

ANÁLISE GEOESTATÍSTICA APLICADA À OBTENÇÃO DE MAPAS 3D DE VALORES DE K PARA O AQUIFERO BOA VIAGEM EM RECIFE (PE) ESTIMADOS A PARTIR DE DADOS LEVANTADOS POR SONDA HPT

César Petroni ¹; Alexandra Suhogusoff ²

¹ Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. São Paulo (SP). cesar.petroni@usp.br

² Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. São Paulo (SP). suhogusoff@usp.br

Palavras-Chave: condutividade hidráulica; geoestatística; HPT

INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico e dos métodos de aquisição de dados vem transformando a abordagem técnica e econômica de estudos hidrogeológicos relacionados à proteção e exploração de aquíferos sedimentares inconsolidados. Novos instrumentos hoje disponíveis integram amostragem e análise dinâmica de solo e águas subterrâneas em tempo real e de alta densidade a interpretações hidroestratigráficas e mapeamento de permeabilidade em três dimensões (Suthersan *et al.*, 2015).

Ferramentas de mapeamento hidroestratigráfico como *Cone Penetrometer Testing* (CPT) e *Hydraulic Profiling Tool* (HPT) e de análise qualitativa como *Membrane Interface Probe* (MIP) e *Ultra Violet Optical Screening Tools* (UVOST) possibilitam a coleta de dados *in situ* e em alta densidade para uma caracterização hidrogeológica mais representativa de aquíferos.

Dentre as ferramentas de mapeamento hidroestratigráfico, destaca-se o HPT por ser um ótimo indicador da permeabilidade da formação geológica. Essa sonda mede a pressão requerida para injetar determinada vazão de água artificial dentro da formação à medida que avança em profundidade, além de possibilitar a medição da condutividade elétrica (CE) do solo através de um sensor acoplado dedicado. A análise das variações de pressão de injeção permite estabelecer uma distinção entre zonas mais e menos permeáveis para um intervalo de condutividade hidráulica (K) entre 10^{-2} e 10^{-5} cm/s (Geoprobe, 2015).

Mapas de K gerados a partir de dados HPT são essenciais para uma interpretação hidroestratigráfica com detalhe de zonas de transporte de contaminantes, para a definição de horizontes de exploração da água subterrânea e para a modelagem matemática de fluxo de água subterrânea. Para sua obtenção, é, portanto, fundamental a aplicação de análise geoestatística para o entendimento da variabilidade de K no espaço e, por conseguinte, para a interpolação dos seus valores e confecção de mapas 3D.

O objetivo deste estudo é a criação destes mapas 3D para um conjunto de dados coletados na região da cidade de Recife no período entre novembro de 2016 e junho de 2017, que inclui uma malha de 42 sondagens HPT, totalizando cerca de 70 mil dados de vazão, pressão de injeção e CE, além de descrições litológicas de 66 sondagens. Os dados de vazão e pressão serão utilizados para a obtenção de valores de K, que por sua vez serão avaliados quanto ao método de krigagem mais adequado para a interpolação e geração dos mapas de K. Serão avaliadas também a correlação entre variáveis para possível aprimoramento da interpolação e *upscaling* de K através do método de cokrigagem, entre variáveis obtidas por métodos de investigação economicamente mais acessíveis, como CE e descrição de litotipos, com os dados HPT.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende uma antiga indústria desativada contaminada por organoclorados, de 87.000 m², situada na planície costeira da cidade de Recife, estado de Pernambuco, zona estuarina do rio Capibaribe. Segundo Rocha & Oliveira (2003), a geologia da Região Metropolitana do Recife (RMR) é caracterizada por rochas do embasamento cristalino, de idade Proterozóica, como litotipos dos complexos Gnáissico-Migmatítico, Belém do São Francisco e Vertentes, além de granitóides de idades Meso e Neo-Proterozóica. Os litotipos do embasamento encontram-se aflorantes ou recobertos por sedimentos meso-

cenozóicos das bacias sedimentares costeiras Paraíba–Pernambuco e do Cabo, constituídas de intercalações de depósitos fluviais e marítimos como as formações Cabo, Estiva, Beberibe e Gramame e por depósitos mais recentes como a formação Boa Viagem. A planície costeira de Recife situa-se no limite geográfico entre as duas bacias, separadas pelo Lineamento de Pernambuco.

Sedimentos quaternários estão concentrados principalmente na região costeira do estado de Pernambuco, representados por depósitos de terraços marinhos pleistocênicos e holocênicos, sedimentos detríticos flúvio-lagunares quaternários, sedimentos de mangues, depósitos arenosos inconsolidados denominados sedimentos de praia e depósitos aluvionares, que se distribuem ao longo dos principais rios da RMR (Rocha & Oliveira, 2003).

Na região da área de estudo predomina o Aquífero Boa Viagem, constituído por um conjunto de depósitos recentes, incluindo aluviões, coluviões, terraços fluviais, terraços marinhos, areias de praia, paleomangues e dunas antigas, localizadas na atual planície do Recife, região deltaica formada pelos rios Capibaribe, Beberibe e Tejipió. Esse aquífero ocorre sobreposto a outros mais antigos, como o Beberibe e o Cabo, ou diretamente sobre o embasamento cristalino, na região mais oriental do Recife. A espessura média do Aquífero Boa Viagem corresponde a 50 m, e os poços nele instalados apresentam vazões superiores a 20 m³/h (Borba *et al.*, 2010).

METODOLOGIA

O estudo será desenvolvido por meio do *Stanford Geostatistical Modeling Software* (SGeMS), um pacote computacional de código aberto para análise geoestatística de variáveis regionalizadas (SGeMS, 2017), e do *software Earth Volumetric Studio* (EVS), que inclui entre as suas principais funcionalidades a estimativa de parâmetros utilizando algoritmos de krigagem 2D e 3D, geração de grade de modelagem de elementos finitos e suporte de apresentação e animação 3D (C Tech, 2017).

Os dados que serão usados para o cálculo de K foram obtidos através da tecnologia *Hydraulic Profiling Tool* (HPT), uma ferramenta de perfilagem que mede a pressão necessária para injetar uma vazão de água no solo à medida que a sonda avança em subsuperfície. Uma bomba no módulo de fluxo do HPT retira a água do tanque de abastecimento e a impele linha abaixo à uma vazão média de 300 ml/min, definida no Controlador HPT, enquanto a sonda é cravada no solo através de um equipamento de perfuração percussivo. A medição da pressão de injeção no sistema HPT é feita usando um transdutor de pressão acoplado na sonda que permite a medição da pressão de injeção *in situ* (Figura 1), excluindo perdas de fricção através da linha do tubo de fluxo do HPT. Da mesma maneira, a sonda inclui um medidor de fluxo interno que mede a vazão da injeção (Geoprobe, 2017).

A obtenção da CE é realizada pela indução de uma corrente entre os dipolos elétricos em contato com o solo, composição conhecida como *Werner Array*. O sistema mede a corrente e tensão elétrica e, a partir desses parâmetros, calcula CE. Partículas menores tem maior contato superficial entre si e por isso transmitem corrente melhor que partículas maiores, portanto, condutividades elétricas mais altas são tipicamente representativas de sedimentos de grãos mais finos, tais como siltes e argilas, onde a pressão de injeção tende a ser mais alta, enquanto areias e cascalhos apresentam condutividades distintamente mais baixas, onde a pressão de injeção tende a ser mais baixa (Geoprobe, 2015).

CE, pressão e vazão são registrados a cada 15 mm de avanço da sonda e exibidos na tela do computador conectado ao Instrumento de Campo para Aquisição de Dados HPT, conforme a ponta da sonda avança no subsolo.

Desta maneira, o principal uso do HPT é o de fornecer um perfil de permeabilidade pela profundidade da sondagem, o que ajuda a determinar zonas permeáveis, caminhos preferenciais de contaminação e zonas de captação para poços de produção.

Valores de K de uma formação geológica podem ser estimados a partir dos perfis HPT empregando-se uma relação empírica que relaciona os dados de vazão e pressão obtidos pela sonda. O cálculo do K é apresentado na Equação 1 (McCall *et al.*, 2014):

$$K = 21,14 \times \ln \left(\frac{Q}{P_c} \right) - 41,71$$

(Equação 1)

onde Q é a taxa de fluxo HPT e Pc a pressão de injeção corrigida em cada profundidade.

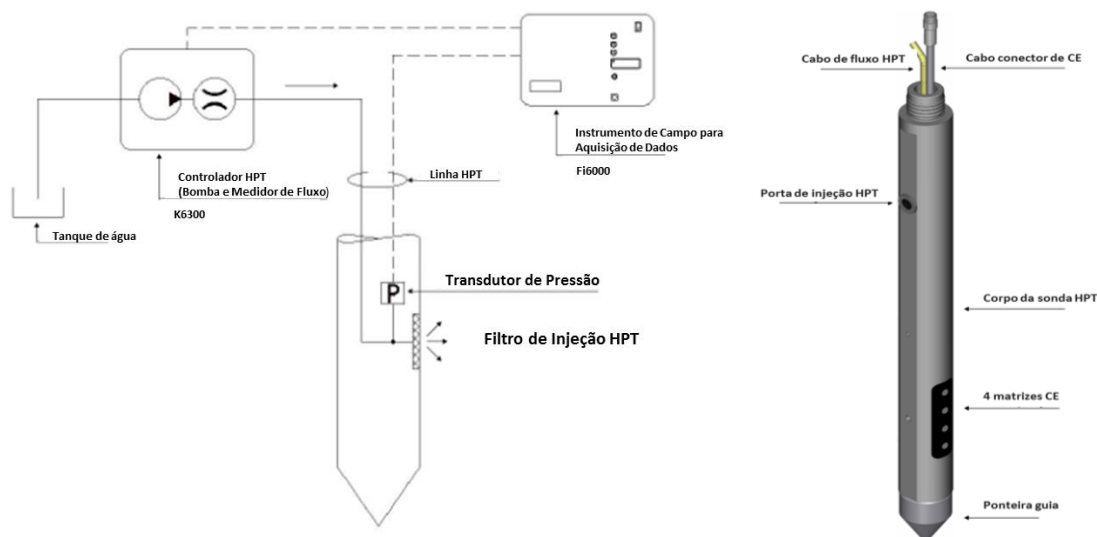


Figura 1. Representação da sonda HPT e dos principais elementos que a compõem (traduzido de Geoprobe, 2017).

Conforme a sonda avança abaixo do nível d'água, a pressão hidrostática aumenta, sendo a medida direta da sonda, portanto, a soma entre pressão hidrostática e atmosférica. Na profundidade desejada, o avanço da sonda pode ser interrompido e o fluxo de injeção desligado para a realização de um teste de dissipação de pressão que determina a pressão hidrostática local. A pressão corrigida (P_c) para cada profundidade é obtida, portanto, subtraindo-se a pressão hidrostática + atmosférica da pressão HPT (pressão medida durante o teste). A pressão HPT corrigida é a pressão real necessária para injetar água na formação, que fornece uma visão mais precisa da permeabilidade relativa dos materiais de formação (Geoprobe, 2017)

RESULTADOS ESPERADOS

A primeira etapa de trabalho prevê a obtenção dos dados de K através da análise dos testes de dissipação realizados e da correção das pressões HPT brutas, utilizando a relação empírica entre vazão e pressão corrigida.

Será realizada então a análise estatística e geoestatística fundamental buscando-se determinar o modelo de correlação espacial da variável regionalizada K, ajustar o modelo teórico através de funções variograma e avaliar a correlação entre K e as variáveis CE e litotipo.

Após esta etapa, será realizada a análise de métodos de interpolação com a verificação dos métodos de krigagem mais adequados (simples, ordinária, multigaussiana ou indicadora) para confecção de mapas de K e de incerteza. A Figura 2 ilustra um mapa 3D de vazão, interpolado a partir de dados HPT coletados na área de estudo, um produto semelhante ao que será obtido para os valores de K.

Por fim, caso a correlação estatística se confirme, será realizada a cokrigagem entre dados de K com CE e litotipo. O objetivo desta etapa é avaliar se o método pode aprimorar os mapas de K localmente e também a possibilidade de *upscaling* dos mapas em regiões onde não existem dados diretos de K, através da cokrigagem dessas variáveis.

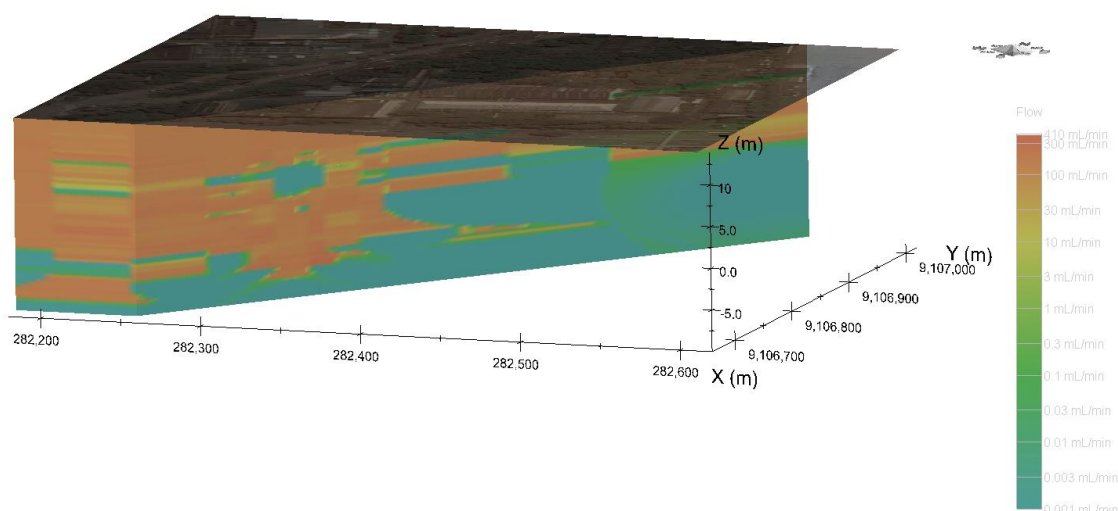


Figura 2. Bloco-diagrama apresentando as vazões obtidas com a sonda HPT na área de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Borba, A. L. S., Costa Filho, W. D., Mascarenhas, J. C.O. Configuração geométrica dos aquíferos da região metropolitana do Recife. In: Anais, p. 1-14, 2010.
- C Tech – Earth Volumetric Studio. Disponível em: <<https://www.ctech.com/>>. Acesso em: 23out. 2017.
- Geoprobe. Electrical Conductivity (EC) System Standard Operating Procedure, In: Technical Bulletin No. Prepared: January, 2015.
- Geoprobe. Hydraulic Profiling Tool (HPT) System Standard Operating Procedure, In: Technical Bulletin No. MK3137, Prepared: January 2015.
- McCall, W., Christy, T.M., Pipp, D., Terkelsen, M., Chistenensen, A., Weber, K., Engelsen, P. Field Application of the Combined Membrane-Interface Probe and Hydraulic Profiling Tool (MiHpt). Groundwater Monitoring & Remediation 34, n. 2, p. 85-95, 2014.
- Rocha, D. E. G. A. & Oliveira, R. G. Geologia e Geofísica. In: Pfaltzgraff, P. A.S. Sistema de Informações Geoambientais da Região Metropolitana do Recife. Ministério de Minas e Energia Secretaria de Minas e Metalurgia CPRM – Serviço Geológico do Brasil Superintendência Regional do Recife, 137p, 2003.
- SGeMS – Stanford Geostatistical Modeling Software. Disponível em: <<http://sgems.sourceforge.net/>>. Acesso em: 23 out. 2017.
- Suthersan, S., Quinnan, J., Welty, N. The New ROI: Return on Investigation by Utilizing Smart Characterization Methods. Ground Water Monitoring and remediation, 2015.