

Aplicação da geoestatística no estudo da variabilidade espacial da piezometria.

Ciomara de Souza Miranda¹
Antonio Conceição Paranhos Filho²
Giancarlo Lastoria³

¹ Cidade Universitária, Caixa Postal 544, CEP 79070900, Campo Grande, MS
(ciomara.miranda@gmail.com¹, antonio.paranhos@pq.cnpq.br², lastoria@nin.ufms.br³).

Abstract. Informations about the piezometric surface of groundwater waters is needed in order to make the exploration sustainable and optimized. The aim of this study is to analyze the spatial variability of the piezometric levels of aquifer, being the study area a watershed of Coxim River basin in São Gabriel do Oeste, where the main land use is intensive farming. Piezometric level data from 22 different pits were analyzed and the theoretical semivariogram was observed, adjusted by the spherical model. We noticed that there is a spatial relationship of 16,5 km of range and a superestimation of 10% in the Groundwater surface in the kriging. The cross-validation was used to verify the accuracy of the proposed spherical model.

Palavras-chave: Geostatistics, kriging, semivariograma

1. Introdução

A modelagem de variáveis ambientais requer, na maioria das vezes, a estimativa de valores não amostrados, sendo necessário o emprego de métodos de interpolação. O método de Krigagem foi desenvolvido pelo engenheiro de minas sul-africano Daniel G. Krige que, ao trabalhar com dados de concentração de ouro, concluiu que somente a informação dada pela variância seria não seria suficiente para explicar o fenômeno em estudo.

Assim sendo, deve-se levar em consideração a distância entre as observações. A partir daí surge o conceito da geoestatística, que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial (Lourenço, 2002).

O princípio da Krigagem é estimar valores não conhecidos obtidos por meio da combinação de valores amostrados adjacentes àquele que se deseja obter, levando-se em consideração, no modelo, a estrutura de variação espacial. Isto pressupõe a existência de correlação entre os dados, exigindo saber até onde espacialmente esta correlação importa (Isaaks e Srivastava, 1989). Através do semivariograma encontram-se os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto.

A Krigagem apresenta-se como uma ferramenta importante em diversos estudos, como no trabalho de Ribeiro et al. (2011) que utilizam a Krigagem para a interpolação dos dados do nível estático na aquisição da distância do nível da água subterrânea, parâmetro do método de avaliação da vulnerabilidade do aquífero.

Na investigação da dependência espacial é necessário conhecer o semivariograma por este ser o responsável pela representação desta dependência, definida como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores das amostras que estão separadas por certa distância entre elas (Miranda, 2005). De acordo Landim (2003), a obtenção do semivariograma dos dados reais, ou mesmo dos resíduos, é de fundamental importância nos estudos da geoestatísticos e faz parte da chamada análise estrutural.

A análise espacial pode ser aplicada à compreensão de diversos fenômenos, como agricultura de precisão, imagens de satélite ou digitais aplicações geofísicas, em agronomia, em mineração e em geologia, hidrogeologia, estudos ecológicos de comunidades de plantas, dentre outros.

No Município de São Gabriel do Oeste a escassez de dados piezométricos é uma realidade, assim como em muitos outros municípios brasileiros. Esses dados são importantes parâmetros de análise para a obtenção de melhorias no uso e aproveitamento dos recursos hídricos.

O trabalho realiza uma análise estrutural para descrever a variabilidade espacial da piezometria, esses dados são importantes parâmetros de análise para a obtenção de melhorias no uso e aproveitamento dos recursos hídricos. Baseada na função do semivariograma, com o intuito de efetuar uma estimativa de valores em locais não amostrados. Para o alcance do objetivo proposto foi utilizado a Krigagem sendo uma operação mais complexa que leva em consideração a tendência dos valores conhecidos na vizinhança de cada ponto a ser estimado.

2. Metodologia de Trabalho

A área de estudo compreende a Sub-Bacia do Rio Coxim, a qual possui 15.642 hectares. Localiza-se na porção central do Município de São Gabriel do Oeste, Mato Grosso do Sul, e desempenha atividade socioeconômica relevante para o Município, uma vez que ganha destaque na produção agrícola e por abrigar um assentamento com aproximadamente 130 famílias.

Os dados utilizados na integração da piezometria foram obtidos em campanha de campo, sendo que a amostragem dos 22 poços foi realizada no período de seca (mês de setembro) de maneira aleatória, esses estão localizados no interior das propriedades rurais. Com o auxílio de um GPS diferencial foram aferidas as altitudes geométricas dos poços e levantados os seus dados de posicionamento. Como as altitudes geométricas são referidas ao elipsóide, foi necessário transformá-las para altitudes ortométricas, referidas ao nível médio do mar. Entretanto, para a realização desse processo é indispensável o conhecimento da ondulação geoidal (N).

Os dados piezométricos foram analisados em cinco etapas. Primeiramente identificou-se a condição da normalidade dos dados através do teste de Kolmogorov-Smirnov com uso do *software* BioEstat 5.0 (Ayres *et al.*, 2007). Para a verificação da hipótese de normalidade são utilizados testes gráficos e analíticos. O método analítico proposto é o Kolmogorov-Smirnov, o qual consiste na comparação das frequências acumuladas observadas e as calculadas pela distribuição normal.

No segundo passo, avaliou-se a estatística descritiva a fim de se observar algumas características do conjunto de dados, como média aritmética, mediana, desvio padrão, assimetria, mínimos e máximos. A terceira etapa considerou o modelo que melhor se enquadrasse na descrição do semivariograma a fim de se observar a dependência espacial entre as observações vizinhas no software GS+ (Robertson, 1998). Em seguida, realizou-se a validação cruzada para verificar a exatidão do modelo. A última etapa foi a interpolação com o uso da Krigagem para estimar a superfície piezométrica do aquífero utilizando o *software* Geomatica Focus (PCI, 2003).

A análise estrutural é obtida, em geral, por meio do semivariograma (Guerra, 1988). Os parâmetros observados no semivariograma e utilizados para a integração da krigagem são: o efeito pepita (C_0), sendo o valor da função do semivariograma na origem, representando o valor da descontinuidade; a semivariância estrutural (C), que representa a diferença entre o patamar e o efeito pepita; o patamar ($C + C_0$), que indica o ponto a partir do qual as amostras tornam-se independentes por causa da distância que as separam; e o alcance (a), sendo a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes, refletindo o grau de homogeneização (Isaaks & Srivastava, 1989).

O semivariograma teórico, isto é, o modelo matemático que descreve o semivariograma experimental é ajustado pelo método de mínimos quadrados, entre os modelos exponencial, esférico e gaussiano.

A escolha dos modelos leva em consideração três parâmetros: o coeficiente de determinação (r^2), que indica quantos dos pontos do semivariograma experimental encontram-se na curva do modelo teórico, (Robertson, 1998); a soma dos quadrado dos erros (RSS), a qual determina o ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental, sendo que quanto

menor o valor de RSS, melhor o ajuste (Zimmerman & Zimmerman, 1991); e o grau de dependência espacial pelo Índice de Dependência Espacial (IDE) proposto por Zimback (2001).

O IDE utiliza a relação entre a semivariância estrutural e o patamar. Quando seu valor for menor que 25% a correlação é considerada fraca; entre 25 e 75% é moderada; e maior que 75% possui forte correlação (Zimback, 2001)

A veracidade do modelo na interpolação foi testada através da técnica de validação cruzada, a qual se baseia em comparar valores reais com os do resultado de interpolação, o que permite avaliar se o modelo escolhido na interpolação garante previsão precisa (Leuangthong *et al*, 2004). Para Landim (2003), a validação cruzada é uma importante técnica para ponderar o ajuste do semivariograma, porém não comprova que o modelo escolhido é o mais correto nem inteiramente correto.

3. Resultados e Discussões

A aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov revelou, ao nível de 95% de probabilidade, que os dados analisados apresentam distribuição normal, havendo simetria uma vez que o coeficiente de assimetria é próximo do zero, implicando valores de média e mediana semelhantes. Atestando o que a técnica de Krigagem supõe que os dados apresentam distribuição normal de frequências, uma vez que a técnica utiliza valores médios para as estimativas.

Destaca-se que, além da normalidade, os dados satisfazem a condição de estacionaridade, havendo a existência da ocorrência do efeito proporcional em que a média e a variância sejam constantes na área de estudo. Para isso, a variável deve apresentar certa homogeneidade em suas características estatísticas e as correlações presentes nela permaneçam para as mesmas distâncias, levando-se em conta a escala (Bettini, 2007).

O modelo de ajuste ao semivariograma é o esférico, obtendo-se valores do efeito pepita (C_0), semivariância estrutural (C), patamar (a) e coeficiente de determinação (r^2) (Figura 1). Por meio do semivariograma é possível descrever, tanto qualitativa como quantitativamente, a variação espacial e obter os parâmetros que determinam a krigagem.

Modelo Esférico ($C_0=1$, $C_0+C= 2112$, $a=16550$) $r^2= 0,94$

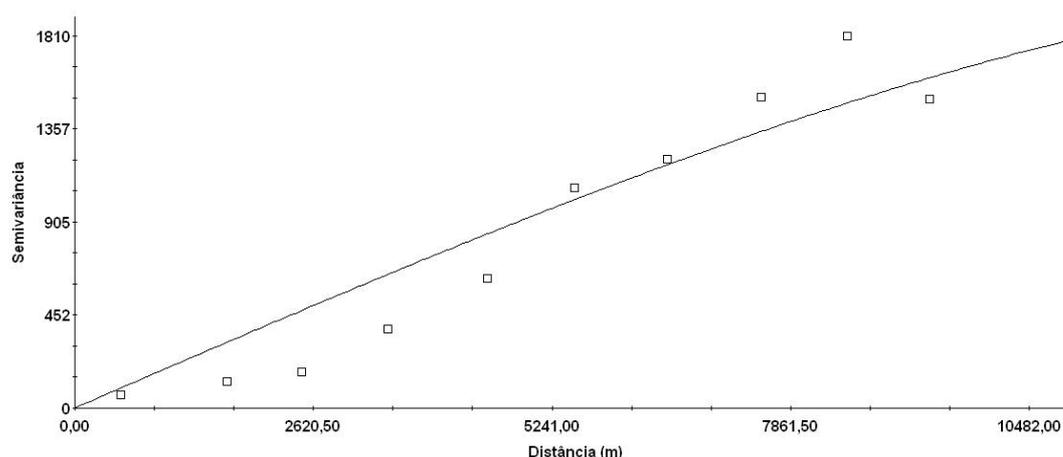


Figura 1. Semivariograma ajustado ao modelo esférico.

Apreciou-se o semivariograma omnidirecional, levando em consideração, assim, o caso de isotropia na medição da superfície do nível do lençol freático do aquífero (Ahmadi & Sedghamiz, 2007). Na elaboração do semivariograma levou-se em consideração um ângulo de

0° e tolerância angular de 90°, e adotou-se um espaçamento de 80% em relação à máxima distância de separação entre os dados, com tolerância de 9.5%, cerca de 1.0 km.

A garantia da estacionaridade é verificada com a existência do patamar (Vieira & Lombardi Neto, 1995). O efeito pepita obtido, demonstra boa continuidade entre valores vizinhos. O alcance de aproximadamente 16.5 km indica que todos os vizinhos, localizados dentro de um círculo com este raio, são semelhantes uns aos outros e podem ser utilizados na estimativa de valores para qualquer ponto entre eles.

A dependência espacial é classificada como forte por atingir um IDE de 100%, o que se justifica o uso da técnica de interpolação empregada. Os valores obtidos, com o uso da krigagem são não tendenciosos e com a mínima variância na categoria dos estimadores lineares (Montebeller *et al.*, 2007).

A visualização do produto final sob a forma de mapa melhora a compreensão dos resultados estatísticos. Do mesmo modo, a Krigagem apresenta-se como ferramenta vantajosa e capaz de gerar a superfície do piezômetro em forma de mapa (Figura 2). Ao se avaliar o modelo digital da superfície piezométrica, percebe-se que a direção do fluxo da água subterrânea é preferencialmente na direção norte para o sul, seguindo tendência central.

Na validação cruzada, tem-se o coeficiente de regressão (R^2) de 0.85, indicando a proporção de simetria entre a reta de 45°, pontilhada no gráfico, e a obtida pelos valores estimados versus reais da piezometria. Já o coeficiente angular é igual a 1.12, sendo que para um ajuste perfeito esse coeficiente deve ser igual a 1.

Com o resultado alcançado enfatiza-se o papel da geoestatística na gestão e sustentabilidade dos recursos hídricos regionais (Demir *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2011). A verificação do ajuste adequado do modelo para a interpolação por meio da validação cruzada.

Verifica-se que para os 22 pontos de controle o erro médio quadrático é de 12 metros e uma superestimação da superfície da água subterrânea em 10%, sendo esses erros aceitáveis para o Padrão de Exatidão Cartográfica na escala trabalhada de 1:100.00 (Brasil, 1984).

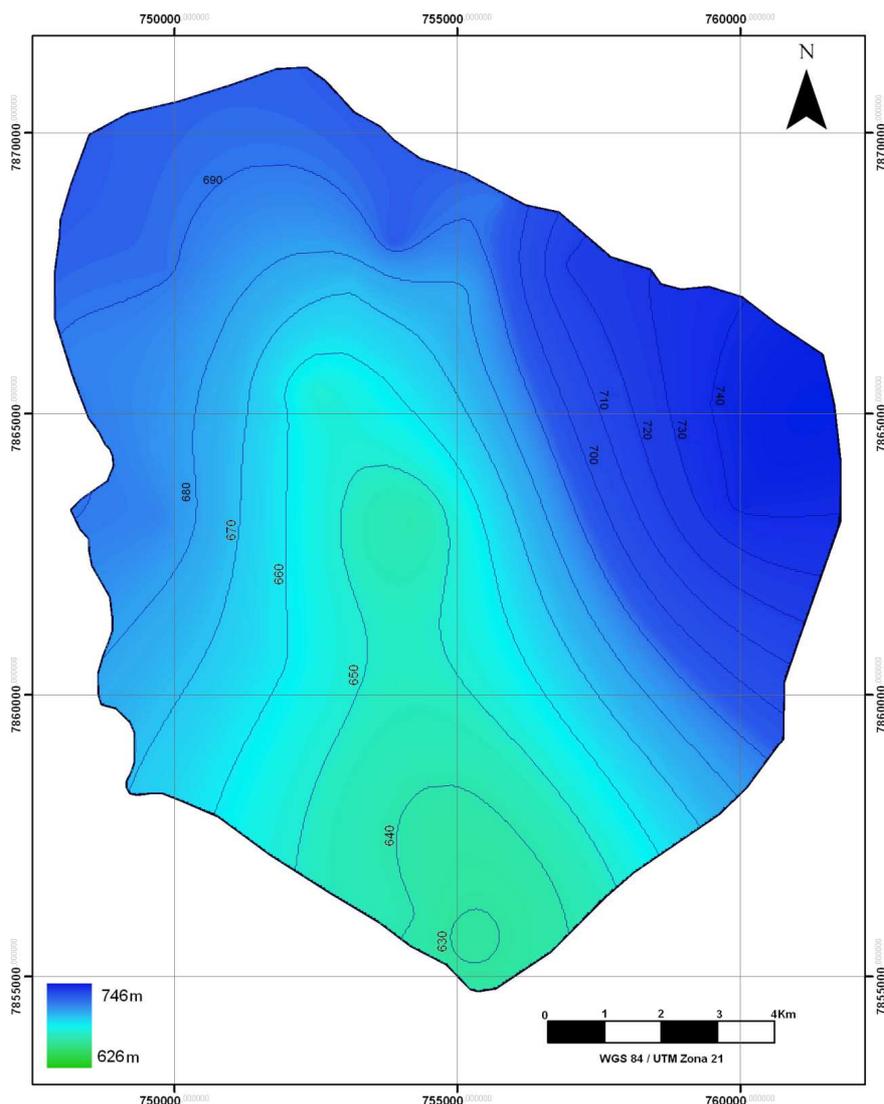


Figura 2. Mapa da piezometria da sub-bacia do rio Coxim, MS.

4. Conclusão e Recomendações

Conclui-se que, por meio da análise do semivariograma, que é viável a aplicação da Krigagem na elaboração do modelo da piezometria. Através da interpretação do mapa de piezometria pode-se concluir que, o fluxo da água subterrânea percorre toda a sub-bacia e tem direção de N-S com tendência central. Portanto na área de estudo são necessárias práticas de conservação para garantir a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

A avaliação do semivariograma é a base para o estudo de variabilidade espacial. A dependência espacial foi classificada como forte, validando a aplicação da krigagem na interpolação dos dados que foi superestimado em 10%, erro aceitável, o que convalida a aplicação da krigagem na interpolação dos dados e destaca a importância da modelagem do semivariograma na utilização da interpolação por meio dos programas computacionais específicos.

O trabalho demonstra a importância da integração de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) com procedimentos geoestatísticos na interpolação de dados espacialmente distribuídos, consolidando-se como uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos.

5. Referências Bibliográficas

Ahmadi, S. H. & Sedghamiz, A. 2007. Geostatistical Analysis of Spatial and Temporal Variations of Groundwater Level. **Environ Monit Assess**, v. 129, 277–294.

Ayres, M.; Ayres Junior, M.; Ayres, D.L. & Santos, A.S. **BioEstat 5.0**. 2007. Aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas. Belém: Sociedade Civil Mamirauá/CNPq, 380p.

Bettini, C. Conceitos básicos de Geoestatística. In: Meirelles, M. S. P.; Câmara, G.; Almeida, C. M. (Ed.). 2007. **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. Brasília: Embrapa, 193-234.

Brasil. Decreto nº 89.817, de 20 de Junho de 1984. **Estabelece as Instruções Regulamentadoras das Normas Técnicas da Cartográfica Nacional**. Diário Oficial da União de 27 de Jul de 1984.

Demir, Y.; ErsAhin, S.; Guler, M., Cemek; B., Gunal; H & Arslan H. 2009. Spatial variability of depth and salinity of groundwater under irrigated ustifluents in the Middle Black Sea Region of Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.158, 279–294.

Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M. 1989. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 561 p.

Leuangthong, O.; McLennan, J. A.; & Deutsch, C. V. 2004. Minimum acceptance criteria for geostatistical realizations. **Natural Resources Research**, v.13, p.131–141.

Miranda, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas** 2005. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 425p.

Montebeller, C.A.; Ceddia, M.B.; Carvalho, D.F.; Vieira, S.R. & Franco, E.M. Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no Estado do Rio de Janeiro. 2007. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, 426-435.

Landim, P.M.P. 2003. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 253 p.

Lourenço W. R. 2002. **Modelagem geoestatística por geoprocessamento em uma área da baixada santista**. Programa de pós graduação do Instituto de Geociência e Ciência Exata, Rio Claro, Tese Doutorado, 213p.

PCI GEOMATICS. **Geomática version 9.1**. Ontário – Canadá. 2003. CD-ROM.

Ribeiro, M. D.; Rocha, W. F & Garcia, A. J. V. 2011. Vulnerabilidade Natural À Contaminação dos Aquíferos a Sub-bacia do Rio Siriri, Sergipe. **Águas Subterrâneas**, v.25, (1).91-102.

Robertson, G.P. 1998. GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ users guide. Plainwell, **Gamma Design Software**, 152p.

Vieira, S.R. & Lombardi Neto, F. 1995. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v.54 (2), 405-412.

Zhou, Z.; Zhang, G.; Yan, M.; Wang, J. 2011. Spatial variability of the shallow groundwater level and its chemistry characteristics in the low plain around the Bohai Sea, North China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, 3697-3710.

Zimback, C.R.L. 2001. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. (Livre-Docencia em Levantamento do Solo e Fotopedologia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 114p.

Zimmerman, D.L., Zimmerman, M. B. 1991. A comparison of spatial semivariogram estimators and corresponding ordinary kriging predictors. **Technometrics**, v. 33, 77-91.