

Mapeamento geoestatístico de parâmetros obtidos em sondagens de simples reconhecimento na cidade de Santa Maria – RS – Brasil

Geostatistical mapping of parameters obtained in surveys of simple recognition in the central portion of city of Santa Maria – RS – Brazil

Ana Paula Dal'Asta¹
Carlos Alberto da Fonseca Pires^{2(*)}
Rinaldo José Barbosa Pinheiro³

Resumo

A geoestatística constitui um conjunto de ferramentas amplamente utilizadas para a análise espacial de dados das ciências da terra, especialmente no que tange à predição de valores para pontos não amostrados. Dispondo de boletins de sondagens de simples reconhecimento realizados na cidade de Santa Maria, é possível, utilizando-se de técnicas de geoestatísticas, prever valores de Standard Penetration Test (SPT) para pontos desconhecidos (não amostrados) e, com isso, obter superfícies contínuas. Assim, o presente trabalho teve por objetivo localizar e analisar a distribuição e o comportamento dos parâmetros cota da boca da sondagem e o impenetrável à percussão, obtidos em boletins de sondagens SPT, na porção central da cidade de Santa Maria (RS). Foram utilizados dados de 77 SPT, sendo 33 amostras obtidas na Formação Santa Maria exceto arenito basal e 43 amostras na Formação Caturrita, para análise geoestatística. A variabilidade espacial foi caracterizada pela análise variográfica, onde foi identificada a anisotropia e a dependência espacial das amostras. A variável impenetrável à percussão apresentou maior variabilidade, sendo o modelo esférico o que melhor se ajusta ao semivariograma experimental. Para a variável altitude da boca da sondagem, o modelo mais adequado foi o gaussiano, que através da validação do modelo, mostrou acuracidade no ajuste, com coeficientes de correlação de 87,1%, para a Formação Santa Maria exceto Arenito Basal e 94,7%, na Formação Caturrita.

Palavras-chave: mapeamento geoestatístico; análise espacial; SPT; Geoestatística.

1 MSc.; Geógrafa; Doutoranda em Sensoriamento Remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE; Endereço: Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim Granja, Caixa Postal, 515, CEP: 12227-010, São José dos Campos, São Paulo, Brasil; E-mail: anapdalasta@dpi.inpe.br

2 Dr.; Geólogo; Professor do Departamento de Geociências do Centro de Ciências Naturais e Exatas da Universidade Federal de Santa Maria, UFSM; Endereço: Avenida Roraima, 1000, Bairro Camobi, Cidade Universitária, Prédio 17, sala 1113B, CEP: 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil; E-mail: calpires@terra.com.br

3 Dr.; Engenheiro Civil; Professor da Universidade Federal de Santa Maria, UFSM; Endereço: Rua 8, casa 100, Parque Residencial Alto da Colina, Bairro Camobi, CEP: 97110-790, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil; E-mail: rinaldo@ufsm.br

Recebido para publicação em 13/11/2012 e aceito em 01/09/2013

Ambiência Guarapuava (PR) v.9 n.3 p. 545 - 562 Set./Dez. 2013 ISSN 1808 - 0251
DOI: 10.5935/ambiencia.2013.03.07

Abstract

Geostatistics is a set of widely used tools for spatial data analysis of earth sciences, especially regarding to the prediction of values for non-sampled points. By having bulletins surveys of simple reconnaissance made in the city of Santa Maria it is possible, using geostatistical techniques, to predict values of Standard Penetration Test (SPT) to points unknown (not sampled) and thus obtain continuous surfaces. Thus, the present study aimed to locate and analyze the distribution and the behavior of parameters quota mouth drilling and the impenetrable to percussion, obtained in bulletins polls SPT in the central part of the city of Santa Maria (RS). It was utilized data from 77 SPT, being 33 samples obtained from the Santa Maria Formation except basal sandstone and 43 samples in the Caturrita Formation, for geostatistical analysis. The spatial variability was characterized by the variogram analysis, where we identified the anisotropy and spatial dependence of the samples. The variable impenetrable to percussion showed greater variability with the spherical model which best fits the semivariogram experiment. For the variable altitude of the mouth of the catheter, the most appropriate model was the Gaussian, which through the validation of the model showed accuracy in adjustment, with correlation coefficients of 87.1% for the Santa Maria Formation except Basal Sandstone and 94, 7% in the Caturrita Formation.

Key words: geostatistical mapping; spatial analysis; SPT; Geostatistics.

Introdução

A expansão urbana sem critérios técnicos adequados, associada à segregação sócio-espacial na sociedade capitalista, impulsionou a ocupação desordenada de áreas impróprias ao uso urbano. Esse processo de ocupação do espaço, sem o conhecimento das propriedades geológico-geotécnicas do substrato, tem provocado a perda da qualidade de vida no ambiente urbano, deflagrando ou intensificando a atuação dos processos erosivos, entre outros. Convém destacar que as sondagens de simples reconhecimento ou sondagens Standard Penetration Test

(SPT) aliadas à geologia de determinada área são de extrema importância na definição dos locais apropriados à instalação e ao dimensionamento de obras de engenharia. Entretanto, grande parte das edificações é construída sem a realização de qualquer tipo de investigação do subsolo, principalmente em áreas periféricas, marcadas pela ocupação horizontalizada, onde são raras as ocorrências de sondagens SPT.

Com base nos dados de SPT existentes na cidade de Santa Maria (RS), é possível, com auxílio de técnicas de geoestatística, prever valores de SPT para pontos desconhecidos (não amostrados), e

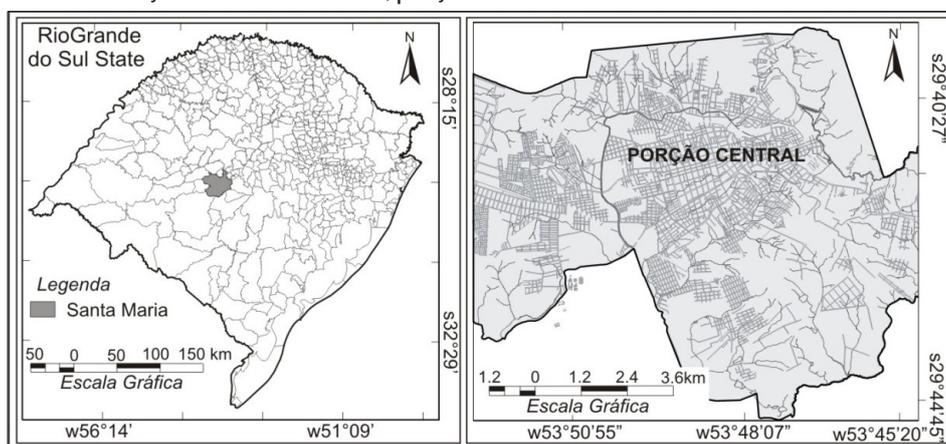
com isso, obter superfícies contínuas a partir de ensaios pontuais realizados.

Este trabalho teve por objetivo localizar e analisar, através da krigagem, a distribuição e o comportamento dos parâmetros cota da boca do furo da sondagem (altitude) e o impenetrável à percussão, obtidos em sondagens de simples reconhecimento – SPT, na porção central da cidade de Santa Maria, e definir, com estimativas, as linhas de isovalores dessas variáveis.

Caracterização da área de estudo

A cidade de Santa Maria localiza-se na porção central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, entre as coordenadas $53^{\circ}53'21,54''$ e $53^{\circ}39'56,56''$ de longitude Oeste e $29^{\circ}44'52,93''$ e $29^{\circ}39'18,66''$ de latitude Sul, abrangendo uma área total de 11.862 ha, conforme a figura 1. Os limites da área de estudo compreendem a porção central da cidade de Santa Maria.

Figura 1 - Localização da área de estudo, porção central da cidade de Santa Maria



Fonte: Autores (2012).

A cidade de Santa Maria abrange dois compartimentos geológico-geomorfológicos: o Rebordo do Planalto Sul Rio-grandense e a Depressão Periférica. O primeiro compartimento é constituído, principalmente, por rochas da Formação Serra Geral, ocupa a porção norte da cidade e constitui-se no compartimento de maior energia do relevo, cuja morfologia de montanhas e vales resultou de processos morfogenéticos de clima seco (no passado) e clima úmido (no presente), associados à intensa erosão fluvial, à presença de falhas e à erosão diferencial nas rochas vulcânicas e sedimentares.

A Depressão Periférica abrange a maior área da cidade e caracteriza-se, geomorfologicamente, por coxilhas (colinas, colinas tabulares e planícies aluviais), sendo constituída por sedimentos mesozóicos da Bacia Sedimentar do Paraná (MACIEL FILHO, 1990). Na área de transição entre esses dois compartimentos, tem-se a presença de morros testemunhos, os quais se configuram como vetores do adensamento populacional, uma vez que, atualmente, a ocupação é incipiente.

Em termos de ocupação, a cidade de Santa Maria teve seu núcleo inicial assentado

sobre as colinas da Depressão Periférica, entretanto, a expansão urbana, controlada pela especulação fundiária e imobiliária, impulsionou a ocupação de áreas planas correspondentes às planícies aluviais dos Arroios Cadena e Vacacaí-Mirim. Ressalta-se, também, o avanço da ocupação em direção ao Rebordo do Planalto, área inadequada devido à elevada energia do relevo onde predomina declividade superior a 15% (MACIEL FILHO, 1990).

Espacialmente, as ocupações nas áreas periféricas representam um significativo crescimento da cidade, mas se diferem do centro, pelo uso mais horizontalizado e pelo menor adensamento populacional. Essa forma diferenciada de ocupação do espaço urbano reflete na maior ocorrência de investigações do subsolo no centro da cidade, uma vez que nas áreas marginais ao centro, geralmente, as edificações são de pequenas moradias.

O substrato da área de estudo é formado por rochas sedimentares e, em menor quantidade, por rochas vulcânicas. Conforme Maciel Filho (1990) a geologia da área urbanizada de Santa Maria, está, predominantemente, representada pelas Formações Santa Maria e Caturrita, formações com maior número de ocorrência de sondagens SPT. A Formação Santa Maria é subdividida nos membros Passo das Tropas e Alemoa, com suas seções tipo localizadas, respectivamente, na rodovia BR-392, junto ao arroio Passo das Tropas, e nas ravinas a sudeste do entroncamento entre a BR-158 e a RS-509 (“Trevo do Castelinho”). A Formação Caturrita tem sua seção-tipo junto ao viaduto da rodovia Santa Maria - São Martinho da Serra, à margem da ferrovia (Figura 2).

A Formação Caturrita é de origem fluvial sendo composta por duas fácies: uma arenosa e outra argilosa e síltica. O arenito basal geralmente é mais grosseiro e com menor teor argiloso. O substrato rochoso pode ser classificado como rocha branda ou solo sobreconsolidado (MACIEL FILHO, 1990).

A unidade definida por Maciel Filho (1990), como Santa Maria exceto arenito basal é composta por uma sequência de siltitos argilosos e arenitos argilosos, e segue, concordante e gradualmente, uma argila siltosa ou lamito. Em termos geotécnicos, pode ser classificada como rocha evolutiva ou também solo pré-adensado.

Sondagens SPT

As sondagens de simples reconhecimento, em áreas urbanas, constituem uma técnica que possibilita identificar as potencialidades do substrato e se propõem, a partir de verificações *in loco*, identificar a capacidade e relação custo benefício de qualquer obra de ocupação. Essas sondagens possuem um vasto emprego, e, no Brasil, são definidas como um tipo de prospecção do subsolo que visa determinar o perfil estratigráfico, o nível de água e as características de resistência dos solos, através de ensaios de simples reconhecimento (BORTOLUCCI, 1983, citado por STURARO, 1993). Nessas sondagens, são realizados os Ensaios de Penetração Padronizados (SPT), para cada metro perfurado, cuja execução foi normatizada, no Brasil, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 6484/80. O ensaio de penetração é realizado a cada metro, a partir de um metro de profundidade da sondagem, e consiste na cravação do

barrilete amostrador no solo, através de quedas sucessivas de um martelo de 65 kg, de uma altura de 75 cm. A resistência à penetração (N_{spt}) corresponde ao número de golpes necessários para cravar 30 cm do amostrador padrão, após os primeiros 15 cm, sendo realizado nos últimos 45 cm de cada metro perfurado.

O vasto emprego desse ensaio se deve a inúmeras vantagens, tais como: equipamento simples e robusto; ensaio de fácil execução; facilidade nas amostragens e associados a um número; possível execução em todos os tipos de solos e rochas brandas, acima e abaixo do lençol freático; além de determinar a posição do lençol freático (CLAYTON, 1993; SCHNAID, 2000; STURARO, 1993).

As sondagens SPT fornecem dados quantitativos e qualitativos das características e comportamento do substrato, de grande valia para a construção civil, principalmente ao definir e dimensionar uma fundação, e na obtenção das características geotécnicas (resistência do solo inferida a partir dos valores de SPT, composição do solo, etc.). Esses dados, também, são passíveis de tratamento geoestatístico, para analisar a variabilidade espacial das amostras e estimar o comportamento para locais não amostrados.

Geoestatística

A geoestatística compreende um conjunto de técnicas estatísticas utilizadas para analisar a variabilidade espacial e estimar valores de uma variável distribuídos e correlacionados no espaço ou no tempo. No entendimento de Soares (2000), a geoestatística tem por objeto a caracterização da dispersão espacial e espaço-temporal das grandezas que definem a quantidade e a qualidade de recursos naturais ou de outros fenômenos espaciais nos quais os

atributos manifestam certa estrutura no espaço e/ou no tempo.

Uma das principais características das variáveis correlacionadas espacialmente constitui-se na sua variabilidade espacial, cujo entendimento e modelamento representam a base de toda a análise geoestatística (STURARO; LANDIM, 1996). Nessa análise, a variabilidade espacial é profundamente avaliada e modelada, para, em seguida, empregarem-se técnicas apropriadas de estimativas, cujos resultados serão imagens representativas da distribuição no espaço, das propriedades que estão sendo analisadas (STURARO, 1993).

A análise da dependência espacial é realizada através do ajuste de semivariogramas experimentais e a caracterização da variabilidade espacial, por meio do mapeamento da variabilidade a partir da estimativa, sem tendenciosidade, de dados para locais não amostrados.

O variograma ou semivariograma, como é comumente chamado, constitui uma ferramenta básica de suporte às técnicas de estimativa, uma vez que permite representar, quantitativamente, a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (CAMARGO et al., 2004), além de mostrar as dimensões da zona de influência, aspectos anisotrópicos e presença de eventuais erros de amostragem e ou componente aleatória (STURARO; LANDIM, 1996).

O semivariograma representa a tendência de $\gamma(h)$ (semivariâncias) em relação à h (distância), sendo definido a partir da equação:

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

Onde:

$Y(h)$ é o semivariograma estimado e $N(h)$ é o número de pares de valores medidos, $z(x_i)$ e $z(x_i+h)$, separados pelo vetor

h. Além disso, $Y(h)$ é um estimador não tendencioso do semivariograma para uma função intrínseca.

Além de estimar o grau de dependência espacial entre as amostras, o semivariograma, também, define os parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados, através da krigagem. Diferente de outros métodos de interpolação, a krigagem está fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas e fornece em média estimativa não tendenciosa e com variância mínima. Conforme Camargo et al. (2004, p.103) “estimativas não tendenciosas significam que, em média, a diferença entre valores estimados e observados para o mesmo ponto deve ser nula; e variância mínima significa que esses estimadores têm a menor variância entre todos os estimadores não tendenciosos”.

Metodologia

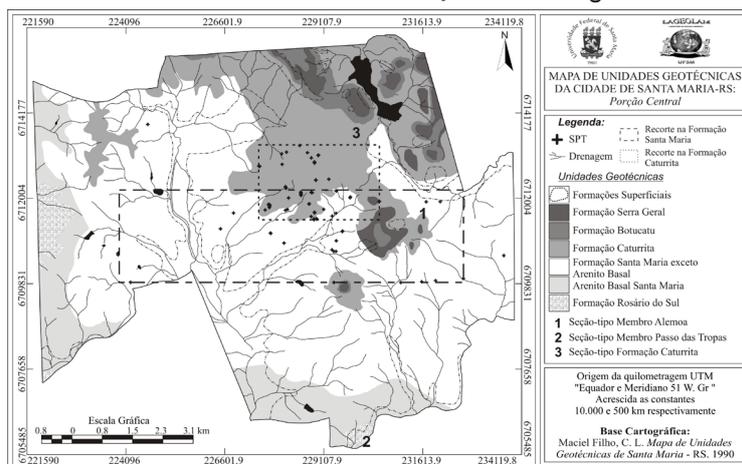
Os procedimentos metodológicos utilizados consistiram no levantamento das sondagens SPT e na análise geoestatística de dados fornecidos pelos relatórios de sondagens realizadas pela empresa GEOCENTRO –

Geologia, Engenharia e Estaqueamento Ltda, na cidade de Santa Maria.

As sondagens foram espacializadas no perímetro urbano de Santa Maria e, devido a maior concentração, foram analisadas apenas as que ocorrem na porção central, num total de 76 ocorrências. Nessa porção da cidade, tem-se um uso mais intenso e verticalizado do solo, conferindo a isso a maior concentração de sondagens realizadas.

Com base na carta de Unidades Geotécnicas da cidade de Santa Maria, na escala 1: 25.000, elaborada por Maciel Filho (1990), que abrange a parte central da cidade, as sondagens foram divididas em grupos, de acordo com a Unidade Geotécnica (Figura 2), e a análise geoestatística ocorreu por Formação, levando-se em conta a representatividade de ocorrência de sondagens. Assim, foram analisadas as que ocorrem na Formação Santa Maria exceto Arenito Basal, 33, e na Formação Caturrita, 43, as duas formações mais representativas da área urbana de Santa Maria, sendo a cota do furo de sondagem e o impenetrável à percussão ou limite da sondagem as variáveis, obtidas nos relatórios de sondagens SPT.

Figura 2 - Mapa de Unidades Geotécnicas com localização das sondagens SPT



Fonte: Maciel Filho (1990).

A amostragem das sondagens SPT é distribuída irregularmente no terreno, abrangendo uma área de 8.770 x 4.105 m na Formação Santa Maria exceto arenito basal, e de 3.123 x 1.980 na Formação Caturrita, áreas estas utilizadas para o adensamento da malha de pontos.

Os dados foram dispostos em planilhas, contendo o número do furo da sondagem, as coordenadas X e Y e as variáveis para análise. Esses dados foram utilizados na análise estatística descritiva dos dados, modelagem geoestatística e no mapeamento das variáveis.

A análise estatística descritiva é realizada para caracterizar e descrever estatisticamente o comportamento geral das variáveis em análise, sendo média, mediana, desvio padrão, valor máximo e mínimo, quartil inferior e superior, amplitude total, coeficiente de assimetria e de curtose, coeficiente de variação e variância. A média corresponde à soma de todas as observações divididas pelo número de observações e a mediana corresponde ao elemento que ocupa o valor central da distribuição, dividindo-a em duas partes. O quartil inferior representa a primeira quarta parte dos dados e o quartil superior ocupa uma posição intermediária entre a mediana e o valor máximo da variável. A variância é definida como a soma das diferenças ao quadrado, dividida pelo número de observações (N), e a sua raiz quadrada corresponde ao desvio padrão. O coeficiente de variação é a percentagem de variação de uma amostra, sendo o quociente entre o desvio padrão e a média (PIRES, 2002). O coeficiente de assimetria e de curtose são medidas de forma. O primeiro representa o grau de deformação de uma distribuição em relação à curva normal e o coeficiente de curtose, corresponde ao grau de achatamento da curva de distribuição de probabilidade.

Para essas análises, utilizou-se o SIG INPE© Spring 4.2 (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cujas funções de geoestatística utilizam o GSLIB (*Geostatistical Software Library*). O GSLIB 90, com o auxílio dos aplicativos *scatterplot.par* e *escatterplot.exe* foi utilizado para determinar o coeficiente de correlação e a acuracidade do modelo utilizado para a estimativa, utilizando a análise bivariada entre os valores observados versus os estimados. A análise bivariada é o procedimento estatístico utilizado para comparar duas distribuições, de maneira a medir seu grau de associação, através do índice de correlação.

As etapas para o modelamento geoestatístico das variáveis, no Spring, consistiram em: análise exploratória, onde foi realizada a estatística descritiva através da análise univariada de cada variável analisada; geração do semivariograma experimental, através da definição dos parâmetros e a identificação dos eixos de anisotropia com a utilização do semivariograma experimental unidirecional; ajuste do semivariograma, correspondente à definição do modelo teórico que melhor se ajusta ao semivariograma experimental; validação do modelo de ajuste, o qual envolve a re-estimação dos valores conhecidos através dos parâmetros ajustados ao modelo do semivariograma; e, por fim, krigagem, onde, após a definição do modelo de semivariograma, foram realizadas interpolações, usando uma malha de 20 x 20 m, sendo as estimativas executadas através da krigagem ordinária. Os arquivos resultantes do processo de interpolação

por krigagem foram exportados para o *software* Surfer® versão 8.0, utilizado para a elaboração do mapeamento, através da geração de isolinhas, com o comportamento das variáveis analisadas. Para a edição final dos produtos, utilizou-se o *software* Corel Draw 12 © 2010 Corel Corporation.

Resultados

Dispondo dos boletins de ocorrência de sondagens, foram espacializados 83 furos de sondagens SPT, na porção central da cidade de Santa Maria, dos quais dois ocorrem no Arenito Basal Santa Maria, cinco em formações superficiais, 43 na Formação Caturrita e 33 ocorrem na Formação Santa Maria exceto arenito basal (Figura 2), conforme definições propostas por Maciel Filho (1990). Ressalta-se que os pontos de cada sondagem foram espacializados a partir das coordenadas UTM coletadas *in loco* com *Global Positioning System* (GPS) de navegação. O erro máximo desse equipamento é de 15 m, considerado inexpressivo uma vez que, na escala gráfica do mapa, esse erro representa 0,16 mm.

Estatísticas descritivas

Foram analisadas como variáveis a cota do furo da sondagem e o impenetrável à percussão.

Variável cota da boca do furo sondagem

Através das estatísticas descritivas, apresentadas no quadro 1, pode-se observar que em ambas as formações a variável não apresenta grande variabilidade em torno

da média. Os valores muito próximos das medidas de tendência central - média e mediana, e que estão na metade entre os valores mínimo e máximo, além dos valores relativamente baixos do coeficiente de variação (9% e 10%), demonstram essa tendência.

Analisando a amplitude da distribuição, observa-se que na Formação Caturrita é de, aproximadamente, 43 m, com altitude média de 130 m, e na Santa Maria exceto Arenito Basal é de 40 m e altitude média de 110 m. A diferença altimétrica decorre baixa declividade e amplitude altimétrica, constituindo-se uma unidade de baixa energia do relevo, uma vez que as amostras estão localizadas na morfologia da Depressão Periférica, que é caracterizada pela presença de colinas com vertentes amplas.

Nessa linha de análise, Maciel Filho (1977) coloca que a Formação Santa Maria exceto arenito basal, frequentemente, apresenta-se na encosta de morros, cujos topos são mantidos pela Formação Caturrita. Quando os morros, também denominados colinas, serem mantidos pelas camadas da Formação Santa Maria, estes são de pequena altura e com vertentes muito suaves.

Devido à composição litológica, composta por duas fácies: uma arenosa e a outra argilosa e siltica, que possuem resistências diferentes, a Formação Caturrita é responsável pelo capeamento de plataformas convexas com vertentes, embora suaves, mais abruptas que as da Formação Santa Maria e representantes de um primeiro degrau para a subida do planalto (MACIEL FILHO, 1977). Em uma dessas plataformas, encontra-se o centro da cidade de Santa Maria.

Quadro 1 - Estatísticas descritivas da variável cota da boca do furo da sondagem (altitude)

Formação	Santa Maria exceto arenito basal	Caturrita
Estatísticas		
Número de Pontos	33	43
Média	110,015	129,8
Variância	112,067	180,621
Desvio Padrão	10,586	13,439
Coefficiente de Variação	0,095	0,103
Coefficiente de Assimetria	0,403	0,173
Coefficiente de Curtose	2,315	1,749
Valor Mínimo	90	109
Quartil Inferior	101	119,5
Mediana	110	130
Quartil Superior	119	142,5
Valor Máximo	130	153

Fonte: Autores (2012).

Variável Impenetrável à percussão

A variável impenetrável à percussão corresponde à máxima profundidade atingida pelo amostrador padrão durante a realização de uma sondagem, representando, praticamente, a espessura do material inconsolidado (material de alteração).

A distribuição dessa variável em ambas as formações apresenta assimetria negativa, indicando que os valores menores que a média aritmética se afastam mais dessa medida. As medidas de tendência central, média e a mediana, conforme o quadro 2, também indicam que a distribuição não é simétrica, uma vez que não estão na metade entre os valores mínimo e máximo, demonstrando a presença de valores *outliers*.

A partir do coeficiente de variação (Quadro 2), nota-se que a variabilidade das amostras em torno da média é maior na Formação Caturrita, cerca de 29%, em relação a Santa Maria exceto arenito basal, aproximadamente 27%, embora a amplitude seja menor, 5,96 m para 7,6 m, na Santa Maria. Isso se deve ao fato de na Formação Santa Maria exceto arenito basal as frequências estarem melhor distribuídas nos intervalos de classes, seguindo a tendência da curva de distribuição normal. No entanto, a variabilidade média em torno da média é menor na Caturrita, dado os valores menores do desvio padrão e da variância, isto é, os dados flutuam menos em torno da média.

Quadro 2 - Estatísticas descritivas da variável impenetrável à percussão

Formação	Santa Maria exceto arenito basal	Caturrita	Santa Maria exceto arenito basal/ sem outliers
Estatísticas			
Número de Pontos	33	43	25
Média	7,073	5,66	7,318
Variância	3,681	2,824	1,521
Desvio Padrão	1,918	1,68	1,233
Coefficiente de Variação	0,271	0,296	0,168
Coefficiente de Assimetria	-0,227	-0,262	-0,302
Coefficiente de Curtose	2,329	1,846	2,423
Valor Mínimo	3,00	218	4,75
Quartil Inferior	6,23	4,18	6,50
Mediana	7,25	6,00	725
Quartil Superior	8,21	7,14	8,149
Valor Máximo	10,60	8,15	9,44

Fonte: Autores (2012).

Confirmada a presença de valores *outliers* através das estatísticas descritivas, especialmente na Formação Santa Maria exceto arenito basal, estes foram descartados gerando um novo conjunto de dados para essa formação, conforme a terceira coluna do quadro 2. Essas amostras foram desconsideradas, a fim de não prejudicar a estimativa na população.

Os valores superiores à média mais um desvio padrão e inferiores a média menos um desvio padrão foram considerados extremos ou *outliers*, porém foram removidos do conjunto original apenas os valores mais altos e mais baixos, a fim de não empobrecer o conjunto amostral e torná-lo mal distribuído na região de análise.

Com a remoção dos valores considerados discrepantes, o número de observações passou de 33 para 25 e possibilitou a aproximação dos valores de média e mediana, bem como na redução da variância e do coeficiente de variação, apresentando menor variabilidade em torno da média aritmética.

Modelagem Geoestatística

Após a análise da estatística descritiva das variáveis, empregaram-se as técnicas da geoestatística, a fim de identificar e avaliar a estrutura espacial das variáveis e, a partir de observações pontuais, gerar superfícies contínuas com o comportamento de cada variável.

Variável cota da boca do furo da sondagem

O uso da análise variográfica permitiu identificar o comportamento anisotrópico da variável cota da boca do furo da sondagem nas duas formações analisadas, sendo os semivariogramas experimentais ajustados nas direções que representam a maior continuidade amostral: 0°, para a Formação Santa Maria exceto Arenito Basal, e 60°, para a Formação Caturrita. Na primeira formação, o espaço amostral foi dividido em 8 *lags*, distanciados 400 m e com tolerância de 200 m. Para a Formação Caturrita também foram utilizados

8 lags, porém, com distância e tolerância de 200 m. O número de lags bem como o espaçamento de cada lag correspondem à distância *h* do semivariograma.

Tendo em vista que a malha de sondagens apresenta amostragem irregular foram empregados ângulos de tolerância na pesquisa de pares de pontos no espaço, ou seja, as direções foram variografadas com ângulos de tolerância, sendo estes de 45° e 30°, para a Formação Santa Maria exceto arenito basal e para a Caturrita, respectivamente.

O semivariograma experimental da cota da boca do furo da sondagem na Formação Santa Maria exceto arenito basal

foi ajustado a um modelo gaussiano, de 3 estruturas, devido às variações amostrais em relação à distância *h*, com alcance de dependência espacial de 450 m e 1550 m. Para a Formação Caturrita o semivariograma experimental também foi ajustado a um modelo gaussiano, porém com 1 estrutura, e alcance de dependência espacial de 750 m.

A tabela 1, resultado do ajuste dos modelos de semivariogramas propostos, elucida o resumo dos parâmetros geoestatísticos (Efeito pepita, alcance e contribuição) utilizados para a variável cota da boca do furo da sondagem nas duas Formações.

Tabela 1 - Modelos de semivariogramas ajustados a variável cota da boca do furo da sondagem nas formações analisadas

Geoestatísticas					
Formação	Modelo	Efeito Pepita	Estruturas	Contribuição	Alcance
		14,5	1ª estrutura	96	1550
SM ¹	Gaussiano	14,5	2ª estrutura	120,5	450
		14,5	3ª estrutura	157,5	450
Caturrita	Gaussiano	10,341	Estrutura única	169,046	750

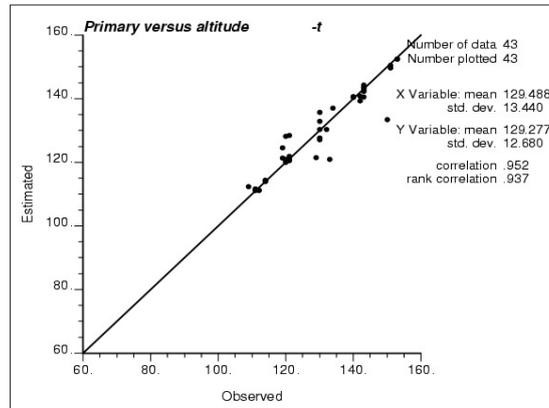
Fonte: Autores (2012).

Nota: ¹ Santa Maria exceto arenito basal.

Por existir certo grau de incerteza sobre os parâmetros utilizados na geração do semivariograma, realizou-se a validação do modelo de ajuste que, conforme Pires (2002), esse procedimento consiste em retirar um valor real do banco de dados e estimar o seu valor através do modelo estimado pela variografia. Esse procedimento é repetido para todos os valores do banco de dados e a correlação entre eles pode ser observada através da análise do comportamento do gráfico de *scatterplot* dos valores reais versus estimados, na análise bivariada.

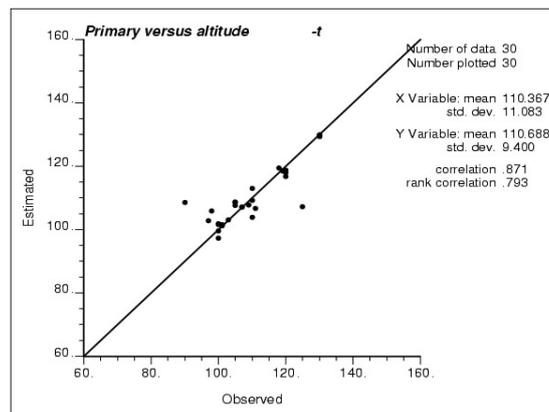
Os coeficientes de correlação altos (95,2% na Formação Caturrita e 87,1% na Santa Maria exceto Arenito Basal) obtidos nessa análise bivariada, onde os pontos estão alinhados na direção de 45° (Figuras 3 e 4), indicam a acuracidade do modelo variográfico ajustado à variável. Além disso, os histogramas da distribuição das frequências do erro (Figura 5) indicam que ocorre uma maior distribuição dos valores do erro em torno do valor da média (0,292 na Formação Santa Maria exceto arenito basal e -0,211 na Caturrita), que está próxima de zero, embora existam alguns pontos subestimados ou superestimados.

Figura 3 - Scatterplot valor real x valor estimado, na Formação Caturrita



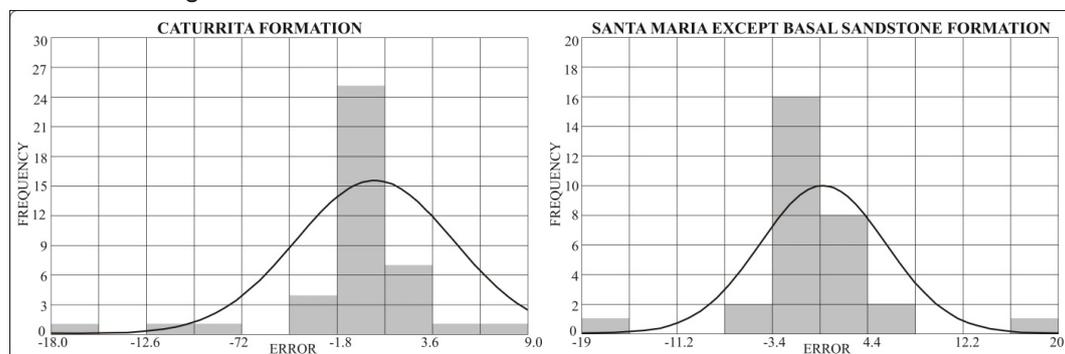
Fonte: Autores (2012).

Figura 4 - Scatterplot valor real x valor estimado, na Formação Santa Maria exceto arenito basal



Fonte: Autores (2012).

Figura 5 - Histograma da distribuição das frequências do erro da variável cota da boca do furo da sondagem

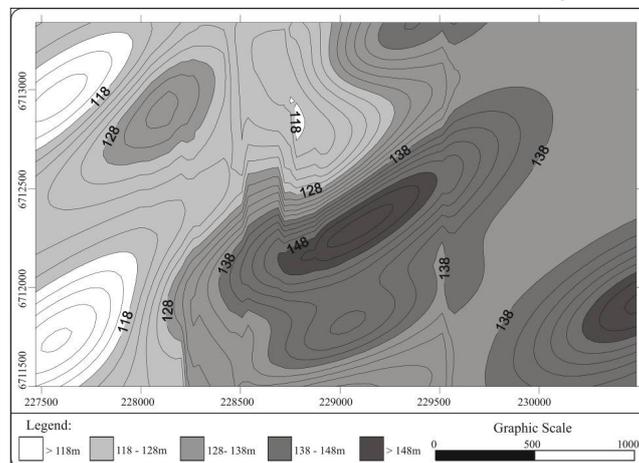


Fonte: Autores (2012).

A figura 6 mostra a distribuição dos valores da variável cota da boca do furo, na Formação Caturrita, obtendo uma amplitude de variação de sua distribuição espacial de 109 a 153 m. Predominam as cotas intermediárias entre 118 e 138 m, que correspondem à posição de meia-encosta da vertente. Na Formação Santa Maria exceto arenito basal, a amplitude de variação da distribuição de valores, obtida pela krigagem, varia de 90 a 130 m,

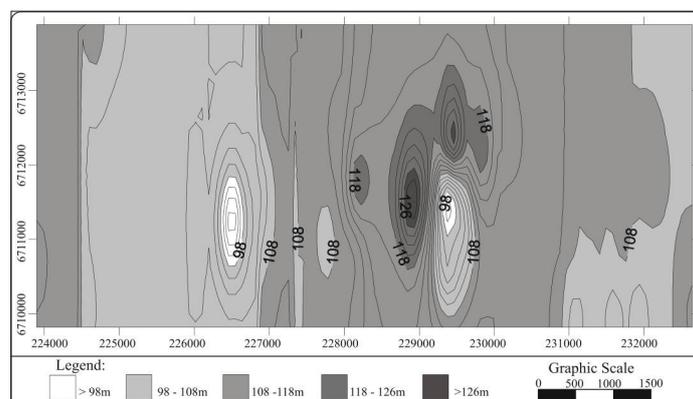
predominando as altitudes inferiores a 118 m (Figura 7). Isso se deve à baixa amplitude das colinas as quais são compostas por vertentes suaves. Analisando as figuras 6 e 7, observa-se que os resultados obtidos através das estimativas para a cota da boca do furo da sondagem representam a morfologia de cada formação: vertentes mais amplas e suaves na Formação Santa Maria exceto arenito basal, e mais onduladas e com maiores altitudes na Formação Caturrita.

Figura 6 - Mapa de isolinhas da variável cota da boca do furo da sondagem na Formação Caturrita



Fonte: Autores (2012).

Figura 7 - Mapa de isolinhas da variável cota da boca do furo da sondagem na Formação Santa Maria exceto arenito basal



Fonte: Autores (2012).

Variável Impenetrável à percussão

A variável impenetrável à percussão, da mesma forma que a variável cota da boca do furo da sondagem, possui comportamento anisotrópico em ambas as formações analisadas. Assim, os semivariogramas experimentais foram ajustados às direções de 90°, na Formação Caturrita, e 135°, na Formação Santa Maria, exceto arenito basal. As direções foram variografadas com ângulos de tolerância, uma vez que a malha de pontos de sondagens SPT possui uma distribuição irregular no terreno, de 45° em ambas as formações.

O espaço amostral foi dividido em 8 *lags* em ambas as formações, com distância entre cada *lag* de 200 m, na Formação Caturrita, e 800 m, na Formação Santa Maria exceto arenito basal, e tolerância de 600 m e 150 m, respectivamente.

O semivariograma experimental para a variável impenetrável à percussão, em ambas as formações, foi ajustado a um modelo esférico, com alcance de dependência espacial de 1.902,349 m, na Formação Santa Maria exceto arenito basal, e 650,679 m, na Formação Caturrita. O resumo dos parâmetros geoestatísticos, utilizados para o ajuste dos modelos de semivariogramas (Efeito pepita, alcance e contribuição), são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Modelos de semivariogramas ajustados a variável impenetrável à percussão nas formações analisadas

Formação	Modelo	Geoestatística			
		Efeito Pepita	Estruturas	Contribuição	Alcance
SM	Esférico	0,276	1	0,793	1902,349
Caturrita	Esférico	0,164	1	2,567	650,679

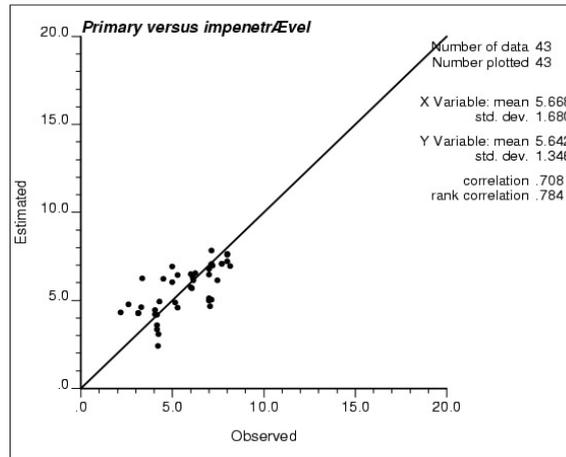
Fonte: Autores (2012).

Nota: SM: Santa Maria exceto arenito basal; Co: Efeito pepita; Cont.: Contribuição.

Devido à incerteza em relação aos parâmetros utilizados na geração e ajuste do semivariograma, realizou-se a validação do modelo de ajuste. Em virtude da grande variabilidade e da presença de alguns dados com componentes de tendências, não se obteve índices de correlação alto para a variável, cerca de 61%, na Formação Santa

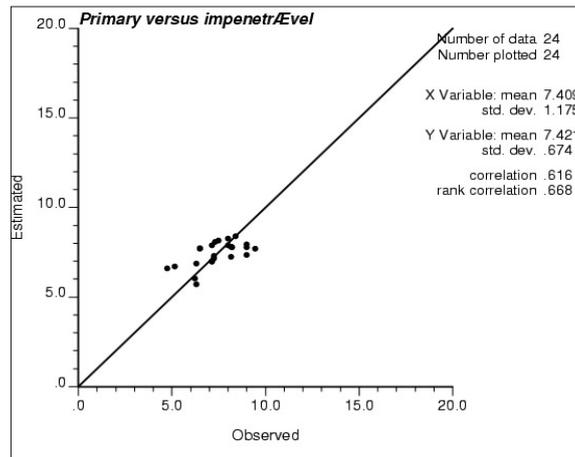
Maria exceto arenito basal, e 70 % na Formação Caturrita, conforme as figuras 8 e 9. Embora a média do erro ocorra próxima à zero, 0,011 e -0,025, tem-se uma alta variabilidade em torno dessa média, coeficiente de variação de 79% e - 47%, conforme os histogramas de distribuição das frequências do erro (Figura 10).

Figura 8 - Scatterplot valor real x valor estimado, na Formação Caturrita



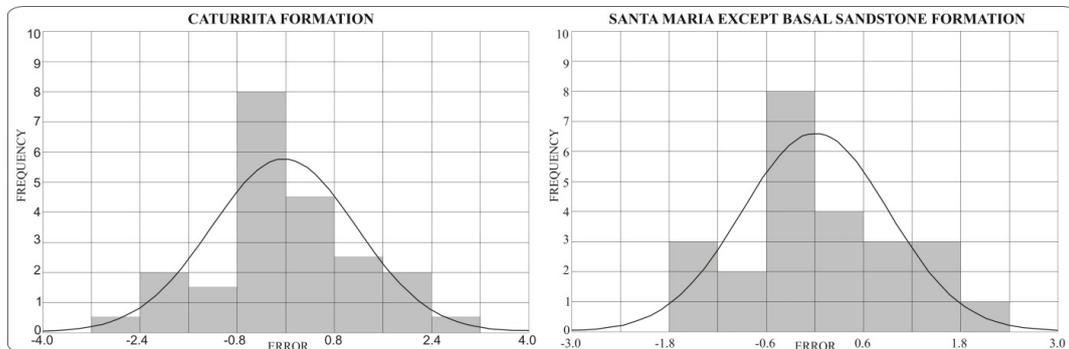
Fonte: Autores (2012).

Figura 9 - Scatterplot valor real x valor estimado, na Formação Santa Maria exceto arenito basal



Fonte: Autores (2012).

Figura 10 - Histograma da distribuição das frequências do erro da variável Impenetrável à percussão

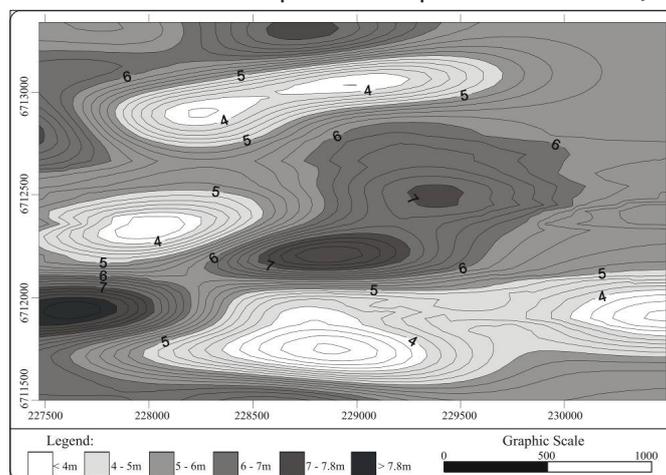


Fonte: Autores (2012).

A figura 11 representa a distribuição dos valores da variável impenetrável à percussão, na Formação Caturrita, sendo a amplitude de variação de sua distribuição espacial de 3,15 m a 8,15 m. Predominam os valores inferiores a 6 m, embora os valores superiores a essa cota também são expressivos na área.

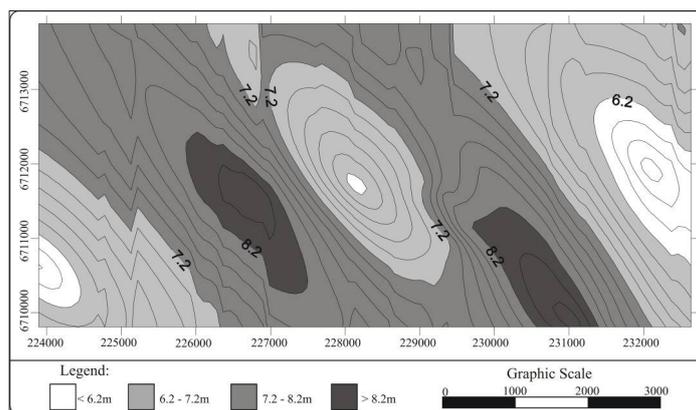
Na Formação Santa Maria exceto arenito basal a amplitude de variação da distribuição de valores, obtida pela krigagem, varia de 5,45 m a 8,72 m, predominando os valores intermediários entre 6,2 m e 8,2 m (Figura 12). Os valores superiores a 8,2 m e inferiores a 6,2 m são pouco expressivos na área.

Figura 11 - Mapa de isolinhas da variável impenetrável à percussão na Formação Caturrita



Fonte: Autores (2012).

Figura 12 - Mapa de isolinhas da variável impenetrável à percussão Formação Santa Maria exceto arenito basal



Fonte: Autores (2012).

Considerações Finais

A ocupação do espaço, em especial o urbano, nem sempre é precedida de estudos que consideram as potencialidades e restrições dos recursos naturais, especialmente o solo, quando submetido a determinados usos. Uma ferramenta, amplamente difundida em áreas urbanas, para a caracterização geotécnica do substrato, a partir de verificações pontuais, são as sondagens SPT. Entretanto, essas investigações do subsolo, ocorrem concentradas nas áreas de uso mais verticalizado e comercial do solo, com maior adensamento de edificações, enquanto nas áreas periféricas, são raras as ocorrências de SPT. A partir da utilização de técnicas geoestatísticas, efetuou-se estimativas para gerar superfícies contínuas, com o comportamento de duas variáveis obtidas nos relatórios de sondagens SPT: cota da boca do furo da sondagem e impenetrável à percussão, para pontos não amostrados, levando em consideração as formações geológicas de ocorrência das sondagens.

O uso da estatística descritiva permitiu constatar que as variáveis apresentam comportamento estatístico característico de cada formação, quando comparada a mesma variável em cada formação analisada: Formação Caturrita e Santa Maria exceto arenito basal.

A krigagem ordinária possibilitou a estimativa de valores de SPT na Formação Caturrita, com acuracidade de aproximadamente 71%, e na Formação Santa Maria, exceto arenito basal, com acuracidade de aproximadamente 62%. Assim, dispondo dos dados pontuais de SPT e atrelados às técnicas de estimação e predição de valores

obteve-se o comportamento em superfície das variáveis analisadas em toda a área analisada.

A variabilidade espacial nos índices obtidos pelos ensaios SPT estão relacionados à heterogeneidade litológica de cada formação, uma vez que os ensaios são verificações *in loco* e refletem as características pontuais. Além disso, é um reflexo dos problemas relacionados à subjetividade na execução desse ensaio, que muitas vezes podem mascarar os dados.

As técnicas geoestatísticas são importantes, como ferramenta de estimativa, para construção de mapas geotécnicos, usando método de fácil aplicação. Os resultados obtidos mostraram que, mesmo usando duas variáveis simples obtidas em sondagens de simples reconhecimento, essas técnicas se mostraram eficientes, obtendo boa acurácia na estimativa de valores para pontos não amostrados. Ressalta-se que ainda é necessário ampliar o banco de dados de valores SPT e são necessários mais estudos, para que essas técnicas possam a ser uma metodologia de uso comum.

Agradecimentos

À empresa GEOCENTRO – Sondagens, Fundações e Serviços Ambientais por ceder os boletins de sondagens SPT realizadas na cidade de Santa Maria e a FAPERGS o apoio financeiro.

Apoio

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS, Processo n° 06505600.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6484/80**: Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos. Rio de Janeiro, 1980.

CAMARGO, E. C. G.; DRUCK, S.; CÂMARA, G. Análise Espacial de Superfícies. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Ed. Téc.). **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p.79-122.

CLAYTON, C. R. I. **The Standard Penetration Test (SPT) - Method and Use**. London: CIRIA, 1993.

CORELDRAW. Suíte de aplicativos gráficos. **CorelDRAW**. Versão 12©. [S.I.]: Corel Corporation e Corel Corporation Limited, 2010. 1 CD-ROM.

MACIEL FILHO, C. L. **Caracterização geotécnica das formações sedimentares de Santa Maria, RS**. 1977. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1977.

_____. **Carta geotécnica de Santa Maria**. Santa Maria: Imprensa Universitária, UFSM, 1990. 21p.

PIRES, C. A. F. **Modelagem e avaliação de dados geofísicos e geoquímicos aplicada a pesquisa de metais básicos e Au no Prospecto Volta Grande (Lavras do Sul, RS, Brasil)**. 2002. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Materiais e Metalurgia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SCHNAID, F. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

SOARES, A. **Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente**. Portugal: IST Press, 2000.

SPRING. **Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas**. Versão 4.2. São José de Campos: INPE©, 2005. 1 CD-ROM

STURARO, J. R.; CAVAGUTI, N.; RIEDEL, P. S.; BÓSIO, N. J.; CAMARGO, A. A. X. de. Elaboração de banco de dados e análise estatística básica de dados de sondagens de simples reconhecimento – Aplicação na cidade de Bauru – SP. **Geociências**, São Paulo, v.12, n. 2, p.449-459, 1993.

STURARO, J. R. **Mapeamento geoestatístico de propriedades geológicas-geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento**. 1993. 183 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 1993.

STURARO, J. R.; LANDIM, P. M. B. Mapeamento geoestatístico de ensaios de penetração padronizada (SPT). **Solos & Rochas**, São Paulo, v.19, n.1, p. 03 - 14, 1996.

SURFER®. **Contouring, Gridding and Surface Mapping Package for Scientists and Engineers**. Version 8.0. [S.I.]: Goden Software, 2002.