



## Zoneamento Faciológico de Perfis de Poço

Gabriela Pantoja; Carolina Barros & André Andrade – UFPA

Copyright 2010, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Brasília, 14 a 17 de novembro de 2010. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IV SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.*

### Resumo

O zoneamento faciológico trata da identificação e do posicionamento em profundidade, das diversas fácies atravessadas por um poço. O termo fácies agrega um conjunto de características macro e microscópicas descritas sobre amostras de rocha coletadas em afloramentos ou retiradas de testemunhos obtidos durante a perfuração de um poço. Assim, em um poço, o zoneamento faciológico é normalmente, o principal produto geológico da análise de testemunho, em função da sua importância para o modelamento geológico ou a caracterização de reservatórios. Em razão do reduzido número de poços testemunhados, das dificuldades operacionais para a coleta de amostras representativas e, em alguns casos, da impossibilidade técnica de testemunhagem, como nos poços horizontais. Apresentamos uma metodologia baseada nos denominados algoritmos inteligentes, aqui representados por uma rede neural artificial, do tipo competitiva angular, que, a partir do reconhecimento de padrões angulares apresentados pelos dados dos perfis de porosidade no Gráfico L-K é capaz de integrar os resultados da análise de testemunho à interpretação dos perfis de porosidade, para produzir o zoneamento faciológico de poços não testemunhados. Este método é avaliado com dados sintético e perfis de poços testemunhados do Campo de Namorado, na Bacia de Campos, Brasil.

### Introdução

O termo fácies envolve uma série de características extraídas de uma amostra de rocha, particularmente, no caso das rochas sedimentares, o termo fácies é descrito em termos como a litologia, a composição mineralógica, a granulometria e a presença de estruturas sedimentares (litofácies) e fósseis (biofácies). Muitas vezes, o termo fácies designa um grupo de rochas com gênese semelhante, enfatizando o ambiente e ou o processo deposicional. O conceito de fácies é utilizado para a interpretação de sistemas deposicionais, a identificação de superfícies estratigráficas para a correlação poço a poço e possível identificação de armadilhas estratigráficas, com a finalidade de avaliar o contexto geológico e estratigráfico para a identificação de um potencial sistema petrolífero. Apesar da grande importância para o modelamento e a caracterização de reservatórios, a aplicabilidade da identificação de fácies

sedimentares está limitada pela rarefação de poços testemunhados em um campo petrolífero.

O zoneamento de perfis trata da identificação ou correlação entre as variações das propriedades físicas mensuradas em função da profundidade e registradas nos perfis com o correspondente evento geológico. O tipo de zoneamento mais utilizado é o litológico, definido em termos do principal mineral presente na composição de cada tipo de rocha atravessado pelo poço. Em que pese a sua potencial utilidade, este tipo de zoneamento é insuficiente para auxiliar no estudo de sistemas petrolíferos.

Na avaliação de formação, foram desenvolvidos muitos métodos gráficos e numéricos para a identificação da litologia com a utilização dos perfis convencionais, como os perfis de porosidade (densidade, sônico e porosidade neutrônica), como o Gráfico M-N (Burke et al., 1969), que enfatiza a qualidade do perfil de densidade. No entanto, em várias situações práticas, como poços de grandes diâmetros ou desmoronamentos; poços com lama de alta densidade, ou casos de camadas com alta permeabilidade e com formação de rebocos de grande espessura, nos quais o perfil de densidade pode necessitar de grandes correções. Estes fatos não afetam o perfil sônico e assim é mais indicado a utilização do Gráfico L-K, que é construído com base na confiabilidade do perfil sônico. A principal limitação para interpretação do Gráfico L-K é a presença da argila, que afeta a sensibilidade dos perfis de porosidade para a identificação do mineral principal.

O objeto aqui é apresentar uma metodologia que produza o zoneamento faciológico de um poço não testemunhado, ou que realize a identificação e o posicionamento em profundidade das diversas fácies atravessadas pelo poço, através do transporte da informação sobre as fácies adquiridas nos poços testemunhados, para os poços não testemunhados, com a utilização dos perfis de porosidade, de modo a auxiliar para uma caracterização do sistema petrolífero mais realista, com a utilização de toda a informação disponível.

Assim, apresentamos um algoritmo inteligente para produzir a interpretação do Gráfico L-K, ao qual são agregados particulares pontos (L, K), calculados nos intervalos testemunhados, contendo a informação sobre as fácies identificadas.

O conceito de algoritmo inteligente envolve um grande conjunto de métodos numéricos, como as redes neurais artificiais, a inferência fuzzy e a computação evolutiva. Os algoritmos inteligentes são uma ferramenta computacional bastante promissora, por trazer inovações na ciência e na engenharia, transformando dados em informação e informação em conhecimento (Nikravesh, 2004).

Admitindo a existência de padrões angulares nos pontos distribuídos no plano L-K e introduzimos uma nova rede neural artificial, denominada como rede competitiva angular, especializada para a busca de padrões angulares estatisticamente relevantes presentes nos dados. Esta característica da rede competitiva angular permite a classificação dos pontos no plano L-K em termos da informação sobre as fácies sedimentares previamente identificadas. Adicionalmente, é introduzida uma nova metodologia de treinamento da rede, como um método de agrupamento automático de dados segundo o seu grau de semelhança (*subtractive clustering*). A intenção aqui é atenuar a imprecisão e melhorar a interpretação do Gráfico L-K para a identificação de fácies. Este método é apresentado com dados sintéticos e avaliado com perfis e análise de testemunho de dois poços do Campo de Namorado, na Bacia de Campos, Brasil.

**Metodologia**

O zoneamento faciológico de um poço não testemunhado é realizado a partir do mapeamento das fácies descritas em um poço testemunhado, em termos das propriedades físicas registradas nos perfis de porosidade e representadas por particulares pontos no Gráfico L-K. Assim, a interpretação no gráfico, dos pontos representativos do poço não testemunhado permite o transporte da informação geológica, sob a premissa de que fácies semelhantes serão representadas por pontos semelhantes no Gráfico L-K.

**Gráfico L-K**

O Gráfico L-K, assim como o Gráfico M-N (Burke et al., 1969) é um dos vários métodos que buscam enfatizar o efeito do arcabouço sólido (matriz) da rocha sobre as medidas realizadas pelas ferramentas de porosidade (densidade, sônico e porosidade neutrônica) e assim, possibilitar a extração de informações sobre a litologia, de maneira relativamente independente do efeito do volume de fluidos sobre estas medidas.

O Gráfico M-N apóia-se na qualidade do perfil de densidade. No entanto, em várias situações práticas, o perfil de densidade pode necessitar de grandes correções e perder confiabilidade, como para os poços com grandes diâmetros ou com a ocorrência de grandes trechos de desmoronamentos; poços perfurados com a utilização de lama de perfuração com alta densidade, ou para os casos de camadas espessas e com alta permeabilidade, que são propícias a formação de rebocos com grande espessura. Estes fatos, normalmente, não afetam as medições realizadas pelas ferramentas sônicas e induzem a utilização do Gráfico L-K.

O Gráfico L-K adota uma combinação particular dos registros do perfil sônico com as medidas do perfil de densidade para definir o parâmetro L (equação 1), que para uma particular matriz, pode ser interpretado como a inclinação da reta de porosidade no gráfico sônico-

densidade. A mesma interpretação do gráfico sônico-neutrônico leva a definição do parâmetro K, como apresentado na equação 2. A constante multiplicativa em ambas as equações é apenas um fator de escala para tornar os valores de L e K semelhantes aos valores dos parâmetros M e N, calculados com as unidades usuais dos perfis de porosidade. A substituição dos valores das propriedades físicas mensuradas pelas ferramentas de porosidade nas equações 1 e 2, para alguns minerais resultam nos chamados pontos de referência do Gráfico L-K, como mostrado na Figura 1.

$$L = \frac{\rho_m - \rho_w}{(\Delta t_w - \Delta t_m)} 100 \tag{1}$$

$$K = \frac{\phi_{Nw} - \phi_{Nm}}{(\Delta t_w - \Delta t_m)} 100 \tag{2}$$

Tabela 1 – Valores de L e K para alguns minerais.

| Mineral    | Composição                          | K     | L    |
|------------|-------------------------------------|-------|------|
| Quartzo    | SiO <sub>2</sub>                    | 0.78  | 1.23 |
| Calcita    | CaCO <sub>3</sub>                   | 0.70  | 1.20 |
| Dolomita   | CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 0.65  | 1.28 |
| Ortoclásio | KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>   | 0.861 | 1.26 |
| Albita     | NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  | 0.72  | 0.72 |
| Anidrita   | CaSO <sub>4</sub>                   | 0.71  | 1.42 |
| Caulinita  |                                     | 0.75  | 1.66 |
| Ilita      |                                     | 0.81  | 1.66 |
| Esmectita  |                                     | 0.83  | 1.66 |

A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros L e K para alguns minerais comuns nas rochas sedimentares.

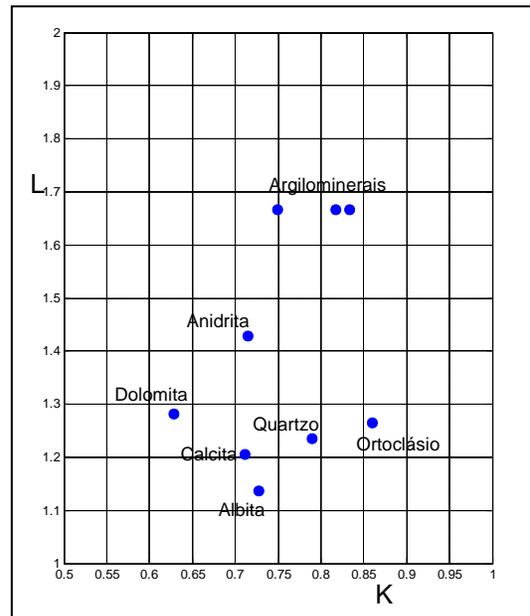


Figura 1 – Gráfico L-K.

Considerando o fluido intersticial como água doce, a substituição, nas equações 1 e 2, dos valores de densidade da matriz ( $\rho_m$ ), porosidade neutrônica da matriz ( $\phi_{Nm}$ ) e tempo de transito da matriz ( $\Delta t_m$ ) pelos valores registrados para um ponto qualquer do poço pelos respectivos perfis de porosidade, resulta em um ponto genérico (L, K) no Gráfico L-K. A proximidade de um ponto genérico a um ponto de referência indica o mineral principal na constituição do arcabouço da rocha reservatório.

Método de Agrupamento

Um método de agrupamento (*clustering*) tem como objetivo agrupar em classes elementos com características semelhantes, buscando maximizar a similaridade entre elementos de uma mesma classe (intra-classe) e minimizar a similaridade entre elementos de classes distintas (inter-classe), de acordo com uma métrica pré-determinada. Estes métodos assumem que o comportamento de uma nuvem, ou de um conjunto de dados próximos uns dos outros, possa ser representado pelo comportamento do seu centro. A operação dos métodos de agrupamento requerem alguma informação *a priori*, como o numero de centros e a qualidade da solução, assim como na maioria dos métodos de otimização não linear, é dependente da escolha destes valores iniciais (número de centros ou suas posições iniciais).

O método *subtractive clustering* determina o número de centros e a sua posição apenas com a informação sobre o raio de influencia de cada centro. Considerando um conjunto de dados  $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$  distribuídos no espaço M-dimensional, em que cada dimensão é escalonada para um hipercubo unitário. Cada ponto é considerado como um possível centro, na dependência do seu potencial, dado por,

$$P_i = \sum_{j=1}^n e^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2} \tag{3}$$

$$\alpha = \frac{4}{r_a^2} \tag{4}$$

Na equação 3, o expoente é a distancia euclidiana, com o parâmetro  $\alpha$  definido pela equação 4. Assim, o potencial de um ponto qualquer representar um centro é função do número de pontos em sua vizinhança, que é definida pelo raio ( $r_a$ ). Pontos fora da vizinhança determinam um novo agrupamento. Após o cálculo do potencial para todos os pontos, os centros são representados pelos pontos de maior potencial.

Rede Competitiva Mínimo Angular

Uma rede neural competitiva é caracterizada por um treinamento não supervisionado, onde a partir de um conjunto de critérios é estabelecida a forma de atualização dos pesos sinápticos, que determina a existência de um único neurônio vencedor na camada competitiva. Esta característica busca possibilitar a

extração de características estatisticamente relevantes presentes nos dados de entrada. Neste tipo de rede os dados de entrada são tratados de forma a explicitar propriedades comuns presentes em seu conjunto. Diferente de outra arquitetura de rede neural artificial, o resultado útil de uma rede competitiva não é o sinal na camada de saída, mas a posição na camada competitiva ou o conjunto de pesos do neurônio vencedor.

A rede competitiva mínimo angular é derivada da arquitetura e das estratégias de treinamento da Rede Competitiva Angular (Barros,2008). A rede competitiva angular é um tipo de rede competitiva, que busca extrair relações angulares presentes nos dados de entrada. No caso do plano, cada ponto está associado a um vetor, representado como um número complexo e a relação angular é ditada pela sua direção.

A rede competitiva mínimo angular utiliza a estratégia de operação da rede competitiva angular buscando classificar pontos no plano em relação a classes representadas por vetores de referência. Um ponto, representado por seu vetor posição, é classificado em uma classe representada pelo vetor de referência que forma o menor ângulo entre eles.

A arquitetura da rede competitiva mínimo angular é mostrada na Figura 2.

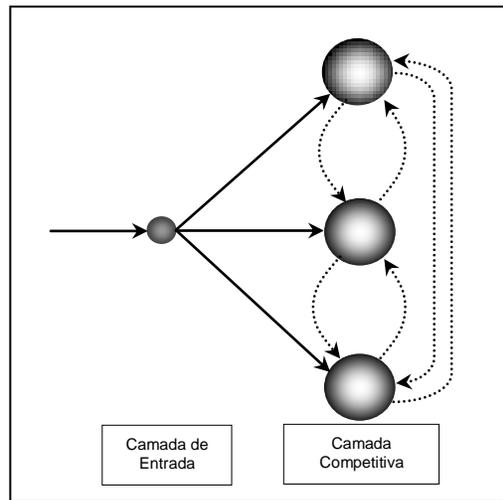


Figura 2 – Arquitetura da rede competitiva angular.

O sinal de saída de um neurônio competitivo é o resultado da avaliação da sua função de ativação para o seu potencial de entrada.

O potencial de entrada ( $u_j$ ) é definido na forma

$$u_j = \text{real}(x_i \bar{w}_j) = \cos(\theta) \tag{5}$$

Na equação 5, o potencial de entrada é o produto interno de dois vetores, escrito na forma complexa, como a parte real do produto de dois números, resultando no cosseno do ângulo entre eles. O termo  $x_i$  é um elemento do vetor de entrada e o termo  $\bar{w}_j$  é o conjugado complexo de um elemento do vetor de pesos sinápticos.

A cada neurônio competitivo está associada uma função de ativação, correspondente à particular

característica angular de interesse. Para o caso de uma relação angular, que busca a proximidade entre pontos no plano, tem-se a função de ativação definida como uma transformação afim do potencial de entrada.

A regra de competição utilizada para a definição do neurônio vencedor é a função que toma o maior valor para o cosseno do ângulo. Assim, vence a competição por um ponto de entrada, o neurônio com o maior valor de saída.

#### Zoneamento de Perfis

Para a realização do zoneamento faciológico de um poço não testemunhado é fundamental a codificação da informação geológica, ou da descrição das fácies, em termos das medidas registradas nos perfis de porosidade. A proposição é calcular os pontos (L, K) para os intervalos de profundidade testemunhados e lançá-los no Gráfico L-K. Observa-se que os pontos se distribuem no plano L-K, de modo que os pontos provenientes de um mesmo intervalo testemunhado formam um agrupamento e que pontos de intervalos diferentes, se distribuem por agrupamentos diferentes. Toma-se o centro de cada agrupamento como o ponto de referência para cada uma das fácies descritas.

O propósito da metodologia, aqui apresentada, é o de produzir a interpretação do Gráfico L-K, com a adição dos novos pontos de referência correspondentes às fácies previamente descritas. Para tanto, tem-se que oferecer respostas a duas questões. A primeira questão refere-se ao número de camadas ou fácies presentes no intervalo perfilado do novo poço e a segunda, corresponde à classificação destas em termos das fácies descritas no poço testemunhado.

A partir dos perfis de porosidade do poço não testemunhado, com a aplicação das equações 1 e 2 obtêm-se os novos pontos no Gráfico L-K. O método de agrupamento (*subtractive clustering*) é utilizado para a determinação do número de agrupamentos e do par ordenado de localização de cada centro.

A classificação destes centros, em termos das fácies descritas é realizada pela rede competitiva mínimo angular. Considerando que a particular distribuição dos pontos representativos de uma mesma fácies ou pertencente a um mesmo agrupamento no gráfico L-K, apresenta um padrão angular, onde os pontos alinham-se aproximadamente em uma mesma direção. A rede competitiva mínimo angular é construída com um único neurônio na camada de entrada, que recebe o par (K, L) calculado para um ponto em profundidade e representado na forma de um número complexo. A camada competitiva é construída com um número de neurônios igual ao número de fácies descritas adicionado ao número de minerais principais presentes no Gráfico L-K, de modo a possibilitar uma indicação da litologia, através do mineral principal, para as camadas não contempladas nas fácies descritas no poço de referência.

O vetor de pesos sinápticos é formado pelos vetores posição de cada um dos pontos de referência no Gráfico L-K. A rede competitiva mínimo angular promove a classificação dos vetores de entrada em termos do menor ângulo em relação aos pontos de referência.

Observa-se, na grande maioria dos casos, que a relação angular promove uma melhor classificação dos pontos no Gráfico L-K, que a relação de distância. Problemas relacionados às calibrações das ferramentas, as correções das medidas e a ocorrência de ruído, muitas das vezes alteram as relações de distância admitidas nas interpretações dos gráficos de identificação litológica, construídos a partir dos perfis de porosidade.

#### Resultados

Considera-se o caso sintético de um trecho de profundidades de um poço testemunhado, poço A, no qual foram descritas três fácies, como apresentadas na Tabela 2. Na Figura 3 é apresentado o Gráfico L-K a ser interpretado, com a adição dos pontos de referência das fácies descritas, representados por quadrados azuis.

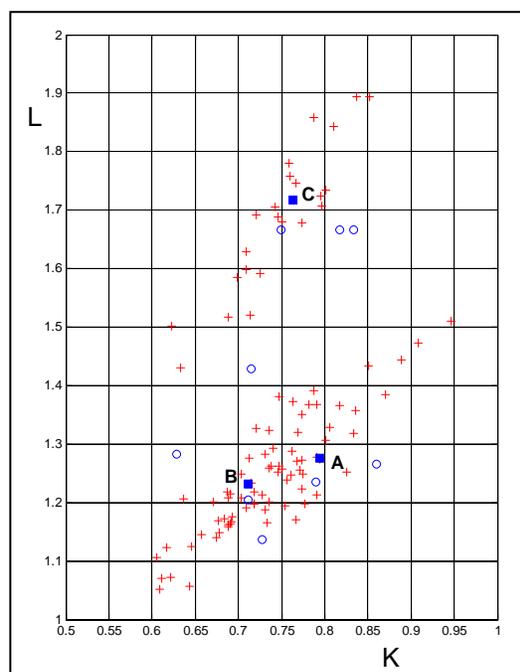


Figura 3 – Gráfico L-K. Dados sintéticos.

Tabela 2 – Fácies descritas no poço testemunhado.

| Fácies | Descrição                    |
|--------|------------------------------|
| A      | Arenito, médio, bem graduado |
| B      | Calcário maciço              |
| C      | Folhelho                     |

Considera-se um poço não testemunhado, que atravessa uma sequência de quatro fácies, como apresentado na Tabela 3. Observa-se que a fácies B-1, representando uma dolomita, não aparece no poço testemunhado.

Na Figura 4 são apresentados os pontos (L, K) calculados com os registros dos perfis de porosidade do poço a ser zoneado, representados por cruzeiros em vermelho. A aplicação do método de agrupamento

(*subtractive clustering*) resulta na identificação dos quatro agrupamentos, que representam as fácies presentes no poço não testemunhado e estão representados por círculos em preto.

Tabela 3 – Fácies descritas no poço não testemunhado.

| Fácies | Descrição                    |
|--------|------------------------------|
| A      | Arenito, médio, bem graduado |
| B      | Calcário maciço              |
| B-1    | Dolomita                     |
| C      | Folhelho                     |

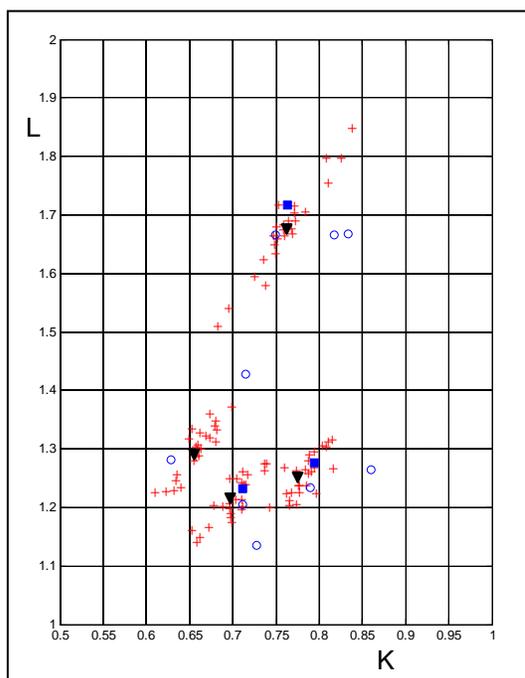


Figura 4 – Gráfico L-K. Dados sintéticos. Os centros das camadas estão marcados por triângulos em preto.

A interpretação ou classificação das fácies no poço a ser zoneado, em termos das fácies descritas no poço testemunhado é realizada pela rede competitiva mínimo angular. O número de pontos de referência presentes no Gráfico L-K define o número de neurônios na camada competitiva. Observa-se visualmente na Figura 4, que a relação de distancia dos centros em relação aos pontos de referência do Gráfico L-K não produz uma correta classificação das fácies.

A Figura 5 mostra o gráfico L-K com os resultados da classificação promovida pela rede mínimo angular. A cor das cruzes que representam pontos de uma mesma camada está associada ao círculo de mesma cor que indica a fácies classificada ou a indicação do mineral principal desta camada.

O resultado da operação desta metodologia com dados sintéticos é mostrado na Figura 6. A Figura 6-A mostra o perfil de raios gama natural no intervalo a ser zoneado. Observa-se a dificuldade da realização do

zoneamento pela simples interpretação qualitativa do perfil. A Figura 6-B mostra o zoneamento do poço não testemunhado adotado no modelo. A Figura 6-C mostra o zoneamento produzido pelo método apresentado neste trabalho.

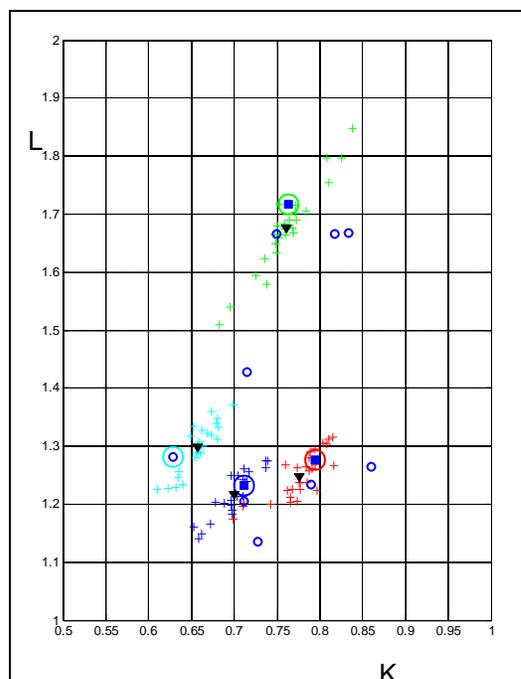


Figura 5 – Gráfico L-K. Dados sintéticos. Classificação realizada pela rede mínimo angular.

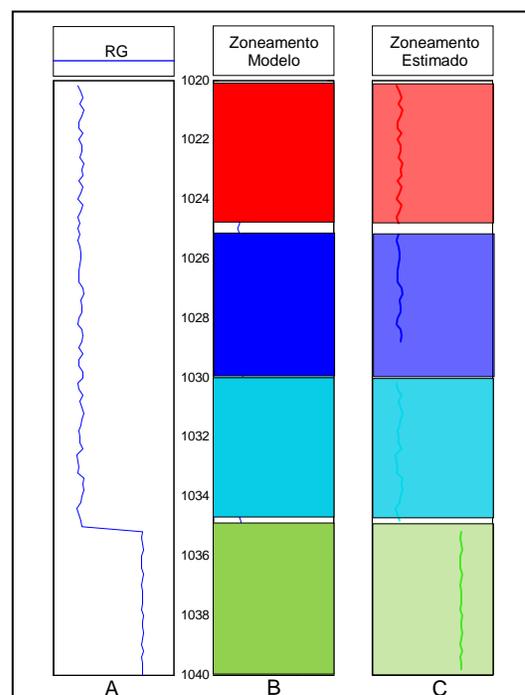


Figura 6 – Zoneamento do poço. 6-A Perfil de raios gama. 6-B Zoneamento modelo. 6-C Zoneamento estimado.

Para um exemplo de aplicação desta metodologia com a utilização de perfis reais são tomados dois poços testemunhados do Campo de Namorado. O poço A é escolhido como poço de referência e nele tomou-se uma camada de arenito de granulação média e bem selecionado como a fácies a ser identificada no segundo poço. A descrição dos testemunhos no intervalo tomado do segundo poço apresenta uma camada com a mesma descrição do arenito do primeiro poço, seguida por uma segunda camada formada por um interlaminado de calcilitita e arenito fino. A litologia predominante parece ser o calcário.

A Figura 7 mostra o resultado da aplicação desta metodologia para o segundo poço, apresentando o Gráfico L-K com os pontos (K,L) calculados com os seus perfis de porosidade. O quadrado em preto representa o centro da fácies transportada do primeiro poço. Os triângulos em verde representam os centros das camadas no intervalo do segundo poço. As cruzes em azul mostram a camada classificada como calcário e as cruzes em vermelho mostram a camada classificada como a fácies transportada.

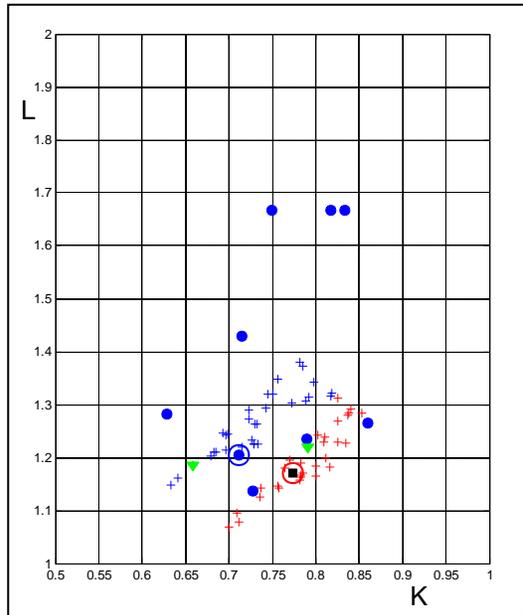


Figura 7 – Gráfico L-K. Dados reais. O quadrado preto representa o centro da fácies transportada. Os triângulos em verde representam os centros das camadas no poço teste. As cruzes azuis mostram a camada classificada como calcário e as cruzes em vermelho mostram a camada classificada como a fácies transportada.

A Figura 8 mostra o zoneamento do segundo poço utilizado para a avaliação desta metodologia. A Figura 8-A mostra o perfil de raio gama. A Figura 8-B mostra a descrição litológica do testemunho e a Figura 8-C apresenta o zoneamento estimado. A inserção dos pontos minerais permitiu a identificação de uma camada carbonática ou tendo a calcita como mineral principal, de forma coerente com a descrição do testemunho.

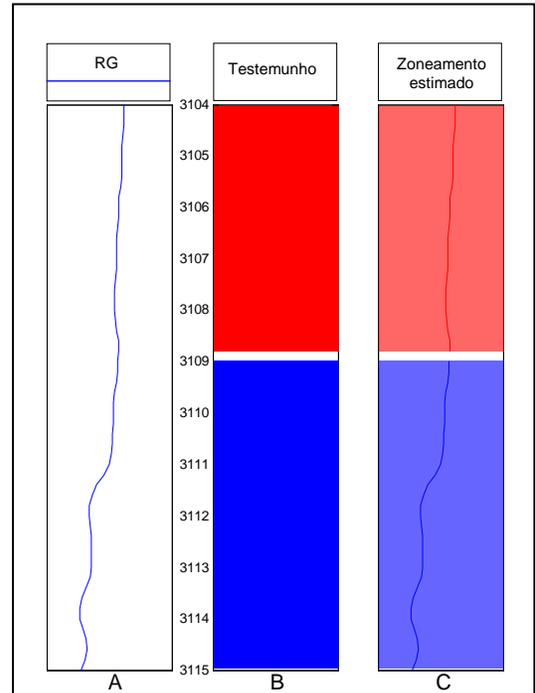


Figura 8 – Zoneamento do poço. 8-A Perfil de raio gama. 8-B Testemunho. 8-C Zoneamento estimado.

## Conclusões

O Gráfico L-K mostrou-se eficiente para promover a codificação de uma informação de caráter qualitativo como a descrição de fácies em termos das propriedades físicas mensuradas pelas ferramentas de porosidade e a rede competitiva mínimo angular foi capaz de interpretar o Gráfico L-K e promover o transporte desta informação para poços não testemunhados.

## Agradecimentos

Os autores agradecem pelo apoio a este trabalho a PETROBRAS (Rede de Geofísica) e ao Convênio MCT/UFPA/ANP/PRH-06.

## Referências

- Burke, J., Campbell, R. & Schmidt, A., 1969. The lithoporosity crossplot. SPWLA 10<sup>th</sup> Logging Symposium.
- Barros, C. & Andrade, A., 2008. Determination of Water Saturation by Intelligent Algorithm. III SimBGF.
- Kohonen, T., 1989. Self-organization and associative memory. Berlin, Springer-Verlag, 312 p.
- Nikraves, M., 2004. Soft computed based computational intelligent for reservoir characterization, Expert Systems with Applications. V: 26, 19-38.