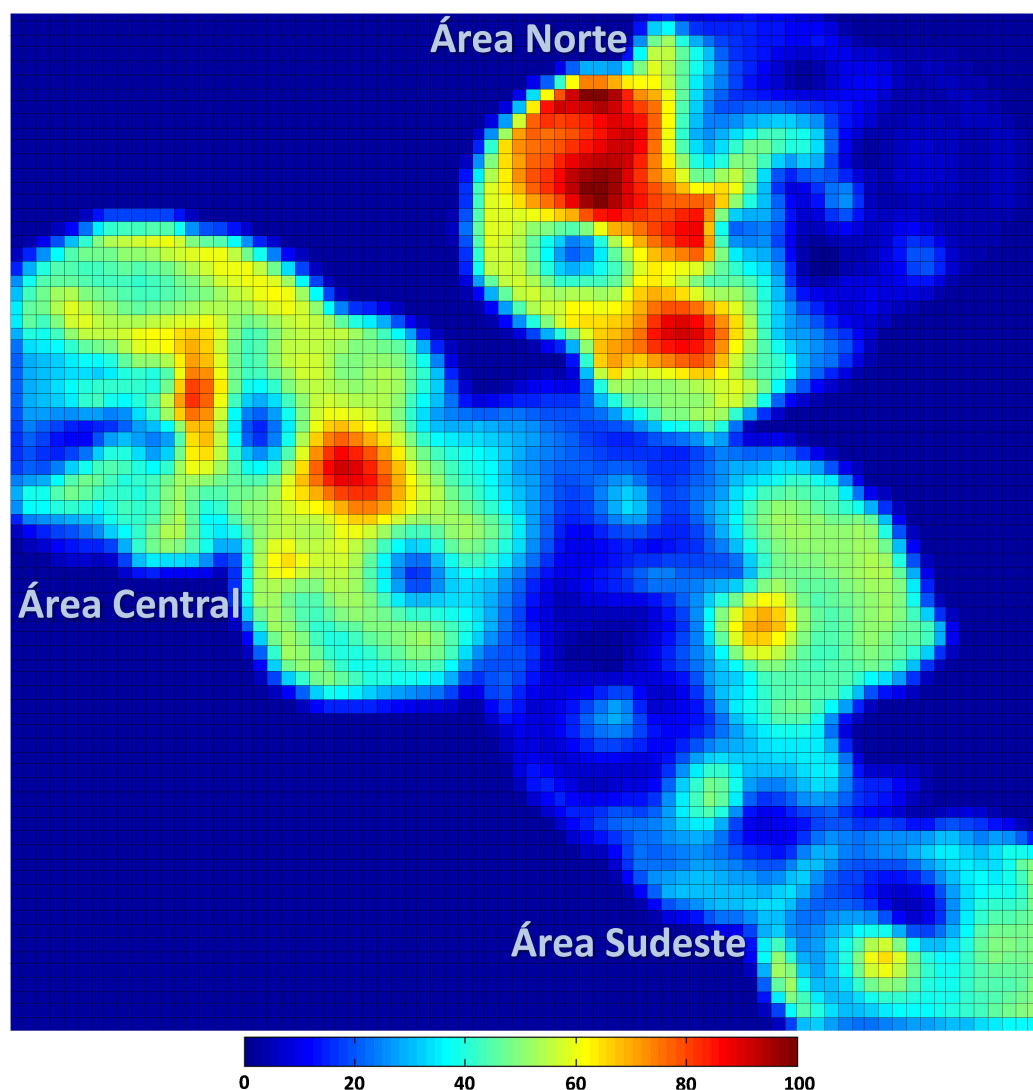


Figura 6. Mapa de Qualidade para o Campo de Pilar.

A diferença de qualidades de reservatórios entre as duas famílias de zonas, já identificável nos mapas, é ressaltada pelos dados da Tabela 2. Desta, podemos notar uma média de Índice de Qualidade bastante baixa para a família de zonas CSO-10, enquanto que para as CSO-06 os valores se mostram bem mais favoráveis. Esta tendência é corroborada pelo histórico de produção do Campo, que nos mostra que as CSO-06 são zonas que tendem a ter ótimas vazões iniciais e fatores de recuperação muito bons.

Tabela 2. Médias dos Índices de Qualidade.

Conjunto Analisado	Média do Índice de Qualidade
Campo de Pilar	0,304
Zonas CSO-06	0,409
Zonas CSO-10	0,199

Estas análises por zona também são de grande importância, pois poderão indicar não apenas as regiões mais promissoras, como também as profundidades em que se encontram os melhores reservatórios. Isto permite um refinamento para dos estudos almejando investimentos em poços, lembrando-se da dependência entre profundidade dos poços e custos de perfuração.

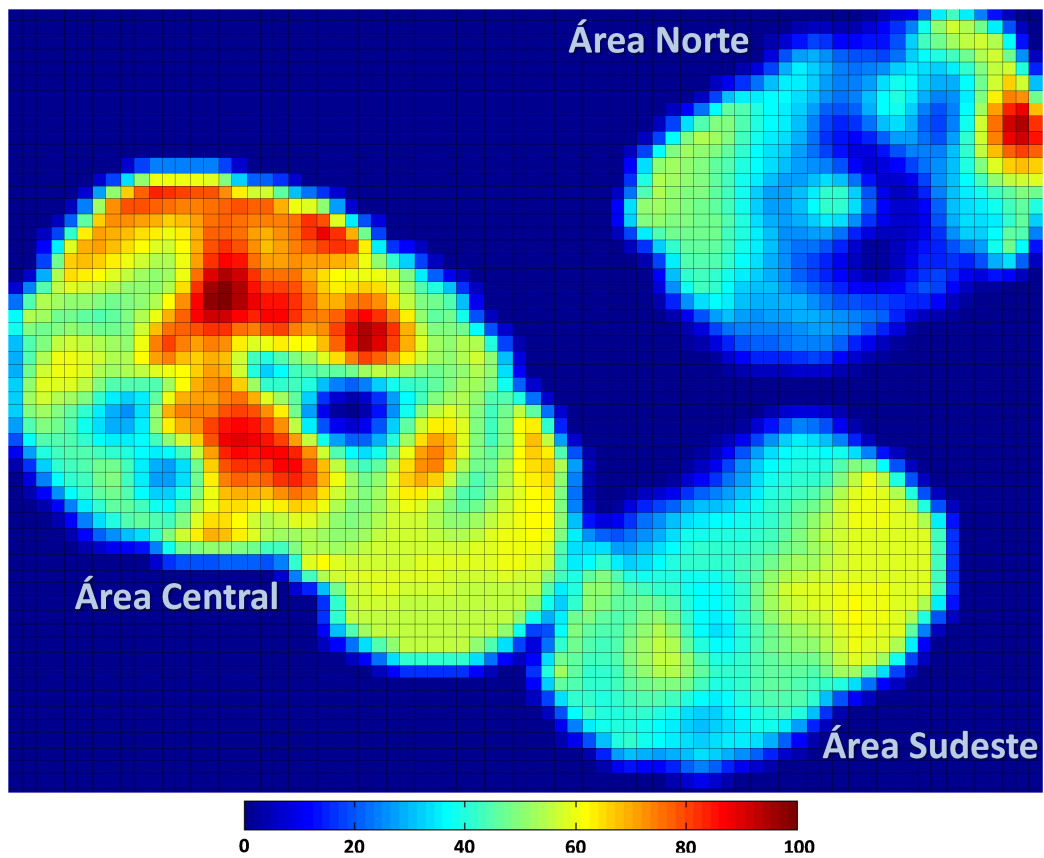


Figura 7. Mapa de Qualidade para CSO-06, nas áreas norte, central e sudeste do Campo.

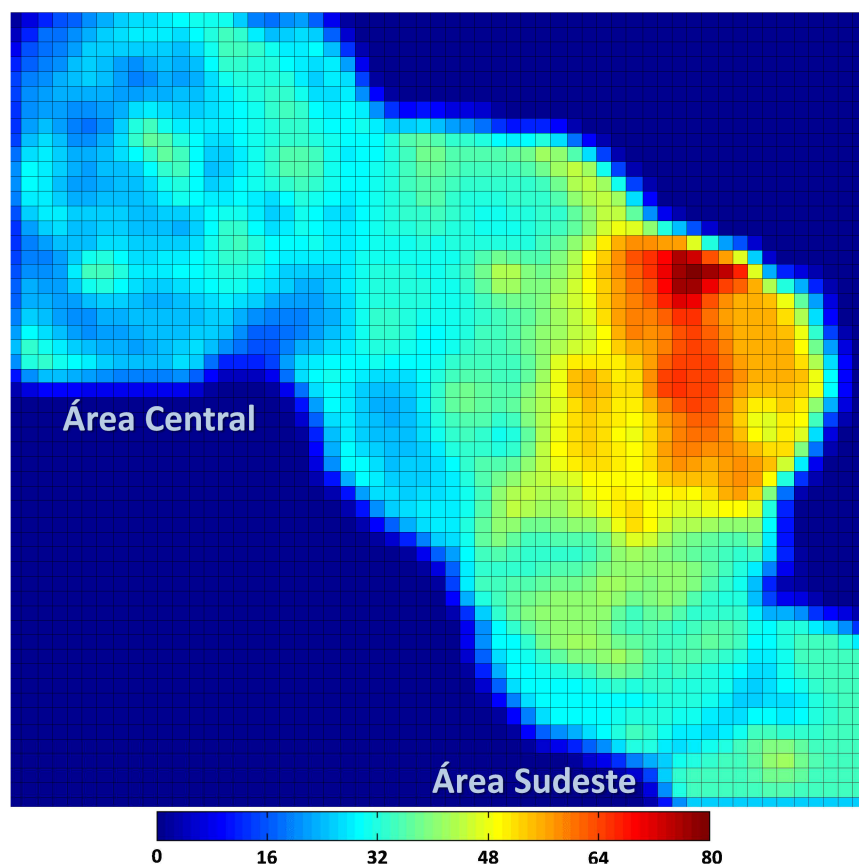


Figura 8. Mapa de Qualidade para CSO-10, nas áreas central e sudeste do Campo.

4. Considerações Finais

O que se deseja neste trabalho e em seus futuros desdobramentos é obter uma ferramenta adicional para auxílio nas tomadas de decisão no gerenciamento de campos de petróleo, sendo particularmente útil para aqueles que apresentam maior complexidade, como o Campo de Pilar, alvo do presente estudo. Considerando o conjunto de dados de reservatório trabalhado, com todas as heterogeneidades em suas essências e distribuições, a metodologia proposta, combinando Sistemas de Inferência Fuzzy e Interpolação por Krigagem, obteve êxito ao conciliar todas as informações para quantificar a qualidade de reservatório em cada ponto do espaço, somando ainda a experiência dos profissionais da área, representada pelas regras Fuzzy.

Futuros aprimoramentos para a metodologia incluem a adição de outras propriedades de reservatório no Sistema de Inferência, como a permeabilidade, a mobilidade, a viscosidade e a fração recuperada, além da consequente necessidade de adequação da base de regras.

Os Mapas de Qualidade gerados, embora não sejam capazes de funcionar como ferramentas únicas, são bons direcionadores para estudos mais pontuais e detalhados. Pensando no caso de um campo com um número muito elevado de reservatórios, cada qual com propriedades de fluidos e de rochas, contatos e históricos de produção únicos, as regiões destacadas nos mapas poderão apontar aqueles que merecerão, por exemplo, ser alvo de uma simulação numérica visando à perfuração de novos poços ou, dependendo das características de depleção e saturação de água, visando injeções de água ou de polímeros. Desta forma, a equipe responsável pelo estudo de Reservatórios pode ser direcionada para diferentes frentes de estudo, de acordo com a afinidade atual de cada região, o que é de grande valia para aumento da eficiência quando se tem em mãos um campo de tamanha complexidade.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Petrobras S.A. pela permissão para publicação deste trabalho.

6. Referências

- BORBA, C., TAKEGUMA, M. S., SOUZA FILHO, E. J. Revitalization of Pilar Field (Sergipe-Alagoas Basin, Brazil) Using Deviated Wells Along Fault Planes: A Successful Experience. In: *Symposium on Improved Oil Recovery*, Tulsa, USA : SPE, abr., 2004.
- CRUZ, P. S., HORNE, R. N., DEUTSCH, C. V. The Quality Map: A Tool for Reservoir Uncertainty Quantification and Decision Making. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, EUA : SPE, out., 1999.
- DEUTSCH, C. V. *Geostatistical Reservoir Modeling*, Oxford University Press, 2002.
- DUBOIS, D., PRADÉ, H. *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*, Academic Press, 1980.
- DUBRULET, O. Comparing Splines and Kriging. *Computers and Geosciences*, v. 10, p. 327-338, 1984.
- FERNANDES, M. A. Using Neural Networks for Determining Hydrocarbons Presence from Well Logs: A Case Study for Alagoas Basin. In: *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Cidade do México, México : SPE, abr., 2012.
- ISAAKS, E. H., SRIVASTAVA, R. M. *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, 1989.
- JANG, J.-S., SUN, C.-T., MIZUTANI, E. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice-Hall, 1997.
- MAMDANI, E. H., ASSILIAN, S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, v. 7, n. 1, p. 1-13, 1975.
- MASCHIO, C., NAKAJIMA, L., SCHIOZER, D. J. Production Strategy Optimization Using Genetic Algorithm and Quality Map. In: *Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition*, Roma, Itália : SPE, jun., 2008.
- NAKAJIMA, L., SCHIOZER, D. J. Horizontal Well Placement Optimization Using Quality Map Definition. In: *Canadian International Petroleum Conference*, Calgary, Canadá : Petroleum Society, jun., 2003.
- OLIVER, M. A., WEBSTER, R. A Tutorial Guide to Geostatistics: Computing and Modelling Variograms and Kriging. *Catena*, v. 113, p. 53-69, 2014.
- POPA, A. S. Identification of Horizontal Well Placement Using Fuzzy Logic. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, EUA : SPE, set., 2013.
- ZADEH, L. Fuzzy Sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338-353, 1965.