

**USO DA IMAGEM SPOT NO AUXILIO DO ESTUDO GEOESTATÍSTICO PARA  
CARACTERIZAÇÃO DO SUBSOLO  
DO MUNICIPIO DE CAMPOS DOS GOYTACAZES**

RAIMUNDO NONATO SILVA FARIAS<sup>1</sup>  
FERNANDO SABOYA DE ALBUQUERQUE JÚNIOR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>**UENF** - Universidade Estadual do Norte Fluminense  
LECIV – Laboratório de engenharia civil  
Av. Alberto lamego 2000 – Parque Califórnia – 28016-810 – Campos – RJ – Brasil  
nonato@uenf.br, saboya@uenf.br

**Abstract.** This present paper intends to study the distribution of the soft clay layer, on the south of the Municipal District of Campos dos Goytacazes/RJ, regarding layer thickness, depth and N<sub>spt</sub>. The software used for performing geo-statistical analysis was the Geovisual Sistem to trace and model the variograms. The total area studied involved about 9 km<sup>2</sup> where 92 SPT bore logs were carried out. These data were obtained from database belonging to civil engineering companies in Campos – RJ. An estimation of initial and final depth, thickness and N<sub>spt</sub> value of the soft clay layers is done with the range of the variograms.

**Keywords:** geo-statistical, variograms, clay layer.

## 1. INTRODUÇÃO

Solos e rochas, dos quais resultam as propriedades geotécnicas, constituem-se em materiais de elevada heterogeneidade e conforme a escala de mapeamento a ser adotada, a hipótese de classificação homogênea pode se revelar totalmente inadequada.

Este importante aspecto torna-se mais relevante quando se deseja quantificar as propriedades dos solos ou rochas, sem considerar a sua variabilidade natural. Nesses casos, é usual a atribuição de valores numéricos para zonas consideradas homogêneas, as quais não apresentam significados práticos. A variabilidade é considerada por somente um único valor, cuja determinação seguramente envolve julgamentos pessoais ou, ainda, é ignorada, quando a média aritmética ou outro valor médio obtido do conjunto de amostras, são empregados como parâmetros no modelamento dos projetos (Lee et al., 1983).

Por outro lado, Sturaro (1994) cita que a aplicação da estatística clássica está, por razões formais, limitada nas avaliações da variabilidade, pela dispersão dos valores em torno de um valor médio ou de tendência central. Entretanto, a variabilidade de natureza espacial das propriedades físicas, que é resultante de uma formação complexa como solos e rochas, requer um novo conjunto de ferramentas de análises, encontrado atualmente na estatística espacial ou geoestatística.

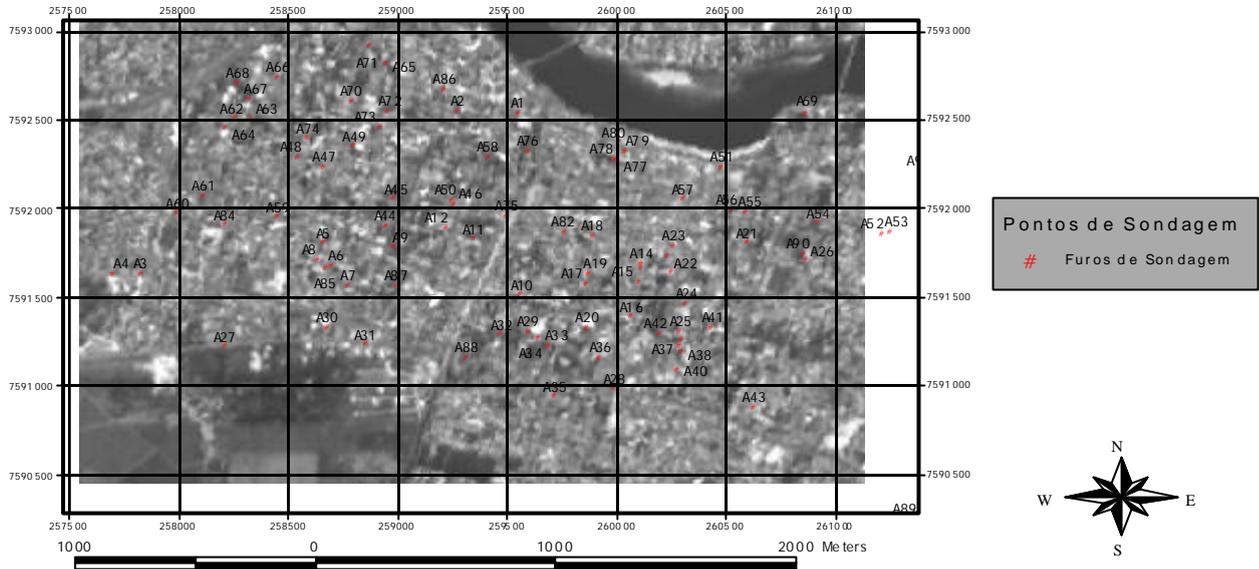
A importância da variabilidade espacial pode ser ressaltada, por exemplo, quando se classificam solos segundo algumas propriedades geotécnicas. Desse modo, dois solos distintos podem possuir a mesma distribuição de frequência com médias e variâncias estatisticamente iguais, porém a variação espacial das propriedades geotécnicas, dentro de cada tipo de solo pode ser completamente diferente.

Na análise geoestatística, a variabilidade espacial é profundamente avaliada e modelada para, em seguida, se empregar técnicas apropriadas de estimativas, cujos resultados serão imagens representativas da distribuição no espaço, das propriedades que estão sendo analisadas.

As propriedades geotécnicas, dadas às suas características enquadram-se num universo de variáveis, cujos valores são resposta a processos naturais, como os geológicos, pedológicos e outros. Desta forma, técnicas como a geoestatística, fundamentadas nos modelos probabilísticos, constituem-se em uma abordagem apropriada para quantificar a aparente aleatoriedade das variáveis geotécnicas, efetuando-se estimativas e avaliando-se incertezas.

Os dados disponíveis para a realização do trabalho são provenientes do banco de dados da carta geotécnica da cidade de Campos/RJ composto por sondagens SPT. Estas sondagens forneceram as cotas iniciais, finais, espessura e spt das camadas de argila mole. O aglomerado de sondagens representando a área escolhida para a análise foram plotadas em uma imagem SPOT previamente tratada e geo-referenciada no software SPRING como é visto na Figura 1. Este procedimento permitiu uma visualização da abrangência dos dados e a sua espacialização. O software utilizado para modelagem geoestatística foi o sistema GEOVISUAL através dele obteve-se o traçado e modelagem dos variogramas.

## Distribuição dos Pontos de Sondagem no Núcleo Urbano de Campos dos Goytacazes



**Figura 1-** localização dos furos de sondagem.

## 2. OBJETIVO

Esse trabalho tem como objetivo principal caracterizar de camada de argila mole, localizada no subsolo do centro da cidade de Campos dos Goytacazes/RJ.

Cadastrar os pontos de sondagem (92) com auxílio de um Sistema de Posicionamento Global (GPS) numa de 9 km<sup>2</sup>.

Utilizar o programa Geovisual para o traçado e modelagem de variogramas.

Utilizar metodologia geoestatística para determinar a distribuição espacial e o mapeamento das variáveis, profundidade inicial, final, espessura e spt da camada de argila mole e fazer uma estimativa a partir do alcance obtido pelos variogramas.

## 3. CONCEITO DE SEMIVARIOGRAMA

Os métodos geoestatísticos conseguem juntar o aspecto espacial (topológico) com o aspecto aleatório (probabilístico). Estes métodos se baseiam na teoria das variáveis regionalizadas, a partir da qual é possível estudar a estrutura espacial e estimar o erro cometido na avaliação levando em conta a posição real das amostras. Surgiu, então, a necessidade de se encontrar novas ferramentas matemáticas que permitam estudar, de modo sintético, as duas características essenciais das variáveis regionalizadas (aspecto aleatório e aspecto espacial), ou seja, extrair da aparente desordem dos dados disponíveis uma imagem da variabilidade dos mesmos e também uma medida da correlação existente entre os valores tomados em dois pontos do espaço. Este é o objetivo da análise estrutural que pode ser alcançada, por exemplo, através do semivariograma que nos permite estudar

a dispersão natural das variáveis regionalizadas. Ele indica o grau de continuidade espacial e nos dá um mínimo necessário de informação sobre o fenômeno a ser estudado. Entretanto, geralmente a modelagem e a interpretação do variograma não são simples. Ambas exigem conhecimentos do fenômeno e da maneira que foi realizada a coleta das amostras para que se possa analisar adequadamente os dados (Valente 1988).

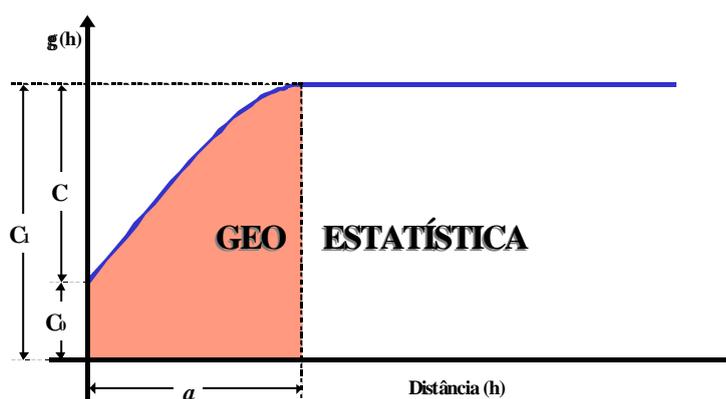
O semivariograma é a pedra fundamental da Geoestatística (Cressie, 1989). A análise variográfica é uma arte, no melhor senso do termo. Antes requer bons instrumentos, como neste caso, um bom programa interativo; mas também experiência e habilidade para sintetizar e, às vezes, ir além dos dados (Journel, 1988).

Segundo Diniz (1997), o variograma é uma curva que representa o grau de continuidade de uma variável regionalizada. Em termos gerais, o variograma é uma função crescente com a distância  $h$ , desde que, em média, quanto maior a distância que ambas as amostras estiverem uma da outra, maiores serão as diferenças entre os seus valores. Esta afirmação fornece um conceito preciso da zona de influência de uma amostra.

A determinação do variograma é o primeiro passo no procedimento de uma estimativa através da Geoestatística e pode ser considerado como o passo mais importante, porque o modelo variográfico escolhido será utilizado através de todo o processo de estimação e influirá em todos os resultados e conclusões (Guerra, 1988).

Desta maneira, o alcance  $a$ , é a linha divisória para a aplicação de Geoestatística ou Estatística Clássica, e por isso o cálculo do semivariograma deveria ser feito rotineiramente para dados de campo para garantir as hipóteses estatísticas sob as quais serão analisados.

Antes de se prosseguir com os estudos, serão definidos os parâmetros e características do semivariograma, com base no esquema mostrado na Figura 2.



**Figura 2.** Esquema do semivariograma experimental (adaptado de GUERRA, 1988).

Esquemáticamente a Figura 2 representa:

Alcance ( $a$ ): À medida que a distância entre os pares aumenta, a variabilidade tenderá a aumentar até atingir um determinado nível. A distância onde o variograma atinge este nível é denominado de alcance ou “range”.

Patamar ( $C$ ): Representa o nível de variabilidade onde o variograma se estabiliza. Este patamar deve ser teoricamente igual à variância amostral. Este parâmetro é também denominado “Sill”.

Variância Espacial ( $C_1$ ): Representa as diferenças espaciais entre os valores de uma variável tomada em dois pontos separados por distâncias cada vez maiores.

Efeito Pepita ( $C_0$ ): Para distância igual a zero ( $h=0$ ), o variograma deveria apresentar variabilidade nula. Entretanto, vários fatores como erros de amostragens, erros de medidas ou ainda microrregionalizações da variável em análise, causam uma descontinuidade na origem do variograma, denominado de efeito pepita (“nugget effect”).

O semivariograma é, por definição,

$$g(h) = \frac{1}{2} E[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

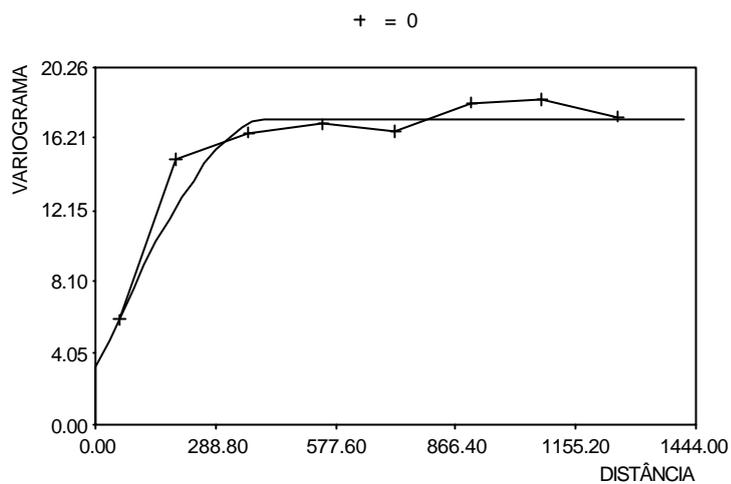
E pode ser estimado através de

$$g^*(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

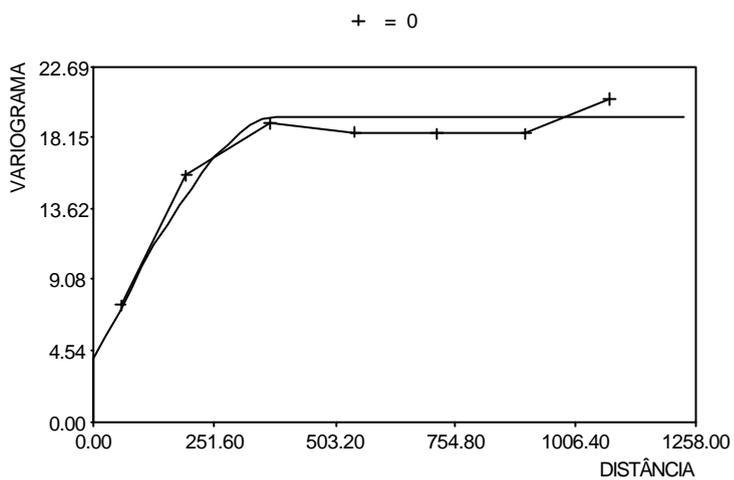
onde  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i+h)$ , separados por um vetor  $h$ . O gráfico de  $g^*(h)$  “versus” os valores correspondentes de  $h$ , chamado semivariograma, é uma função do vetor  $h$ , e portanto depende da magnitude e direção de  $h$ . Quando o gráfico do semivariograma é idêntico para qualquer direção, ele é chamado isotrópico e representa uma situação bem mais simples do que quando é anisotrópico, isto é, muda de forma nas diferentes direções. É óbvio que isto depende muito da propriedade em estudo e das dimensões da área amostrada.

#### 4. ANÁLISE DOS VARIOGRAMAS

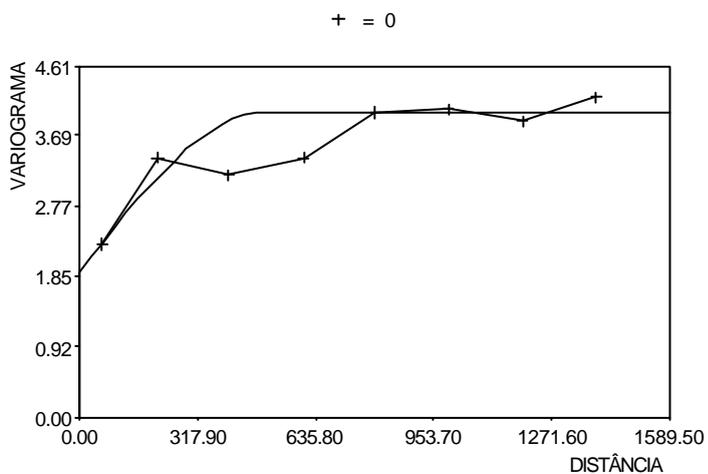
A partir do arquivo contendo as amostras da região foram traçados variogramas experimentais que melhor expressassem as correlações espaciais existentes. Assim, obteve-se os gráficos das Figuras 3, 4, 5 e 6. Os passos utilizados foram de 180m ( $Dh = 90m$ ), 180m ( $Dh = 90m$ ), 180m ( $Dh = 90m$ ) e 180m ( $Dh = 90m$ ), respectivamente para a profundidade inicial e final, espessura da camada e SPT. A tolerância angular foi de 90° graus para os quatros variogramas.



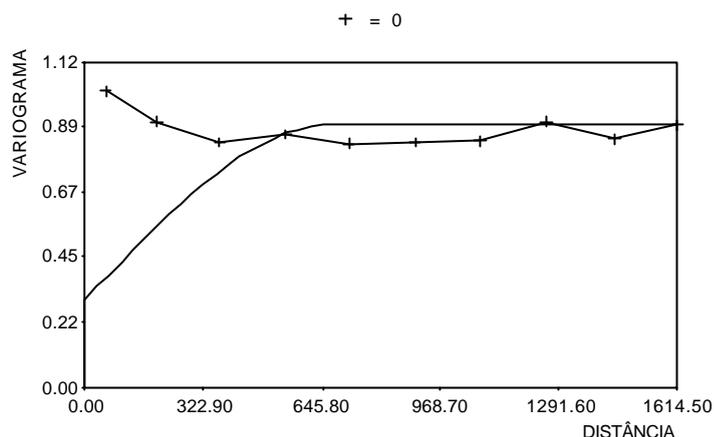
**Figura 3** – Variograma experimental e teórico da camada inicial



**Figura 4** – Variograma experimental e teórico da camada final



**Figura 5** – Variograma experimental e teórico da espessura da camada



**Figura 6** – Variograma experimental e teórico do SPT

Após a construção dos variogramas experimentais, realizou-se o processo de modelagem. A tabela 1 indica os parâmetros estruturais dos modelos construídos para as variáveis em estudo.

**Tabela 1** – Parâmetros para o traçado dos modelos teóricos de variogramas.

Parâmetro	Região de estudo			
	Camada inicial	Camada final	espessura	SPT
<b>modelo</b>	Esférico			
<b>C<sub>0</sub></b>	3.3	4.0	1.9	0.3
<b>C1</b>	14.5	15.5	2.1	0.6
<b>Alcance</b> (metros)	450	390	500	670

Os modelos variográfico modelados estão apresentados também nas Figuras 3 a 6. a presença do efeito pepita ( $C_0$ ) nos variogramas corresponde a uma resposta do método à diversos tipos de erros que possam existir nos dados. O ensaio de abtenção do SPT está sujeito a muitos erros, e o reflexo destes possíveis erros, no variograma, é presença deste efeito pepita.

O variograma para camada inicial (Figura 3) apresenta uma estrutura nítida partindo de  $C_0$  e a variabilidade aumenta linearmente até uma distância de 450 metros. Á partir deste valor a variabilidade passa a ter comportamento aleatório e a estrutura variográfica é interrompida com valor  $\gamma$  de 14.5. Isso indica que, para a variável em questão, existe uma correlação espacial entre os valores da profundidade inicial até uma distância de 450 metros entre as amostras.

Comportamento parecido também pode ser notado nos variogramas das variáveis, profundidade final, espessura da camada e SPT e seus valores aumentam até as distâncias de 390, 500 e 670 metros respectivamente, com patamares atingido valores  $\gamma$  de 15.5, 2.1 e 0.6.

## 5. CONCLUSÕES

O uso da imagem SPOT foi de grande valia, pois permitiu visualizar a distribuição espacial dos pontos de sondagem da área de estudo favorecendo uma análise preliminar da distribuição dos pontos. Com essa imagem foi possível analisar a densidade e saber que era possível utilizar o método geoestatístico com o número de sondagens obtidas.

O estudo realizado indica que o traçado de variogramas pode ser uma ferramenta útil no estudo de perfis de solo, quando se dispõe de informação suficiente como um grande conjunto de sondagens.

A análise estrutural do comportamento da camada de argila mole inicial, final, espessura da camada de argila mole e SPT mostram alcance de 450, 390, 670 metros 55 m. Estes alcances indicam a distância dentro da qual as variáveis são estruturadas, apresentando autocorrelação espacial.

O emprego da modelagem, aliado à capacidade da geoestatística em estabelecer estimativas consistentes e determinar a incerteza associada, desde que criteriosamente fundamentadas nas bases da teoria e com conhecimento da metodologia, formaram uma técnica que se adaptou-se muito satisfatoriamente ao emprego em engenharia geotécnica.

Apesar disso, não se pretende sugerir a substituição dos ensaios “in situ”, pois o SPT é um ensaio de baixo custo e fácil obtenção. A principal finalidade dos mapas geoestatísticos (ou probabilísticos) que possam funcionar como um guia confiável de orientação e subsídios aos profissionais ligados à engenharia geotécnica, para que estes possam selecionar com maior facilidade as áreas mais qualificadas a determinados projetos ou obras de engenharia.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CRESSIE, N. Geostatistic. *The American Statistician*, v.43, n.4, p.197-202, 1989.
- GUERRA. P.A.G. *Geoestatística operacional*. Ministério das Minas e Energia, 1988. 145p.
- JOURNAL, A.G. *Geostatistic for environmental sciences*. Las Vegas: Report of United States Environmental Protection Agency, 1988.
- LEE, I.K; WHITE W.; INCLES, O.G. *Geotechnical engineering*. Boston: Pitman, 1983. 508p.
- STURARO, J.R. *Mapeamento geoestatístico de propriedades geológicas - geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento*. São Carlos. 1994, 172p. Tese (Doutorado em Geoestatística) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- VALENTE, J.M.G.P. *Geomatemática - lições de Geoestatística*. 2.ed. Ouro Preto: Fundação Gorceix, 1988. 8v. 2.210p.