



## Aumento de escala em perfis geofísicos de poços por krigagem ordinária

José Agnelo Soares<sup>1</sup>, Ailma Robéria Souto de Medeiros<sup>1</sup>, Denise Ágatha Rodrigues Almeida<sup>1</sup>, Lígia Mara Gonzaga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Mineração e Geologia, Universidade Federal de Campina Grande.

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

Este trabalho apresenta e analisa os resultados obtidos, pela aplicação da krigagem ordinária 1D, com o objetivo de promover o aumento da escala de investigação dos perfis de raios gama de doze poços, todos oriundos de um campo terrestre produtor de petróleo. Antes da krigagem os dados foram normalizados, sendo convertidos de volta à escala normal dos perfis de raios gama (API), após a estimação por krigagem. Três diferentes espaçamentos entre pontos de krigagem foram testados, em cada poço, e as curvas krigadas de raios gama (GR) foram comparadas com a curva de GR original em termos do coeficiente de correlação, do erro RMS e do espectro de frequências espaciais, este último representado pelo comprimento de onda mínimo de cada curva. Os resultados alcançados indicam que o aumento da distância entre pontos de krigagem resulta em curvas de menor resolução vertical, embora conservando a capacidade de reconhecer as feições de maior escala presentes nos perfis. Enquanto os perfis GR originais apresentam resolução na escala métrica, as curvas krigadas obtidas apresentam resolução nas escalas de dezenas a centenas de metros. Finalmente, a metodologia aplicada neste trabalho pode ser aplicada a qualquer perfil geofísico de poço.

### Introdução

Os perfis geofísicos de poços se constituem nos dados geofísicos de campo de mais alta resolução vertical adquiridos para fins de exploração dos recursos naturais subterrâneos. A resolução vertical precisa depende do tipo de perfil e das características construtivas de cada modelo de sonda ou fabricante; mas de modo geral, pode-se afirmar que para as curvas tradicionais (raios gama, resistividade elétrica, potencial espontâneo, densidade, sônico e porosidade de nêutrons), a resolução se situa na escala métrica (Hearst et al., 2000).

A interpretação geofísica para fins de exploração sempre se baseia no cruzamento das informações disponíveis, em geral oriundas de levantamentos geológicos e geofísicos (de superfície e de poço), os quais apresentam diversas escalas de investigação. Por exemplo, os métodos geofísicos de superfície fornecem dados que, em geral, apresentam uma resolução vertical muito inferior àquela dos dados fornecidos pela geofísica de

poço. A maioria dos dados geológicos também apresenta uma baixa resolução, tanto vertical quanto horizontal. A interpretação integrada desses dados exige a adoção de uma escala única de investigação, em geral obtida pelo aumento de escala (ou a equivalente redução de resolução) dos perfis geofísicos de poços (Hwang, 2009). Outras aplicações também exigem esse aumento da escala de investigação dos perfis. Por exemplo, quando se deseja modelar o regime de fluxo de um reservatório não interessa considerar todas as unidades geológicas, mas apenas aquelas principais, responsáveis pelo controle do regime de fluxo de fluidos.

Há também casos em que se deseja diminuir a escala de investigação, o que pode ser obtido pela incorporação de informações oriundas de uma fonte de mais alta resolução. De um modo geral, mudanças de escala (para cima ou para baixo) devem sempre ser consideradas quando se deseja trabalhar com dados de diferentes níveis de resolução.

### Metodologia

Neste trabalho foram utilizados os perfis de raios gama (GR) oriundos de doze poços de um campo terrestre produtor de petróleo. Foi realizado um trabalho de aumento de escala dos perfis GR com o objetivo de identificar as camadas geológicas mais importantes do campo. O método adotado foi o da krigagem ordinária em uma dimensão (1D).

Os programas computacionais usados para o processamento geoestatístico dos dados foram o GSLIB<sup>®</sup> e o GS+<sup>®</sup>. Inicialmente o GSLIB<sup>®</sup> foi utilizado na análise da distribuição estatística e na normalização dos dados (geração de uma variável de escores com distribuição normal padrão). Em seguida o programa GS+<sup>®</sup> foi utilizado na definição do modelo de variograma e na krigagem ordinária 1D com três separações distintas entre pontos de estimação: 5 m, 20 m e 50 m. Finalmente, o programa GSLIB<sup>®</sup> foi utilizado para a realização da transformação inversa, ou seja, transformar os valores krigados da variável normalizada em valores de GR.

### Dados utilizados

Os perfis de GR precisaram ser reamostrados pois o módulo de normalização da versão utilizada do GSLIB<sup>®</sup> processa apenas mil amostras por vez, e os perfis de alguns poços apresentam um número superior de amostras. A fim de reduzir o número de amostras, os perfis de GR foram reamostrados com intervalos de amostragem de 2,0m, 3,048m e 4,0m; de acordo com a

taxa de redução necessária no número de amostras de cada poço. Os perfis resultantes dessa reamostragem são referidos neste trabalho apenas pela sigla GR.

A Figura 1 apresenta um mapa de localização dos poços. As coordenadas estão propositalmente alteradas de modo a não identificar a localização exata do campo, por razões de sigilo industrial. No entanto, as distâncias entre poços são as reais.

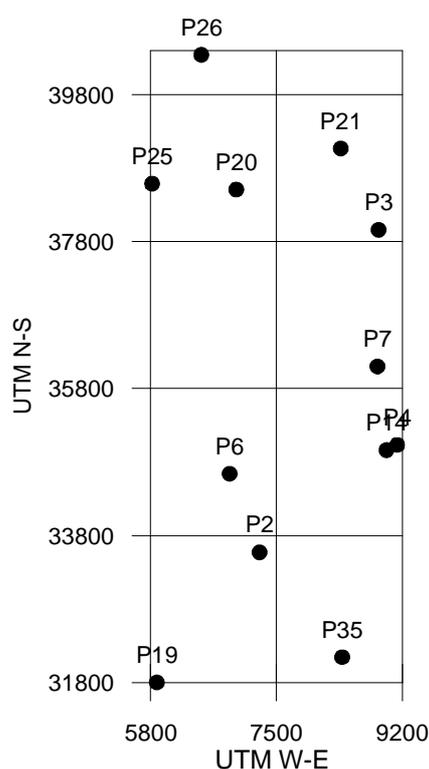


Figura 1 – Mapa de localização dos poços.

#### Krigagem

O método da krigagem trata-se de uma forma de estimar valores em locais não-amostrados com base nas amostras conhecidas e localizadas na sua vizinhança. A influência de cada amostra vizinha ao ponto de estimação da variável é determinada com base no comportamento da continuidade espacial do fenômeno estudado. A krigagem garante a melhor estimativa possível através da minimização da variância de estimativa, ou seja, a incerteza associada ao conjunto de valores estimados é sempre a mínima possível de ser atingida com os valores amostrados disponíveis. Esse método pode ser utilizado na interpolação de dados, sendo esta baseada no variograma, conforme apresentado por Journel e Huijbregts (1978).

O variograma representa a variância espacial dos dados, ou seja, caracteriza o fenômeno estudado em termos da sua continuidade espacial. O comportamento experimental dos dados é representado através de uma função espacialmente contínua (modelo teórico de variograma) a qual permite estimar a influência de cada

amostra, qualquer que seja a sua distância em relação ao ponto a ser estimado.

A Figura 2 apresenta o variograma experimental para o poço P3 com ajuste do modelo teórico de variograma. Neste caso o melhor ajuste ( $R^2 = 0.97$ ) foi alcançado com o modelo exponencial.

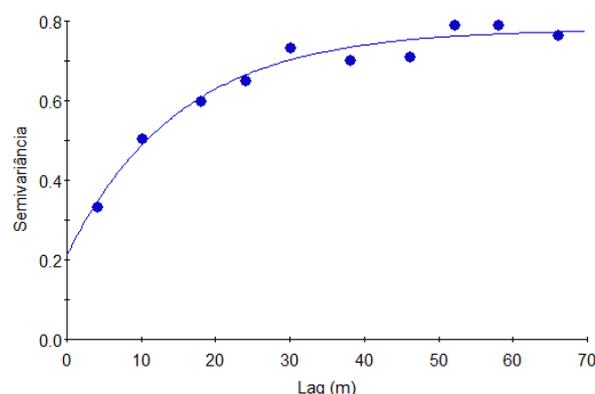


Figura 2 – Ajuste de variogramas para o poço P3.

#### Fluxograma de trabalho

O procedimento adotado neste trabalho seguiu o fluxograma apresentado na Figura 3.

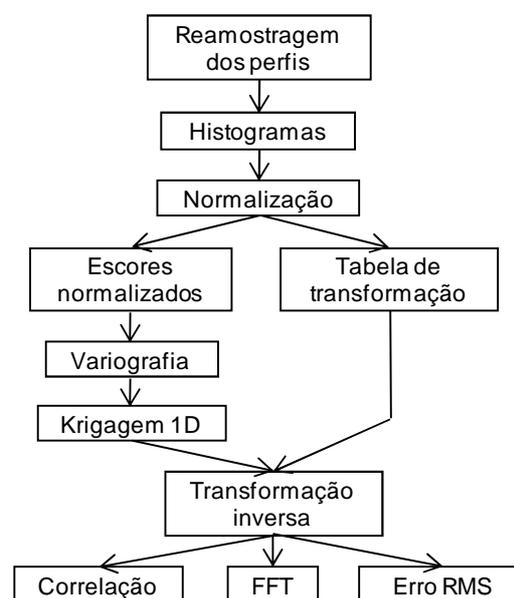


Figura 3 – Fluxograma com o procedimento adotado.

O procedimento começa com a reamostragem dos perfis, seguido pela construção dos histogramas para o perfil GR reamostrado de cada poço e normalização das curvas. Esta última etapa resulta em dois arquivos para cada poço: um arquivo com os dados normalizados e outro contendo uma tabela de transformação que permite

relacionar os valores normalizados com os valores de GR.

Em seguida é realizada a variografia, que gera o modelo teórico de variograma representativo da continuidade espacial do fenômeno investigado. Esse modelo teórico de variograma é em seguida utilizado para a definição da influência de cada amostra localizada na vizinhança dos pontos de estimação por krigagem.

Na krigagem foram estimados valores com três separações diferentes entre pontos de estimação (5 m, 20 m e 50 m), de modo que a curva krigada com maior separação entre pontos krigados representa a curva mais suavizada e com maior escala de investigação. A curva obtida com separação dos pontos de krigagem de 5 m apresenta a menor escala, e a de 20 m apresenta uma escala de investigação intermediária. Em seguida cada curva krigada é submetida a uma transformação inversa (de acordo com a tabela de transformação) para gerar os perfis krigados de GR com as três escalas de investigação adotadas.

A etapa seguinte foi comparar as três curvas GR krigadas com a curva de GR original (GR reamostrado). Os parâmetros adotados para essa comparação foram o coeficiente de correlação, o erro RMS e a frequência espacial (representada pelo número de onda e obtida pela aplicação da transformada de Fourier 1D).

O coeficiente de correlação indica o quanto cada curva krigada mantém uma relação linear em comparação à curva original. Quanto mais este parâmetro se aproxima da unidade mais diretamente correlacionáveis são as curvas comparadas. Para o cálculo do coeficiente de correlação é necessário que as duas curvas apresentem o mesmo número de amostras. Deste modo as curvas krigadas foram reamostradas a fim de exibirem o mesmo número de amostras das respectivas curvas GR originais.

O erro RMS indica a diferença média quadrática entre duas variáveis. Quanto menor o erro RMS, mais próximos são, em média, os valores das curvas comparadas. Para o cálculo do erro RMS as duas curvas comparadas também devem apresentar o mesmo número de amostras.

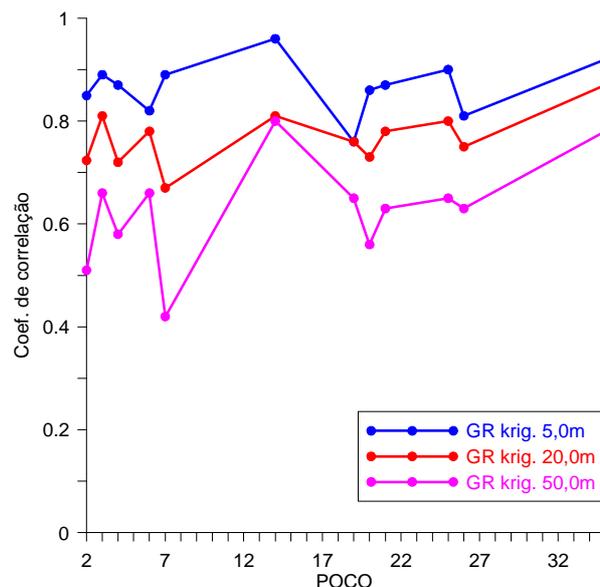
A transformada de Fourier no domínio do espaço permite avaliar o conteúdo de frequências espaciais de uma dada curva. A frequência espacial é representada pelo número de onda. Valores baixos de número de onda indicam que apenas feições de grande porte podem ser reconhecidas em uma dada curva, ou seja, que se trata de uma curva que investiga feições de grande escala. Por outro lado, a ocorrência de valores mais elevados de número de onda para uma dada curva indica a possibilidade do reconhecimento de feições de pequena escala. Deste modo, o número de onda é inversamente proporcional à escala de investigação de uma dada curva.

## Resultados

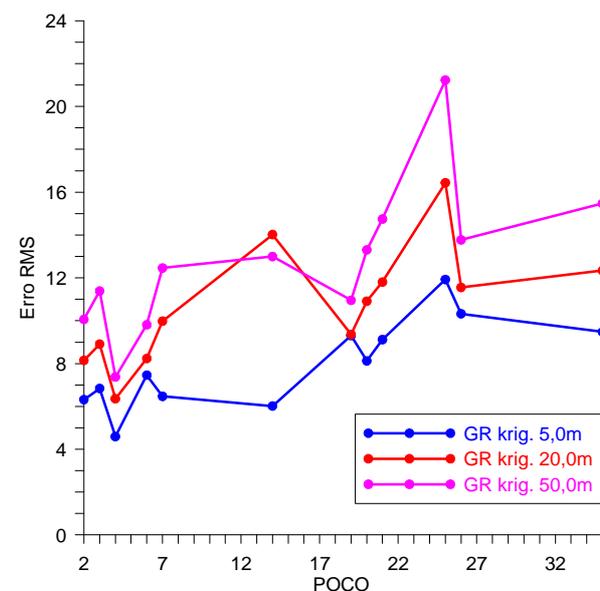
A Figura 4 apresenta uma comparação da curva original com as curvas krigadas com as distâncias entre pontos de krigagem de 5, 20 e 50 metros. Observa-se que as

curvas krigadas apresentam uma redução na resolução com o aumento da escala de investigação, resultante do aumento da distância entre pontos de krigagem. No entanto, as feições de maior escala estão perfeitamente preservadas em todas as curvas.

A Figura 5 apresenta os coeficientes de correlação calculados entre as curvas GR krigadas (com as separações de 5, 20 e 50 metros entre pontos de krigagem) e a curva GR original, para todos os 12 poços investigados.



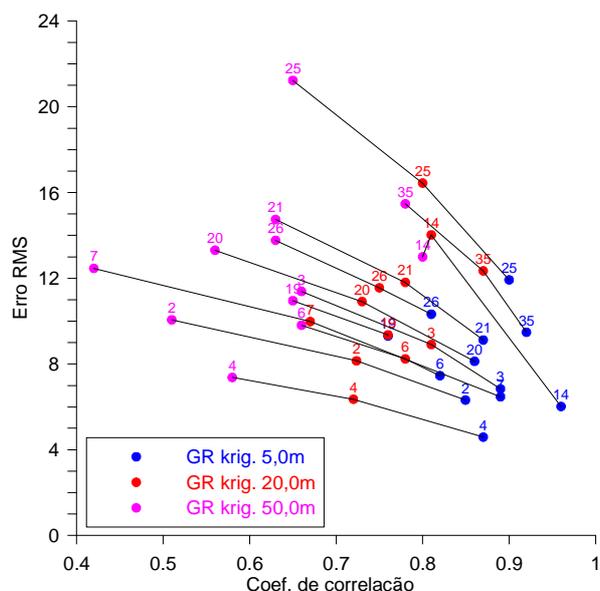
**Figura 5** – Coeficiente de correlação entre as curvas GR krigadas e a curva GR original, para os 12 poços investigados.



**Figura 6** – Erro RMS calculado entre as curvas GR krigadas e a curva GR original, para os 12 poços investigados.

A Figura 6 apresenta o erro RMS calculado também entre cada curva GR krigada e a respectiva curva GR original, para todos os poços estudados.

A Figura 7 relaciona o coeficiente de correlação com o erro RMS calculados para cada poço e para cada curva GR krigada. Em geral, a distância entre pontos de krigagem é diretamente proporcional ao erro RMS e inversamente proporcional ao coeficiente de correlação, calculados em relação à curva GR original.



**Figura 7** – Relação entre coeficiente de correlação e erro RMS calculados entre as curvas GR krigadas (para 3 diferentes distâncias entre pontos de krigagem) e a curva GR original, para todos os poços investigados.

A Figura 8 apresenta a distribuição de freqüências espaciais, obtidas pela aplicação da transformada de Fourier 1D, para a curva de GR original e para as respectivas curvas de GR krigadas. A título de exemplo, são apresentadas as curvas referentes ao poço P35.

A Tabela 1 apresenta os valores de coeficiente de correlação e erro RMS calculados para cada curva krigada, em relação à respectiva curva de GR original, e o comprimento de onda mínimo de cada curva de GR (original e krigadas) para todos os 12 poços investigados. Observar que o número de onda máximo para cada curva, extraído de gráficos como o da Figura 8, foi transformado no comprimento de onda mínimo.

### Discussão e Conclusões

A técnica de krigagem ordinária 1D aplicada às curvas de GR de doze poços de um campo terrestre de petróleo se mostrou adequada para a mudança de escala daqueles perfis, conforme indicado pelos indicadores adotados e pela comparação visual entre as curvas krigadas e as correspondentes curvas originais.

O alcance médio dos variogramas, para o campo estudado, foi da ordem de dezenas de metros, permitindo

estimar pontos separados por até esta ordem de grandeza. Os parâmetros de avaliação adotados mostram que a adoção de distâncias crescentes de separação entre pontos krigados conduz à obtenção de curvas com escalas de investigação cada vez maiores.

As curvas krigadas apresentaram coeficientes de correlação com a curva original de raios gama que variaram entre 0,42 e 0,96. Cerca de 70% dos coeficientes de correlação obtidos, para todos os poços, se encontram no intervalo igual ou superior a 0,7. Para as curvas krigadas com distância de 5 metros os coeficientes de correlação de todos os poços se encontram acima de 0,7; para as curvas krigadas com distância de 20 metros apenas um poço apresenta coeficiente de correlação inferior a este limite; e para as curvas krigadas com distância de 50 metros, apenas dois poços apresentam coeficiente de correlação superior.

O erro RMS para as curvas krigadas de todos os poços variou de 4,6 até 21,2 API. Considerando que um intervalo comum para a variação do perfil de raios gama vai de 0 até 120 API, um erro RMS igual a 12 representa um erro médio de apenas 10% da escala. 70% das curvas krigadas, para todos os poços, apresentam um erro RMS abaixo de 12 API. Para as curvas krigadas com distância de 5 metros os erros RMS de todos os poços se encontram abaixo de 12 API; para as curvas krigadas com 20 metros 3 poços apresentam erro RMS abaixo deste limite; e para as curvas krigadas com distância de 50 metros, cinco poços apresentam erro RMS inferior a 12 API.

A análise da freqüência espacial indicou que as curvas krigadas com distância de 5 metros apresentam um comprimento de onda mínimo médio de cerca de 90 metros; as curvas krigadas para 20 metros apresentam um comprimento de onda mínimo médio de 150 metros; e as curvas krigadas com distância de 50 metros apresentam um comprimento de onda mínimo médio de 300 metros. Este resultado indica claramente o aumento de escala decorrente do aumento da distância entre os pontos krigados.

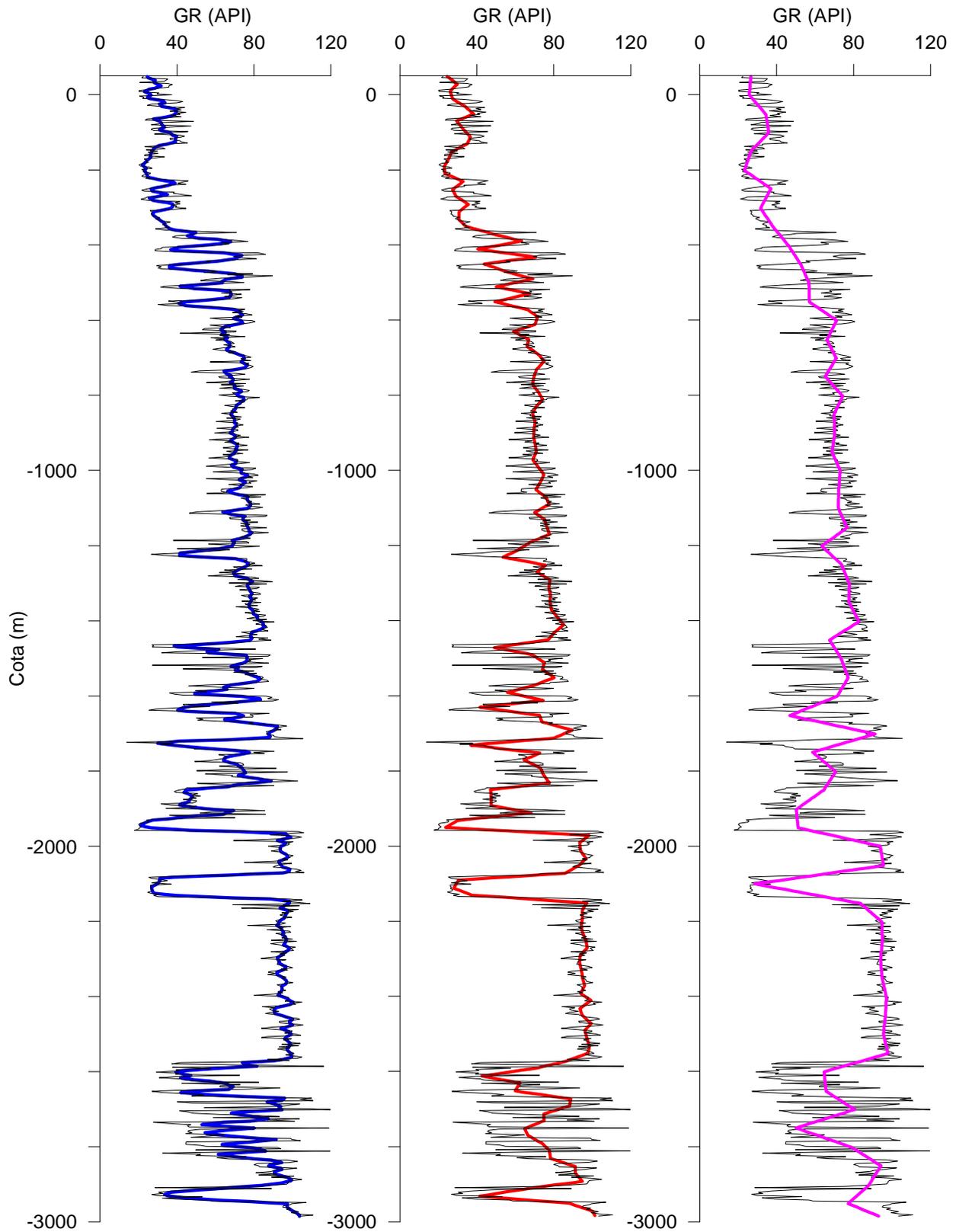
Finalmente, o procedimento adotado neste trabalho pode ser aplicado para qualquer perfil geofísico de poço.

### Agradecimentos

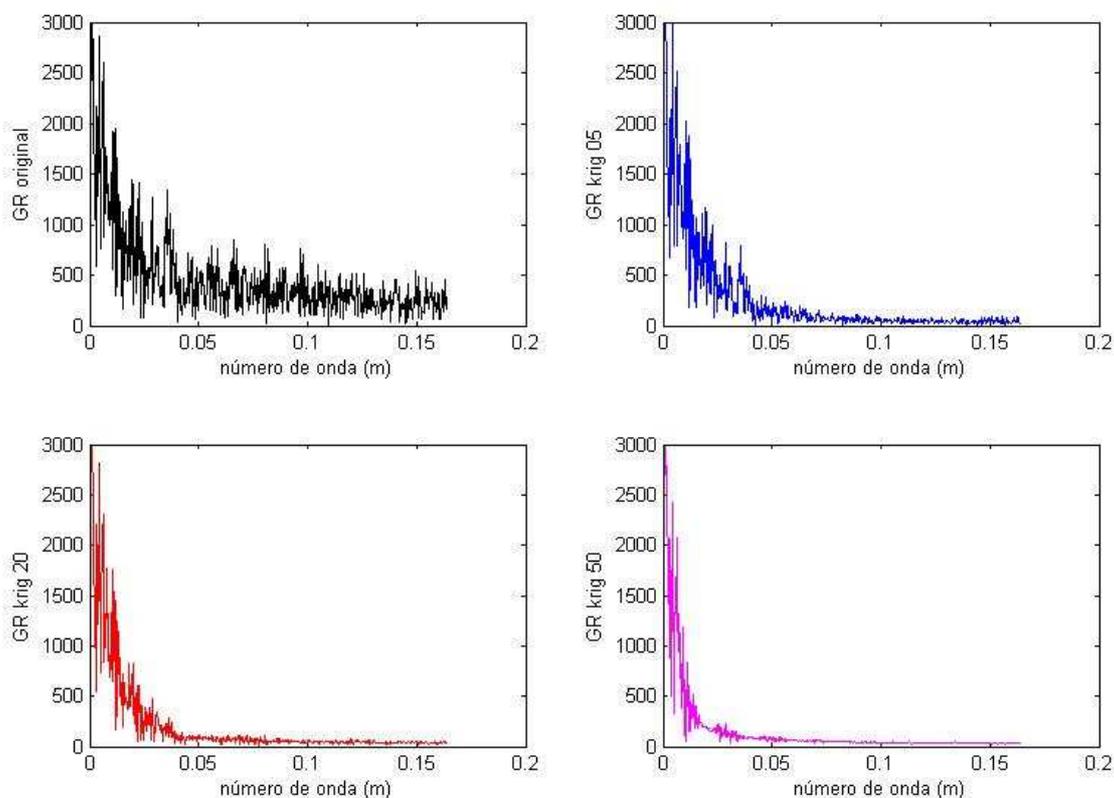
Os autores agradecem à PETROBRAS pela gentil cessão dos dados.

### Referências

- Hearst, J.R.; Nelson, P.H.; Paillet, F.L., 2000. Well logging for physical properties. John Wiley and Sons, 483 pp.
- Hwang, K., 2009. Uncertainty analysis in upscaling well log data by Markov chain Monte Carlo method. Thesis submitted to the Texas A&M University, 83 pp.
- Journel, A.G.; Huijbregts, C.J., 1978. Mining geostatistics. Academic Press, 600 pp.



**Figura 4** – GR original (curva preta) e perfis de GR krigados em 1D para distâncias entre pontos de krigagem de 5,0 m (curva azul), 20,0 m (curva vermelha) e 50,0 m (curva rosa) para o poço P35.



**Figura 8** – Distribuição das freqüências espaciais, representadas pelo número de onda, das curvas de GR original (curva preta), e das curvas de GR krigadas com separações entre os pontos de krigagem de 5,0 m (curva azul), 20,0 m (curva vermelha) e 50,0 m (curva rosa) para o poço P35.

**Tabela 1** – Valores de coeficiente de correlação e erro RMS das curvas krigadas em relação à curva de GR original, e comprimento de onda ( $\lambda$ ) mínimo para as curvas de GR original e krigadas para todos os poços investigados.

Poço	Corr_05	Corr_20	Corr_50	RMS_05 (API)	RMS_20 (API)	RMS_50 (API)	$\lambda_{GR}$ (m)	$\lambda_{05}$ (m)	$\lambda_{20}$ (m)	$\lambda_{50}$ (m)
2	0.85	0.72	0.51	6.3	8.1	10.1	38	105	157	314
3	0.89	0.81	0.66	6.8	8.9	11.4	50	126	157	314
4	0.87	0.72	0.58	4.6	6.4	7.4	38	79	140	314
6	0.82	0.78	0.66	7.5	8.2	9.8	38	79	143	393
7	0.89	0.67	0.42	6.5	10.0	12.5	51	90	157	370
14	0.96	0.81	0.80	6.0	14.0	13.0	51	90	126	314
19	0.76	0.76	0.65	9.3	9.4	11.0	38	79	140	209
20	0.86	0.73	0.56	8.1	10.9	13.3	38	84	157	180
21	0.87	0.78	0.63	9.1	11.8	14.7	51	79	157	314
25	0.90	0.80	0.65	11.9	16.4	21.2	25	79	157	314
26	0.81	0.75	0.63	10.3	11.6	13.8	51	105	157	349
35	0.92	0.87	0.78	9.5	12.3	15.5	38	79	157	209