

10º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Estimativa de resistência não drenada do solo marinho utilizando técnicas
geoestatísticas

AUTORES:

Joyce Kelly França Tenório, Christiano A. F. Várady Filho, Pedro Henrique Matias Silva,
João Paulo Lima Santos, Rafael Dias, Fábio Sawada Cutrim.

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Alagoas – UFAL

ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA NÃO DRENADA DO SOLO MARINHO UTILIZANDO TÉCNICAS GEOESTATÍSTICAS

Abstract

On early stages of the well construction, an important step is the installation of the conductor casing, because it provides structural stiffness to the wellhead system, an important role in the integrity of the well. Thus, to ensure the structural stiffness of the soil-casing system, it is necessary to characterize the clay soil and, thus, minimize the uncertainties associated with this drilling step. Soil formation processes causes heterogeneity on the material which should be regarded carefully. Currently, soil data is obtained using Cone Penetration Test (CPT), consisting of *in situ* quasi-static penetration tests without considering the pore pressure measurement, evaluating soil geotechnical parameters along depth. Motivation for this study results from the lack of work involving the application of techniques for parameter estimation for early stage of the well's project. Among the geostatistical techniques for parametric estimation, a set of fit methods using least squares, kriging, stands out. One of the main differences between kriging and other estimate methods is in weight calculation. Thus, we estimate soil parameters from point data at different locations using kriging and computational programming. Results evaluated for a data set showed low residual level when submitted to the cross-validation process. Therefore, the effectiveness of the referred methodology in estimating soil parameters was verified, as well as making it possible to minimize the realization of *in situ* tests.

Introdução

O processo de formação do solo proporciona alta variabilidade espacial de suas características, motivo pelo qual a área tem sido objeto de estudo desde o início do século XXI. A heterogeneidade conferida aos solos e rochas é um ponto de grande importância a ser estudado, pois considerá-los homogêneos pode levar a conclusões equivocadas.

A fase de início de poço consiste em uma sequência operacional com a finalidade de assentar o revestimento condutor e perfurar a fase seguinte, instalando o revestimento de superfície. A importância desta fase reside no cuidado com a integridade estrutural do poço, que proporciona rigidez estrutural ao sistema de cabeça de poço (SANTOS, 2007).

Sendo assim, a estimativa de parâmetros do solo utilizando dados espaciais ganha destaque e possui como base o uso dos furos geotécnicos para fornecimento dos dados obtidos em ensaios *Cone Penetration Test* (CPT). Por meio de técnicas geoestatísticas, é possível caracterizar o solo e obter melhores resultados na etapa de instalação do revestimento condutor.

No contexto de projeto de poços de petróleo, a API RP 2A diz a resistência não drenada do solo é necessária para realizar a composição de curvas representativas em solos compostos por argila, bem como no cálculo da capacidade axial da estaca (API, 2007). Além disso, é comum a presença de uma base na estrutura de cabeça de poço, apoiada no solo marinho. A resistência não drenada é também empregada no cálculo da resistência total do solo sobre a base.

No processo de jateamento, faz-se necessário quantificar a diminuição da resistência do solo em decorrência da perturbação no entorno do condutor. Tal diminuição da resistência é calculada multiplicando a resistência não drenada por um fator de minoração definido como uma fração da profundidade a partir da *mudline* (SIMWORX, 2015). Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho consiste na aplicação da técnica de krigagem para estimativa da resistência não drenada ao cisalhamento de solos argilosos como apoio a projetos de início de poço tendo como base dados de furos geotécnicos provenientes de ensaios CPT.

Metodologia

Para o desenvolvimento dos variogramas necessários à krigagem, algumas suposições são estabelecidas. Estas se baseiam em formulações que precisam ser estudadas, para compreensão da influência dos parâmetros. Ensaios do tipo CPT correspondem a ensaios de penetração quasi-estática *in situ* sem a consideração da medida de poropressão, o qual possibilita a classificação de perfis geotécnicos do terreno assim como a avaliação dos parâmetros geotécnicos do solo (GIACHETTI; QUEIROZ, 2004).

Os testes denominados CPTu correspondem a uma variação do teste CPT, no qual são consideradas as medidas de poropressão em função da presença de um sensor localizado no piezocone, ferramenta utilizada nesse tipo de ensaio. Na maioria das vezes, os testes são realizados em pontos nas proximidades de locações de poços de petróleo com o intuito de analisar o solo onde será realizada a perfuração.

Conhecendo os dados derivados dos ensaios em campo cedidos pela indústria e com base nos conceitos e formulações acerca de variogramas e krigagem, foram aplicadas técnicas de krigagem simples e ordinária para a estimativa de resistência não drenada do solo. Utilizando a linguagem de programação *Python* (*Python* 3.7.4), foi implementado um código que realiza a estimativa desejada, iniciando com a leitura de arquivos JSON, os quais possuem dados de resistência não drenada nos pontos conhecidos.

Foram empregadas as formulações de variograma de Matheron (1963), Cressie e Hawkins (1980) e Dowd (2013), os quais foram ajustados de acordo com o modelo esférico e serviram de embasamento para aplicação das técnicas de krigagem simples (KS) e ordinária (KO). Como a quantidade de dados disponíveis é limitada, foi aplicado o conceito de variograma omnidirecional para inclusão de todos os dados recebidos. O variograma omnidirecional possui como ideia principal o fato de que realiza sua varredura em todas as direções e não apenas em um intervalo angular limitado.

No presente trabalho, optou-se pela utilização do modelo esférico para ajuste dos variogramas. Este modelo apresenta melhores resultados, conforme apresentado no artigo revisional de Oliver e Webster (2014).

Após a realização da estimativa de resistência em um ponto desconhecido, a próxima etapa refere-se à análise e validação dos resultados obtidos. Neste trabalho, os resultados foram validados empregando a Cokrigagem, que consiste em uma técnica de validação em que é realizada a estimativa em um ponto já conhecido, ou seja, um ponto cujos valores de resistência não drenada já estão definidos, e comparados aos valores reais. A partir dos resultados da cokrigagem, foi possível calcular o resíduo associado à estimativa e com isso, validar a metodologia utilizada e baseando-se na análise dos resíduos, cuja equação encontra-se na Equação 1, em que $Z(x_i)$ corresponde ao valor real e $\hat{z}(x_i)$ o valor estimado.

$$R_i = Z(x_i) - \hat{z}(x_i) \quad (1)$$

Aspectos teóricos

Os processos de formação dos solos possuem certa diversidade e complexidade, o que leva as propriedades do solo exibirem um comportamento inicialmente aleatório. Na realidade, os solos apresentam continuidade espacial e é essa característica que diferencia a ciência de dados da terra de outros bancos de dados (OLIVER; WEBSTER, 2014).

Diz-se que, em um processo aleatório, o valor assumido por uma variável Z em um dado ponto x encontra-se em um intervalo infinito de possibilidades. Quando tal valor é determinado, denomina-se que este valor é realizado. O conjunto de valores realizados em locais de uma região é denominado de Processo Aleatório. Sabendo da continuidade nos processos geológicos de formação e que os processos possuem aleatoriedade, introduz-se a hipótese da estacionariedade, a qual permite que seja assumido que há similaridade na variação em pontos com certa proximidade espacial.

De acordo com Guimarães (2004), é chamado processo estacionário aquele que possui desenvolvimento relativamente homogêneo no domínio estudado, possuindo oscilações aleatórias próximas a um valor médio, sem mudanças bruscas e cujas características não se comportam em função da origem. Sabendo que o Variograma consiste na variância das diferenças $[Z(x) - Z(x + h)]$, tem-se que

$$2 \cdot \gamma(h) = \text{Var}[Z(x) - Z(x + h)] \quad (2)$$

O comportamento estacionário das variáveis regionalizadas possui características intermediárias entre as variáveis totalmente aleatórias e as determinísticas, herdando irregularidades, devido à sua característica estrutural. Além disso, apresenta variação imprevisível de ser analisada ponto a ponto, pois exibe conexão entre pontos no espaço decorrentes dos seus processos de formação (FERNANDES, 2014).

Conforme Celso e Camargo (1998), o variograma é utilizado como instrumento de suporte à krigagem, onde é possível expressar de modo quantitativo a variação de um fenômeno regionalizado assim como representar o nível de dependência espacial entre duas variáveis regionalizadas. Pode-se

representar uma variável regionalizada empregando duas abordagens de variograma: o experimental e o teórico. A Equação 2 exibida para variograma corresponde ao variograma teórico. Celso e Camargo (1998) dizem que se considerada uma amostra $Z(x_i)$, em que $i = 1, \dots, n$, a equação do variograma pode ser escrita como na Equação 3 e refere-se ao variograma experimental.

$$2 \cdot \gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

sendo $2\gamma(h)$ o variograma estimado, $N(h)$ o número de pares dos valores medidos e separados por uma distância h , $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ correspondem aos valores da i -ésima observação da variável regionalizada.

De acordo com Sturaro (2015), o semivariograma consiste no gráfico das semivariâncias das diferenças dos valores experimentais localizados em intervalos regulares. De maneira análoga ao variograma experimental, pode ser representado por

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 \cdot N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

O tipo de ajuste e a modelagem do variograma influenciam diretamente na computação do variograma. Para realização do ajuste, devem ser fornecidos parâmetros como os valores pontuais para *lags* diferentes e obtém-se parâmetros como Alcance (a), Efeito Pepita (C_0), Patamar (C) e Contribuição (C_1).

O processo de escolha do ajuste é realizado de modo iterativo, sendo necessária a aplicação e verificação da adequação dos modelos (CELSE; CAMARGO, 1998). Isaaks e Srivastava (1989) definem que os modelos básicos podem ser classificados em modelos com patamar ou sem patamar. Para eles, os modelos com patamar, também denominados de modelos transitivos, englobam os modelos esférico, exponencial e gaussiano. A função do modelo esférico corresponde a

$$\begin{cases} \gamma_0 = C_0 + c \left\{ \frac{3h}{2r} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{r} \right)^3 \right\} \\ \gamma_0 = C_0 + c, & \text{para } h > r \\ \gamma_0 = 0, & \text{para } h = 0 \end{cases} \quad (5)$$

sendo c a variância do componente espacialmente correlato e r o Alcance de dependência espacial.

Há também os variogramas robustos, que consistem em variogramas que apresentam resultados mais precisos quando considerada-se a presença de *outliers*. Os variogramas robustos mais aplicados foram desenvolvidos por Cressie e Hawkins (1980) e Dowd (2013), respectivamente.

$$\gamma_c(h) = \frac{1}{0.457 + \frac{0.494}{m(h)} + \frac{0.045}{N^2(h)}} \left\{ \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \sqrt{Z(x_i) - Z(x_i + h)} \right\}^4 \quad (6)$$

$$\gamma_D(h) = \frac{1}{2} 2.188 \{ \text{mediana}(Z(x_i) - Z(x_i + h)) \}^2 \quad (7)$$

A terminologia krigagem surgiu em homenagem ao primeiro autor, Daniel G. Krige, que sugeriu o uso de médias móveis a fim de esquivar-se da superestimação sistemática em suas análises (CELSE; CAMARGO, 1998). Em seus estudos envolvendo dados de teor de ouro nas minas da África do Sul, Krige (1951) percebeu que apenas as informações fornecidas pela estatística básica não seriam suficientes para entender tal fenômeno.

Tendo como base os apontamentos realizados por Krige, Matheron (1963) estabeleceu a Teoria das Variáveis Regionalizadas, que corresponde a um dos elementos principais da geoestatística. Inicialmente, o foco principal de Matheron foi encontrar um estimador capaz de recompor totalmente a distribuição espacial do teor de metais em um bloco de minério analisado, considerando a estrutura e aleatoriedade da variável regionalizada (FOLLE, 2009).

A krigagem é definida por Matheron (1963) como a segunda aplicação de grande importância no âmbito da geoestatística. Com objetivo de usar as informações de pontos amostrados para estimar certo parâmetro em pontos desconhecidos, a krigagem visa uma atribuição de pesos ótima às amostras, fornecendo um melhor estimador sem vies. Os pesos variam de 0 a 1 e seu somatório deve ser unitário. Considera-se que quanto mais próximo um dado do nó do grid, maior o peso do respectivo dado.

No método definido como krigagem simples, a média μ deve ser conhecida e constante, além do que se baseia também avaliação dos resíduos, o qual correspondem a diferença entre os valores estimados e os observados por amostragem (JAKOB; YOUNG, 2006). A Equação 8 apresenta esse cálculo

$$\hat{z}(x_o) - \mu(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) [z(x_i) - \mu(x_i)] \quad (8)$$

Já na krigagem ordinária, utiliza-se um modelo de probabilidade no qual o viés e a variância do erro podem ser calculados e em seguida são escolhidos os pesos para as amostras próximas, que garantem a minimização do erro da variância. No método da krigagem simples, o somatório dos pesos associados às amostras não equivale a 1, pois um peso dos coeficientes calculados é concedido à média. Isso equivale a uma desvantagem da krigagem simples, pois pode tornar os resultados alcançados não representativos.

Para propor uma solução, a krigagem ordinária apresenta-se como um método que introduz uma i-ésima equação no sistema, forçando a soma dos pesos a ser unitária. O sistema de equações para a krigagem ordinária é mostrado na Equação

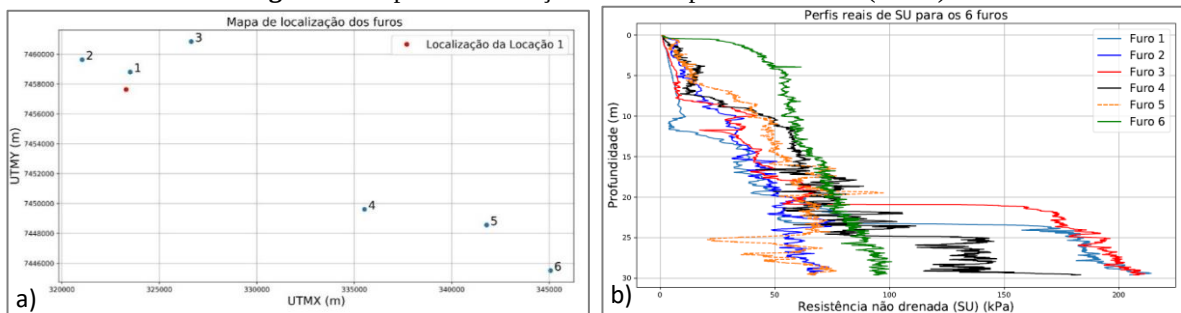
$$\hat{z}(x_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \text{ e } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (9)$$

Resultados e Discussões

Com base nas técnicas de variograma e krigagem apresentadas anteriormente, é possível estimar a resistência ao cisalhamento não drenada do solo (SU). Esta Seção apresenta os resultados obtidos ao aplicar esses conceitos a conjuntos de dados de resistência não drenada oriundos de ensaios realizados em solo marinho. Os dados disponibilizados correspondem a dados reais descaracterizados e fornecidos pela indústria. Os cenários 1 e 2 referem-se a campos de petróleo distintos, tanto em localização como em características físicas e geológicas.

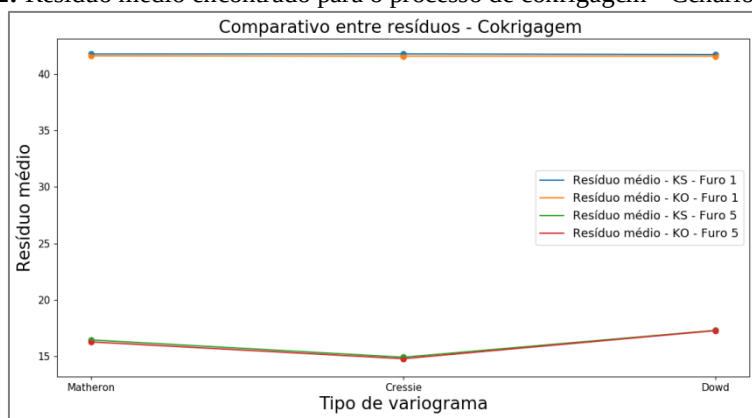
Para o cenário 1, o qual trata-se de um campo heterogêneo, um total de seis pontos amostrados foram disponibilizados para realização desse estudo. Já para o cenário 2, um campo homogêneo, dados de nove furos geotécnicos estão disponíveis. Na Figura 1a, encontram-se as localizações de cada um dos furos disponíveis para o cenário 1, que foram utilizados no processo de krigagem, já na Figura 1b estão mostrados os perfis de SU dos seis furos.

Figura 1: Mapa de localização dos furos para o cenário 1 (Autor)

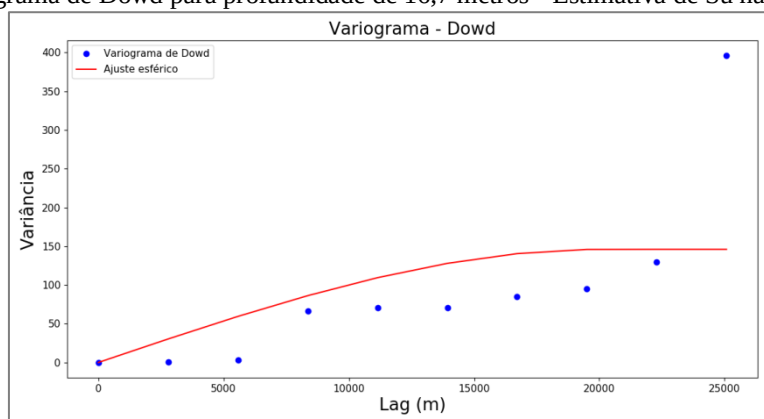


Com o objetivo de avaliar a metodologia empregada na estimativa de resistência não drenada do solo, foi aplicada a cokrigagem. No gráfico da Figura 2, estão mostrados os valores de resíduo médio encontrados a partir da cokrigagem para os furos 1 e 5, para os três tipos de variogramas e em algumas profundidades definidas (11.24, 16.7 e 29.16 metros).

Analisando os resíduos médios obtidos a partir da Cokrigagem dos furos 1 e 5, observou-se que a krigagem ordinária apresentou melhores resultados que a krigagem simples na maior parte das estimativas apresentadas, pois retorna menores valores de resíduo. Além disso, destaca-se que os resultados encontrados ao modificar apenas o tipo de variograma utilizado não divergem significativamente.

Figura 2: Resíduo médio encontrado para o processo de cokrigagem - Cenário 1 (Autor)

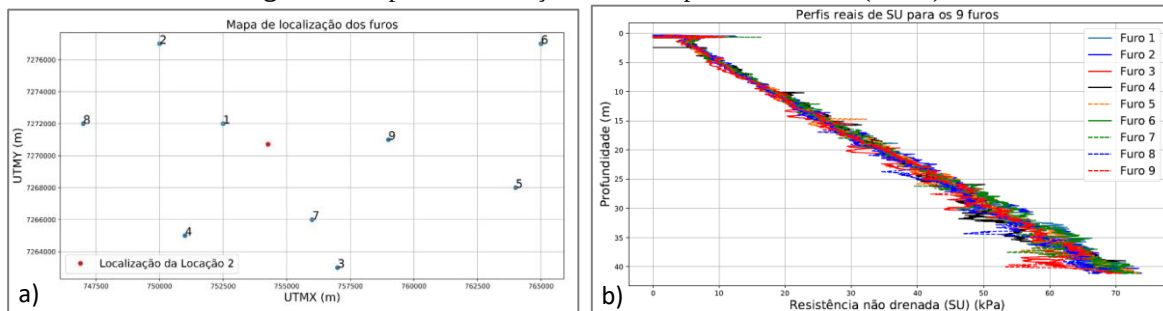
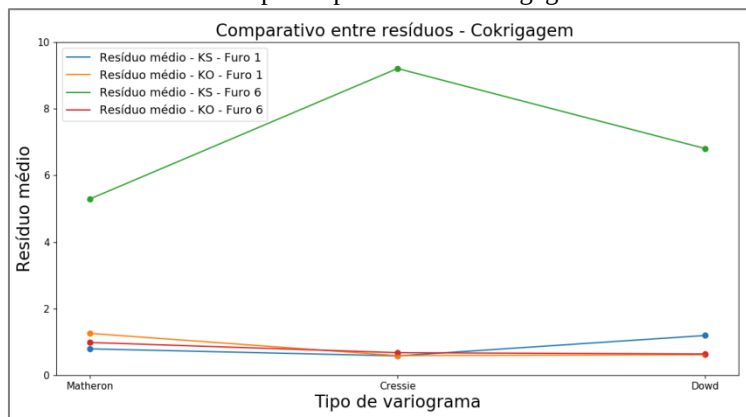
De modo geral, mesmo com uma pequena diferença de resíduo médio, os menores valores de resíduo foram obtidos nos casos em que os variogramas de Dowd e Cressie foram utilizados. O variograma de Dowd para a profundidade de 16,7 metros pode ser observado na Figura 3. Na Tabela 1, estão mostrados os valores de resistência não drenada estimados no ponto correspondente a locação 1, para os três tipos de variogramas e em algumas profundidades.

Figura 3: Variograma de Dowd para profundidade de 16,7 metros - Estimativa de Su na Locação 1 (Autor)**Tabela 1:** Valores estimados de resistência não drenada para a Locação 1

Variograma	Prof. (m)	KS (kPa)	KO (kPa)
Matheron	11,24	11.8889698	11.39500141
	16,7	45.65140711	43.91807744
	29,16	203.46864758	201.87167083
Cressie	11,24	11.85320204	11.39500141
	16,7	45.65140711	43.91807744
	29,16	203.29508652	201.86903569
Dowd	11,24	41.30151723	41.30151657
	16,7	45.65140711	43.91807744
	29,16	203.26783012	201.8625863

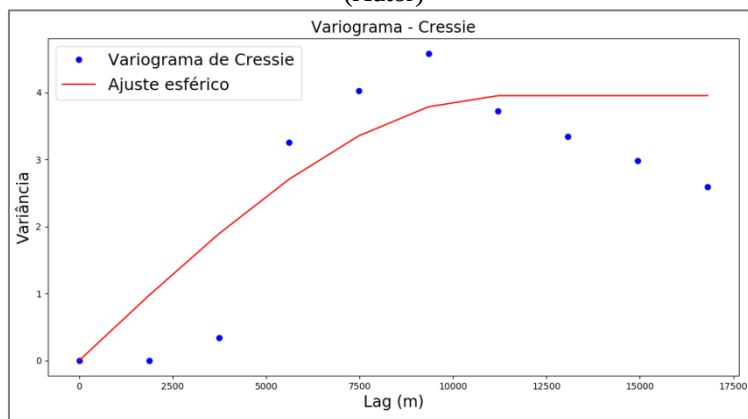
Do mesmo modo, a cokrigagem foi realizada para o cenário 2, o qual corresponde a um campo com características de solo com comportamento mais homogêneo e possui maior quantidade de furos disponíveis para utilização no processo de krigagem. Na Figura 4, encontram-se o mapa de localizações dos pontos considerados (Figura 4a) e os perfis de SU para os nove furos disponíveis (Figura 4b), mostrando a característica homogênea desse campo, pois a resistência não drenada se comporta de forma aproximadamente linear com o aumento da profundidade.

Já na Figura 5 são exibidos os valores de resíduo médio obtidos a partir da cokrigagem para os furos 1 e 6. Nota-se que os valores de resíduos obtidos na etapa de validação para o cenário 2 foram menores que para o cenário 1, isso ocorre devido ao fato de que a variação entre os valores usados de resistência não drenada para esse caso é menor que para o caso anterior, comprovando o comportamento homogêneo da resistência não drenada para esse campo.

Figura 4: Mapa de localização dos furos para o cenário 2 (Autor)**Figura 5:** Resíduo médio encontrado para o processo de cokrigagem do furo 1 – Cenário 2 (Autor)

Além disso, os resultados da análise variando o tipo de variograma também foram semelhantes, destacando-se o resultado para o variograma de Cressie, pois apresentou maior diferença em relação aos demais. Como mostra a Figura 5, o resíduo médio obtido empregando a krigagem ordinária foi menor que para a krigagem simples, quando estudadas as formulações de Matheron e Cressie.

Na Figura 6 pode ser observado o variograma de Cressie utilizado no processo de estimativa da resistência não drenada no ponto da locação 2 e na profundidade de 16,82 metros. Assim como no cenário 1, o ajuste do variograma segue o seu comportamento típico, sendo notável que a partir de certa distância, o aumento do valor do lag não influencia na variância.

Figura 6: Variograma de Cressie correspondente a profundidade de 16,82 metros - Estimativa na Locação 2 (Autor)

Os valores de resistência não drenada do solo estimados para a locação 2, em três profundidades distintas e para os três variogramas, são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2: Valores estimados de resistência não drenada para a Locação 2

Variograma	Prof. (m)	KS (kPa)	KO (kPa)
Matheron	8,82	20.60459118	15.9096844
	16,82	27.53721543	22.88786785
	31,82	68.33417616	55.08818615

Cressie	8,82	20.85341066	15.91969495
	16,82	27.66568276	22.88115576
	31,82	67.90014588	55.09844554
Dowd	8,82	19.8419509	15.89576572
	16,82	26.02849887	22.89214663
	31,82	66.17918852	55.12800007

Desse modo, pode-se dizer que para a maioria das estimativas realizadas usando a técnica de cokrigagem o valor residual entre o parâmetro estimado e seu real valor foi baixo, assim como não há grandes variações no resíduo médio quando variado o tipo de variograma. Somado a isso, percebe-se a grande influência dos dados utilizados no resultado da krigagem, uma vez que uma maior quantidade de dados e amostras com boa qualidade refletem diretamente na estimativa.

Conclusões

As análises realizadas com base nos resultados obtidos para os dois cenários são consideradas satisfatórias. Para o primeiro cenário, o valor residual obtido pela cokrigagem foi maior que para o segundo, indicando o comportamento das propriedades dos campos em questão. Com isso, percebe-se que cada amostra de dados possui suas particularidades, sendo necessário estudos que visem encontrar qual tipo de técnica irá representar melhor o fenômeno estudado antes de fazer a análise em si.

Apesar de apresentar alguns dados a mais que o campo do primeiro cenário, os resultados obtidos a partir das estimativas realizadas para o campo da locação 2 foram mais satisfatórios. Oliver e Webster (2014) sugerem que para a construção do variograma, sejam utilizados de 100 a 150 pontos para que sejam realizadas estimativas dentro do esperado.

Dessa forma, entende-se que a quantidade de dados utilizados é bastante limitada, podendo ser responsável por parcela do erro envolvido. Apesar desse fator limitante, os erros obtidos foram consideravelmente baixos. Além disso, deve-se considerar a existência de erros de medição durante a realização de testes responsáveis pela captação dos dados.

A partir dos resultados alcançados ao fim do presente trabalho e considerando a complexidade e variação das técnicas empregadas, recomenda-se para trabalhos futuros a aplicação de outros tipos de krigagem, como a krigagem universal e krigagem dos resíduos, a fim de verificar sua eficiência e aplicabilidade, deixando a krigagem simples de lado devido a sua simplicidade.

A análise de diferentes tipos de variogramas com base em características específicas dos conjuntos de dados utilizados, assim como o estudo de diferentes tipos de ajustes também correspondem a importantes pontos a serem abordados em trabalhos futuros. Além disso, é de grande interesse a aplicação das técnicas aqui utilizadas em outros conjuntos de dados para solos diferentes, com maior quantidade de dados e níveis variados de heterogeneidade do solo, de forma a adquirir maior segurança acerca da aplicação desses métodos geoestatísticos, assim como proporcionar novas discussões e alternativas de estudo.

Agradecimentos

Ao LCCV, pelo suporte e viabilização da realização do trabalho e à empresa petrolífera parceira, PETROBRAS, pela disponibilização dos dados utilizados, primordiais para o presente estudo.

Referências

- API. *Recommended Practice for Planning , Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design*. [S.l.], 2007. v. 24-WSD, n. December 2000, 242 p.
- CÂMARA, G. et al. *Análise espacial de superfícies por geoestatística linear*. In: . [S.l.: s.n.], 2004. v. 0, p. 44. ISBN 85-7383-260-6.
- CELISO, E.; CAMARGO, G. *Geoestatística: Fundamentos e Aplicações*. In: *Geoprocessamento em Projetos Ambientais*. [S.l.: s.n.], 1998.
- CRESSIE, N.; HAWKINS, D. M. *Robust estimation of the variogram: I. Journal of the International Association for Mathematical Geology*, v. 12, n. 2, p. 115–125, 1980. ISSN 00205958.
- DOWD, P. A. *The Variogram and Kriging: Robust and Resistant Estimators. Geostatistics for Natural Resources Characterization*, p. 91–106, 2013.

FERNANDES, T. T. *Krigagem indicativa para elaboração de mapas probabilísticos em agricultura de precisão*. Dissertação (Mestrado), 2014.

FOLLE, D. *Análise e aplicações da geoestatística no contexto geológico-geotécnico urbano*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

GIACHETI, H. L.; QUEIROZ, C. *O Ensaio de Piezocone e de Minicone na Investigação do Subsolo : Alguns Exemplos de Aplicação*. *Geociências*, v. 23, n. n. 1/2, p. 89–103, 2004. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/106887/ISSN1980-900X-2004-23-1-89-103.pdf?sequence=1>>.

GUIMARÃES, E. C. *Geoestatística Básica e Aplicada*. UFU/FAMAT, 2004.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *Applied geostatistics*. [S.l.: s.n.], 1989. v. 28. 28–0304–28–0304 p. ISSN 0009-4978.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. *O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas*. *Encontro Nacional de Estudos Populacionais*, p. 22, 2006.

KRIGE, D. G. *Journal of the Chemical Metallurgical & Mining Society of South Africa*. *Journal of the Chemical Metallurgical & Society of South Mining Africa*, v. 52, n. 6, p. 119–139, 1951. Disponível em: <<http://journals.co.za/content/saimm/52/6/AJA0038223X>>.

MATHERON, G. *Principles of geostatistics*. *Economic Geology*, v. 58, n. 8, p. 1246–1266, dec 1963. ISSN 1554-0774. Disponível em: <<http://pubs.geoscienceworld.org/economicgeology/article/58/8/1246/17275/Principles-of-geostatistics>>.

OLEA, R. A. *Systematic sampling of spatial functions*. Kansas Geological Survey, 1984.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. *A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging*. Catena, Elsevier B.V., v. 113, p. 56–69, 2014. ISSN 03418162. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>>.

SANTOS, A. R. D. *Análise do colapso de telas utilizadas em sistemas de contenção de areia em poços horizontais*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO.

SIMWORX. *MANUAL SIMCON v0*. [S.l.], 2015.