

UTILIZAÇÃO DE KRIGAGEM COMO ESTIMADOR DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE NITRATO EM UM AQUÍFERO

Jefferson Nascimento de Oliveira¹, Milton Dall'Áglio Sobrinho² e Valeria Di Giunta³

Resumo - Devido ao fato de a água subterrânea ser largamente utilizada em comunidades rurais sem o devido cuidado quanto à manutenção da sua qualidade, foi feito um levantamento do grau de contaminação de parte de um lençol freático. Foi utilizada a krigagem para se construir o mapa de isoconcentrações de nitrato distribuído espacialmente por uma área de 1.5 km². Região sem coleta de esgotos e com 46 poços freáticos produzindo água, sem o devido controle quanto à utilização de defensivos e fertilizantes agrícolas. Os resultados foram bastante satisfatórios, tendo sido demonstrado que a distribuição do contaminante está intimamente ligada às características de relevo, o qual influencia o fluxo da água subterrânea aumentando drasticamente as taxas de contaminação.

INTRODUÇÃO

Um estudo recente divulgado pela CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - retratou a importância do recurso hídrico subterrâneo no Estado de São Paulo (CASARINI, 1997). Cerca de 71,6% dos municípios paulistas utilizam total ou parcialmente a água subterrânea para o abastecimento público. Este percentual representa 5,5 milhões de pessoas abastecidas.

¹ Prof. Assistente do Depto. Eng. Civil, FEIS-UNESP. Av. Brasil, 56. Ilha Solteira -SP. CEP15385.000. Fone-Fax: 0187623121. E-mail: jeffnas@sc.usp.br

² Prof. Doutor do Depto. Eng. Civil, FEIS-UNESP. Av. Brasil, 56. Ilha Solteira -SP. CEP15385.000. Fone-Fax: 0187623121. E-mail: milton@dec.feis.unesp.br

³ Bolsista graduanda do Depto. Eng. Civil, FEIS-UNESP. Av. Brasil, 56. Ilha Solteira -SP. CEP15385.000. Fone-Fax: 0187623121. E-mail: digiunta@dec.feis.unesp.br

Em outras partes do Brasil, como no Vale do Gurgueia, no Estado do Piauí e em Mossoró, no Rio Grande Norte, várias culturas são irrigadas com água proveniente de lençóis subterrâneos.

Porém, com o desenvolvimento desordenado e a intensa agressão aos mananciais naturais, a preocupação com a preservação ambiental tornou-se, muito mais que um modismo, uma necessidade. Como exemplo tem-se o aquífero Bauru, no Estado de São Paulo, onde 30% dos poços estão contaminados.

Em áreas rurais a água percolada do excesso de irrigação também contribui substancialmente para a qualidade da água subterrânea em termos de concentração de sais, agravando-se ainda mais em situações onde a utilização de fertilizantes agrícolas é intensificada pela ação do homem. É o caso do bairro Ipê, objeto do presente estudo, onde devido ao uso intenso e indiscriminado de agrotóxicos e pesticidas, a qualidade da água vem sendo afetada no que se refere a presença de íons sulfatos, carbonatos, nitritos e nitratos.

Buscou-se fazer um levantamento e acompanhamento de todos os poços existentes nesta região, caracterizada por pequenas propriedades rurais, estimando a possibilidade de contaminação do aquífero freático em decorrência do possível uso inadequado de adubação e defensivos agrícolas.

Para a obtenção de um diagnóstico mais efetivo sobre o comportamento dos contaminantes, foi utilizada a técnica da krigagem na análise da variabilidade espacial da variável nitrato, por se tratar de um importante fator de risco.

METODOLOGIA

Os procedimentos para se mapear as concentrações variam desde interpolação linear simples (quer seja manualmente ou utilizando programas de computador) até métodos geoestatísticos, que oferecem possibilidade de extrapolar os perfis de isoconcentrações, expressando os possíveis erros encontrados nessa previsão e separando as anomalias das variáveis regionalizadas (**DAVIS, 1986**).

Duas são as ferramentas fundamentais da metodologia estatística: o semivariograma e a krigagem (**LANDIM, 1998**).

Pelo semivariograma, efetua-se uma análise estrutural do comportamento da variável sob estudo, verificando-se quantitativamente a sua variação no espaço. Após essa análise para se obter a estimação de valores, seja pontual ou área ou tridimensional, utiliza-se o processo de Krigagem.

Para **OLIVEIRA (1994)**, a construção de um variograma é necessário compreender as propriedades básicas ou características principais.

O semivariograma constitui-se na média quadrática das diferenças entre os valores nos pontos (x) e (x+h) no espaço, apresentado na equação (1).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum (Y(x+h) - Y(x))^2 \quad (1)$$

Deve-se conhecer a posição dos dados envolvidos, suas coordenadas cartesianas, para que se possa utilizar adequadamente os métodos geoestatísticos sugeridos neste trabalho.

Os valores de Y(x) e Y(x+h) são considerados dados amostrais nos referidos pontos, sendo por meio deles que o semivariograma é calculado. O semivariograma é originado da construção de um gráfico da função $\gamma(h)$ versus h (Figura 1).

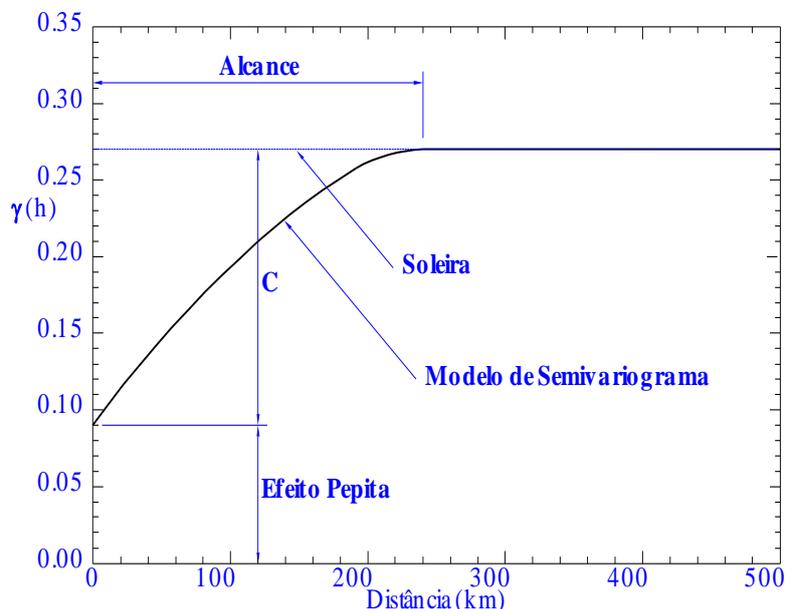


Figura 1- Representação gráfica de um semivariograma

A distância para a qual $\gamma(h)$ atinge um valor-patamar igual à variância (C), sendo esse valor limite conhecido como soleira (sill), é chamado de alcance (range). O efeito pepita (C_0), nome dado para a descontinuidade presente na origem, revela uma variável

regionalizada muito irregular, não contínua, na média. Conforme **COOPER e ISTOK (1988)**, as restrições a seguir devem ser levadas em consideração: $N(h) \geq 30$; $h < L/2$. Onde $N(h)$ representa o número de pares, para determinada distância h e L é o valor da maior dimensão existente na direção de h . Isto se deve ao fato de h ser também considerado um vetor de separação entre os pares.

Um fator importante que deve ser levado em conta é o ângulo de direção a ser tomado, pois geralmente ao se modificar a direção, simultaneamente se modifica também a forma do semivariograma, devido aos pares distintos tomados.

O valor máximo de h deverá obedecer a Regra 2 estipulada por **COOPER e ISTOK (1988)**. O valor da direção θ deverá estar entre 0° e 180° e a variação de $(\pm)\Delta\theta$ vai de 0° e 90° . A tolerância deve ser mínima, caso haja uma anisotropia forte (**OLIVEIRA, 1994**).

Após a confecção do semivariograma experimental, deve-se tentar associar ao mesmo um modelo matemático, o qual apresente o melhor ajuste aos dados amostrados. Para se obter um resultado satisfatório optou-se, no presente estudo, pelo programa de ajuste de modelos **VARIOWIN**, apresentado por **PANNATIER (1996)**.

Para a geração dos mapas de isovalores foi utilizado o programa **SURFER 6** que permite que se utilize a krigagem para a estimativa da distribuição espacial da variável estudada, adotando-se os valores do semivariograma. Com este program conseguiu-se ainda a geração de um mapa de erros com base nos arquivos gerados pelo software **Geo-Eas** apresentado por **ENGLUD e SPARKS (1988)**.

DESCRIÇÃO DA ÁREA

A área de estudo selecionada, Bairro do Ipê, está localizada a 6 km do município de Ilha Solteira, cidade esta localizada a Noroeste do Estado de São Paulo, a aproximadamente 700 km da capital. O bairro possui topografia acidentada com uma lagoa na parte mais baixa, e está dividido em lotes, na maioria dos quais foram perfurados poços com uma profundidade variando de 3 a 22m.

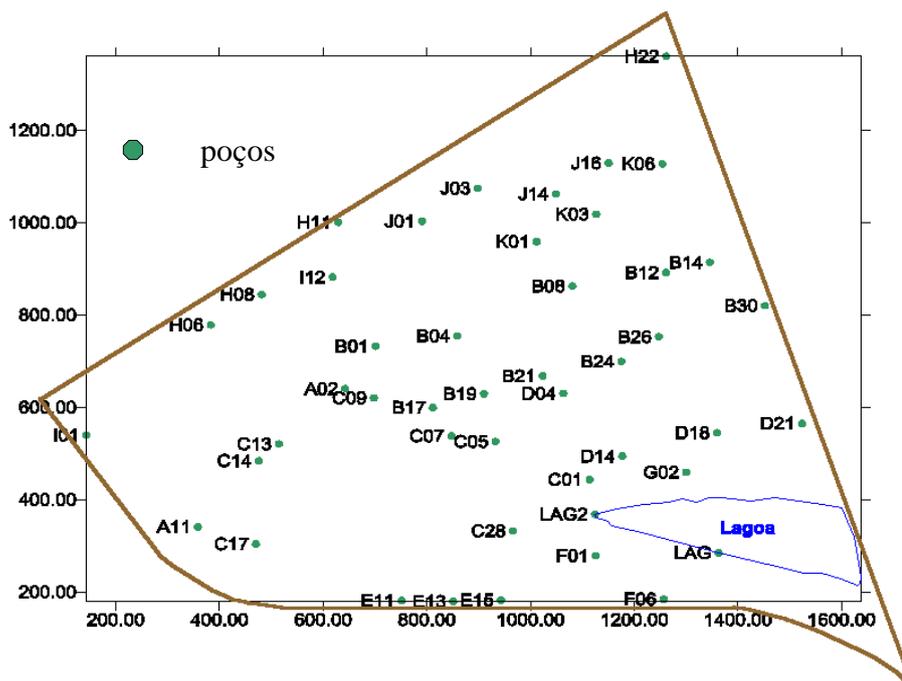


Figura 2 - Distribuição dos poços na área de estudo.

Com a distribuição dos 46 poços na área de estudo, foi possível, após digitalizar o mapa topográfico da região, obter-se as coordenadas de cada um. Uma listagem dos mesmos, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Identificação do lote, coordenadas (m) e quantidade de nitrato para cada um dos poços analisados no bairro do Ipê.

Lote	Coord X (m)	Coord Y(m)	Nitrato (ppm)	Lote	Coord X (m)	Coord Y(m)	Nitrato (ppm)
A02	642.6	640.1	1	D18	1126	278.5	3
A11	358.3	340.6	3	D21	1256.8	184.4	5
B01	701.3	732.3	10	E11	383.2	778.7	1
B04	858.7	754.7	2	E13	481.3	844.5	0
B08	1080.5	862.5	4	E15	1261.8	1360.5	40
B12	1261.3	891.8	1	F01	143	539.7	20
B14	1345.9	913.9	2	F06	618.3	881.9	2
B17	811.6	599.3	1	G02	790.8	1002.9	4
B19	1023.4	667.7	1	H06	1048.6	1062.2	2
B21	1175.3	699.1	15	H08	1126.6	1018.3	0
B24	1247.3	752.7	10	H11	1254.2	1127.3	2
B26	1114	443.5	5	H22	697.8	620.4	0
B30	932.5	525.7	4	I01	1011.6	958.6	5

C01	847.4	538	10	I12	1150.6	1129.1	0
C05	514.4	520.5	7	J01	966	332.3	0
C07	476	484.2	5	J03	910	629.1	2
C09	470.3	304	5	J14	898.1	1074.5	5
C13	1063.3	630	15	J16	629.4	1000.8	1
C14	1176.9	494.1	60	K01	1300	459.3	2
C17	1359.5	544.9	2	K03	850.8	179.4	2
C28	1523.7	565.1	7	K06	1452.3	820.3	5
D04	751.3	181.3	3	LAG	1362.8	284.9	1
D14	942.7	182.5	7	LAG2	1124.5	368.2	3

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O semivariograma apresentada na Figura 3, mostra o comportamento espacial da varável nitrato e foi ajustado segundo um modelo exponencial, sem anisotropia, dado pela Equação 2.

$$\gamma(h) = C_0 + C \left\{ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right\} \quad (2)$$

onde: C_0 é o *nugget*, a é o range e C é o *sill*.

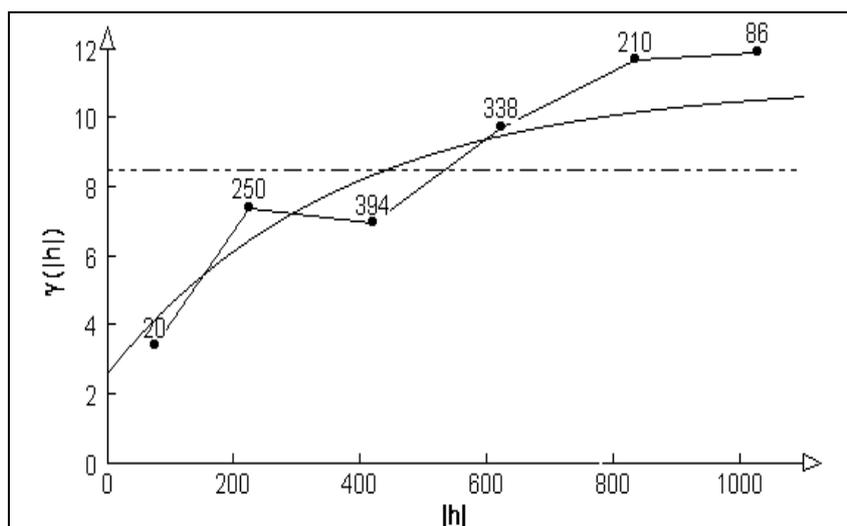


Figura 3 -Semivariograma Exponencial: $C_0 = 2.63$; $a = 1100$; $C = 8.42$

Os valores apresentados na Figura 3 representam o número de pares encontrados pelo programa ao compilar todos os dados existentes.

Foi constatada a presença de níveis altos de nitrato, chegando a dez vezes mais do que o recomendado pela NTA-60. A presença desse íon implica na contaminação orgânica, além da química.

Um forte indício de contaminação já era conhecido, pois a região não apresenta rede de esgoto e há um uso indiscriminado de fertilizantes e corretivos para o solo.

Ao ser analisado o gráfico de distribuição espacial do nitrato, traçado pelo **SURFER** (Figura 4) verificou-se a tendência do surgimento de picos na região mais baixa das áreas de estudo.

Já a Figura 5 apresenta um mapa dos erros obtidos pela krigagem na estimação da variável. Observa-se que estes erros se acentuam nas regiões dos cantos do mapa, onde a densidade de poços amostrados é muito baixa.

CONCLUSÕES

O crescimento da contaminação em poços existentes no fundo do vale já era esperado, uma vez que o carreamento de material obedece ao gradiente topográfico, tanto na superfície como nas camadas subterrâneas. Isto fica evidenciado pela baixa profundidade dos poços, o que agrava a contaminação.

A utilização krigagem ordinária, pontual mostrou-se muito satisfatória apresentando um baixo índice de erro na estimação espacial.

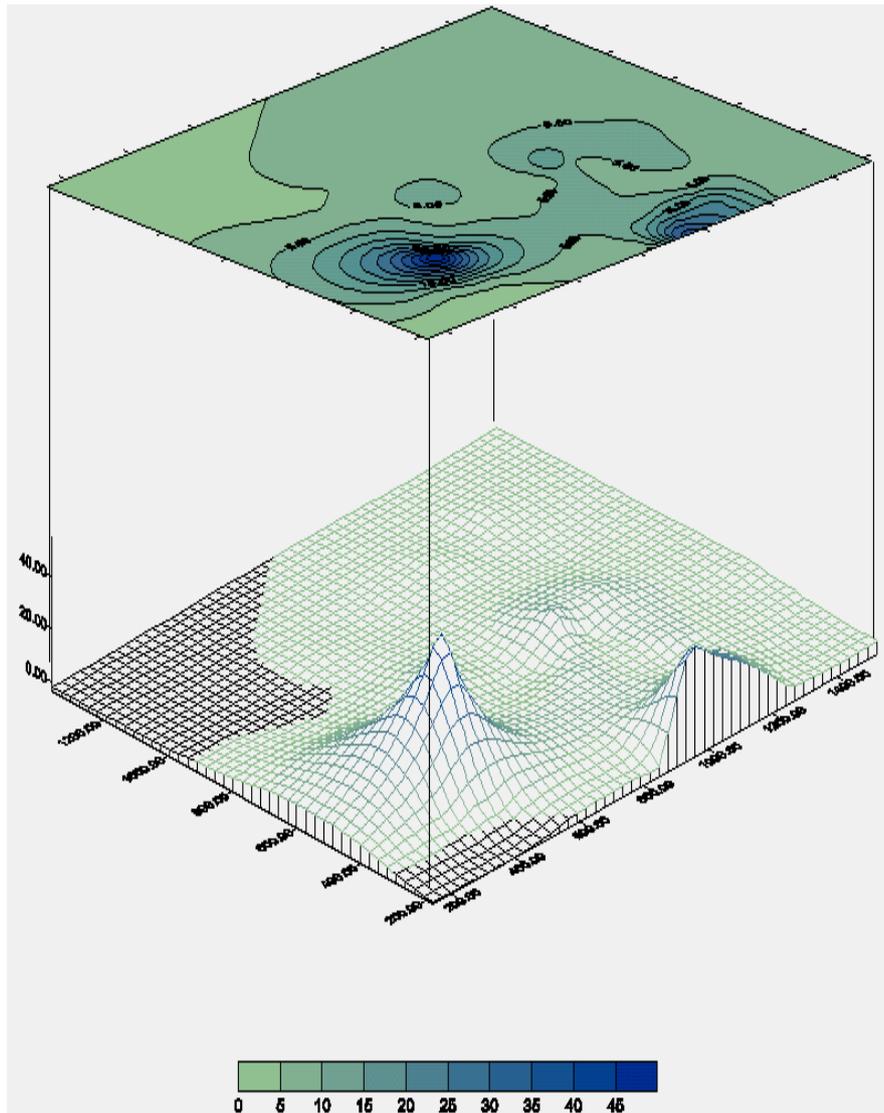


Figura 4 – Mapa e superfície de isovalores de nitrato

Figura 4. Mapa e superfície de isovalores de nitrato.

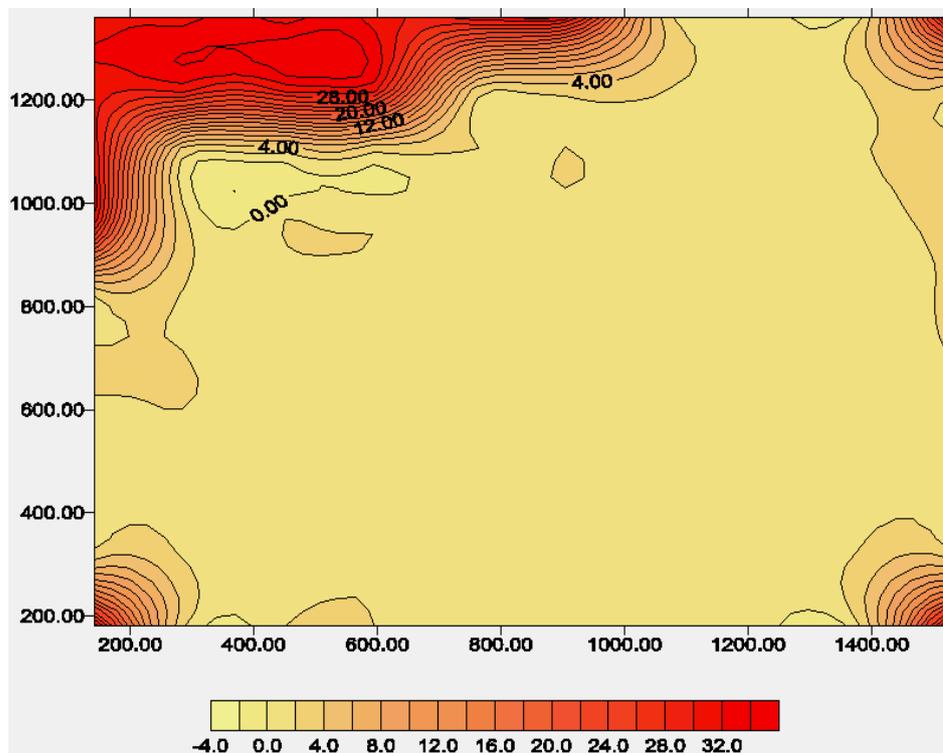


Figura 5 - Mapa de isovalores dos erros obtidos com a estimação por krigagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASARINI, D.C.P. Uso das águas subterrâneas para o abastecimento público no estado de São Paulo. *Boletim Informativo da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas*, n.73, p.8, out/nov.1997.
- COOPER, R.M.; ISTOK, J.D. Geoestatics applied to groundwater contamination .I: Methodology. *Journal of Enviromental Engineering*, v.114, n.2, p. 270-286, 1988.
- DAVIS, J. C. *Statistics and Analysis in Geology*. 2 ed.New York. John Wiley & Sons, 1986
- ENGLUND, E.; SPARKS, A. GEO-EAS. *Geoestatistical Environmental Assessment Software. User's Guide*. Las Vegas, Nevada. U. S. Environmental Protection Agency, 1988.
- LANDIM, P.M.B. *Análise Estatística de Dados Geológicos*. São Paulo Editora da UNESP, 1998.
- OLIVEIRA, J. N. *Método “ cokriging” aplicado a dados pluviométricos da bacia do Rio Camanducaia*. São Carlos,1994. 116p. Dissertação de (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PANNATIER, Y. *VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer-Verlag, New York, NY, 1996.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com financiamento do II Programa de Suporte Técnico à Gestão de Recursos Hídricos, do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal (convênio 023/97 ABEAS-UNESP). Contou também o apoio do CNPq, programa PIBIC, por meio de Bolsa de Iniciação Científica. A Prefeitura Municipal de Ilha Solteira - SP também apoiou o projeto.