



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

UNCERTAINTY ANALYSIS FOR SIMULATING PUMP-AND-TREAT IN CONTAMINATED AREAS

Caetano Pontes Costanzo¹, Alexandre Campana Vidal²

Artigo recebido em: 27/02/2014 e aceito para publicação em: 06/12/2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v29i1.27865>

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 different 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 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.

Keywords: Indicator kriging. Stochastic simulations. Numerical simulations. Hydraulic conductivity.

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.

Palavras-chave: Krigagem da indicatriz. Simulações estocásticas. Simulações numéricas. Condutividade hidráulica.

¹ Departamento de geologia e recursos naturais – UNICAMP (caetano.costanzo@gmail.com).

² Departamento de geologia e recursos naturais – UNICAMP (vidal@ige.unicamp.br)

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

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, a partir de dados coletados em campo, 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 (DEMIRCI e AKSOY, 2011).

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.

Dessa forma, os principais objetivos deste trabalho 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;
- 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.

MATERIAIS E MÉTODOS

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* (Chiang, 2005), respectivamente.

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.

Tabela 1 - Informações obtidas para a composição da base de dados
Table 1 - Information obtained for the database composition

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 (K)	Porcentagem de areia do perfil estratigráfico de cada poço de monitoramento e estimativa dos valores de K	Campanhas de sondagem para instalação dos poços de monitoramento
	Distribuição de fácies litológicas e mapa de NA Cota do fundo e carga hidráulica do rio localizado a norte da área	Modelo geoestatístico de litologia e nível d'água Disponibilizada pela Walm
Simulação numérica do fluxo e transporte de contaminante para os campos de K	Valor de recarga do aquífero estudado	Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura - CEPAGRI - precipitação anual para a região da área de estudo
	Campos de K Condutividade hidráulica para o layer2 (base do modelo): 1,0E-06 m/s – horizontal e 1,0E-07 m/s – vertical	Resultados de <i>SlugTests</i> e 20 campos estocásticos de condutividade hidráulica
	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	

Fonte: WALM Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda, 2013 e CEPAGRI, 2012.

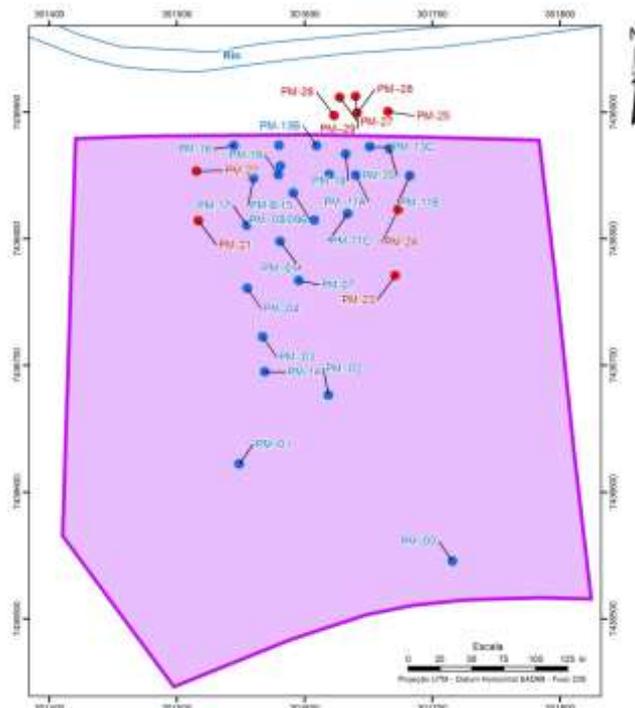


Figura 1 - Mapa de localização dos poços de monitoramento
Figure 1 - Location map of monitoring wells

Aplicativos

✓ *Definição dos Grupos de Hidrofácies*

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:

$$I(x_i) = 1, \text{ se } x_i \in X \\ = 0, \text{ se } x_i \in X^c$$

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 pertençam 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.

✓ *Simulações da Condutividade Hidráulica*

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).

De acordo com Landim (2013), a SGS é a aplicação de procedimento de simulação sequencial para funções aleatórias multigaussianas. Considerando a simulação de N variáveis aleatórias

$\{Z(x_i), i = 1, N\}$ localizados sobre os nós de uma malha regular e condicionadas ao conjunto de n pontos de dados $\{z(x_\alpha), \alpha = 1, n\}$.

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.

✓ *Simulação Numérica de Fluxo e Transporte*

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.

✓ *Cenários de Bombeamento e Tratamento*

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
Table 2 - Quantities and flow rates of pumping and injection wells used for each scenario

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

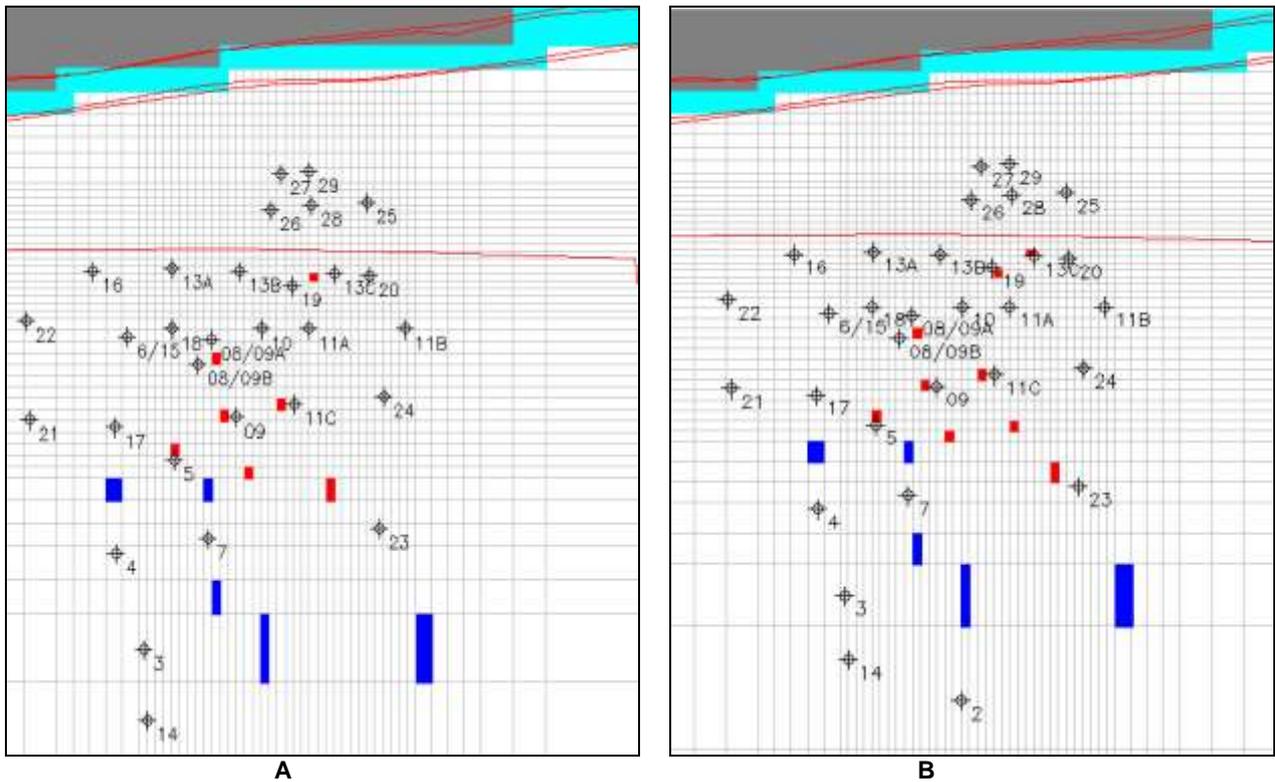


Figura 2 - (A) Configuração dos poços de bombeamento e injeção para os cenários 01 e 02; (B) configuração dos poços de bombeamento e injeção para o cenário 03. Células em vermelho: poços de bombeamento. Células em azul: poços de injeção

Figure 2 - (A) Configuration of pumping and injection wells for scenarios 01 and 02, (B) configuration of pumping and injection wells for scenario 03. Cells in red: pumping wells. Cells in blue: injection wells

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Geologia Regional

A partir das informações presentes no mapeamento realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - 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,

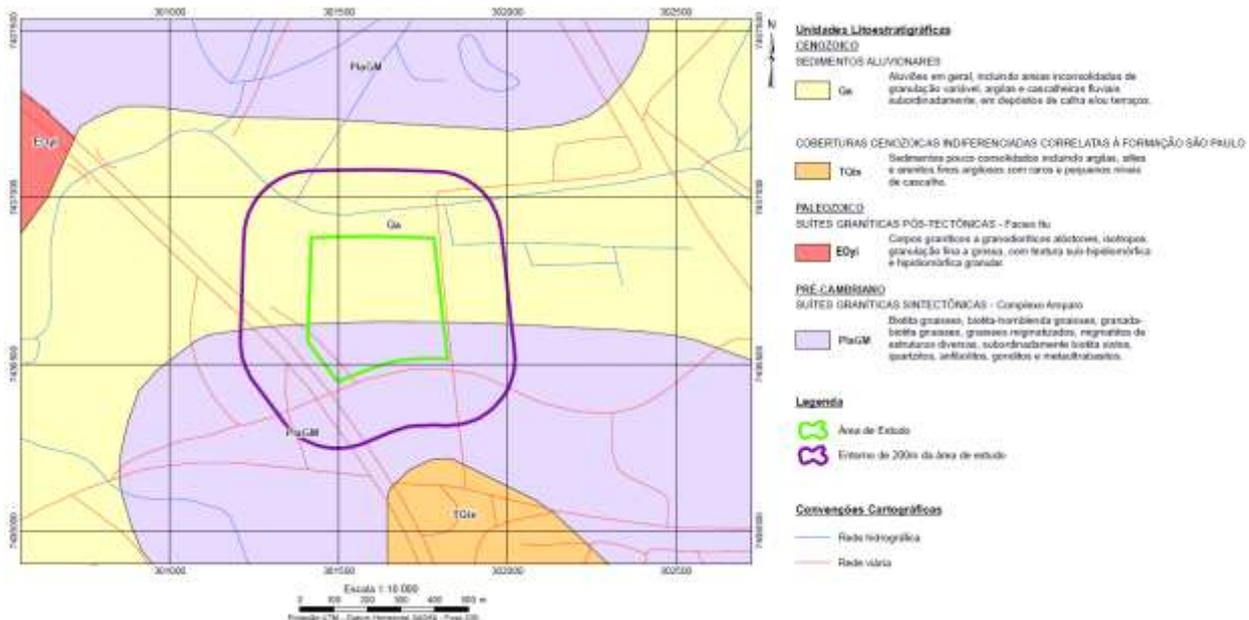
argilas e cascalheiras fluviais subordinadamente, em depósitos de calha e/ou terraços;

- 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, subor-

dinadamente biotita xistos, quartzitos, anfibolitos, 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, anfibolitos, gonditos e metaultrabasitas. Também ocorrem intrusões de granitóides na região e mais raramente, ocorrem filitos pertencentes ao Grupo São Roque.



Fonte: IPT (1981)

Figura 3 - Mapa geológico esquemático da área de estudo
Figure 3 - Schematic geological map of the study area

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.

RESULTADOS OBTIDOS

Krigagem da Indicatriz

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.

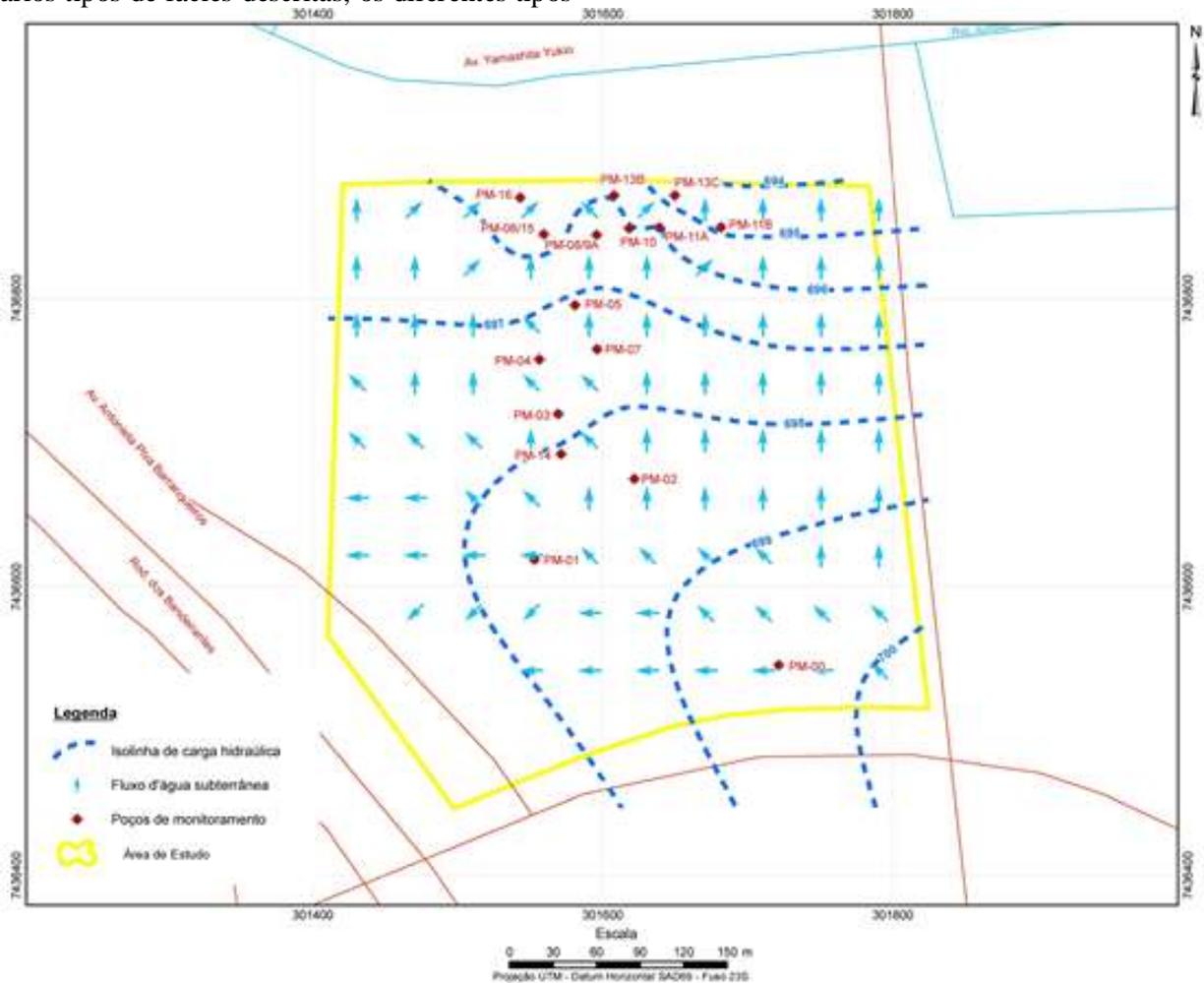


Figura 4 - Mapa potenciométrico da área de estudo
Figure 4 - Potentiometric map of the area

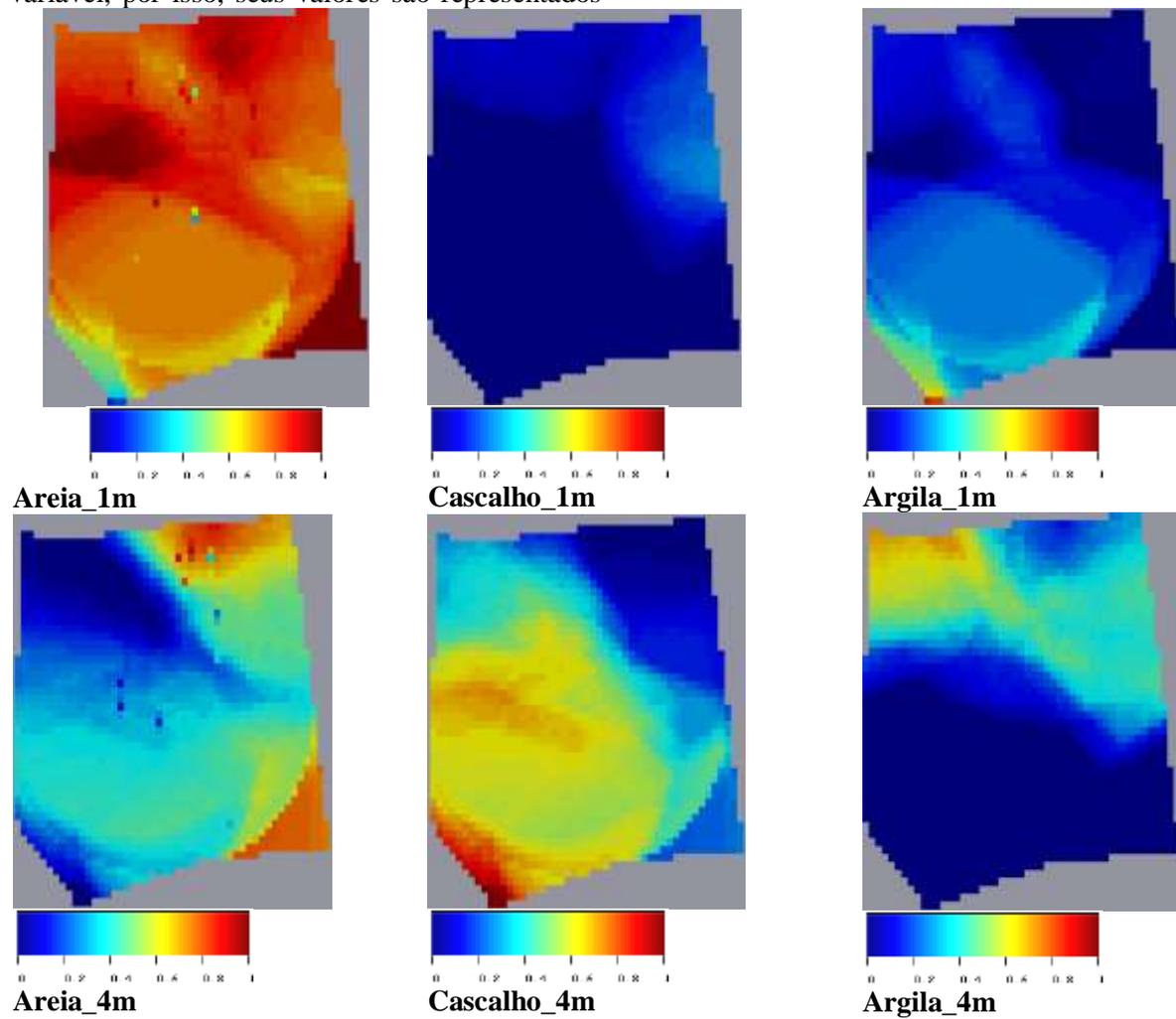
Tabela 3 - Grupos associados aos sedimentos descritos
Table 3 - Groups associated with sediments described

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	Solo argilo-arenoso Solo argiloso Silte argiloso Solo silto-arenoso Argila Silte pouco argiloso ou Silte argiloso Argila arenosa Argila siltosa

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.



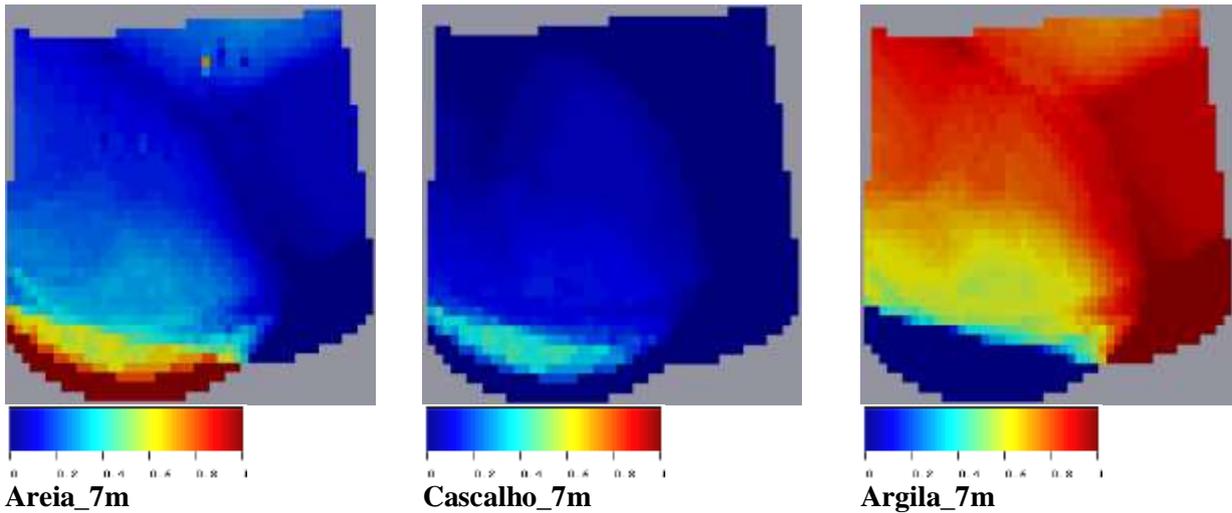


Figura 5 - Resultados da krigagem por indicatriz para 1, 4 e 7 metros de profundidade
Figure 5 - Kriging indicatrix results for 1, 4 and 7 meters deep

Os sedimentos arenosos possuem alta probabilidade de ocorrência a um metro de profundidade em praticamente toda área, ao passo que sedimentos argilosos e cascalho apresentam baixa probabilidade de ocorrência nesta profundidade. A quatro metros da superfície, o cascalho possui média a alta probabilidade de ocorrência nas porções sul e central, enquanto os sedimentos arenosos nas regiões nordeste e sudeste e os argilosos na região noroeste. No entanto, a maior área refere-se à alta probabilidade de ocorrência do cascalho a quatro metros de profundidade.

Os sedimentos argilosos apresentam alta probabilidade de ocorrência em toda a área na profundidade de sete metros, já os arenosos aparecem apenas na borda sudoeste e o cascalho possui baixa probabilidade de ocorrência nesta 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.

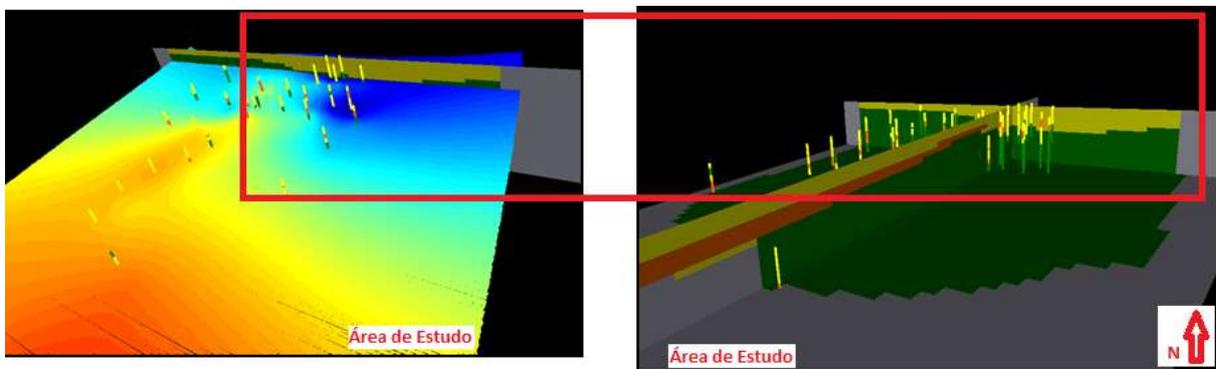


Figura 6 - Detalhe do maior rebaixamento do lençol freático associado aos poços presentes no limite nordeste da área de estudo

Figure 6 - Details largest drawdown associated with wells present in the northeastern boundary of the area

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.

Na Figura 7 é apresentada a correlação utilizada entre os dados de litologia (porcentagem de areia) dos poços de monitoramento instalados no local do estudo e os resultados de *slug tests* realizados. Com base nesta correlação, estimaram-se os valores de K iniciais antes da geração dos campos aleatórios desta variável.

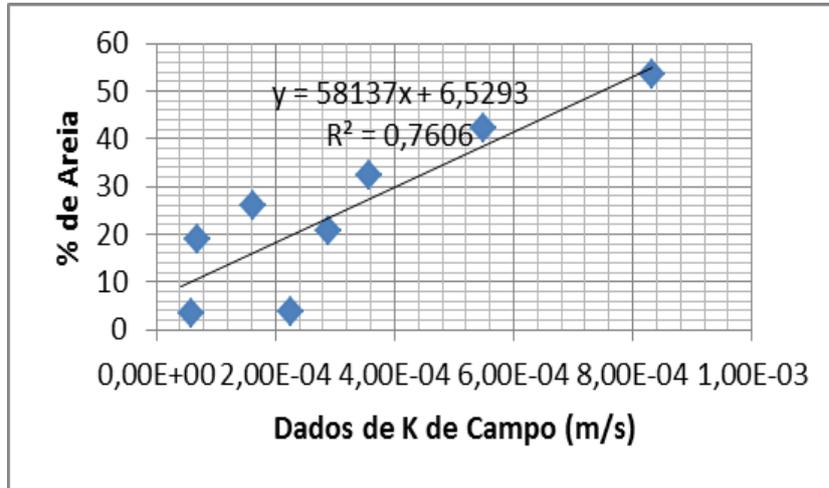


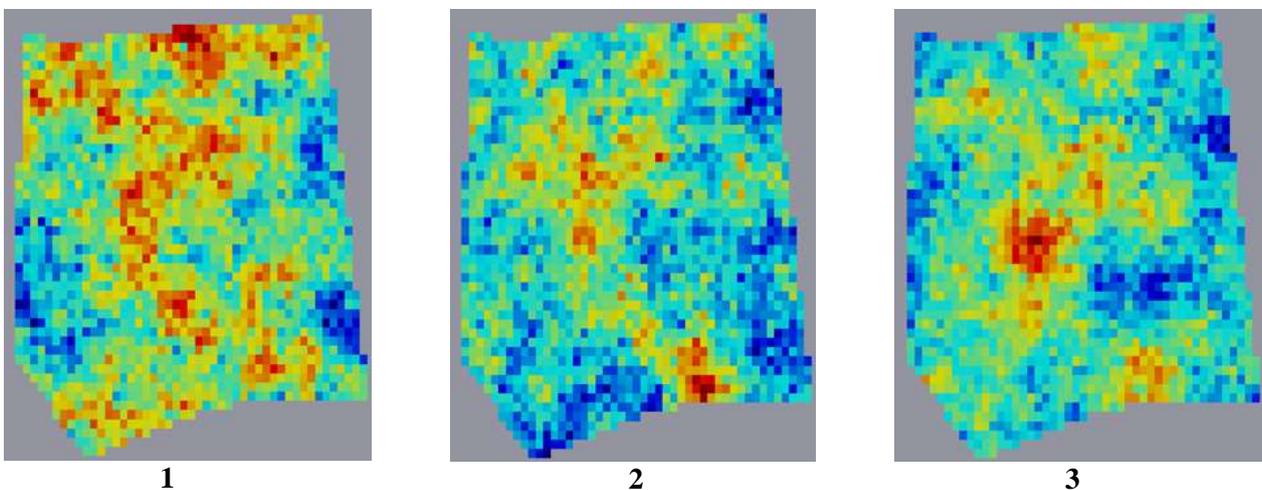
Figura 7 - Correlação obtida entre porcentagem de areia e dados de condutividade hidráulica obtidos em campo
Figure 7 - Correlation between percentage of sand and hydraulic conductivity data

Conforme apresentado no item 4.1, as hidrofácies arenosas predominam na profundidade até 10m. Considerando esta informação advinda do modelo geoestatístico de litologia, a porcentagem de areia foi calculada até esta profundidade.

Esta correlação entre porcentagem de areia e dados de K de campo foi considerada em todas as simulações realizadas, que significa que todos os campos de condutividade hidráulica apresentaram, em área, a mesma distribuição percentual dentro das hidrofácies arenosas, mudando apenas a sua localização.

A Figura 8 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.



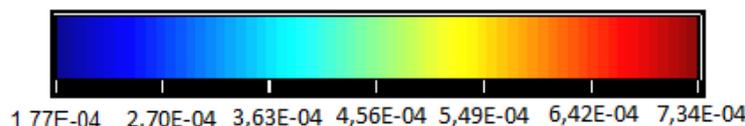


Figura 8 - Distribuição espacial dos valores de K (m/s) para três realizações das simulações
Figure 8 - Spatial distribution of K (m/s) for three stochastic simulations realizations

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 adensamento da malha foi realizado próximo à área-alvo, onde há maior densidade de poços (porção norte da área). Este procedimento possibilita o detalhamento da análise na área de interesse.

A decisão para a escolha de duas camadas deve-se à análise de distribuição de fácies presente na modelagem geoestatística, onde os resultados mostram o predomínio de litologias argilosas na base e arenosas próximas a superfície.

Definiu-se a camada superior como de comportamento não-confinado, enquanto a camada da base como Confinada/Não-confinada com

transmissividade variável, visto que há variações de nível d'água que fazem com que este fique mais profundo que seu topo em alguns momentos do ciclo hidrológico.

Para a incorporação das condições de contorno junto ao rio situado a norte, foram inseridos dados de carga hidráulica e cota de fundo do rio, calculados para toda a extensão de acordo com a interpolação de valores levantados em campo. Além destas o programa solicita a inserção de mais um parâmetro: o “*Riverbed Hydraulic Conductance*” que traduz a interação entre a água subterrânea e o leito do rio. Este último parâmetro é usualmente desconhecido, devendo ser estimado de acordo com Chiang (2005). Desta maneira, primeiramente adotou-se o valor de 1 m²/s e, após a calibração inversa

através do PEST, este valor foi confirmado como sendo adequado para o modelo.

O valor de recarga do aquífero adotado inicialmente foi de 1x10⁻⁹m/s (CEPAGRI, 2012), tendo sido também calibrado através do PEST e encontrando-se valor final de 1,74x10⁻⁹ m/s.

A introdução de outras variáveis como evapotranspiração, reservatórios e barreiras é possível dentro do PMWIN, contudo, para o escopo deste estudo, os dados introduzidos são suficientes para o objetivo estabelecido.

Conforme citado no item 3.2, as direções de fluxo da água subterrânea são de sul para norte, por isso foi adotado como condições de contorno somente as bordas sul, com células de carga constante, definido pelo mapa potenciométrico, e a norte foi adotado o rio como área de descarga. Na porção a norte da margem do rio as células foram consideradas nulas.

O aquífero em estudo não foi considerado isotrópico. Conforme informado na tabela 1, a condutividade horizontal (1,0E-06 m/s) é diferente da vertical (1,0E-07 m/s), por conter diversidade litológica.

A partir do modelo numérico gerado e das vinte simulações de K, foram realizadas simulações numéricas do fluxo da água subterrânea e do transporte de contaminante, para avaliação das possíveis configurações espaciais das plumas de contaminação, comparando-se e avaliando-se os resultados obtidos para cada cenário de condutividade hidráulica. Ressalta-se que não foram consideradas contaminações residuais (fonte secundária) nas simulações realizadas nesta pesquisa.

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 5, enquanto a Tabela 4 contempla as informações utilizadas no simulador.

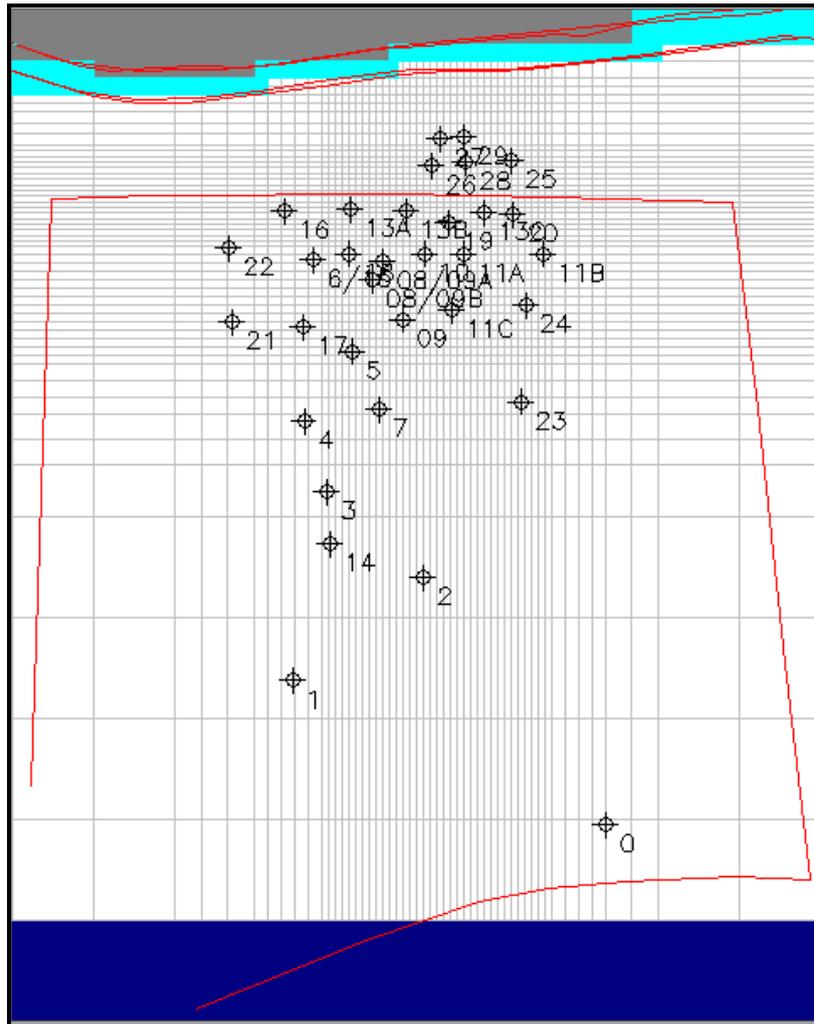


Figura 9 - Malha com diminuição do tamanho de células na área de maior interesse
Figure 9 - Mesh with decreasing size of cells in the area of greatest interest

Tabela 4 - Informações utilizadas para o modelo

Table 4 - Information used for the model

Contaminante considerado	Sulfato	Justificativa da Informação
Coefficiente de Distribuição	0,0	Fator de retardamento para este parâmetro não é significativo, o que faz com que o Sulfato possua mobilidade muito maior que a de metais em geral.
Porosidade Efetiva Para a Camada Superior	4 e 6%	6% para áreas de maior porcentagem de areias e 4% para a região de menor porcentagem.
Porosidade Efetiva Para a Camada Inferior	2%	Constante para toda a camada em função do maior volume de sedimentos argilosos.
Fator de Retardamento	0,0	Fator de retardamento para este parâmetro não é significativo, o que faz com que o Sulfato possua mobilidade muito maior que a de metais em geral.
Coefficiente de Decaimento de Primeira Ordem	Não foi utilizado	Para o sulfato esta opção não foi utilizada.
Concentrações Iniciais Utilizadas	Dados provenientes da pluma de contaminação delimitada a partir dos resultados das análises realizadas e fornecidas pela Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda.	

Tabela 5 - Resultados das áreas das plumas simuladas para os 20 cenários de K

Table 5 - Results of the simulated plume areas to 20 K scenarios

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

Para o primeiro ano da simulação foi elaborado o histograma de frequência acumulada para as áreas resultantes do modelo numérico a fim de se realizar uma análise de cenários (otimista, intermediário e pessimista) nos resultados das simulações de fluxo e transporte de

contaminante

em função dos cenários aleatórios de K.

A Tabela 6 contempla os dados utilizados para a geração do histograma, enquanto a Figura 10 apresenta o mesmo com a posição dos cenários analisados.

Tabela 6 - Dados utilizados para a geração do histograma de frequência acumulada para o 1º ano da simulação

Table 6 - Data used to generate the cumulative frequency histogram for the 1st year of the simulation

Bloco – Áreas (m ²)	Frequência	% cumulativa
9073	5	25,00%
11144	3	40,00%
13215	3	55,00%
15286	5	80,00%
17357	3	95,00%
19428	0	95,00%
21499	0	95,00%
23570	0	95,00%
25641	0	95,00%
27712	1	100,00%

Conforme estas informações geradas, é possível definir os seguintes cenários resultantes da simulação de fluxo e transporte de

contaminante em função dos cenários aleatórios de K:

- P10 – Cenário otimista: Cenário 14 de K com área da pluma no primeiro ano da simulação de 7.125 m²;
- P50 – Cenário intermediário: Cenário 8 de K com área da pluma no primeiro ano da simulação de 12.259 m²;
- P90 – Cenário pessimista: Cenário 16 de K com área da pluma no primeiro ano da simulação de 16.512 m².

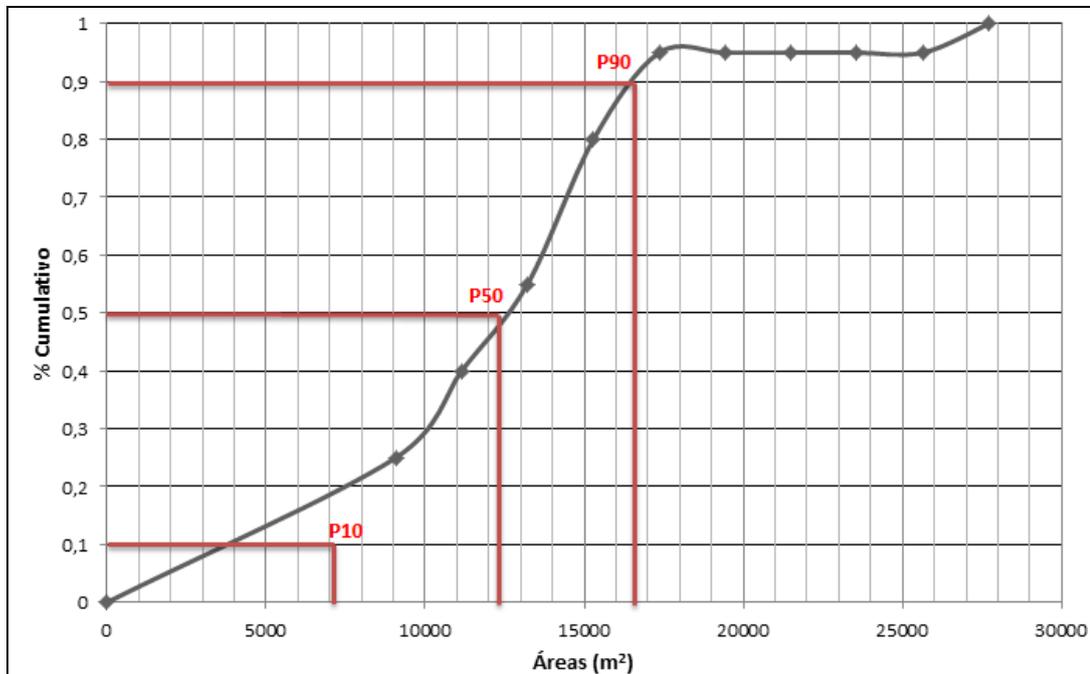


Figura 10 - Distribuição de frequência acumulada
Figure 10 - Cumulative frequency distribution

A área da pluma no tempo zero é de 59.550 m² para todos os campos de condutividade hidráulica. Sendo assim, em 1,0 ano, para o cenário otimista, a pluma diminui cerca de oito vezes, para o intermediário cinco vezes e para o pessimista próximo de quatro vezes. A diminuição da área da pluma nos respectivos cenários de K está atrelada à possível descarga natural do aquífero contaminado no rio situado a jusante da área de estudo. Esta alta variabilidade nos resultados das áreas simuladas é relacionada às incertezas geradas em função da heterogeneidade do parâmetro condutividade hidráulica.

Ressalta-se que os cenários otimista, intermediário e pessimista levam em consideração

apenas os tamanhos das áreas das plumas em m² no primeiro ano, simulado em função dos cenários aleatórios de condutividade hidráulica.

Vale destacar que a menor área é considerada o cenário otimista, entretanto, este cenário é resultado da descarga de contaminante no rio a jusante.

A Figura 11 a seguir contempla a pluma delimitada no tempo inicial (tempo zero) e no primeiro ano de simulação para o P10, P50 e P90.

Ressalta-se novamente que não foi considerada pela pesquisa a contribuição de fase residual do contaminante nas simulações realizadas.

hidrogeológico. A delimitação da pluma (tempo zero) a montante também foi levada em consideração nesta escolha.

Os resultados obtidos foram considerados coerentes com os cenários P10, P50 e P90, ou seja, para o primeiro (cenário considerado otimista) após 2 anos do processo de remediação por bombeamento e tratamento para as três situações consideradas, as áreas das plumas de contaminação reduzem, em relação à simulação sem bombeamento, cerca de 5, 7 e 10 vezes por meio das contenções 1, 2 e 3, respectivamente. Logo, para este caso, a configuração de remediação 3 foi mais eficiente na redução da área da pluma ao longo dos dois anos.

Já em relação aos cenários P50 e P90 (intermediário e pessimista), ao final dos dois anos da simulação da remediação a menor área de pluma constatada para o primeiro foi de 3.303 m², referente à configuração 3, enquanto para o segundo foi de 3.042 m² também referente à configuração 3. Estas áreas representam uma diminuição próxima de 1,3 e 1,45 vezes em relação à simulação sem o bombeamento para o P50 e P90, respectivamente.

Mesmo não tendo a maior soma das vazões de bombeamento (extração), a configuração 3 teve o melhor resultado dentre os cenários escolhidos de remediação. Provavelmente, isto se deve a possíveis caminhos preferenciais em zonas de maior condutividade hidráulica no sentido e direção das zonas de captura relacionadas aos poços de bombeamento considerados. As zonas de captura dos poços de extração não foram consideradas na pesquisa e, portanto podem ser um fator limitador para os resultados encontrados.

Neste contexto, as áreas simuladas podem influenciar de maneira significativa no tempo e, conseqüentemente, no custo de uma técnica de remediação, no caso no bombeamento e tratamento. É importante ressaltar que o modelo considera água não contaminada (limpa) sendo introduzida no aquífero pelos poços de injeção. Esta situação pode ser considerada hipotética no processo de remediação real, em função das dificuldades encontradas no tratamento e na diminuição de concentrações de contaminantes em aquíferos com problemas de contaminação.

Tabela 7 - Resultados para as três configurações de remediação

Table 7 - Results for the three remediation configurations

Tempo (anos)	P10 – Campo 14 de K			
	Simulação sem a remediação	C1	C2	C3
	Áreas (m ²)			
1,0	7125	4016	4045	4021
1,5	4258	2990	2421	2394
2,0	329	61	46	34
Tempo (anos)	P50 – Campo 8 de K			
	Simulação sem a remediação	C1	C2	C3
1,0	12259	11725	11781	11809
1,5	8015	7452	7482	7452
2,0	4328	3327	4080	3303
Tempo (anos)	P90 – Campo 16 de K			
	Simulação sem a remediação	C1	C2	C3
1,0	16512	15226	15248	15261
1,5	10995	7755	7700	7762
2,0	4407	4146	3351	3042

Destaque em negrito para o 2º ano da remediação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 e/ou pode ser oriundo da sedimentação pela dinâmica fluvial, da drenagem considerada na modelagem;

- 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 hidrofacies, 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 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 efici-

ente em relação à diminuição das áreas das plumas ao longo dos dois anos da remediação. Esta informação evidencia a importância do conhecimento mais detalhado das zonas de captura dos poços de bombeamento e da previsão de seus

REFERÊNCIAS

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.

comportamentos ao longo do processo de 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.

A alta variabilidade das áreas (m^2) das plumas de contaminação retratada pelos cenários otimista, intermediário e pessimista ratifica os resultados de Alberto e Chang (2011), os quais revelam um contexto dominado por incertezas em relação ao conhecimento geológico de subsuperfície, em função da heterogeneidade dos tipos litológicos.

Mesmo a pesquisa sendo realizada numa escala macro, foi possível observar que pequenas variações nos valores de condutividade hidráulica apresentaram significativas diferenças no comportamento da pluma de contaminação ao longo da simulação da remediação. Geralmente estas variações são diagnósticas em meso e micro escalas.

A modelagem de incertezas e de fluxo deve ser mais utilizada em projetos de remediação por bombeamento e tratamento, bem como ser indicativa de quais dados de campo são necessários para a razoável previsão deste processo de remediação.

Sendo assim, com base nos resultados obtidos observa-se que ainda é necessária a redução destas 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.

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.

CEPAGRI - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura, acessado em outubro de 2012.

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.

LANDIM, P.M.B. Simulação Estocástica. In: Jorge Kazuo Yamamoto, Paulo M. Barbosa Landim. **Geoestatística: conceitos + aplicações.** São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

GÜNGÖR-DEMIRCI, G.; AKSOY, A. Change in optimal pump-and-treat remediation design and cost for different correlation lengths os spatially variable hydraulic conductivity field. **Quaterly Journal of Engineering and Hydrogeology**, 44, 469-480, The Geological Society of London, 2011.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS (IPT). Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000. São Paulo, 1981.

JOURNEL, A. G.; ALABERT, F. G. Focusing on spatial connectivity of extreme-valued attributes: Stochastic indicator models of reservoir heterogeneities. SPE Paper N° 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.

WALM Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda. Investigação Ambiental Detalhada, 2013.

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