

ANÁLISE DE INCERTEZA DE CENÁRIOS DE BOMBEAMENTO E TRATAMENTO EM ÁREAS CONTAMINADAS

Caetano Pontes Costanzo ¹; Alexandre Campana Vidal ²;

Resumo – Em face da crescente demanda de execução de projetos de remediação de aquíferos contaminados, a técnica de bombeamento e tratamento está sendo utilizada de forma significativa. Esta ferramenta de recuperação Ambiental consiste no bombeamento da água subterrânea em pontos estrategicamente posicionados de maneira a gerar uma barreira hidráulica que impeça o avanço da extensão de uma pluma de contaminação. Em áreas com alta heterogeneidade litológica, a organização espacial dos valores de condutividade hidráulica (K) em subsuperfície apresenta incertezas associadas à variabilidade na distribuição das fácies. No presente estudo foram analisadas estas incertezas por meio de métodos geoestatísticos (krigagem da indicatriz e simulações estocásticas) e também a partir de simulações numéricas de fluxo e transporte de contaminantes. Estas ferramentas permitiram a análise das possibilidades de deslocamentos espaciais das plumas de contaminação, bem como possíveis cenários de remediação numa área contaminada, em função de distintos campos aleatórios de condutividade locais, devido à complexidade geológica. A partir da krigagem da indicatriz foi possível elaborar um modelo geoestatístico de fácies que foi utilizado como ferramenta para validar o uso da condutividade hidráulica em função de cada litologia, definindo assim os possíveis grupos de hidrofácies presentes na área. Por meio das simulações estocásticas foram gerados vinte campos distintos de condutividade hidráulica, os quais configuraram distintas distribuições espaciais das áreas das plumas de contaminação, como também cenários otimista, intermediário e pessimista para o deslocamento das mesmas. Foram simulados três cenários de bombeamento resultando nove situações desta técnica de remediação. Dessa forma, os efeitos da heterogeneidade atrelada à condutividade hidráulica evidenciaram que, para a execução de um projeto de remediação por bombeamento e tratamento em áreas com certa heterogeneidade geológica, é necessária a análise de incertezas atreladas ao diagnóstico hidrogeológico. Ao considerar modelos com homogeneidade na condutividade e mais simplistas, o projeto de remediação pode vir a ser ineficiente aumentando o tempo para a recuperação ambiental local e consequentemente aumentando os custos.

Abstract – Due to the growing demand for project execution remediation of contaminated aquifers, the pump and treat technique is being used significantly. This remediation technique consists in groundwater pumping in strategically points placed to generate a hydraulic barrier to prevent the advance of a contamination plume. In areas with high lithological heterogeneity, the spatial organization of the hydraulic conductivity (K) values in the subsurface introduces uncertainties associated with the variability in the distribution of facies. In this study these uncertainties were evaluated using geostatistical methods (indicator kriging and stochastic simulations) and also from numerical simulations of flow and contaminant transport. These tools enable the analysis of the contamination plumes areas, as well as scenarios for remediation, due to different random fields of local conductivity according to the geological complexity. By indicator kriging, was possible to provide a geostatistical facies model which was used as a tool to validate the hydraulic conductivity as a function of each lithology, thus defining the possible hydrofacies groups in the area. The stochastic simulations generated twenty distinct hydraulic conductivity fields, which represented diferente spatial distributions of contamination plumes, as well as scenarios optimistic, intermediate and pessimistic to offset these. Three scenarios for pump and treat were simulated resulting nine situations of this remediation technique. Therefore the effects of heterogeneity associated with hydraulic conductivity showed that, for the remediation design in areas with certain geological

¹ Geól., PhD, Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda. Tel, (11) 99111-1620, caetano@walmambiental.com.br

² Geól., PhD, Universidade Estadual de Campinas Tel, (19) 99757-3439, vidal@unicamp.br

heterogeneity, the analysis of uncertainties linked to hydrogeological studies is needed. When considering models with homogeneous conductivity and most simplistic, the remediation Project may prove to be inefficient increasing the time to the project and consequently increasing costs.

Palavras-Chave – Krigagem da indicatriz. Simulações estocásticas. Simulações numéricas. Condutividade hidráulica.

1. INTRODUÇÃO

A utilização da geoestatística permite a previsão espacial da distribuição dos tipos litológicos, do nível d'água subterrâneo e consequentemente das zonas de fluxo presentes num aquífero, subsidiando projetos de remediação.

Técnicas geoestatísticas são cada vez mais utilizadas para o estudo de fluxo e transporte de plumas de contaminação em ambientes subterrâneos heterogêneos (GÉGO e HANKINS, 2001).

Aquíferos heterogêneos, normalmente atrelados a diferentes fácies e consequentemente diferentes valores de condutividade, podem ser descritos e caracterizados por parâmetros geoestatísticos, fornecendo a variabilidade espacial desta propriedade.

A organização espacial dos valores de condutividade, fornecendo as direções de conectividade e continuidade no aquífero, é extremamente importante para simulação de fluxo e de transporte de plumas de contaminantes (JOURNEL e ALABERT, 1988).

Dessa forma, a geração de modelos de subsuperfície para o tratamento de incerteza é pouco utilizada devido à grande variabilidade espacial de muitos parâmetros, como exemplo a condutividade hidráulica. Com isso, a melhor determinação da distribuição de condutividade (K) resultará no melhor modelo de fácies para ser aplicado em um simulador de fluxo.

Conforme Alberto e Chang (2011), para a elaboração de um projeto de remediação por bombeamento e tratamento, em áreas geologicamente complexas, é necessária a análise das incertezas atreladas ao ambiente hidrogeológico por meio de testes de diferentes arranjos espaciais litológicos, uma vez que, quando modelos simplistas são considerados, a remediação pode ser ineficiente, aumentando os custos com novas investigações e ações de remediação adicionais.

A avaliação da incerteza em todas as etapas do processo passa a ser fundamental, ao avaliar um método de recuperação ambiental de um aquífero. Como exemplo, ao definir um cenário de bombeamento e tratamento (técnica de remediação) é necessário prever as possibilidades para o comportamento do fluxo.

1.1 Objetivos Gerais

Os objetivos gerais da pesquisa são:

- Gerar modelo geoestatístico de litologia e nível d'água a partir de informações de sondagens para instalação de poços de monitoramento;
- Elaborar 20 campos de condutividade hidráulica (K), através de simulações estocásticas, com base nas informações do modelo de litologia e dados de campo;
- Analisar as incertezas associadas à variabilidade da condutividade hidráulica (K) na simulação de fluxo da água subterrânea e do transporte de contaminante;

1.2 Objetivos Específicos

- Definir cenários: (i) otimista, (ii) intermediário e (iii) pessimista para o deslocamento da pluma de contaminação em função dos campos de K;
- Simular cenários de bombeamento e tratamento para os resultados otimista, intermediário e pessimista do deslocamento da pluma a fim de se propor um projeto de remediação para a área, bem como avaliar as incertezas no mesmo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Métodos / Procedimentos

O trabalho foi dividido em cinco etapas básicas: (1) delimitação da pluma de contaminação, (2) definição dos grupos de hidrofácies, (3) geração dos campos de condutividade hidráulica (K), (4) simulação numérica do fluxo e transporte de contaminante para os campos de K e (5) simulação de cenários de bombeamento e tratamento.

A etapa 1 foi realizada com base na Decisão de Diretoria da CETESB nº 263-2009-P, enquanto as etapas 2, 3, 4 e 5 foram realizadas utilizando-se os softwares Sgems (Remy, 2004) e *Processing Modflow*, respectivamente.

Ressalta-se que as simulações numéricas possuem como base um caso real de contaminação, no entanto, por motivos específicos de sigilo, este caso não pode ser explicitado.

2.2. Materiais Utilizados

Dados de campo

A base de dados utilizada refere-se a 33 poços de monitoramento instalados em área contaminada, disponibilizada pela empresa Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda. As informações obtidas para a composição desta base de dados estão compiladas na Tabela 1.

A distribuição dos poços (Figura 1) não é regular, sendo que o maior adensamento está no plano horizontal e também os poços de maior profundidade ocorrem na porção norte da área de estudo, local no qual foram diagnosticadas as maiores concentrações do contaminante e considerada área-alvo para a recuperação ambiental.

Os valores de condutividade hidráulica foram obtidos por *slug tests* nos poços de monitoramento da área. Não ocorreu a consideração de evapotranspiração na estimativa de recarga do lençol freático local.

Tabela 1: Informações obtidas para a composição da base de dados

Etapas do Estudo	Informações Utilizadas para a Composição da Base de Dados	Fontes das Informações
Delimitação da Pluma de Contaminação	Concentrações do contaminante dissolvido na água subterrânea	Resultados laboratoriais das concentrações dissolvidas em cada poço*
Definição dos grupos de hidrofácies	Descrição de 331,3 m de testemunhos com informações geológicas de subsuperfície	Campanhas de sondagem para instalação dos poços de monitoramento*
	Cargas hidráulicas dos poços de monitoramento	Medição dos níveis d'água dos 33 poços. Cota topográfica de cada poço*
Geração dos campos de condutividade hidráulica (<i>K</i>)	Porcentagem de areia do perfil estratigráfico de cada poço de monitoramento e estimativa dos valores de <i>K</i>	Campanhas de sondagem para instalação dos poços de monitoramento*
Simulação numérica do fluxo e transporte de contaminante para os campos de <i>K</i>	Distribuição de fácies litológicas e mapa de NA	Modelo geoestatístico de litologia e nível d'água
	Cota do fundo e carga hidráulica do rio localizado a norte da área	Disponibilizada pela Walm
	Valor de recarga do aquífero estudado	CEPAGRI - precipitação anual para a região da área de estudo
	Campos de <i>K</i>	Resultados de <i>SlugTests</i> * e 20 campos estocásticos de condutividade hidráulica
	Condutividade hidráulica para o <i>layer2</i> (base do modelo): 1,0E-06 m/s – horizontal e 1,0E-07 m/s – vertical	
	Porosidade efetiva de 4,5%	Média dos valores obtidos por análises de laboratório*
	Densidade aparente de 1,36 mg/m ³	
Densidade seca de 1,08 mg/m ³		

*Informações fornecidas pela WALM Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda.

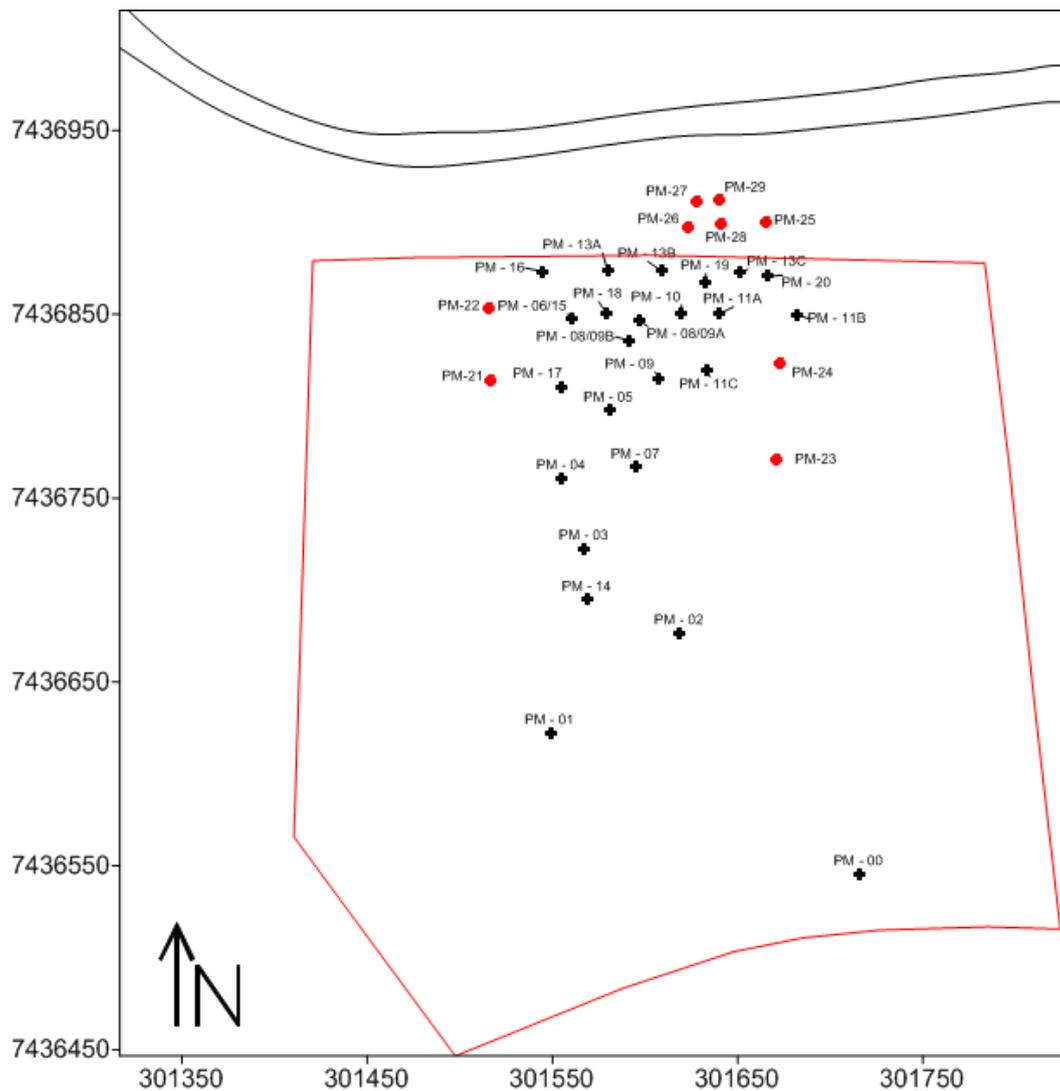


Figura 1: Mapa de localização dos poços de monitoramento

Aplicativos

A técnica da krigagem por indicação estima a probabilidade de ocorrência de variáveis discretas que, no caso deste estudo, compreendem as hidrofácies definidas nos poços.

Este método tem como etapa inicial a transformação binária dos dados. Desta maneira, são geradas as variáveis indicatrizes ($I(x)$) dado um conjunto x e o complementar x^c , no domínio $A = X \cup X^c$, onde há amostras x_i localizadas em A com $i=1, \dots, n$. A variável indicatriz $I(x_i)$ é dada por:

$$(1) \quad I(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{se } x_i \in X \\ 0, & \text{se } x_i \in X^c \end{cases}$$

onde X é um conjunto do domínio A e X^c o conjunto complementar de X .

A condição conduz a um quadro onde os valores assumidos a cada conjunto e em cada ponto amostral pertencem a 0 ou 1. Posterior à definição das variáveis indicatrizes, realizam-se procedimentos similares ao utilizado na krigagem ordinária, como a determinação do variograma experimental das indicatrizes e o ajuste do modelo variográfico.

Foram realizadas simulações estocásticas para a geração dos 20 (vinte) cenários com diferentes distribuições de condutividade hidráulica. O método escolhido foi a simulação gaussiana sequencial (SGS).

A SGS é a aplicação de procedimento de simulação sequencial para funções aleatórias multigaussianas. Considerando a simulação de N variáveis aleatórias (2) $\{Z(x_i), i = 1, N\}$ localizados sobre os nós de uma malha regular e condicionadas ao conjunto de n pontos de dados (3) $\{z(x_\alpha), \alpha = 1, n\}$.

Neste algoritmo, um valor aleatório é atribuído a cada célula que não possui dado experimental, definindo uma ordem aleatória para todas as células da malha. Para cada célula, a função de densidade de probabilidade (fdp) é estimada baseada em um número de dados condicionantes vizinhos (dados iniciais e dados simulados precedentemente). Um valor aleatório desta fdp é atribuído estabelecendo uma continuidade espacial.

O software *Processing Modflow* (PMWIN, 3D – *Groundwater Modeling With PMWIN. A simulation System For Modeling Groundwater Flow and Transport Processes*, Chiang, 2005) integra algoritmos de modelo de fluxo de água subterrânea com modelos de transporte de solutos e de calibração. Neste trabalho foram utilizadas três rotinas contidas no PMWIN, sendo elas:

- Modelo de Fluxo de Água Subterrânea: MODFLOW;
- Modelo de Transporte de Solutos: MT3D;
- Ferramentas de Calibração Inversa: PEST.

Para a simulação do bombeamento e tratamento foram considerados 03 cenários com diferentes números de poços de bombeamento e injeção a diferentes vazões e posições geográficas (Tabela 2 e Figura 2).

Tabela 2: Quantidades e vazões dos poços de bombeamento e injeção utilizados para cada cenário

Poços de Bombeamento e Injeção	Nº de Poços, Vazões Individuais e Totais	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
Poços de Bombeamento	Nº de Poços	07	07	09
	Vazão Individual	110 L/h	130 L/h, 110 L/h, 125 L/h e 4 poços com 150 L/h	06 poços com 110 L/h e 3 poços com 90 L/h
	Vazão Total	770 L/h	965 L/h	930 L/h
Poços de Injeção	Nº de Poços	05	05	05
	Vazão Individual	154 L/h	193 L/h	186 L/h
	Vazão Total	770 L/h	965 L/h	930 L/h

*L/h = Litros por hora

Os poços de injeção foram simulados com a intenção de manter o cenário de simulação mais próximo possível do caso real.

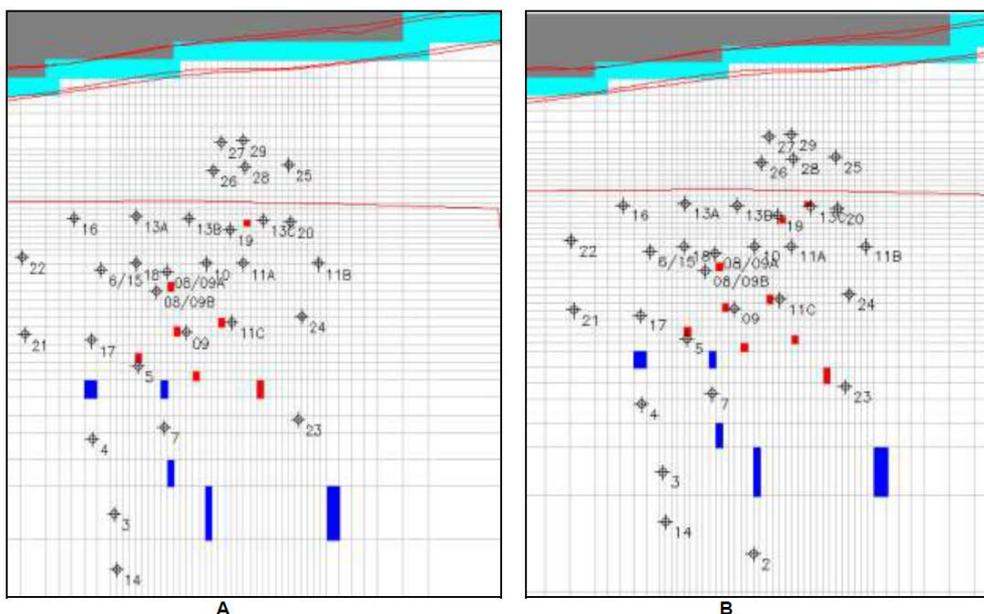


Figura 2: (A) Configuração dos poços de bombeamento e injeção para os cenários 01 e 02; (B) configuração dos poços de bombeamento e injeção para o cenário 03. Células em vermelho: poços de bombeamento. Células em azul: poços de injeção

2.3. Aspectos Físicos da Área

2.3.1 – Geologia Regional

A partir das informações presentes no mapeamento realizado pelo IPT (1981) para o Estado de São Paulo, foi possível identificar duas unidades geológicas presentes na região da área de estudo, sendo elas:

Sedimentos Aluvionares do Cenozóico (Qa): Aluviões em geral, incluindo areias inconsolidadas de granulação variável, argilas e cascalheiras fluviais subordinadamente, em depósitos de calha e/ou terraços;

Suítes Graníticas Sintectônicas do Pré Cambriano: Representada pelo Complexo Amparo e constituída por biotita gnaisses, biotita-hornblenda gnaisses, granada-biotita gnaisses, gnaisses migmatizados, migmatitos de estruturas diversas, subordinadamente biotita xistos, quartzitos, anfíbolitos, gonditos e metaultrabasitas.

Os depósitos aluvionais representam aluviões em geral, incluindo areias inconsolidadas de granulação variável, argilas e cascalheiras fluviais subordinadamente, em depósitos de calha e/ou terraços. Possuem idade quaternária sendo que os depósitos de grande porte são encontrados ao longo da margem do rio situado a norte da área.

O Complexo Amparo do embasamento pré cambriano é composto, basicamente, por gnaisses com grau variável de migmatização e intercalações de quartzitos, xistos, anfíbolitos, gonditos e metaultrabasitas. Também ocorrem intrusões de granitóides na região e mais raramente, ocorrem filitos pertencentes ao Grupo São Roque.

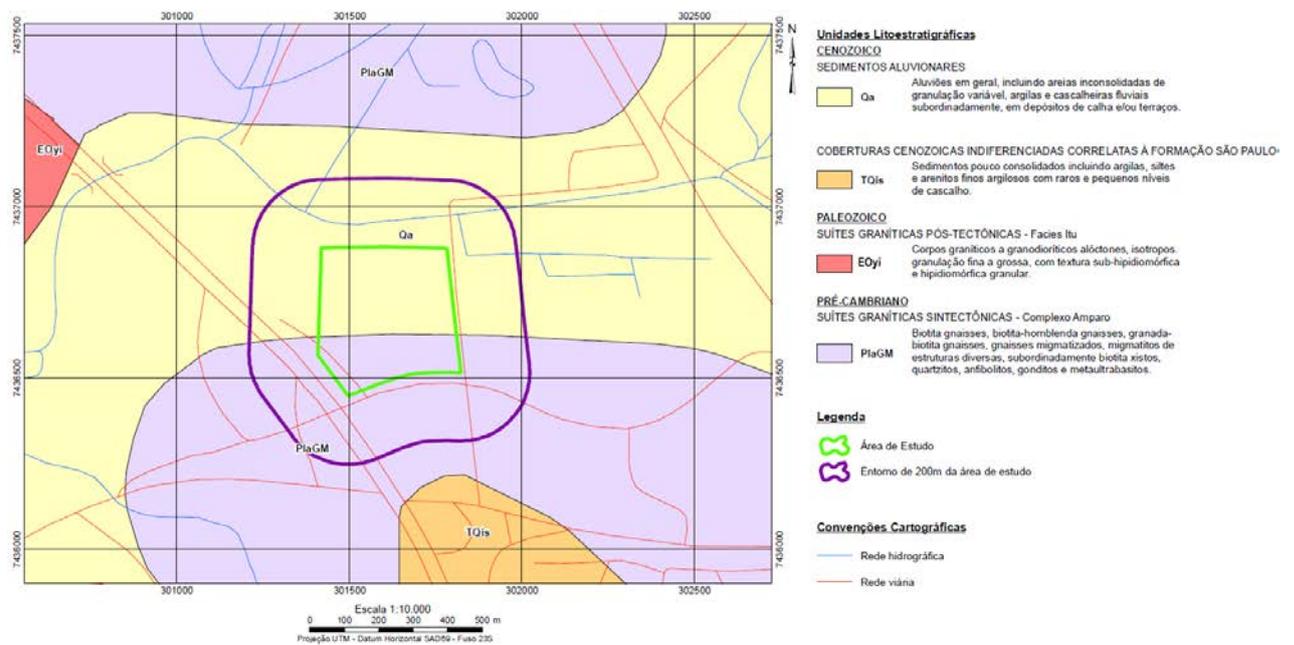


Figura 3: Mapa geológico esquemático da área de estudo

2.3.2 – Geologia e Hidrogeologia Local

A partir das informações advindas de dois perfis construtivos de um poço semi-artesiano e de outro poço tubular profundo instalado na área é possível caracterizar a geologia local da seguinte maneira, da base para o topo sequencia estratigráfica:

350 a 40 metros: Rochas do embasamento cristalino (Complexo Amparo) com predomínio de Gnaisses (melanocrático, mesocrático e leucocrático). Estes gnaisses apresentam coloração cinza a cinza claro com intercalações mais xistosas de coloração esverdeada e com feldspato róseo;

40 a 30 metros: Rocha gnáissica pouco alterada cinza esverdeado e fraturado – Alteração do próprio Complexo Amparo;

30 a 0 metros: Depósitos sedimentares quaternários relacionados aos processos de erosão e transporte do Rio situado a norte da área – Sedimentos Aluvionares do Cenozóico.

Para a caracterização hidrogeológica local, primeiramente foi realizado o levantamento topográfico dos poços de monitoramento instalados com o objetivo de obter as coordenadas UTM (Datum SAD 69) de cada poço de monitoramento. Foram também realizadas medições de nível d'água dos poços de monitoramento no mesmo dia, e, posteriormente, calculadas suas cargas hidráulicas.

Com a compilação destas informações, foi diagnosticado fluxo d'água subterrânea com orientação preferencial de Sul para Norte, no sentido da zona de descarga local (Rio localizado a norte da área), com pequenas alterações pontuais, conforme é apresentado na Figura 4.

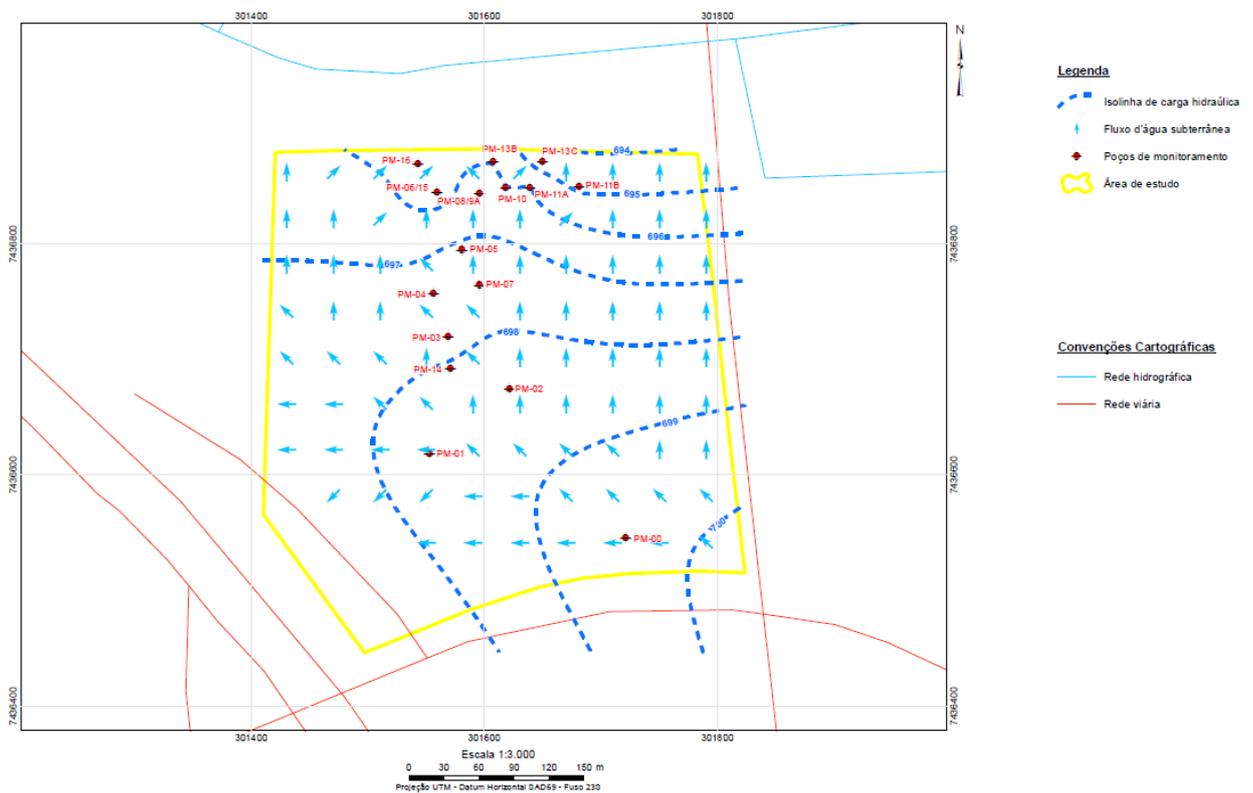


Figura 4: Mapa potenciométrico da área de estudo

3. RESULTADOS OBTIDOS

Em função das diferentes descrições e dos vários tipos de fácies descritas, os diferentes tipos litológicos foram divididos em três grupos conforme a granulação do sedimento e composição.

A determinação dos grupos foi baseada na granulação e grau de seleção, assumindo a correlação entre esses dois parâmetros com porosidade e permeabilidade da formação geológica, respectivamente. Não será analisado nesse trabalho o impacto causado por diferentes agrupamentos de fácies. Os três grupos definidos estão ilustrados na Tabela 3, sendo eles:

- Sedimentos arenosos;
- Sedimentos compostos por cascalhos;
- Sedimentos argilosos.

Tabela 3: Grupos associados aos sedimentos descritos

Grupo Hidrofácies	Tipos Litológicos Descritos
Sedimentos Arenosos	Solo arenoso médio a grosso
	Areia fina
	Solo arenoso fino a médio
	Areia argilosa
	Solo areno-siltoso
	Areia argilosa ou Areia pouco argilosa
	Silte arenoso ou Silte pouco arenoso
	Areia siltosa
Cascalho	Cascalho
Sedimentos Argilosos	argila pouco arenoso
	Solo argilo-arenoso
	Solo argiloso
	Silte argiloso
	Solo silto-arenoso
	argila
	argilo-arenoso
	argila
Silte pouco argiloso ou Silte argiloso	

Grupo Hidrofácies	Tipos Litológicos Descritos
	Argila arenosa
	Argila siltsosa

Os mapas da krigagem por indicatriz fornecem a probabilidade de ocorrência de cada grupo litológico considerado, e assim possibilitam estimar a incerteza na distribuição de cada variável, por isso, seus valores são representados entre 0 e 1. Os mapas com a distribuição de cada variável estão apresentados na Figura 5, os resultados são referentes aos mapas a 1, 4 e 7 metros de profundidade.

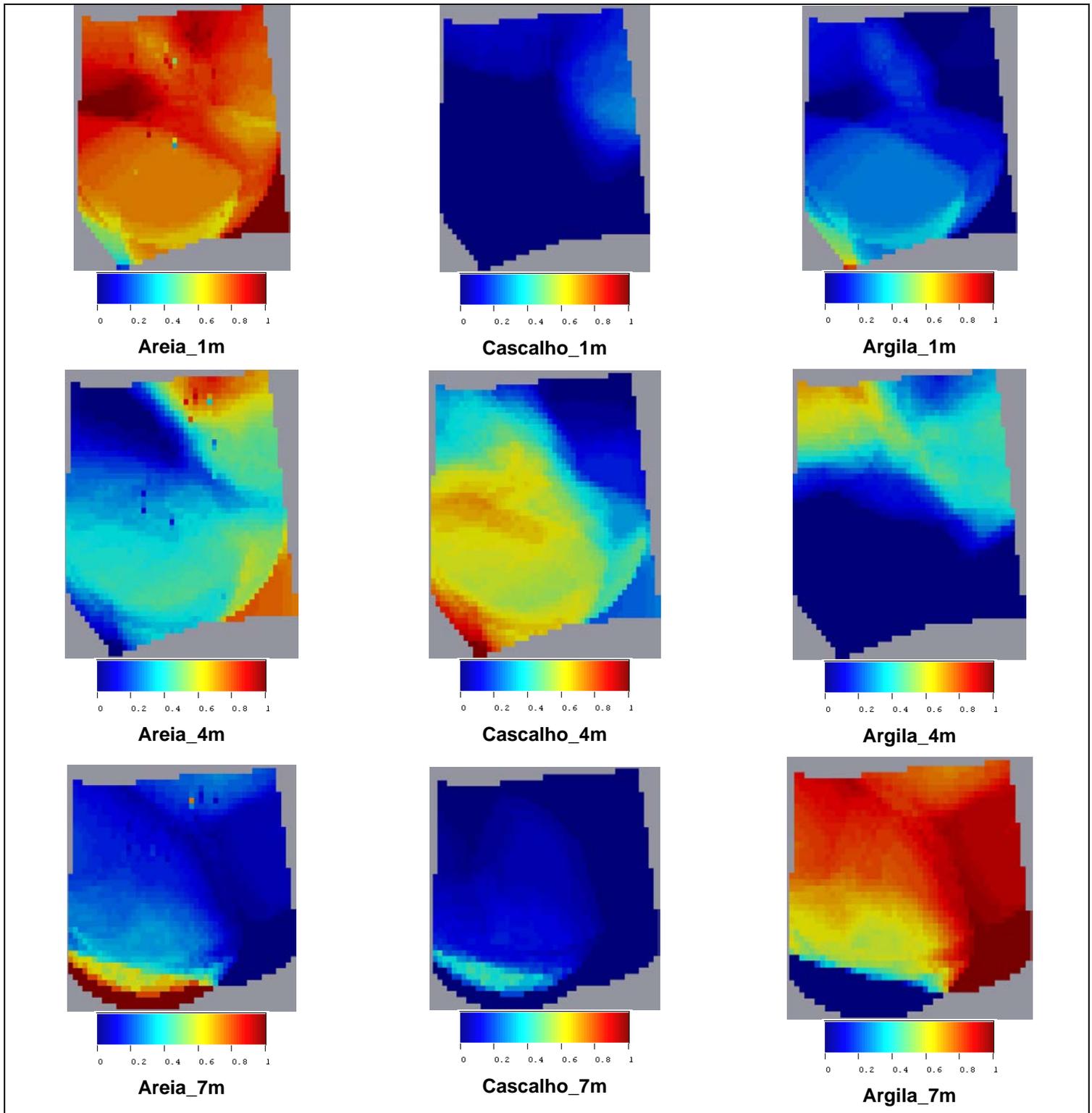


Figura 5: Resultados da krigagem por indicatriz para 1, 4 e 7 metros de profundidade Atribuindo-se as possíveis variações de condutividade hidráulica para as três litologias descritas, a distribuição espacial da probabilidade de ocorrência de sedimentos arenosos,

cascalho e sedimentos argilosos, nos planos horizontal e vertical, possibilita a previsão das zonas de fluxo que permitem o transporte do contaminante no aquífero.

Para o caso estudado, as prováveis zonas de fluxo estariam entre 0 e 10 metros de profundidade na porção centro – norte da área, onde predominam os sedimentos arenosos mais permeáveis.

A evidente correlação entre o modelo de fácies sedimentares e o comportamento do nível estático foi constatada ao analisar os dois mapas. O maior rebaixamento da borda nordeste da área é provocado pela presença maior de sedimentos arenosos em área que predominam sedimentos argilosos (Figura 6). Provavelmente, esta espessura de sedimentos arenosos presente nos poços, localizados no limite nordeste, pode estar em conexão com a drenagem do rio e/ou ser proveniente da dinâmica de sedimentação fluvial.

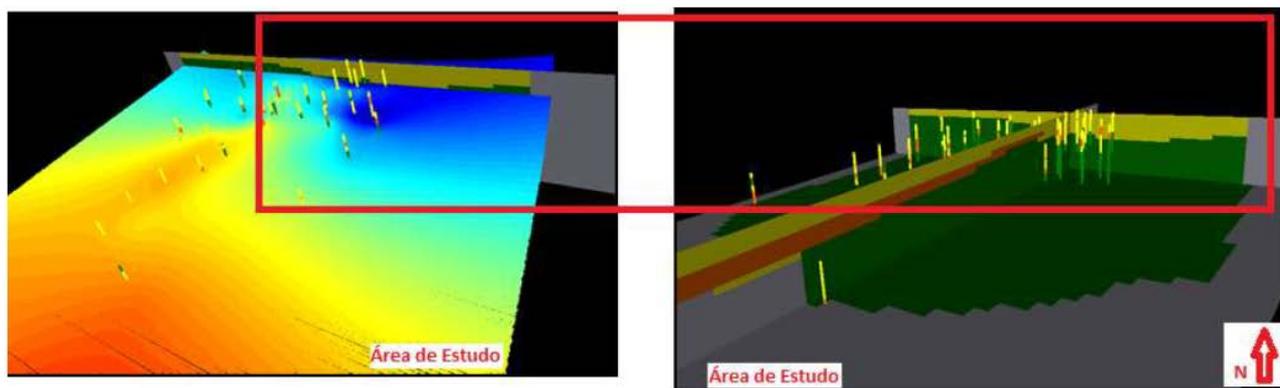


Figura 6: Detalhe do maior rebaixamento do lençol freático associado aos poços presentes no limite nordeste da área de estudo, com elevada espessura de sedimentos arenosos

3.1. Simulações Estocásticas

Foram geradas vinte simulações de K, com distribuições espaciais distintas, respeitando as informações advindas do modelo geoestatístico gerado pela krigagem da indicatriz. Os dados de litologia provenientes das sondagens para a instalação dos 33 poços de monitoramento foram correlacionados aos dados de ensaios hidrogeológicos (*slug test*) realizados em campo.

A Figura 7 apresenta três realizações das 20 opções simuladas, gerando 20 conjuntos de distribuição espacial dos valores de condutividade hidráulica. As simulações foram denominadas pelos números de 1 a 20 de K.

Ressalta-se que estas simulações tiveram como dados de entrada os resultados de ensaios hidrogeológicos de campo, os quais possuem incertezas associadas e foram realizados em filtros dos poços de monitoramento localizados na sua maioria em sedimentos argilosos e não nos cascalhos presentes na área de pesquisa.

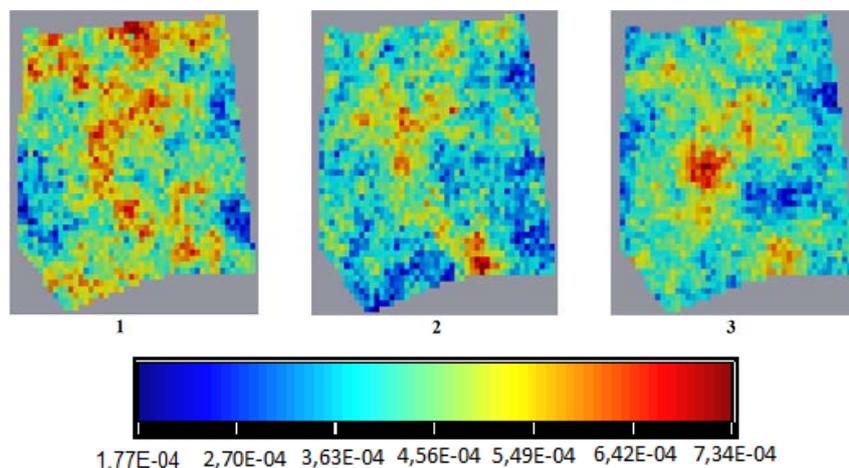


Figura 7: Distribuição espacial dos valores de K (m/s) para três realizações das simulações

3.2. Simulações de Fluxo e Transporte de Contaminantes

Para a modelagem numérica foi utilizada malha de 52x53 blocos referente à 430x540m. Em profundidade, o modelo é dividido em duas camadas, a superior com 10m de espessura e a inferior com 20m de espessura. A espessa camada argilosa na base do modelo foi observada na descrição dos perfis de sondagem realizados na área.

O modelo foi executado no simulador para o intervalo de tempo de 02 anos, sendo calculadas e avaliadas as áreas das plumas de cada simulação para 1,0 ano, 1,5 anos e 2,0 anos. A determinação das áreas das plumas modeladas, resultado das simulações numéricas realizadas para os 20 cenários de K, são descritas na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados das áreas das plumas simuladas para os 20 cenários de K

Cenários de K	Tempo Simulado		
	01 ano	1,5 anos	02 anos
	Área m ²		
1	7508,96	3574,79	343,86
2	13904,43	9019,00	4430,48
3	13877,80	8434,23	4369,96
4	9521,63	7558,27	2753,63
5	10813,14	7720,27	4147,72
6	11749,49	7947,07	4361,91
7	15271,47	4511,16	2883,78
8	12258,63	8015,26	4327,79
9	12269,55	8058,57	4430,23
10	7495,56	4370,51	375,36
11	16299,32	11004,91	8097,67
12	7544,99	4367,21	390,20
13	16893,21	6716,93	3415,78
14	7125,13	4258,40	329,39
15	27711,58	13868,76	8731,54
16	16511,63	10994,53	4407,45
17	7001,52	4284,97	384,73
18	10547,78	6994,50	2721,69
19	14282,38	10856,77	5218,27
20	15209,76	8423,95	3627,90

4. CONCLUSÕES

O trabalho realizado na pesquisa buscou a realização das várias etapas no processo de remediação de plumas de contaminação, como: modelo de litologia por métodos determinísticos; métodos estocásticos de distribuição de K; simulação numérica de fluxo; análise da incerteza relacionada à K correspondente ao dimensionamento das áreas das plumas; por fim a análise da configuração ideal de uma remediação. Os resultados obtidos dessas etapas foram:

- A evidente correlação entre o modelo sedimentar e o comportamento do nível estático foi constatada, onde o maior rebaixamento da borda nordeste da área é provocado pela presença maior de sedimentos arenosos em área que predomina argila. Com isso, a maior espessura de sedimentos arenosos presente nos poços localizados no limite nordeste pode estar em conexão com a drenagem do rio situado a norte;
- As áreas das plumas são bastante diferentes, de acordo com os distintos campos de condutividade hidráulica simulados, mesmo considerando esta variabilidade de K atrelada somente a um grupo de hidrofácies, no caso, sedimentos arenosos;
- Estas distintas áreas geradas corroboram com a ideia de que a heterogeneidade atrelada a K aumenta as incertezas para a definição de um projeto de remediação utilizando-se da técnica de bombeamento e tratamento, podendo ocasionar, o

subdimensionamento e/ou o superdimensionamento da área alvo da remediação provocando o aumento do tempo do processo de recuperação ambiental e consequentemente possível aumento dos custos atrelados ao processo;

- A incerteza atrelada à K também pode afetar a intensidade do rebaixamento provocado pela remediação. Tal fato ficou evidente quando o cenário 3, mesmo possuindo menor vazão de bombeamento do que o 2, apresentou-se como o mais eficiente em relação à diminuição das áreas das plumas ao longo dos dois anos da remediação;
- A alta variabilidade nos resultados obtidos das áreas das plumas do contaminante em função dos diferentes campos de condutividade gerados retrata um contexto com predomínio de incertezas em relação ao conhecimento de K em subsuperfície, em face da alta heterogeneidade litológica da área de estudo.

Sendo assim, com base nos resultados obtidos observa-se que ainda é necessária a redução das incertezas nas simulações de sistemas de bombeamento e tratamento. Para tal propósito é interessante a complementação através de estudos com alternativas tanto de configurações espaciais e vazões de bombeamento como em função de diferentes condutividades hidráulicas e velocidades de recarga em um aquífero contaminado.

5. REFÊRENCIAS

ALBERTO, C.M; CHANG, H.K. Os Desafios da Remediação por Bombeamento e Tratamento em Domínios Geológicos Complexos: O Uso de Modelos Estocásticos Para Auxiliar na Determinação da Zona de Captura. *Águas Subterrâneas*, v.25, n.1, p.121- 142, 2011.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Roteiro para execução de investigação detalhada e elaboração de plano de intervenção em postos e sistemas retalhistas de combustíveis. Decisão de Diretoria Nº 263/2009/P, de 20 de outubro de 2009.

GÉGO, E. L.; M. HANKINS, G. S. JOHNSON. An evaluation of methodologies for generation of stochastic hydraulic conductivity fields in highly heterogeneous aquifers. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 15, 47-64, Springer – Verlag, 2001.

JOURNEL, A. G.; ALBERT, F. G. Focusing on spatial connectivity of extreme-valued attributes: Stochastic indicator models of reservoir heterogeneities. SPE Paper Nº 18324 presented at the 63rd Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Houston, TX, 1988.

REMY, N., BOUCHER, A. WU, J. *Applied Geostatistics with SGeMS*. Cambridge University Press, 264p, 2004.

WEN-HSING CHIANG. *3D-Groundwater Modeling with PMWIN (Second ed.)*, 2005.