

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**TF/06 – 41**

**KRIGAGEM DE INDICADORAS PARA O MAPEAMENTO DE  
PLUMA DE CONTAMINAÇÃO EM ÁGUA SUBTERRÂNEA  
DE UMA ÁREA INDUSTRIAL**

Pedro Machado Simões

Orientador: Profº. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha / GSA – IGc - USP

Co-Orientador: Geólogo Paulo Henrique Pereira dos Santos / Waterloo Brasil Ltda.

São Paulo, SP – 2006

TF  
S593  
PM.k

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Krigagem de indicadores para o mapeamento de pluma  
de contaminação em água subterrânea de uma área  
industrial**

**Pedro Machado Simões**



Monografia de Trabalho de Formatura

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata

São Paulo

2006

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

TF/06 – 41

KRIGAGEM DE INDICADORAS PARA O MAPEAMENTO DE  
PLUMA DE CONTAMINAÇÃO EM ÁGUA SUBTERRÂNEA  
DE UMA ÁREA INDUSTRIAL



DEDALUS - Acervo - IGC



30900024370

Pedro Machado Simões

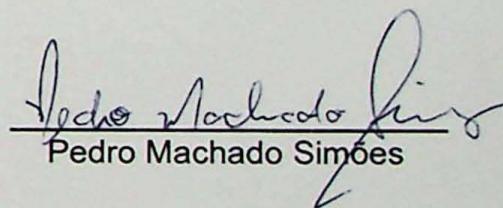
Orientador: Profº. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha / GSA – IGc - USP  
Co-Orientador: Geólogo Paulo Henrique Pereira dos Santos / Waterloo Brasil Ltda.  
São Paulo, SP – 2006



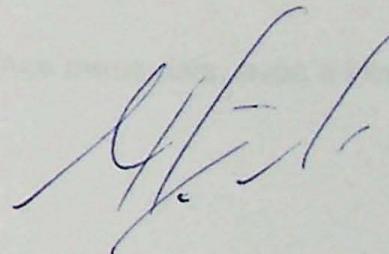
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

TF/06 – 41

KRIGAGEM DE INDICADORAS PARA O MAPEAMENTO DE  
PLUMA DE CONTAMINAÇÃO EM ÁGUA SUBTERRÂNEA  
DE UMA ÁREA INDUSTRIAL

  
Pedro Machado Simões

  
Encaminhe-se



Aos meus pais, avós e irmãos.

## Agradecimentos

Em primeiro lugar aos meus pais, Pedro e Ana, por todo apoio e carinho incondicionais não só durante a faculdade e sim durante toda minha vida.

Aos meus avós maternos, Luiz e Irma, e paternos, Antônio (*in memorian*) e Francisca (*in memorian*) pela família maravilhosa que me deram e pelo exemplo, carinho e dedicação ao longo dos anos.

Aos meus irmãos, Adriana e Paulo, por todo amor e carinho que sempre me proporcionaram apesar de nossos desentendimentos.

Aos meus tios e primos, por todo afeto, alegria e descontração que me proporcionaram.

Ao meu orientador, Profº. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha, pela orientação, paciência e compreensão durante a execução deste trabalho.

A Waterloo Brasil, pelo fornecimento dos dados que tornaram este trabalho possível. Em especial ao Geólogo Paulo Henrique Pereira dos Santos, pela co-orientação, amizade e, acima de tudo, por acreditar no meu valor como profissional.

Aos grandes amigos Enos (Rosa Selvagem) e Carlos (Tropesso) por todo suporte nesta reta final, além das risadas, brigas e brejas que compartilhamos.

Aos eternos irmãos do CRUSP: Anderson (Feitichera), Fernando (Lampião), Murilo (Boi), Fabrício (Passivo), Carolina (Urtiga) e Adriana (Bistekah), grandes companheiros por todos os anos que passamos juntos e pelos que virão.

A Sumaya, pela companhia, apoio e carinho durante todo nosso relacionamento, e a sua família, por terem me acolhido em sua casa como um filho e irmão.

A galera da Irmandade: Secão, Fabião, Qüen, It Boy, Jun, Marcão e Gordo. E a suas famílias, namoradas e esposas. Pela amizade irrestrita e pelo apoio sempre disponível. Que assim seja por muitos anos.

A grande amiga Thais Olher, por tudo que você me ajudou em todos os nossos anos de amizade.

Enfim, a todos os amigos que fizeram parte desta longa etapa que finalmente se encerra,

Muito Obrigado.

# Índice

<b>Resumo.....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Metas e Objetivos .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>5</b>
<b>3.1. Geologia Regional .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2. Geologia Local e Hidrogeologia.....</b>	<b>5</b>
<b>3.3. Geoestatística .....</b>	<b>6</b>
<b>4. Materiais e Métodos .....</b>	<b>13</b>
<b>5. Desenvolvimento do Trabalho .....</b>	<b>14</b>
<b>6. Resultados Obtidos.....</b>	<b>15</b>
<b>6.1. Caracterização Hidrogeológica .....</b>	<b>15</b>
<b>6.2. Análise Geoestatística .....</b>	<b>23</b>
<b>7. Interpretação dos Resultados Obtidos.....</b>	<b>30</b>
<b>8. Conclusões .....</b>	<b>31</b>
<b>9. Referências Bibliográficas.....</b>	<b>32</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>I</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>II</b>
<b>ANEXO III.....</b>	<b>III</b>

## Resumo

O trabalho teve como objetivo testar o método geoestatístico de Krigagem de Indicadoras quanto a sua eficácia para melhor delimitação e mapeamento de plumas de contaminação em aqüíferos livres.

Os dados provêm de uma campanha de monitoramento executada pela Waterloo Brasil em uma área industrial.

O aqüífero estudado é composto por sedimentos cenozóicos em um pacote superior areno-argilosos e em um pacote inferior de argila marinha. Estes pacotes são recobertos por uma camada de aterro de material arenosos a areno-argiloso.

As grandes diferenças entre os teores de contaminação de Cis 1,2 Dicloroeteno, ou mesmo sua ausência em muitos poços, gerou variogramas pouco estruturados. Foi realizada, então, uma diminuição do Domínio na expectativa de obtenção de variogramas melhor estruturados. Como apenas esta redução do espaço estudado não proporcionou os resultados esperados, procedeu-se à transformação das variáveis originais em variáveis indicadoras.

As variáveis indicadoras permitiram a categorização dos dados disponíveis em: 1 (contaminados) e 0 (não-contaminados ou abaixo do teor de corte proposto). Foram feitos variogramas em quatro direções diferentes com tolerância de 22,5°, a fim de se reconhecer a existência de anisotropias. Os dados de contaminação mostraram-se anisotrópicos e um modelo com anisotropia mista foi ajustado.

Foi, então, feita a Krigagem de Indicadoras em procedimento similar ao da Krigagem Ordinária, para a obtenção de um mapa de probabilidade de contaminação que, comparado ao mapa de isovalores de contaminação, mostrou condições de contorno melhor estimadas.

## Abstract

The work had the objective of testing the geostatistical method of Indicator Kriging as for its efficiency for better delimitation and mapping of contamination plums in unconfined aquifers.

The data were from a monitoring campaign made by Waterloo Brasil at the industrial area.

The studied aquifer is composed by Cenozoic sediments in a superior layer of clayey-sand and an inferior layer of marine clay. These layers are covered by a landfill of sandy to clayey-sandy material.

The great difference between the Cis 1,2 Dichloroethylene contamination values or even its absence in many monitoring wells, led to non-structures variograms. A domain reduction was made with the expectancy of having better structured variograms. As only this studied space reduction did not provide the expected results, the original values were transformed in indicator values.

The indicator values allowed the categorization of available data in 1 (contaminated) and 0 (non-contaminated or below the cut-off value). Omnidirectional variograms with tolerance of 22,5° were computed in order to recognize the presence of an anisotropy. Contaminated data showed anisotropy and an anisotropic model was fitted.

Then, it was made the Indicator Kriging in similar procedure as made for Ordinary Kriging to have a probability of contamination map which, compared to the contamination values map, showed better estimated contour conditions.

## 1. Introdução

Desde a instalação das indústrias no Brasil e, posteriormente, com seu intenso crescimento na década de 70, os aquíferos freáticos livres, vêm sendo alvo de contaminações provenientes de atividade antrópica. Sua alta vulnerabilidade facilita a contaminação por efluentes ou derramamentos industriais, chorume de aterros sanitários e o necrochorume em cemitérios. Nas últimas duas décadas houve uma diminuição das emissões de poluentes e das contaminações por conta do surgimento de normas e legislações específicas para o combate à degradação ambiental.

Os órgãos de fiscalização ambiental e empresas privadas precisaram aperfeiçoar e otimizar suas técnicas de investigação e remediação de contaminação. Os métodos hoje utilizados para interpretação dos mecanismos regentes da migração destes contaminantes e determinação do contorno e caminhamento de uma pluma de contaminação, antes baseados apenas em simples interpolação de dados com auxílio da aritmética e geometria, vêm sendo substituídos por métodos mais elaborados, geralmente através de modelos estatísticos e geoestatísticos. Este novo processo vem sendo largamente difundido, utilizado e aceito pelos profissionais da área de meio-ambiente.

O grande problema proveniente da utilização de métodos geoestatísticos é o uso indiscriminado e pouco criterioso que pode, facilmente, gerar resultados que não correspondem à realidade da área contaminada sob estudo.

A utilização de Krigagem como ferramenta para a interpretação e determinação de contornos de uma pluma de contaminação é, atualmente, bastante comum em órgãos fiscalizadores e empresas privadas. No entanto, a Krigagem de Indicadoras é uma ferramenta recente no mercado de meio-ambiente e hidrogeologia e pretende-se, com este trabalho, testar sua eficácia para o mapeamento de plumas de contaminação em aquíferos livres.

## 2. Metas e Objetivos

O presente Trabalho de Formatura tem por objetivo a aplicação de técnicas geoestatísticas a dados de hidrogeologia. Tendo em vista a crescente utilização destas técnicas para a delimitação e interpretação de dados hidrogeológicos como potenciometria ou contornos de plumas de contaminação de aquíferos, a intenção deste trabalho é utilizar um método cujos resultados permitam a delimitação do contorno de uma pluma e sua área de influência. Essa delimitação pode possibilitar uma melhor locação de poços para a realização de uma investigação mais detalhada na área impactada ou ainda de um sistema de remediação melhor dimensionado para aquela determinada pluma de contaminação.

Para este trabalho, optou-se pela utilização da Krigagem de Indicadoras, técnica que gera como resultado um mapa de probabilidade de contaminação na área baseado na distribuição espacial desta contaminação bem como em suas concentrações nos pontos amostrados. Como na área de estudo há uma grande variação das concentrações da contaminação, a opção pela utilização de variáveis indicadoras deve-se ao fato de que esta técnica permite uma significativa diminuição da variância dos dados.

### 3. Revisão Bibliográfica

#### 3.1. Geologia Regional

A área de estudo encontra-se na região portuária da cidade de Santos, SP. Segundo os relatórios disponibilizados pela Waterloo Brasil Ltda. e posteriormente re-interpretados, a geologia regional compreende, em ordem estratigráfica: sedimentos do período Neógeno (Eon Fanerozóico, Era Cenozóica), suítes graníticas do período Neoproterozóico (Eon Fanerozóico, Era Paleozóica) e migmatitos do Complexo Costeiro, da Era Arqueana (Eon Pré-Cambriano). Esta geologia é resumidamente descrita a seguir:

- *Sedimentos Marinhos e Mistos*: sedimentos atuais a subatuais, incluindo terrenos arenosos praiais, depósitos marinhos localmente retrabalhados por ação fluvial e/ou eólica, termos areno-síltico-argilosos de deposição flúvio-marinho-lacustre e depósitos de mangue;
- *Sedimentos Continentais Indiferenciados*: depósitos continentais incluindo sedimentos elúvio-coluvionares de natureza areno-argilosa e depósitos de caráter variado associado a encostas.
- *Suítes Graníticas Sintectônicas - Fácies Cantareira*: corpos para-autóctones e alóctones, foliados, granulação fina a média, textura porfirítica freqüente; contatos parcialmente concordantes e composição granodiorítica a granítica.
- *Complexo Costeiro*: migmatitos metatexíticos de estruturas variadas predominantemente estromatíticas e oftálmicas; diatexitos, incluindo termos facoidais, oftálmicos e homofânicos de paleossomas variados e migmatitos policíclicos complexos de paleossoma xistoso e/ou gnássico.

#### 3.2. Geologia Local e Hidrogeologia

A geologia local é composta por duas unidades sedimentares neógenas, que correspondem a sedimentos marinhos e mistos, recobertas por um pacote de aterro, conforme descrição a seguir:

- *Aterro*: composto por material de aterro, apresenta espessura variada habitualmente inferior a 1,5 metro. O material é composto predominantemente por areia, com alguns termos argilo-arenosos e muitos fragmentos de rocha de dimensões variadas. Sua coloração é amarela a verde na base. Na interface entre o aterro e o pacote superior ocorrem, localmente, depósitos alúvio-coluvionares argilo-arenosos de cor marrom,

intercalações arenosas finas a médias homogêneas, porções retrabalhadas da unidade inferior de cor cinza clara e níveis decimétricos de areia grossa micácea;

- *Pacote superior:* constituído por areia de granulação fina pouco argilosa, de coloração cinza, com intercalações decimétricas restritas a centimétricas arenosas generalizadas. Ocorrem também conchas de bivalves e lentes locais predominantemente argilosas e homogêneas. Seu contato com a unidade inferior é transicional, com uma zona de espessura entre 1 e 2 metros que marca o processo de regressão marinha local;
- *Pacote inferior:* é formado por argila marinha de coloração cinza escura, com intercalações arenosas finas esparsas de dimensões centimétricas e conchas de bivalves.

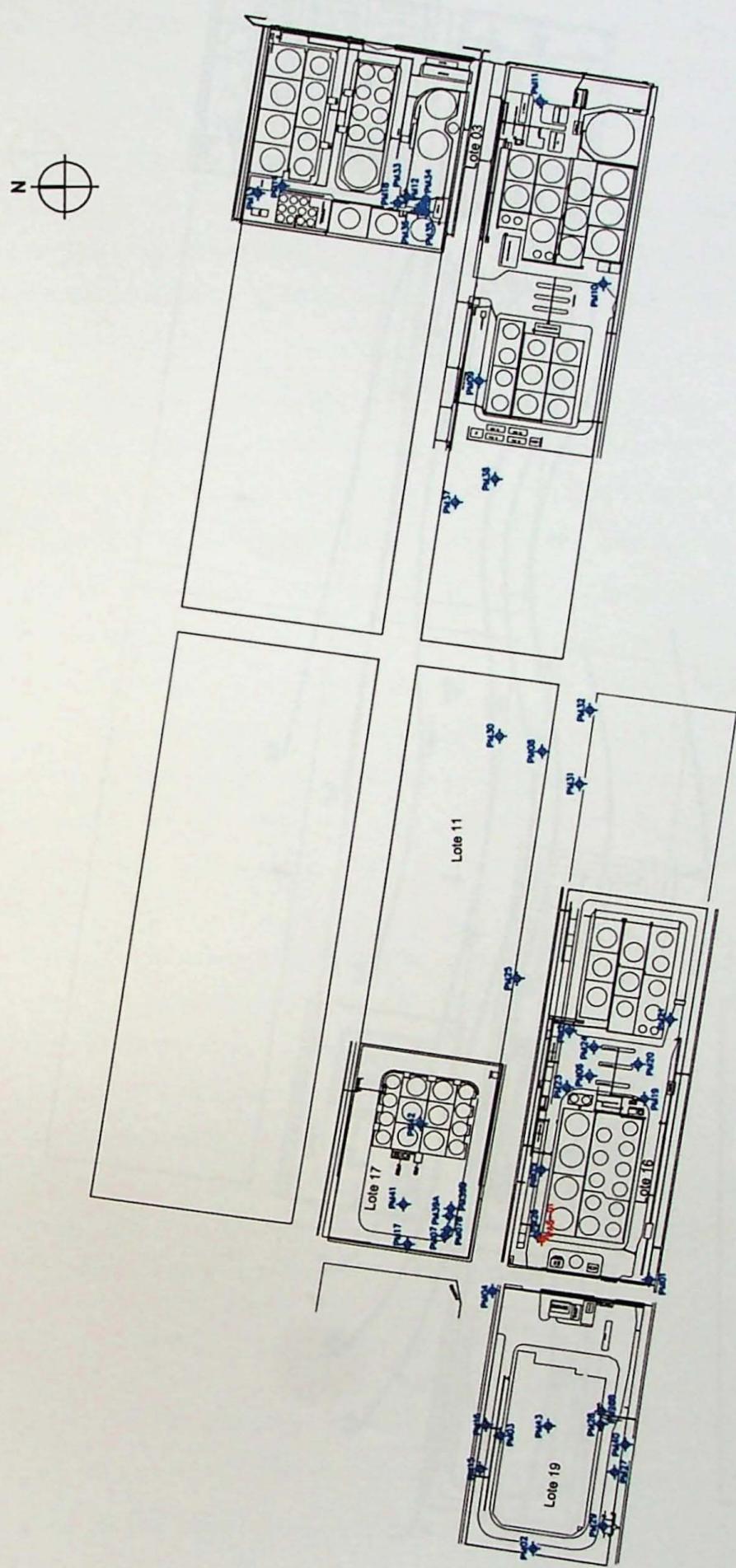
Os perfis litológicos de sondagens e de instalação dos poços são apresentados na Figura 3-1a a 3-1h (Anexo I) e o mapa de localização dos poços de monitoramento instalados está representado na Figura 3-2.

A área de estudo teve seu aquífero local classificado como livre a semiconfinado, com a resultante geral do fluxo dos lotes 11, 16, 17 e 19 com sentido preferencial Sul e derivações para Sudeste e Sudoeste em direção ao corpo de água superficial próximo e a resultante geral do lote 03 com fluxo no sentido Norte, em direção ao Oceano Atlântico. O mapa potenciométrico pode ser observado na Figura 3-3 e a Tabela 3-1 (Anexo II) apresenta os dados utilizados para sua confecção.

### 3.3. Geoestatística

O termo geoestatística, segundo Landim (1998), foi cunhado por G. Matheron e é uma técnica fundamentada nos trabalhos desenvolvidos inicialmente na África do Sul pelo Engº de Minas D. G. Krige e pelo Estatístico H. S. Sichel que teve seu tratamento formal dado pelo grupo do *Centre de Morphologie Mathématique* liderado por Matheron. A geoestatística foi desenvolvida, primeiramente, como ferramenta para a área de mineração, visando uma melhor interpretação dos dados geoquímicos, tratando-os como variáveis regionalizadas, ou seja, que dependem não só dos valores de teor de minério, mas também de sua localização e correlação espacial. O intuito deste processo é o de se obter cubagens e delimitações de áreas mais bem elaboradas e condizentes com a realidade do corpo de minério. Vários métodos foram desenvolvidos para este fim, como a Krigagem Simples e a Krigagem Ordinária.

Quando passaram a ser utilizados para a delimitação, cubagem e interpretação de dados provenientes de contaminações de aquíferos freáticos livres e do solo, passaram a ter grande aceitação por parte dos órgãos fiscalizadores e empresas do ramo de meio-



**Legenda:**

Pux  
● + └

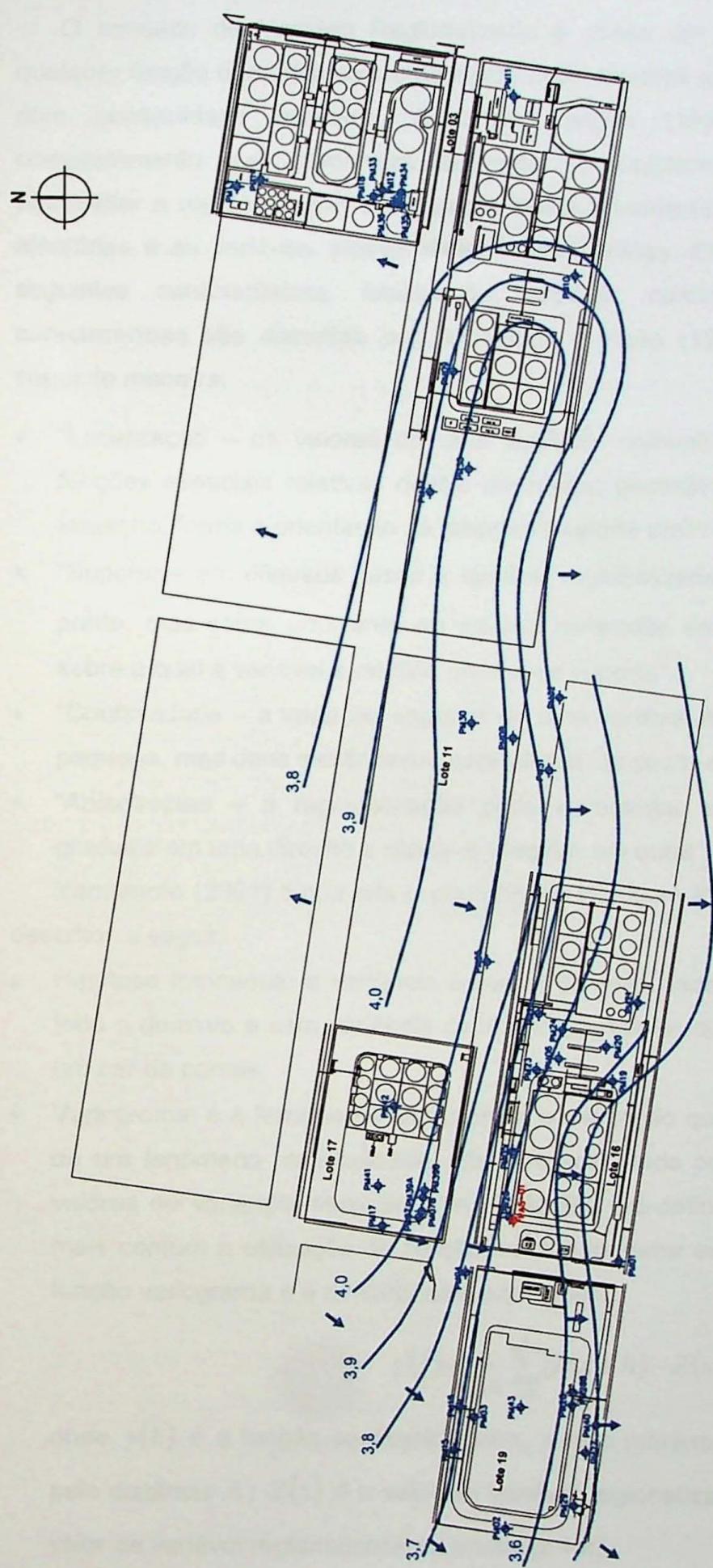
PAS-xx  
● + └

Escala Gráfica  
0 50 100 metros

GEOCITICAS

Figura 3-2: Mapa de Localização dos Poços de Monitoramento

Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial  
Monografia de Trabalho de Formatura  
Aluno: Pedro Machado Simões  
Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha  
Novembro/2006



#### Legenda:

- PMMX Poços de Monitoramento
- PAS-xx Poços do Sistema Air Sparge
- Sentido do Fluxo da Água Subterrânea
- 3.5 Carga Hidráulica
- Linha Eqüipotencial

Figura 3-3: Mapa Potenciométrico

Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial  
 Aluno: Pedro Machado Simões  
 Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha  
 Monografia de Trabalho de Formatura  
 Novembro/2006

ambiente. No entanto, estes métodos geram suavizações (*smoothing effect*) nos teores estimados.

O conceito de Variável Regionalizada é citado em Yamamoto (2001) como sendo qualquer função numérica com uma distribuição espacial que varia de um lugar para o outro com continuidade aparente. Segundo Landim (1998), estas variáveis têm um comportamento que demonstra aparente continuidade espacial, sendo capazes de possibilitar a representação das características intermediárias entre as variáveis realmente aleatórias e as variáveis efetivamente determinísticas. Estas variáveis devem possuir, as seguintes características: localização, suporte, continuidade e anisotropias. Estas características são descritas por Bubenicek & Haas (1969) *apud* Yamamoto (2001) da seguinte maneira:

- “Localização – os valores de uma variável regionalizada são dependentes de suas funções espaciais relativas dentro do campo geométrico. Estes valores dependem do tamanho, forma e orientação da amostra (suporte amostral)”;
- “Suporte – em diversos casos a variável regionalizada  $Z(x)$  não está definida em um ponto, mas sobre uma área ou volume centrados em  $x$ . A unidade amostral básica sobre a qual a variável é medida chama-se suporte”;
- “Continuidade – a variação espacial de uma variável regionalizada pode ser grande ou pequena, mas deve existir certa continuidade de ponto a ponto”;
- “Anisotropias – a regionalização pode apresentar anisotropias devido a variações graduais em uma direção e rápida e irregular em outra”.

Yamamoto (2001) ainda cita o conceito de Hipótese Intrínseca e Variograma conforme descritos a seguir:

- Hipótese Intrínseca: a variância espacial de uma dada variável é a mesma dentro de todo o domínio e esta variância depende apenas da direção e da distância que separa um par de pontos.
- Variograma: é a ferramenta que permite a descrição quantitativa da variação no espaço de um fenômeno regionalizado. Ele é representado por uma função que correlaciona valores de variância espacial com distâncias pré-definidas no domínio. No entanto, é mais comum a utilização da função semivariograma experimental, que é a metade da função variograma e é definida pela expressão:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2$$

onde  $\gamma(h)$  é a função semivariograma,  $n$  é o número de pares de pontos separados pela distância  $h$ ,  $Z(x)$  é o valor da variável regionalizada no ponto  $(x)$  e  $Z(x+h)$  é o valor da variável regionalizada no ponto  $(x+h)$ .

As principais propriedades de um variograma são:

- Amplitude: distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes e reflete a continuidade do fenômeno. É a distância que separa o campo estruturado, com amostras correlacionáveis entre si, do campo aleatório, onde as amostras perdem sua correlação e tornam-se independentes;
- Patamar: é o valor de variância no qual o semivariograma se estabiliza. Ele reflete a homogeneidade das amostras;
- Efeito Pepita: valor da função semivariograma próximo à origem, indica microvariabilidades, ou ainda, variabilidade intrínseca ao fenômeno que não foi reproduzida;
- Variância Espacial: é a diferença entre o patamar e o efeito pepita;

Uma das principais características de um variograma é o fato que a variância espacial aumenta conforme aumenta a distância  $h$ , bem como sua covariância diminui. A função covariância representa a correlação entre pontos separados pela distância  $h$ , ou seja, quando a distância  $h$  é mínima, a covariância é máxima e a variância é mínima.

Quando há variogramas gerados para diferentes direções, pode-se detectar anisotropias entre os dados nestas direções. Estas anisotropias são classificadas em Yamamoto (2001) como: geométrica, zonal e mista. A anisotropia geométrica ocorre quando a amplitude entre os variogramas varia para direções distintas, mas seus patamares são iguais. A anisotropia zonal acontece quando a amplitude entre os variogramas é igual, mas seus patamares variam para cada direção. Anisotropia mista é aquela em que tanto amplitude quanto patamar variam para as diferentes direções adotadas.

Yamamoto (2001) descreve quatro diferentes tipos de comportamento de um variograma próximo à sua origem, conforme apresentados:

- Parabólico – quando a curva descrita pelo variograma, próximo à sua origem, é parabólica. Este tipo de comportamento significa que há um alto grau de continuidades das amostras;
- Linear – este comportamento representa média continuidade entre as amostras selecionadas, e significa que há uma diminuição das semelhanças entre amostras com o aumento da distância. A curva descrita por este variograma é uma tangente oblíqua à origem;
- Efeito Pepita – é o variograma cuja curva de ajuste apresenta uma descontinuidade próxima à origem, que pode ocorrer por dois motivos: microvariabilidades intrínsecas ao sistema ou erros de medida na amostragem;
- Efeito Pepita Puro – comportamento do variograma que demonstra uma situação extrema próximo à origem. Journel & Huijbregts (1978) definem que, nestes casos, os valores da amplitude e do patamar são infinitesimalmente menores que as distâncias de observação e significam uma extrema homogeneidade dos dados.

Os variogramas possuem modelos teóricos diferentes para seu ajuste, como: exponencial, cúbico, linear, gaussiano, potencial e esférico. Cada um deles reflete a função que descreve a correlação espacial existente nos dados para que haja um modelo efetivamente representativo do fenômeno que ocorre no domínio das amostras.

Os modelos recomendados para a Krigagem de Indicadoras são: o esférico e o exponencial. O modelo teórico do variograma esférico é representado pela função

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h < a \text{ e } \gamma(h) = C_0 + C \text{ para } h \geq a, \text{ onde: } C_0 \text{ é o efeito}$$

pepita,  $C$  é a variância espacial,  $h$  é a distância entre os pontos e  $a$  é a amplitude. O modelo exponencial é representado pela expressão  $\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{h}{a} \right) \right) \right]$ .

A Krigagem é um método que estima os valores de variáveis espaciais a partir dos valores adjacentes desde que sejam interdependentes pelo variograma experimental (Landim, 1998). Segundo Yamamoto (2001), a Krigagem permite que o valor desconhecido  $Z^*(x_0)$  seja estimado a partir de um conjunto com  $n$  dados  $\{Z(x_i), i = 1, n\}$  disponíveis, desde que associado a um ponto, área ou volume dependentes entre si pelo semivariograma. A equação que permite obter  $Z^*(x_0)$  por combinação linear dos dados é:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z(x_i)$$

onde  $(\lambda_i, i = 1, n)$  são os ponderadores obtidos pela resolução do Sistema de Equações de Krigagem descritos a seguir:

$$\begin{cases} \sum_j \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_0 - x_i) & \text{para } i = 1, n; \\ \sum_j \lambda_j = 1 \end{cases}$$

Yamamoto (2001) ainda define que as estimativas da Krigagem devem ser feitas apenas dentro do domínio dos pontos de dados. O domínio pode ser aproximado pela sua respectiva fronteira convexa, que é o polígono convexo que abrange todos os dados do domínio na menor área possível, respeitando os pares de pontos que obedecem a uma malha pré-definida.

A Krigagem de Indicadoras utiliza as chamadas variáveis indicadoras. Estas variáveis nada mais são do que os dados originais transformados em dados booleanos. Segundo Rocha (2005), esta transformação tem por finalidade apenas a indicação de presença ou ausência de um determinado atributo ou se determinada característica de uma variável aleatória é satisfeita. Esta transformação é feita a partir de um valor pré-determinado de corte (*cut-off*) que, quando atendido, adquire valor 1 e, quando não satisfaz a condição de

valor, tem valor 0. A transformação destes dados é exemplificada para um *cut-off* de 40 µg/L na Tabela 3-2.

Poço	Resultado Analítico (µg/L)	Dados Booleano
PM-A	500	1
PM-B	10	0
PM-C	33	0
PM-D	250	1

O variograma gerado por este tipo de variável tem características distintas que, de acordo com Le Loc'h (2001 *apud* Rocha, 2005) são:

- Não admite que se determine o tamanho dos objetos estudados;
- Não permite determinar se há conexão entre os conjuntos;
- Apenas sugere a distância que separa os objetos estudados.

A equação da Krigagem Ordinária, devidamente adequada para o uso em Krigagem de Indicadoras, é demonstrada em Rocha (2005) como sendo a função:

$$I^*(z) = \sum_{i=1}^N \lambda_i I_{z(x_i) < z} \quad \text{se } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Em Calvete & Ramirez (1990) define-se a Krigagem de Indicadoras como sendo a estimativa da função  $F(Z)$  da variável regionalizada  $Z(x)$  dentro do domínio  $D$ . Sendo  $I(x, z_i)$  uma função indicadora associada ao valor de  $Z$  em um ponto  $x$  e com limiar  $z_i$ , definida por:

$$I(x, z_x) = 1 \text{ se } Z(x) > z_x \text{ e } I(x, z_x) = 0 \text{ se } Z(x) \leq z_x.$$

Sendo  $Z(x)$  uma função aleatória,  $I(x, z_x)$  também é uma função aleatória.

## 4. Materiais e Métodos

Para a interpretação geológica e hidrogeológica da área de estudo, foram analisados e reinterpretados os dados fornecidos pela Waterloo Brasil Ltda.

A caracterização hidrogeológica foi feita com base nos dados de sondagens, potociometria, condutividade hidráulica, localização dos poços e concentração de Cis 1,2 Dicloroeteno nos poços contaminados. Estes dados foram reinterpretados com o auxílio de softwares como *Surfer 8.0* e *AutoCAD 2000* na realização dos mapas que auxiliaram a caracterização do aquífero local.

Após esta caracterização, procedeu-se ao tratamento de dados para a análise geoestatística da contaminação. Com o auxílio do mapa de localização dos poços (Figura 3-2) foi possível o correto posicionamento dos poços e sua posterior separação em contaminados e não-contaminados. O teor de corte para a determinação de quais poços estavam contaminados foi o Limite de Intervenção da CETESB (50 µg/L).

Esta separação forneceu uma idéia mais precisa de localização da pluma de contaminação na área. Procedeu-se a análise geoestatística dos dados concentração de Cis 1,2 Dicloroeteno na área toda com o auxílio dos softwares *GeoVisual* e *Excel*. Foram gerados variogramas experimentais com apenas uma direção (0°) com tolerância de 90° (omnidirecionais). Este procedimento visou apenas fornecer uma verificação da estruturação dos dados.

Após este procedimento, foram separados apenas os lotes adjacentes e com poços contaminados para a análise geoestatística em um Domínio menor para a tentativa de uma melhor estruturação dos dados de contaminação. Foram, então, gerados novos histogramas e variogramas experimentais para a averiguação da estruturação dos dados.

Os dados foram convertidos em dados booleanos obedecendo ao critério que será explicado no próximo capítulo, e foram gerados variogramas experimentais direcionais destes dados. Os variogramas dos dados binários foram gerados para quatro direções (0°, 45°, 90° e 135°) com tolerância de 22,5° e testados com diferentes tamanhos de passo. A intenção deste procedimento foi a verificação de direções nas quais os dados estariam melhor estruturados e se apresentavam anisotropia. Foi ajustado um modelo teórico de variograma que serviu como ferramenta básica para a Krigagem de Indicadoras.

Os procedimentos para a realização da Krigagem de Indicadoras são exatamente iguais àqueles utilizados na Krigagem Ordinária, o que as diferencia é a natureza da variável. O método foi escolhido devido a sua propriedade de diminuir grandes variabilidades entre dados quantitativos, como é o caso da área de estudo.

## 5. Desenvolvimento do Trabalho

O desenvolvimento deste Trabalho de Formatura deu-se ao longo do período de março a novembro de 2006. Foi efetuada revisão bibliográfica com ênfase principalmente nos relatórios e dados fornecidos pela Waterloo Brasil Ltda. para que um modelo geológico e hidrogeológico coerente facilite o entendimento e as interpretações do mapa de probabilidade gerado por Krigagem de Indicadoras. Para tanto, foi feita a separação, análise e descrição dos dados químicos, geológicos e hidrogeológicos da área de estudo.

Também foi efetuada a revisão bibliográfica do método geoestatístico de Krigagem de Indicadoras e das ferramentas para a sua efetuação, destacando-se, principalmente, a análise dos variogramas experimentais gerados.

Concomitantemente a estas revisões bibliográficas foram realizadas: caracterização hidrogeológica da área de estudo, análise geoestatística dos dados, confecção de um mapa de probabilidade de contaminação e sua comparação com um mapa de isovalores de contaminação de Cis 1,2 Dicloroeteno.

Foi também definida como metodologia inicial a transformação de valores quantitativos de contaminação de Cis 1,2 Dicloroeteno em valores booleanos da seguinte forma: os valores com concentrações maiores ou iguais ao Valor de Intervenção da CETESB (2005) assumem valor igual a 1, que significa que há contaminação no ponto, e os valores menores que esse limite assumem valor igual a 0, significando ausência de contaminação. Este método pode ser resumido da seguinte maneira:

$$\begin{cases} I_{z(x)} = 1 & \text{se } Z(x) \geq 50 \text{ } \mu\text{g/L} \\ I_{z(x)} = 0 & \text{se } Z(x) < 50 \text{ } \mu\text{g/L} \end{cases}$$

Obedecendo a este critério, foram executados os procedimentos relatados no Capítulo 4 deste trabalho para a realização da Krigagem de Indicadoras.

## 6. Resultados Obtidos

### 6.1. Caracterização Hidrogeológica

A caracterização hidrogeológica da área teve como base os dados fornecidos pela Waterloo Brasil Ltda. E provém de seis campanhas realizadas durante os anos de 2002 e 2005. Os dados fornecidos contemplam apenas a caracterização hidrogeológica, não tendo sido disponibilizados dados referentes à evolução da pluma em relação ao tempo de existência da contaminação. Portanto, o estudo foi conduzido levando-se em consideração o estágio em que se encontra a contaminação de acordo com a campanha de monitoramento mais recente.

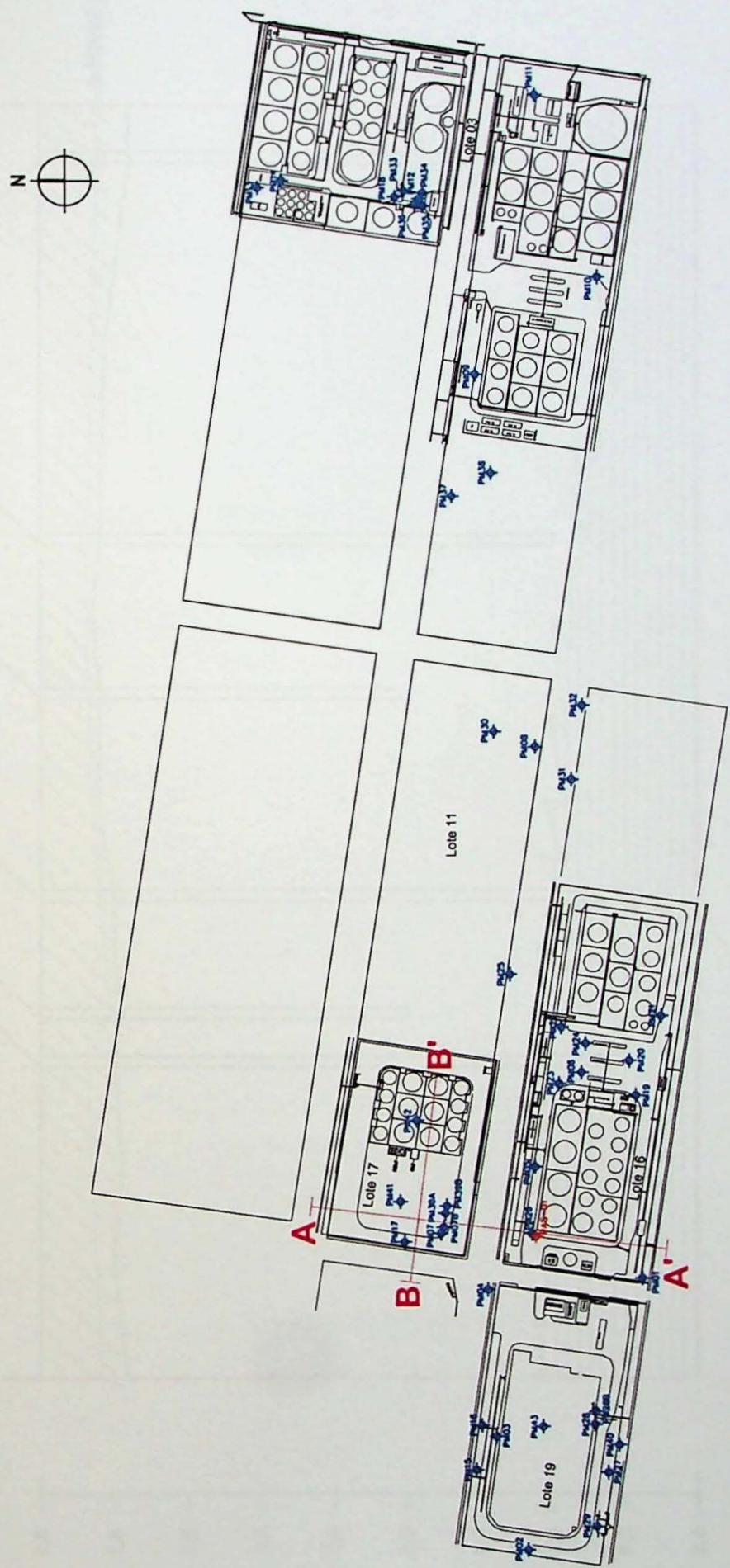
O aquífero foi caracterizado como sendo livre e anisotrópico. Sua heterogeneidade é causada pelas diferenças entre as litologias dos poços, como lentes locais de argila, maior ou menor quantidade de argila no sedimento arenoso e variações na espessura dos pacotes superior e inferior. Devido ao baixo detalhamento dos perfis de sondagens fornecidos, não foi possível uma caracterização precisa quanto aos diferentes pacotes sedimentares, permitindo sua separação em apenas dois pacotes recobertos por uma camada de aterro.

Como ferramenta auxiliar para a caracterização do aquífero foram elaboradas duas seções geológicas, localizadas na Figura 6-1: uma seção paralela ao sentido do fluxo da água subterrânea (Figura 6-2, Seção A-A') e outra ortogonal ao sentido deste fluxo (Figura 6-3, Seção B-B').

O mapa potenciométrico da área (Figura 3-6) demonstra que há dois sentidos para o fluxo da água subterrânea na área de estudo:

- Um fluxo de maior influência na área de estudo, com sentido Sul com derivações para SW e SE em direção ao corpo de água superficial próximo. Este sentido de fluxo contempla os lotes 11, 16, 17 e 19;
- Um fluxo para Norte, em direção ao Oceano Atlântico, localizado a cerca de 500 m, que influencia principalmente o lote 03;

A condutividade hidráulica média da área, de acordo com os dados fornecidos, é de  $6,83 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ . Ainda de acordo com estes dados, foi elaborado um mapa de isovalores de condutividade hidráulica (Figura 6-4) com a utilização do método de triangulação com interpolação linear. Conforme pode ser observado neste mapa, a contaminação está localizada em um setor da área de estudo que possui baixa condutividade hidráulica,



**Legenda:**

Poços de Monitoramento

Poços do Sistema Air Sparge

Escala Gráfica  
0 50 100 metros

**Figura 6-1: Mapa de Localização das Seções Geológicas**

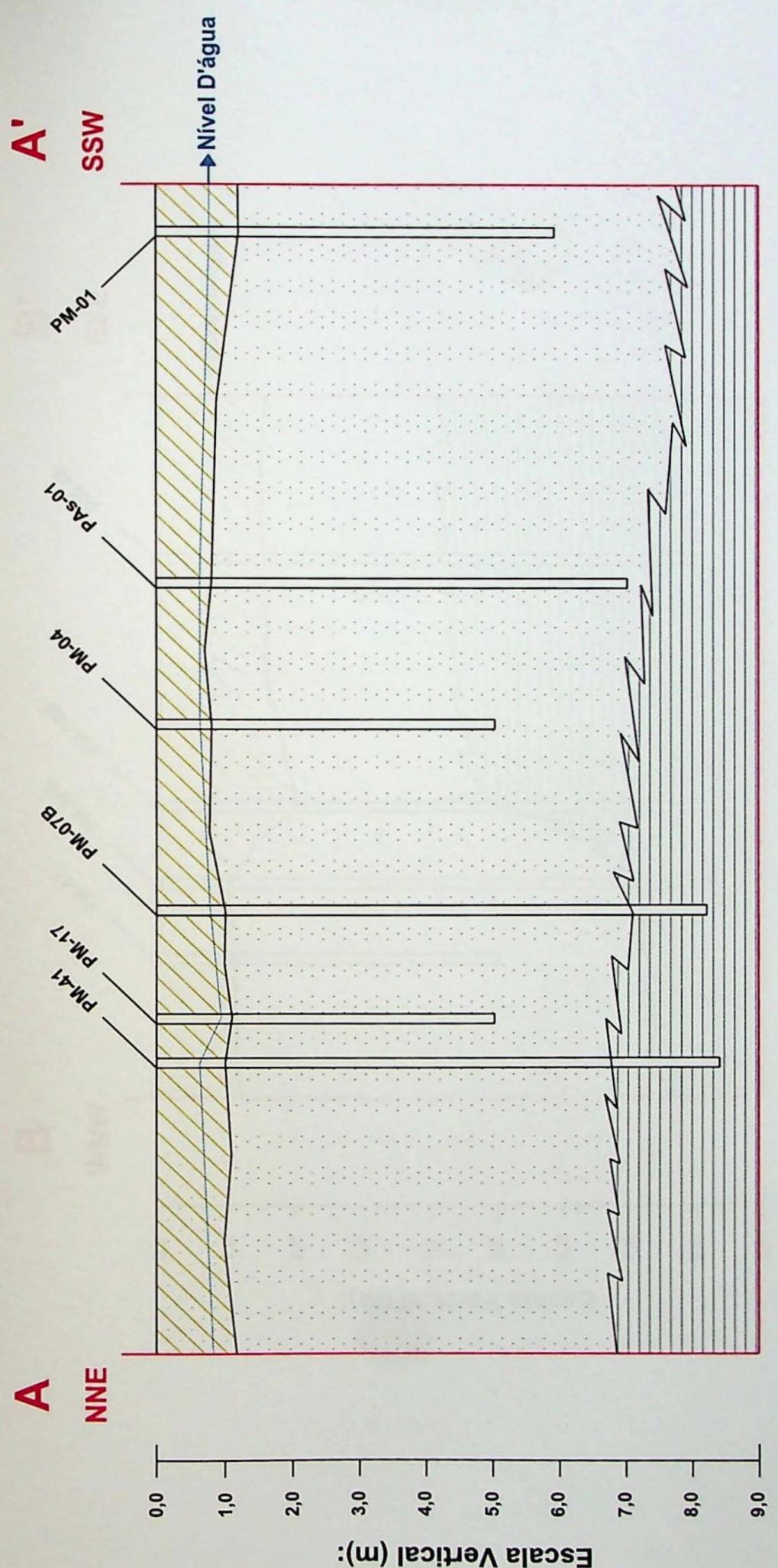
Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial

Aluno: Pedro Machado Simões

Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

GEOCIÊNCIAS

Monografia do Trabalho de Formatura  
Novembro/2006



Aterro - Composto predominantemente por areia, com presença de termos argilo-arenosos e fragmentos de rocha de dimensões variadas. Localmente ocorrem depósitos aluvio-coluvionares argilo-arenosos, intercalações arenosas e porções retrabalhadas do pacote inferior. Coloração variando entre amarelo, verde, marrom e cinza.

Pacote Superior - Constituído por areia de granulação fina pouco argilosa com intercalações arenosas decimétricas a centimétricas, restritivas. Ocorrem localmente conchas de bivalves e lentes predominantemente argilosas e homogêneas. Sua coloração predominante é cinza.

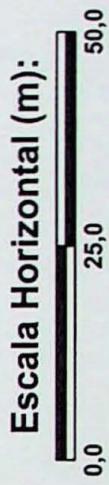
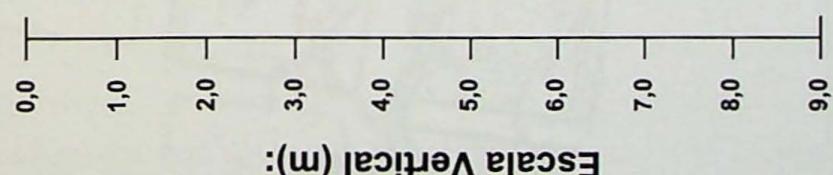
Pacote Inferior - Formado por argila marinha com intercalações arenosas finas esparsas de dimensões centimétricas e conchas de bivalves. A coloração predominante é cinza escura.

Contato entre Aterro e Pacote Superior

Contato transicional

**Figura 6-2: Seção Geológica A-A' (NNE-SSW)**

Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial  
 Aluno: Pedro Machado Simões  
 Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha  
 Monografia de Trabalho de Formatura  
 Novembro/2006

**B'****ESE****PM-39B****PM-07B****PM-17****WNW**

Aterro - Composto predominantemente por areia, com presença de termos argilo-arenosos e fragmentos de rocha de dimensões variadas. Localmente ocorrem depósitos aluvio-coluvionares argilo-arenosos, intercalações arenosas e porções retrabalhadas do pacote inferior. Coloração variando entre amarelo, verde, marrom e cinza.

Pacote Superior - Constituído por areia de granulação fina pouco argilosa com intercalações arenosas dacimétricas a centimétricas, restritas. Ocorrem localmente conchas de bivalves e lentes predominantemente argilosas e homogêneas. Sua coloração predominante é cinza.

Pacote Inferior - Formado por argila marinha com intercalações arenosas finas esparsas de dimensões centimétricas e conchas de bivalves. A coloração predominante é cinza escura.



Contato entre Aterro e Pacote Superior

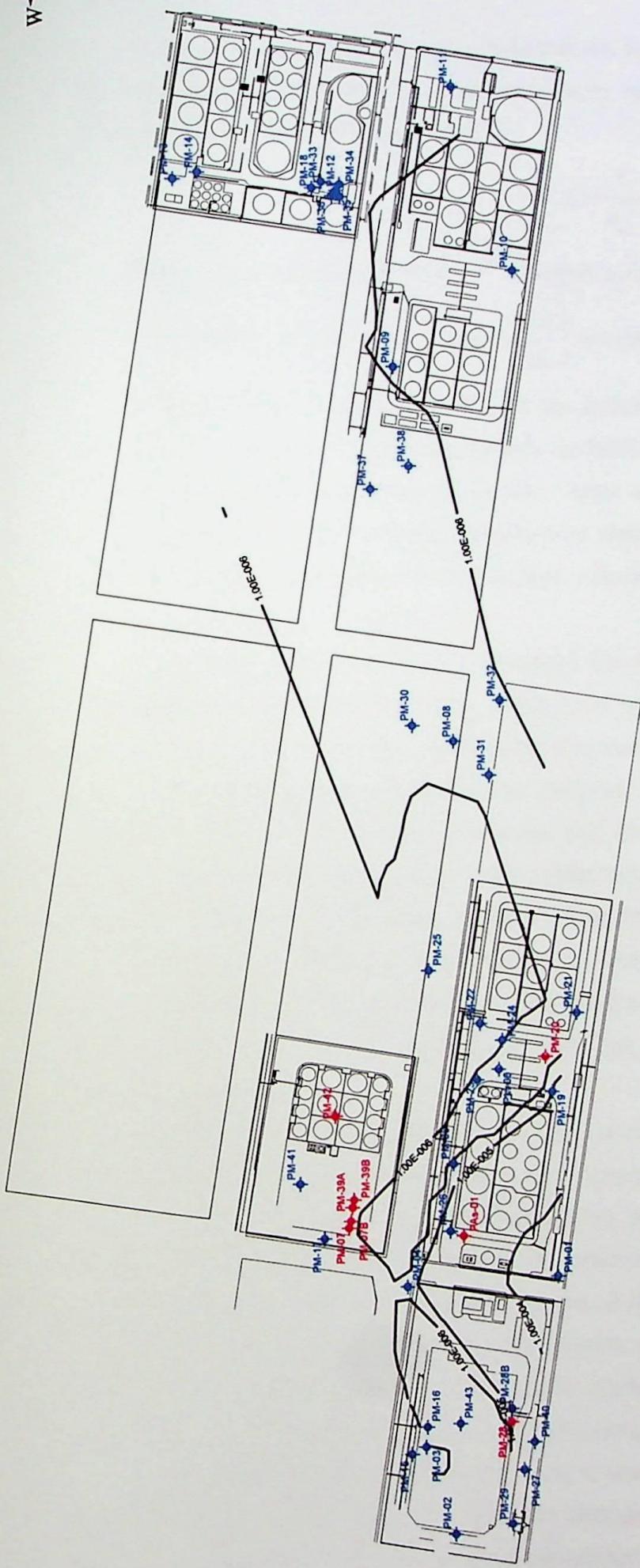
Contato transicional

**Figura 6-3: Seção Geológica B-B' (WNW-ESE)**

Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial  
Aluno: Pedro Machado Simões  
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

GEOCIÊNCIAS

Monografia de Trabalho de Formatura  
Novembro/2006



### Legenda:

- Poços de Monitoramento Contaminados
- Poços de Monitoramento Sem Contaminação ou Abaixo do Limite de Intervenção da CETESB

Curvas de Isovalores de Condutividade Hidráulica

### Escala Gráfica:

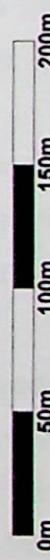


Figura 6-4: Mapa de Isovalores de Condutividade Hidráulica

Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial  
Aluno: Pedro Machado Simões  
Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

predominando uma grandeza da ordem de  $10^{-6} \text{ m/s}$ , condizente com a condutividade média calculada.

A velocidade do fluxo da água subterrânea foi calculada para a área dos lotes 16 e 17, que são os principais locais da contaminação na área. Esta velocidade foi calculada com base na Lei de Darcy (Fetter, 1994):

$$v = K \times \frac{1}{n_{ef}} \times \left( \frac{\Delta h}{\Delta l} \right),$$

onde  $v$  é a velocidade do fluxo da água subterrânea,  $K$  é a condutividade hidráulica,  $n_{ef}$  é a porosidade efetiva do meio e  $\left( \frac{\Delta h}{\Delta l} \right)$  é o gradiente hidráulico entre os poços.

Os poços escolhidos para o cálculo da velocidade da água subterrânea foram PM-01 e PM-17 por estarem paralelos ao sentido do fluxo da água subterrânea nos lotes 16 e 17. A porosidade efetiva adotada foi de 5%, valor que melhor representa as características hidrogeológicas do meio predominantemente areno-argiloso (Fetter, 1993).

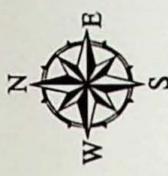
Foi obtido o valor de 3,716 m/ano para velocidade do fluxo da água subterrânea. Devido às características do aquífero

As maiores concentrações do composto Cis 1,2 Dicloroeteno estão localizadas em local de baixa condutividade hidráulica, conferindo baixa mobilidade ao contaminante. Embora seja um composto de alta mobilidade (Domenico & Schwartz, 1997; Fetter, 1994), as características hidrogeológicas da área conferem a ele baixa movimentação. Os valores das análises laboratoriais do Cis 1,2 Dicloroeteno são apresentados na Tabela 6-1 (Anexo III). Dentre eles, foram assinalados quais estão acima do Limite de Intervenção, da lista de valores orientadores para solos e águas subterrâneas (CETESB, 2005).

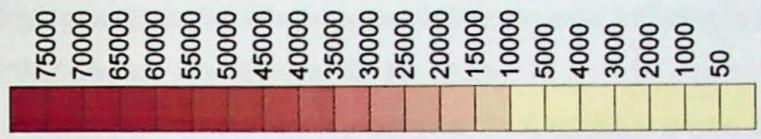
Uma particularidade da contaminação na área de interesse é a variabilidade dos valores das concentrações do contaminante. Há pontos onde os valores do parâmetro analisado variam, em cerca de três metros, de 368  $\mu\text{g/L}$  a 72500  $\mu\text{g/L}$  (poços PM-07 e PM-07B, respectivamente).

O mapa de isoconcentração de Cis 1,2 Dicloroeteno (Figura 6-5) também foi elaborado utilizando o método de triangulação com interpolação linear e fornece uma idéia mais precisa da distribuição da contaminação na área. Para a realização deste mapa, foi estipulado um contorno para a pluma de contaminação com o objetivo a minimizar o efeito da dispersão dos dados no software (*Surfer 8.0*). O contorno da pluma foi determinado a partir das relações teóricas entre a mobilidade do contaminante, direção e velocidade do fluxo d'água subterrânea. Com a utilização deste critério os poços PM-20 e PM-28, foram excluídos para que não houvesse uma extração dos limites da pluma de contaminação.

Estes dados calculados confirmam que o composto Cis 1,2 Dicloroeteno, tem pequena movimentação no aquífero, não devendo ultrapassar uma dezena de metros por ano. Com isso, mesmo eliminando-se o acompanhamento temporal da evolução da pluma de



Concentração (ug/L)



#### Legenda:

- Poços de Monitoramento Contaminados (Concentração acima do Limite de Intervenção da CETESB)
- Poços de Monitoramento Sem Contaminação ou Abaixo do Limite de Intervenção da CETESB

#### Escala Gráfica:



Figura 6-5: Mapa Isoconcentração de Cls 1,2-Dicloroeteno

Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial  
 Aluno: Pedro Machado Simões  
 Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha  
 Monografia de Trabalho de Formatura  
 Novembro/2006

contaminação, sabe-se que ela atualmente possuiria contorno similar ao da época da campanha de amostragem se não estivesse com o sistema de remediação agora ativo.

Cabe ainda ressaltar que na época da amostragem, o sistema de remediação por *air sparging* estava inativo, impossibilitando sua influência na potenciometria e concentração e distribuição da contaminação na área.

A caracterização hidrogeológica da área teve como finalidade criar bases confiáveis para a elaboração do modelo geoestatístico e servirá também para comparação entre o mapa de probabilidade de contaminação obtido pela Krigagem de Indicadoras e o modelo da pluma de contaminação elaborado por triangulação com interpolação linear.

## 6.2. Análise Geoestatística

Os valores de contaminação por Cis 1,2 Dicloroeteno encontrados na área de estudo variam desde menores que o Limite de Quantificação estipulado pelo laboratório de análises químicas em 5  $\mu\text{g/L}$  até 72.500  $\mu\text{g/L}$ . Sendo o Valor de Intervenção estipulado pelo órgão regulamentador de 50  $\mu\text{g/L}$ , a contaminação ultrapassa em alguns poços este limite e ainda o extrapola em uma ordem de grandeza de  $10^3$ .

Além da elevada variação de concentração de contaminante na área, a distribuição espacial desta contaminação ocorre de maneira bastante irregular inclusive em poços bastante próximos e pode ser estimada com o auxílio da Figura 6-5 e da Tabela 6-1 (Anexo III).

Estes fatores associados geram uma grande variabilidade para os variogramas experimentais, isto pode ser comprovado com a geração do variograma experimental omnidirecional para a concentração de Cis 1,2 Dicloroeteno em toda a área de estudo (Lotes 03, 05, 08, 11, 16, 17 e 19) (Figura 6-6).

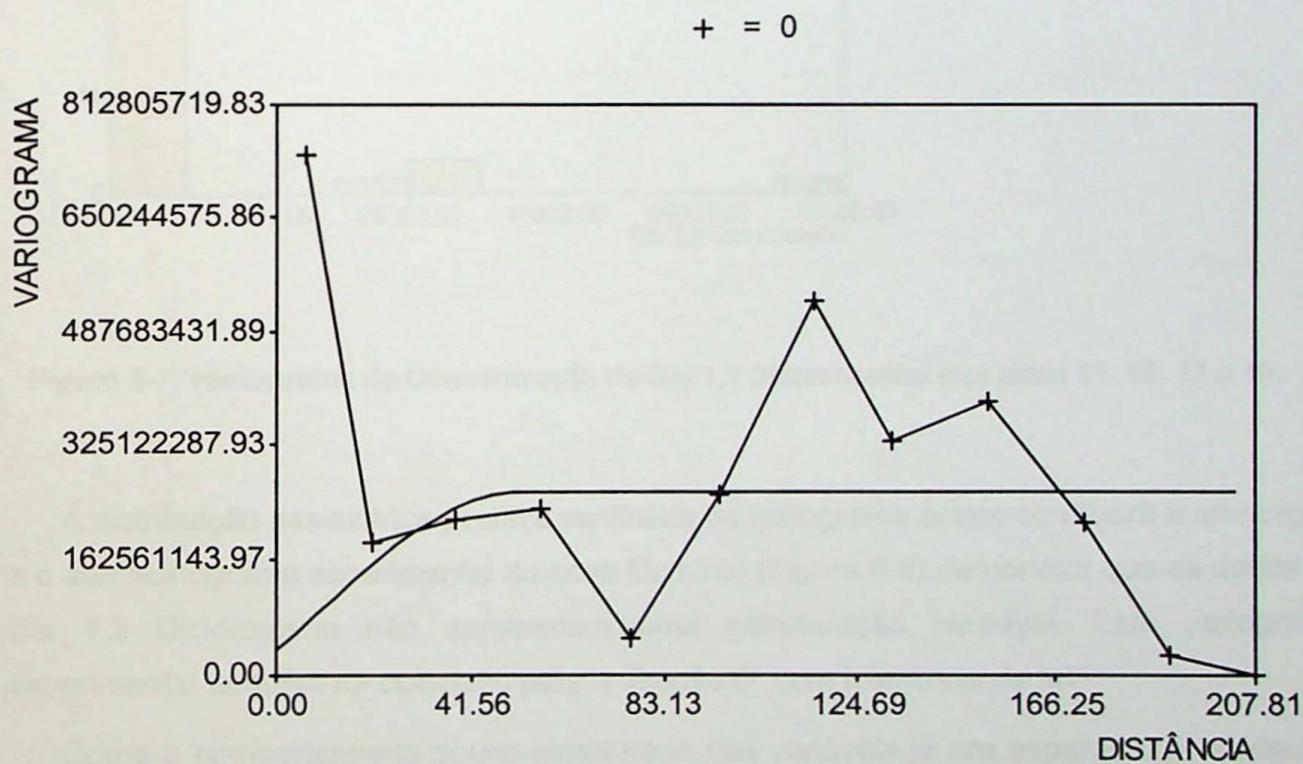


Figura 6-6: Variograma experimental omnidirecional com modelo teórico ajustado para toda a área.

O variograma apresentado na Figura 6-6 foi feito para a direção 0° com 90° de tolerância. Isto confere ao variograma uma varredura máxima para a busca de pares de pontos.

Devido a dissimilaridades entre os dados, foi proposta uma tentativa de redução do Domínio das amostras esperando-se um variograma melhor estruturado. O maior problema verificado em relação aos dados da área onde efetivamente há contaminação (lotes 16, 17 e 19 e parte do lote 11) é que os dados quantitativos possuem, em cerca de 73% de seus pontos, valores inferiores ao Limite de Intervenção estipulado pela CETESB, o que, mesmo com a diminuição do Domínio, faz com que o semivariograma experimental seja pouco estruturado. A distribuição bastante irregular das concentrações nesta área pode ser observada no histograma da Figura 6-7.

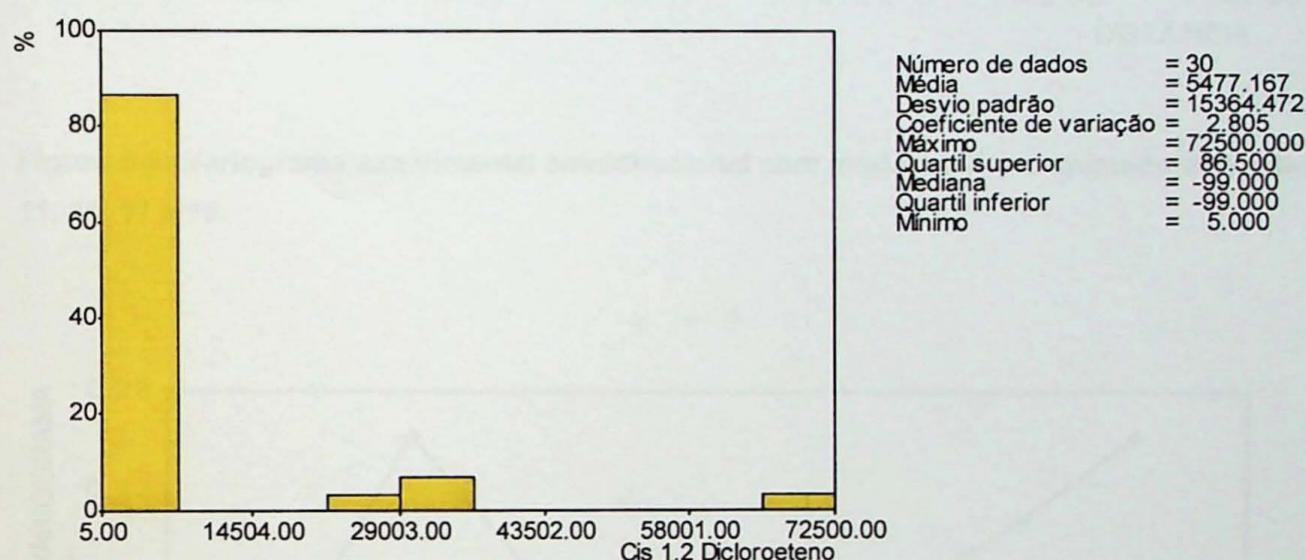
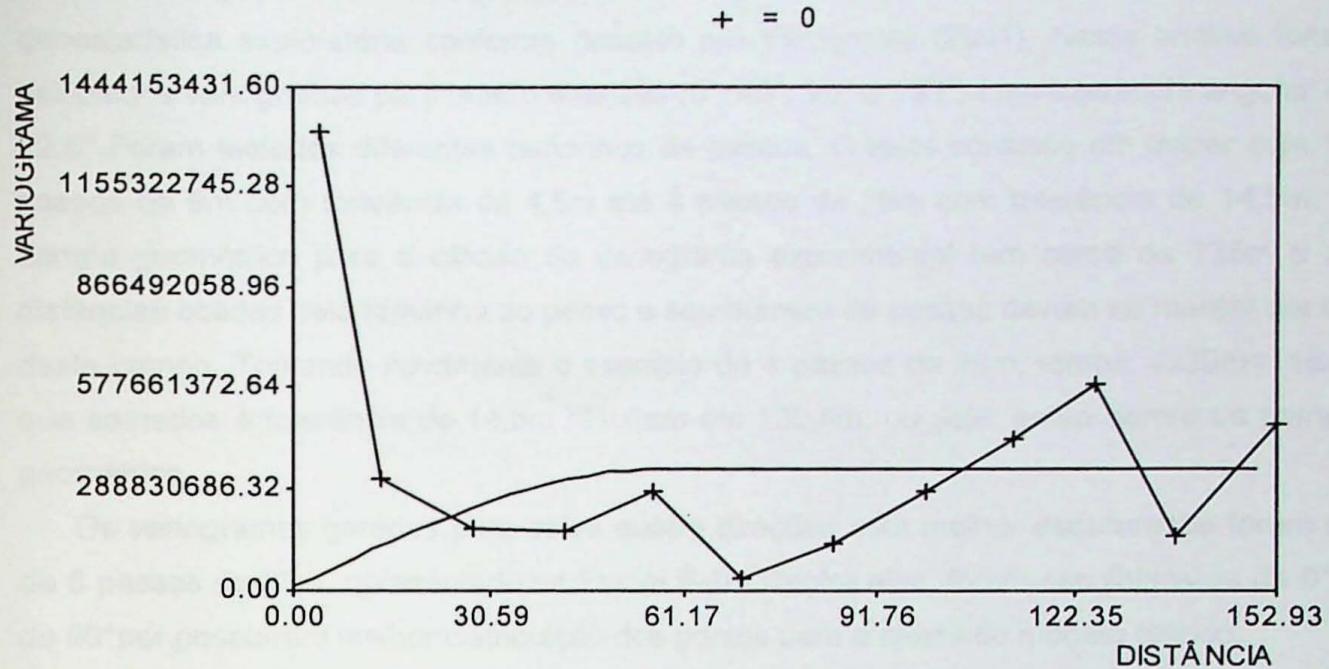


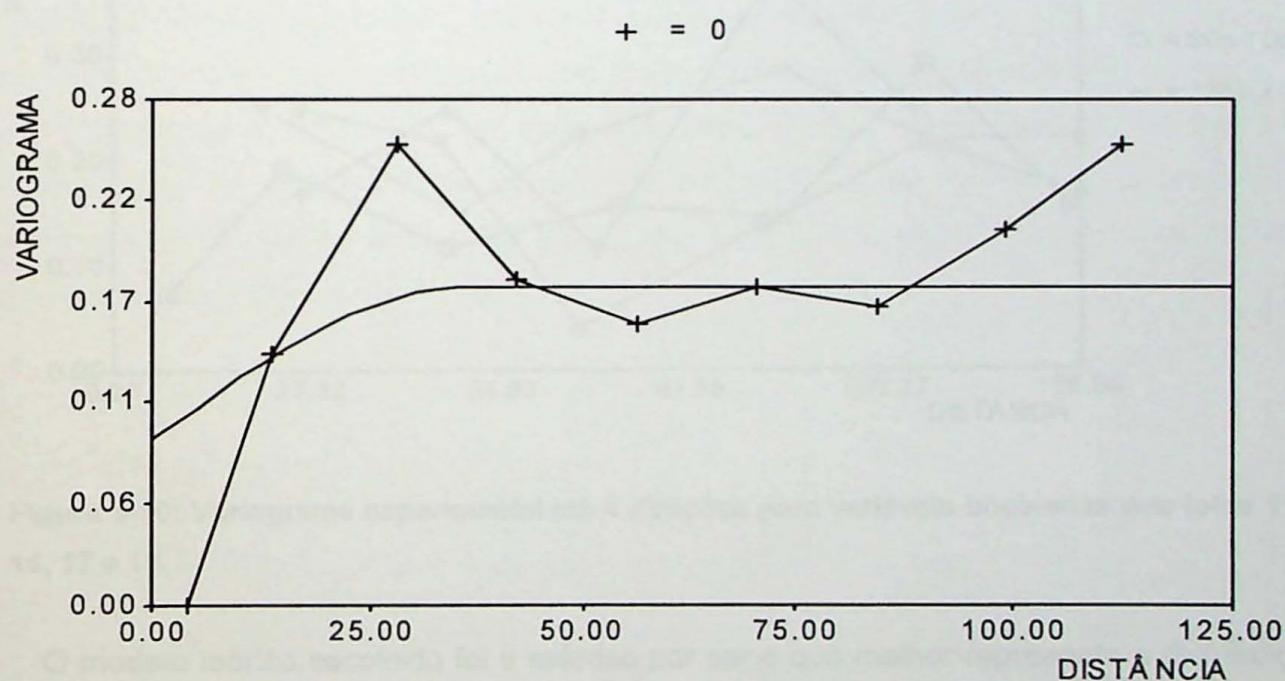
Figura 6-7: Histograma da Concentração de Cis 1,2 Dicloroeteno nos lotes 11, 16, 17 e 19.

A distribuição assimétrica positiva verificada no histograma acima corrobora a afirmação, e o semivariograma experimental do novo Domínio (Figura 6-8) demonstra que os dados de Cis 1,2 Dicloroeteno não apresentam uma estruturação razoável. Este variograma experimental também foi calculado para a direção 0° com tolerância de 90°.

Como o comportamento pouco estruturado das variáveis já era esperado, procedeu-se então à transformação dos dados dos lotes onde há contaminação (lotes 16, 17 e 19 e parte do lote 11) em variáveis booleanas para o cálculo de um novo semivariograma experimental. Este novo variograma omnidirecional foi calculado para a direção 0° com tolerância de 90° e está apresentado na Figura 6-9.



**Figura 6-8: Variograma experimental omnidirecional com modelo teórico ajustado dos lotes 11, 16, 17 e 19.**



**Figura 6-9: Variograma experimental omnidirecional para variáveis booleanas com modelo teórico ajustado dos lotes 11, 16, 17 e 19.**

Conforme o esperado, a conversão dos dados quantitativos de Cis 1,2 Dicloroeteno em variáveis indicadoras diminuiu significativamente o valor da variância espacial para a área contaminada. No entanto, no que concerne à estruturação do variograma, verificou-se que ainda há falta de estruturação dos dados.

Com o objetivo de se detectar a existência de anisotropia nos dados foi feita a análise geoestatística exploratória conforme descrito em Yamamoto (2001). Nesta análise foram calculados variogramas para quatro direções ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ ) com tolerância angular de  $22,5^\circ$ . Foram testados diferentes tamanhos de passos. O teste consistiu em iniciar com 15 passos de 9m com tolerância de 4,5m até 4 passos de 29m com tolerância de 14,5m. O campo geométrico para o cálculo do variograma experimental tem cerca de 135m e as distâncias obtidas pelo tamanho do passo e seu número de passos devem se manter dentro deste campo. Tomando novamente o exemplo de 4 passos de 29m, temos:  $4 \times 29m = 116m$ , que somados à tolerância de 14,5m resultam em 130,5m, ou seja, estão dentro do campo geométrico.

Os variogramas gerados para estas quatro direções com melhor estruturação foram os de 6 passos de 23m, apresentado na Figura 6-10. Dentre eles, foram escolhidos os de  $0^\circ$  e de  $90^\circ$  por possuírem melhor distribuição dos pontos para o ajuste do modelo teórico.

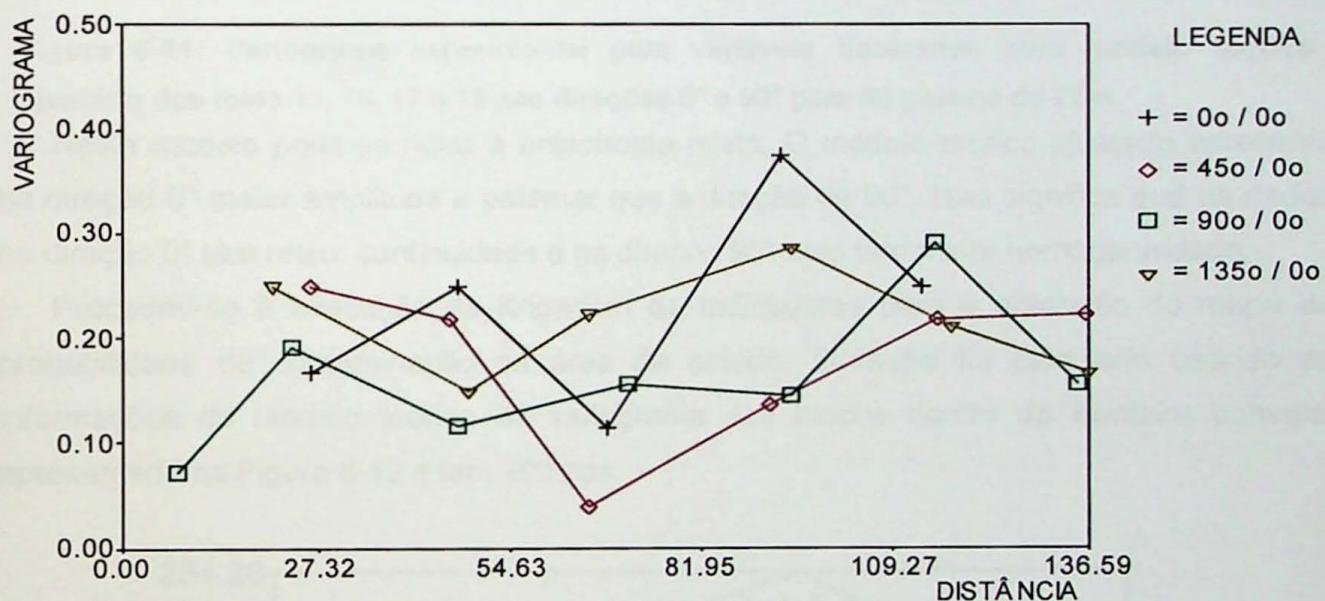
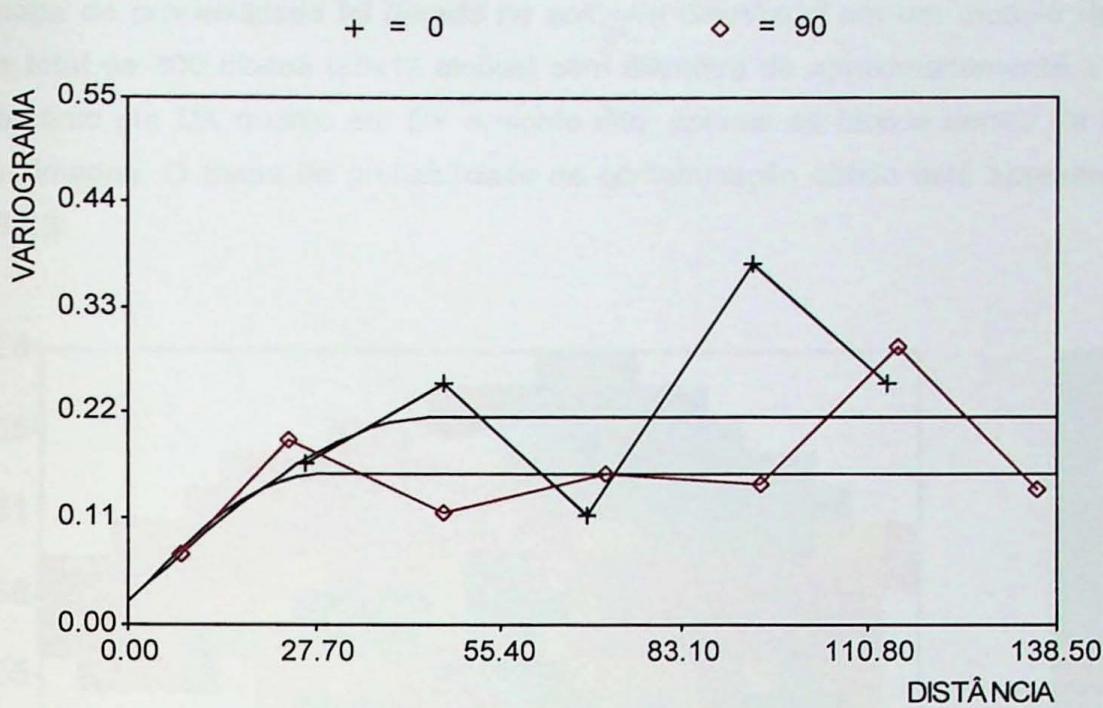


Figura 6-10: Variograma experimental em 4 direções para variáveis booleanas dos lotes 11, 16, 17 e 19.

O modelo teórico escolhido foi o esférico por ser o que melhor representa a distribuição dos pontos no variograma (Figura 6-11) que foi gerado com os seguintes parâmetros:

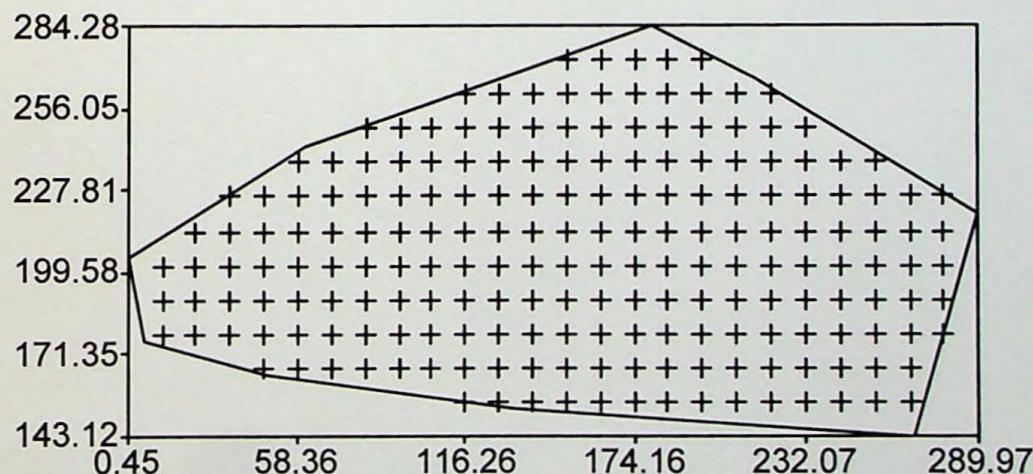
- Efeito Pepita de 0,024;
- Direção  $0^\circ$  - Amplitude de 45m, Variância Espacial de 0,132;
- Direção  $90^\circ$  - Amplitude de 27,5m, Variância Espacial de 0,06;



**Figura 6-11: Variograma experimental para variáveis booleanas com modelo teórico ajustado dos lotes 11, 16, 17 e 19 nas direções 0° e 90° para 06 passos de 23m.**

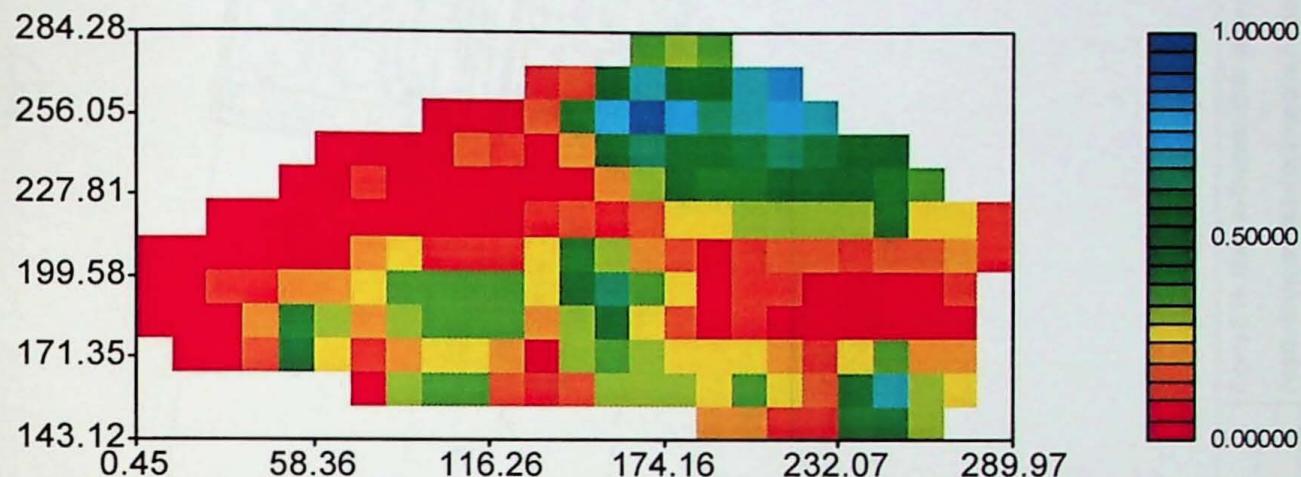
Neste modelo pode-se notar a anisotropia mista. O modelo teórico ajustado apresenta na direção 0° maior amplitude e patamar que a direção de 90°. Isso significa que os dados na direção 0° têm maior continuidade e na direção 90° eles têm maior homogeneidade.

Procedeu-se à execução da Krigagem de Indicadoras para a obtenção do mapa de probabilidade de contaminação na área de estudo. O mapa foi calculado usando as informações do modelo teórico de variograma aos blocos dentro da fronteira convexa apresentada na Figura 6-12 e tem 203 nós.



**Figura 6-12: Fronteira convexa utilizada na Krigagem de Indicadoras.**

O mapa de probabilidade foi gerado no software *GeoVisual* em um modelo de blocos com um total de 300 blocos (25x12 blocos) com diâmetro de aproximadamente 11,5m de abertura tanto em DX quanto em DY e, como dito, apenas os blocos dentro da fronteira foram estimados. O mapa de probabilidade de contaminação obtido está apresentado na Figura 6-13:



**Figura 6-13: Mapa de Probabilidade de Contaminação gerado no software *GeoVisual* para os lotes 11, 16, 17 e 19.**

Para uma melhor interpretação do mapa de probabilidade obtido, ele foi sobreposto a um mapa com a localização dos poços de monitoramento (Figura 6-14). Nota-se a maior probabilidade de contaminação nos poços PM-07, PM-07B, PM-39A, PM-39B e PM-42, além de probabilidades razoáveis para os poços PAs-01, PM-20 e PM-28.



## 7. Interpretação dos Resultados Obtidos

Através da comparação entre o mapa de isoconcentração de Cis 1,2 Dicloroeteno (Figura 6-5) e o mapa de probabilidade (Figura 6-14), observa-se que o primeiro tem apenas uma pluma definida de aproximadamente 9000 m<sup>2</sup>. O mapa de probabilidade de contaminação demonstra que, se utilizarmos como critério de delimitação da pluma, por exemplo, apenas valores acima de 50% de probabilidade, teríamos quatro diferentes plumas na área. Estas plumas seriam:

- Pluma dos poços PM-07, PM-07B, PM-39A, PM-39B e PM-42, com cerca de 7200 m<sup>2</sup>;
- Plumdas dos poços PAs-01, PM-20 e PM-28, com cerca de 600 m<sup>2</sup> cada uma.

As plumas geradas pela Krigagem de Indicadoras somadas têm uma área total similar à da pluma gerada por triangulação com interpolação linear, porém com geometria e distribuição bastante diferente da representada na Figura 6-5.

Se a intenção for adotar apenas os limites de probabilidade acima de 50%, há uma diminuição significativa nas áreas de probabilidade de ocorrência de contaminação por Cis 1,2 Dicloroeteno e, conseqüentemente, um menor volume a ser remediado. Além disso, a locação dos poços para remediação pode levar em consideração um raio de ação melhor dimensionado, assegurando maior abrangência das plumas e uma descontaminação mais eficiente.

Observa-se, ainda, no mapa de probabilidade de contaminação, que a área com maior probabilidade é também onde está localizada a pluma dos poços PM-07, PM-07B, PM-39A, PM-39B e PM-42. Nota-se, ainda, que esta área coincide com a porção mais contaminada indicada no mapa de isoconcentração de Cis 1,2 Dicloroeteno. Esta porção da área de estudo é exatamente onde está localizado o divisor de águas que contribui para uma distribuição da pluma não só no sentido N-S, em direção ao poço PAs-01, , mas também no sentido E-W, em direção ao poço PM-42.

## 8. Conclusões

A hidrogeologia local sofre forte influência da oscilação da maré apenas no lote 03, devido à localização do oceano a Norte da área de estudo. A superfície potenciométrica que contempla a área efetivamente contaminada (lotes 16, 17 e 19) tem seu sentido de fluxo com direção Sul e derivações para SE e SW. Embora os dados fornecidos não tenham permitido um melhor detalhamento das variações sedimentológicas, os perfis de sondagens possibilitaram a execução de seções geológicas que auxiliaram no entendimento da estratigrafia local.

O local onde está a pluma de contaminação de Cis 1,2 Dicloroeteno possui baixa condutividade. Isso indica que, embora o contaminante seja de alta mobilidade, sua velocidade limita-se a, no máximo, poucos metros por ano. Os limites da pluma resumem-se aos poços PM-07, PM-07B, PM-39A, PM-39B, PM-42 e PAs-01, localizados nos lotes 16 e 17, e foram determinados com o auxílio das informações fornecidas pelo mapa potenciométrico e pelo mapa de isovalores de condutividade hidráulica. Os poços PM-20 e PM-28, embora contaminados, são considerados apenas como focos pontuais de Cis 1,2 Dicloroeteno.

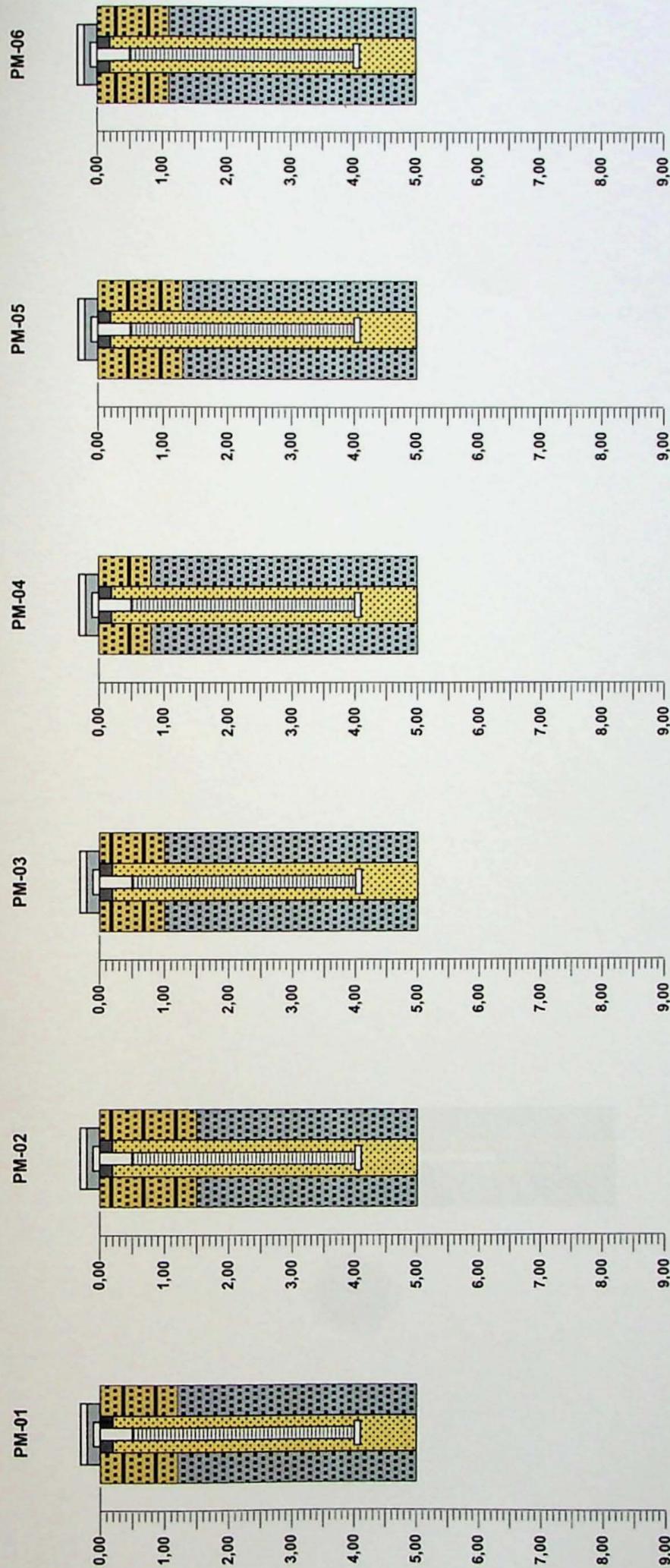
Não foi executada Krigagem Ordinária com os dados de contaminação devido à alta variância de seus dados e sua baixa estruturação, caracterizando o chamado “efeito pepita puro”. Com a transformação destas variáveis em dados booleanos e um refinamento das condições da chamada “janela de pesquisa” (Yamamoto, 2001), foi obtido um semivariograma melhor estruturado apresentando anisotropia mista.

O mapa de probabilidade obtido possibilitou uma melhora nas condições de contorno das plumas de Cis 1,2 Dicloroeteno. A pluma de contaminação feita utilizando-se a triangulação com interpolação linear era abrangente e não contemplava focos pontuais de contaminação, como os poços PM-20 e PM-28. O tratamento geoestatístico dos dados e a utilização do método de Krigagem de Indicadoras forneceram ferramentas auxiliares para uma melhor determinação dos contornos das plumas de contaminação. Por exemplo, se o critério utilizado para considerar uma área contaminada for o de que área com 50% ou mais de probabilidade de contaminação são consideradas contaminadas, temos quatro plumas distintas. Com isso, pode-se dimensionar sistemas de remediação mais eficientes para a área de estudo.

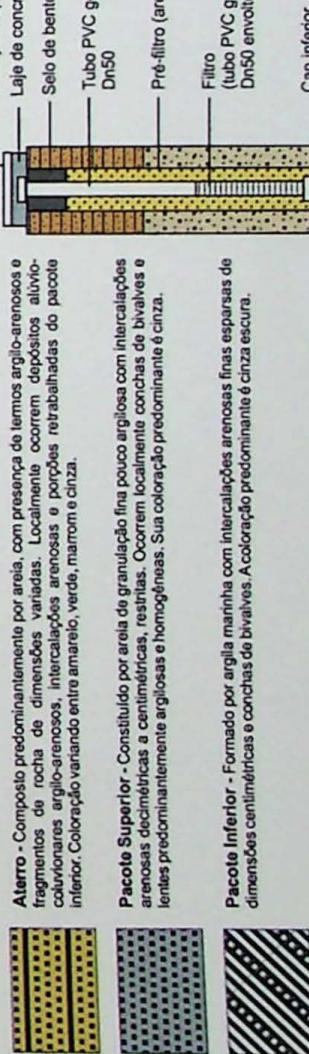
## 9. Referências Bibliográficas

- CALVETE, F. J. S. & RAMÍREZ, J. C. 1990. *Geoestadística, Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea*. Barcelona, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universitat Politècnica de Catalunya. 484 p.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2001. Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas. São Paulo.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2005. Aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas, em substituição aos Valores Orientadores de 2001. São Paulo.
- DOMENICO, P. A. & SCHWARTZ, F. W. 1997. *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York, John Wiley & Sons. 506p.
- FETTER, C. W. 1993. *Contaminant Hydrogeology*. United States of America. University of Wisconsin-Oshkosh, Prentice-Hall Inc. 500 p.
- FETTER, C. W. 1994. *Applied Hydrogeology*. United States of America. University of Wisconsin-Oshkosh, Prentice-Hall Inc. 598 p.
- HENLEY, S. 1981. *Nonparametric Geostatistics*. England, Elsevier Applied Science Publishers Ltd. 145 p.
- HUIJBREGTS, C. J. 1975. *Regionalized Variables and Quantitative Analysis of Spatial Data*. In: DAVIS, J. C. & MCCULLAGH, M. J. (orgs.) ed. *Display and Analysis of Spatial Data*. New York, John Wiley. P. 38-53.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1981. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo, Escala 1:500.000*. IPT.
- JOURNAL, A. G. & HUIJBREGTS, C. J. 1978. *Mining Geostatistics*. Great Britain, Academic Press Limited. 600p.
- MATOS, S. L. F. 2006. Uso da Simulação Gaussiana para Caracterização de Plumas. *Saneamento Ambiental*, 118: 34-37.
- LANDIM, P. M. B. 1998. *Análise Estatística de Dados Geológicos*. São Paulo, Fundação Editora da UNESP. 226 p.
- KITANIDIS, P. K. 1997. *Introduction to Geostatistics: Applications to Hydrogeology*. Stanford University, U. S., Cambridge University Press. 249 p.
- ROCHA, M. M. 2005. Apostila do curso de GSA-0400 – Prospecção, Pesquisa e Avaliação de Jazidas. São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- YAMAMOTO, J. K. 2001. *Avaliação e Classificação de Reservas Minerais*. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo. 232 p.

## **ANEXO I**



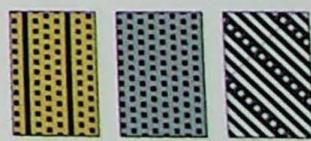
#### Legenda:



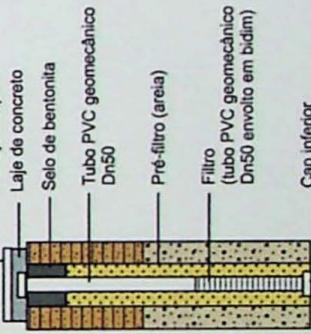
**Figura 3-1a: Perfil de Sondagens e Poços de Monitoramento**



#### Legenda:



#### Perfil Construtivo dos Poços de Monitoramento



**Figura 3-1b: Perfil de Sondagens e Poços de Monitoramento**

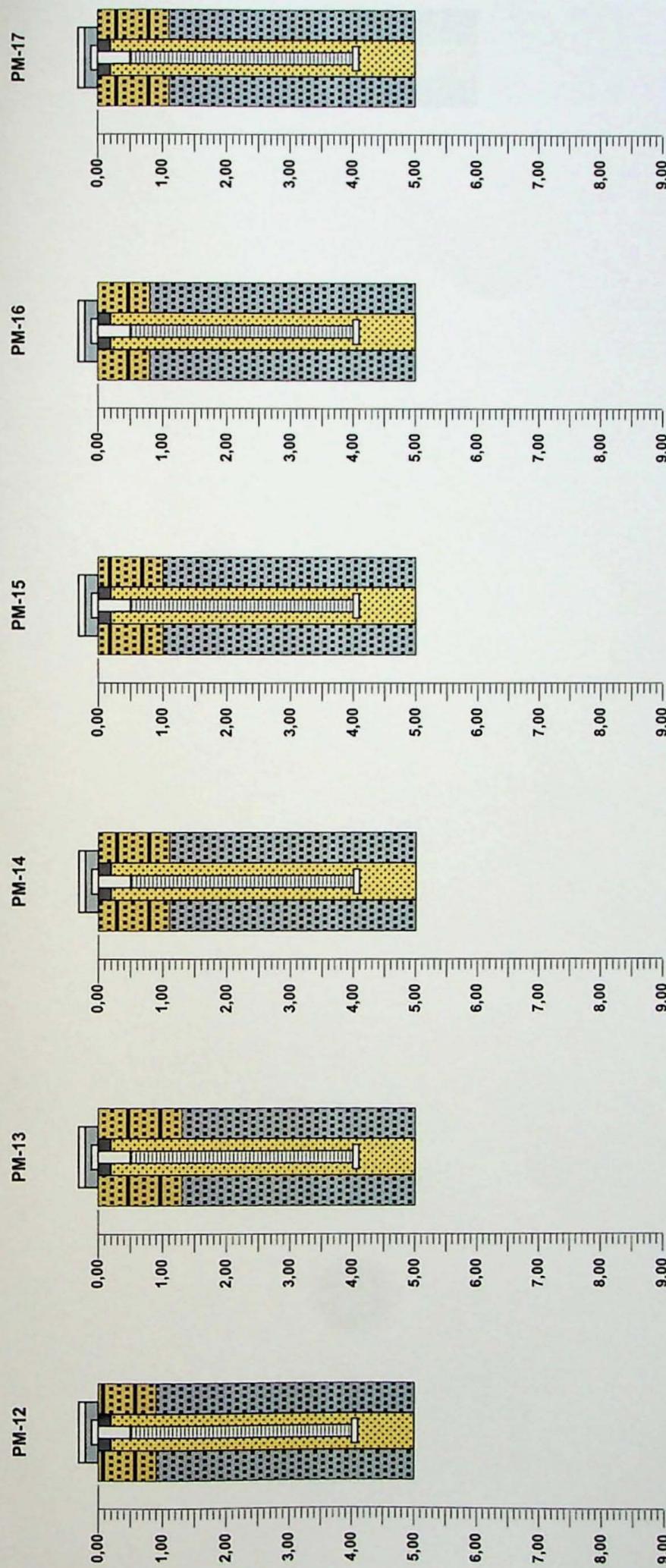
Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial

Aluno: Pedro Machado Simões

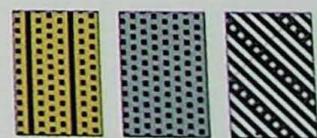
Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

GEOLÓGICAS

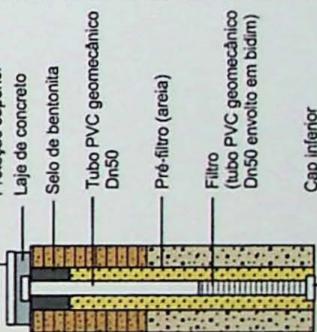
Monografia de Trabalho de Formatura  
Novembro/2006



#### Legenda:



#### Perfil Construtivo dos Poços de Monitoramento



**Figura 3-1c: Perfil de Sondagens e Poços de Monitoramento**

Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial

Aluno: Pedro Machado Simões

Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

#### GEOCIÊNCIAS

Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial

Aluno: Pedro Machado Simões

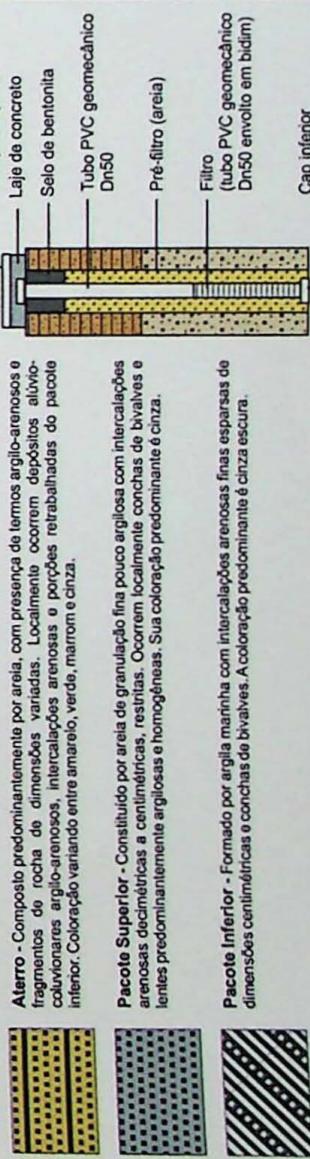
Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

Monografia de Formatura

Novembro/2006



#### Legenda:



#### Perfil Construtivo dos Poços de Monitoramento

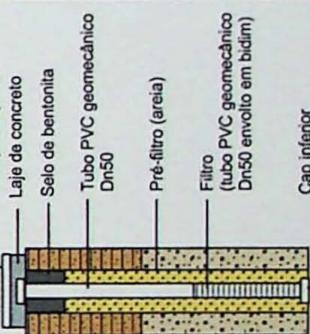


Figura 3-1d: Perfil de Sondagens e Poços de Monitoramento

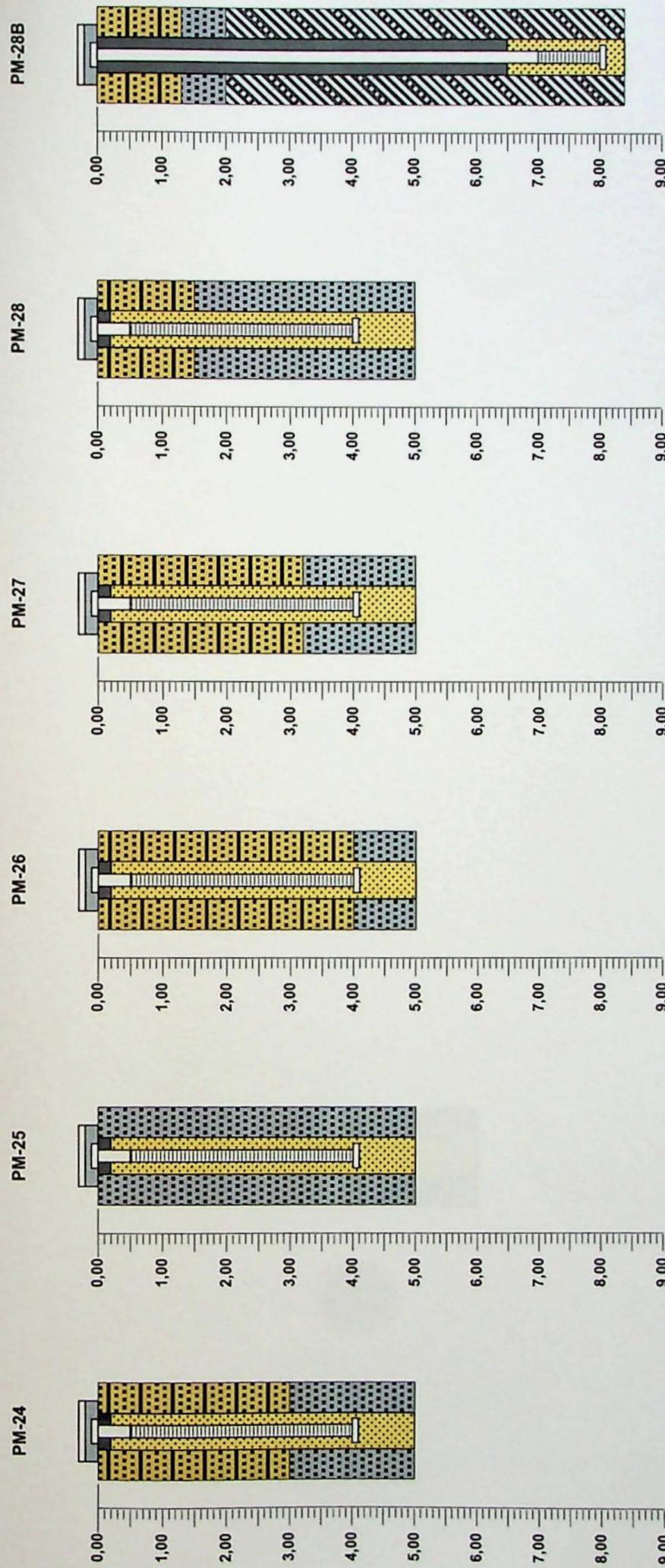
Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial

Aluno: Pedro Machado Simões

Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

GEOCIÉNCIAS

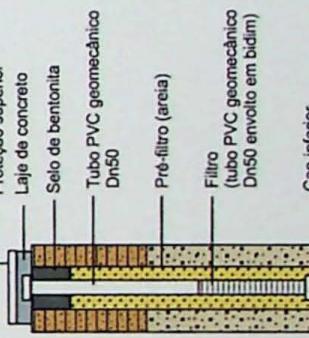
Monografia de Trabalho de Fomatura Novembro/2006



#### Legenda:



#### Perfil Construtivo dos Poços de Monitoramento



**Figura 3-1e: Perfil de Sondagens e Poços de Monitoramento**

Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial

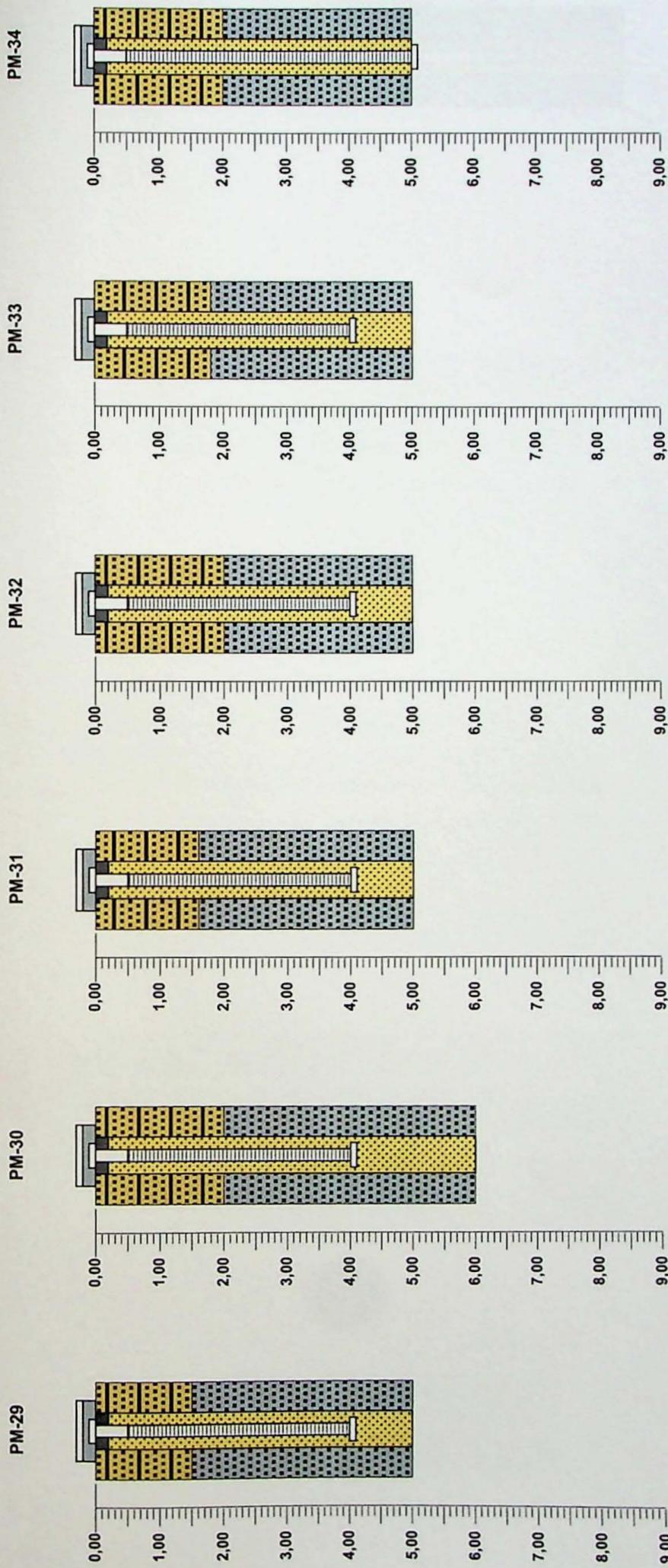
Aluno: Pedro Machado Simões

Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

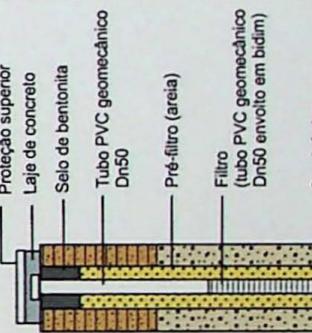
Geotecnia

Monografia de Trabalho de Formatura

Novembro/2006



Perfil Construtivo dos Poços de Monitoramento



**Aterro** - Composto predominantemente por areia, com presença de tecidos argilo-arenosos e fragmentos de rocha de dimensões variadas. Localmente ocorrem depósitos aluvio-cluviáreos argilo-arenosos, intercalações arenosas e porções retrabalhadas do pacote inferior. Coloração variando entre amarelo, verde, marrom e cinza.

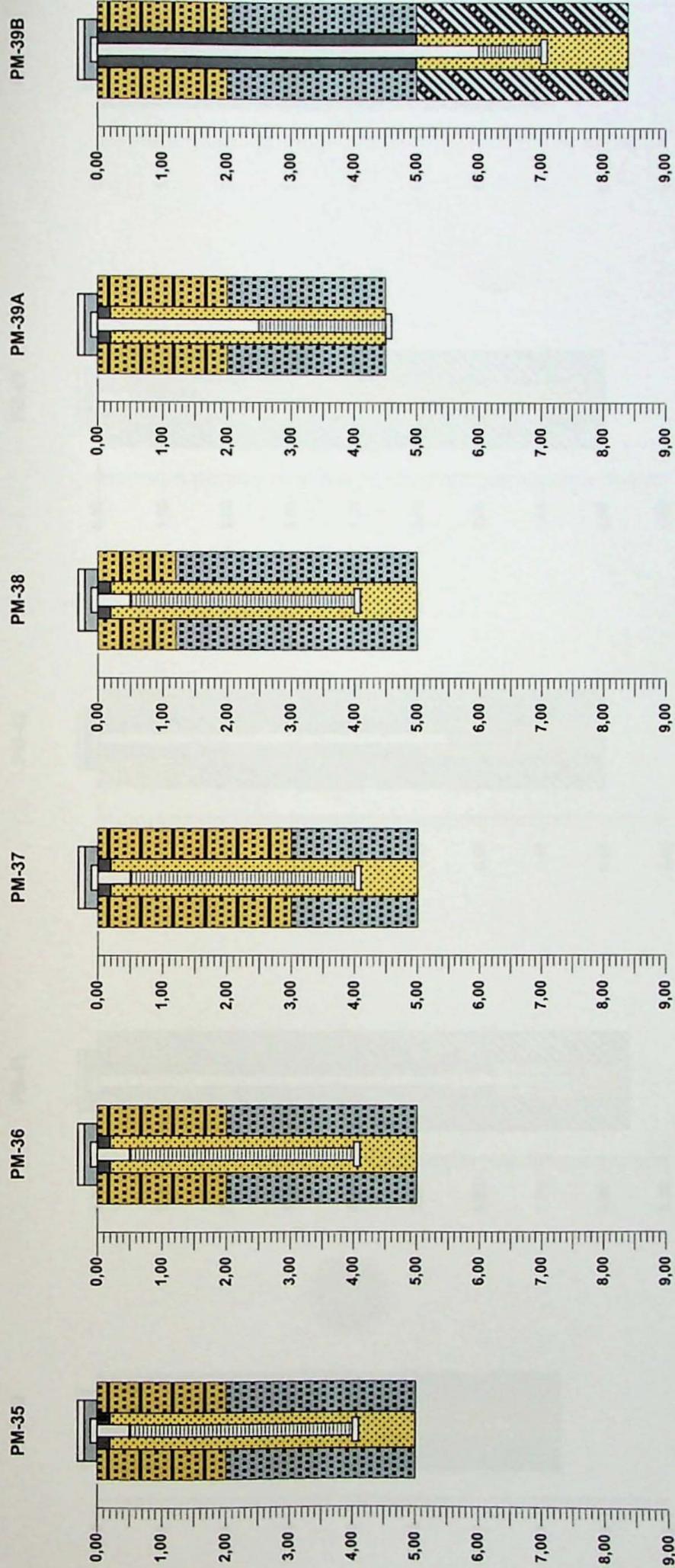
**Pacote Superior** - Constituído por areia de granulação fina pouco argilosa com intercalações arenosas decimétricas a centimétricas, restritas. Ocorrem localmente conchas de bivalves e lentes predominantemente argilosas e homogêneas. Sua coloração predominante é cinza.

**Pacote Inferior** - Formado por argila marinha com intercalações arenosas finas esparsas de dimensões centimétricas e conchas de bivalves. A coloração predominante é cinza escura.

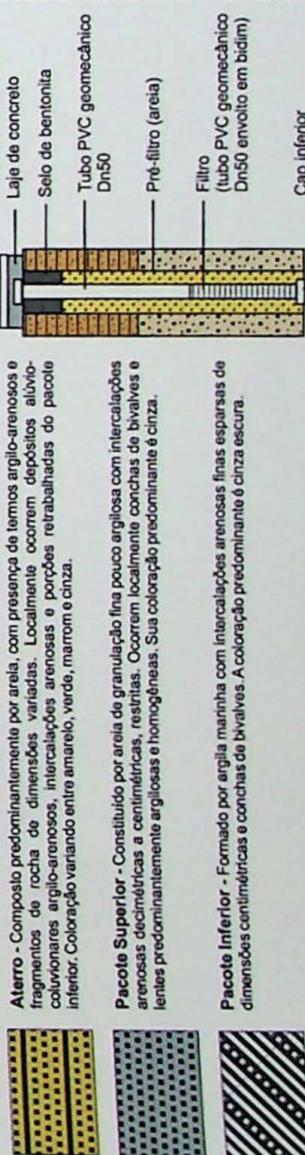
Figura 3-1f: Perfil de Sondagens e Poços de Monitoramento

Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial  
Aluno: Pedro Machado Simões  
Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

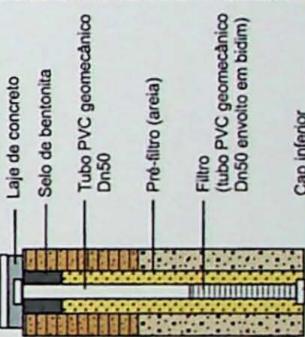
G E O C I E N C I A S  
Monografia de Trabalho de Formatura  
Novembro/2006



#### Legenda:



#### Perfil Construtivo dos Poços de Monitoramento



**Figura 3-1g: Perfis de Sondagens e Poços de Monitoramento**

Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial

Aluno: Pedro Machado Simões  
Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

**GEOCIÊNCIAS**  
Monografia de Trabalho de Formatura  
Novembro/2006

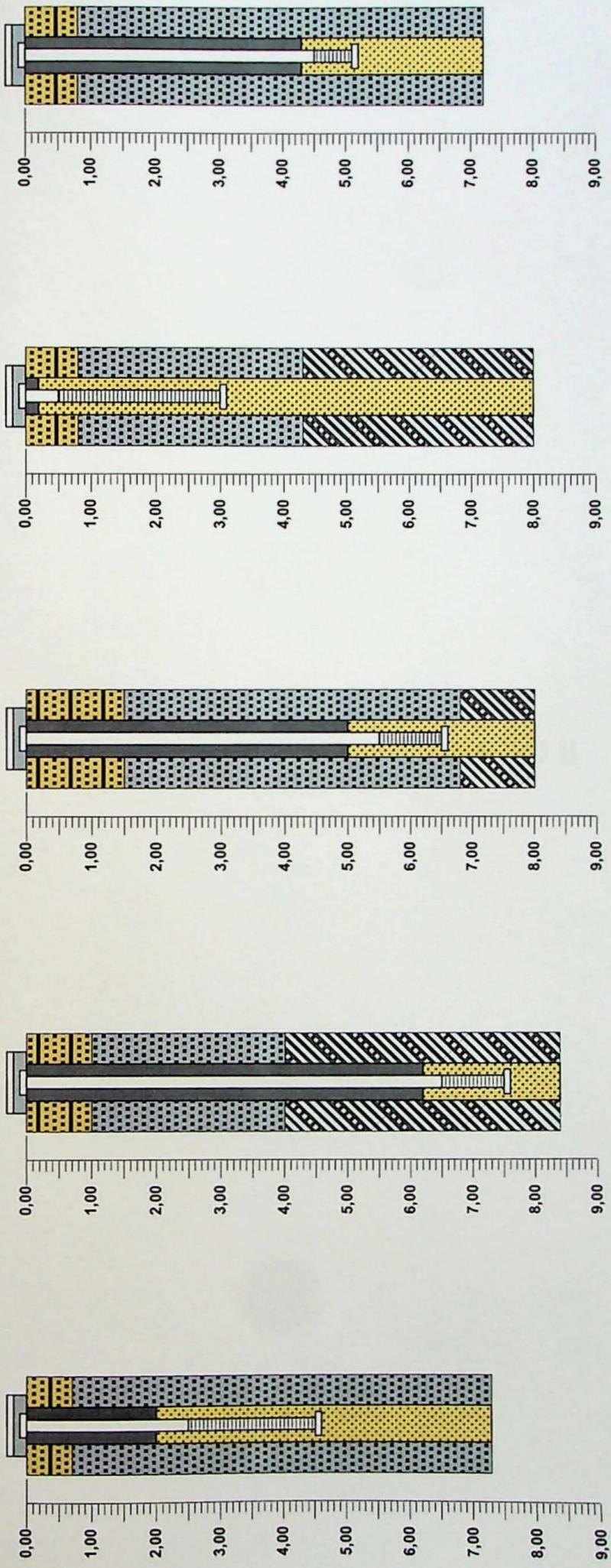
PAs-01

PM-43

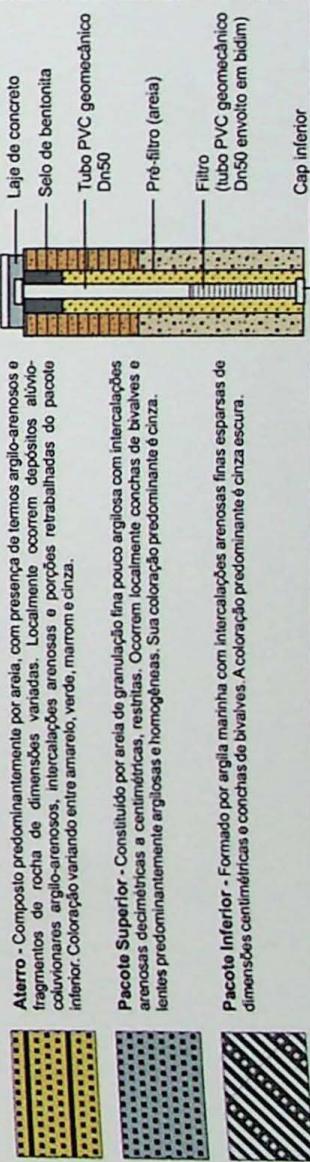
PM-42

PM-41

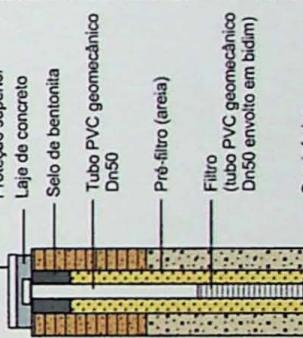
PM-40



#### Legenda:



#### Perfil Construtivo dos Poços de Monitoramento



**Aterro** - Composto predominantemente por areia, com presença de termos argilo-arenosos e fragmentos de rocha de dimensões variadas. Localmente ocorrem depósitos aluvionares argilo-arenosos, intercalações arenosas e porções retrabalhadas do pacote inferior. Coloração variando entre amarelo, verde, marrom e cinza.

**Pacote Superior** - Constituído por areia de granulação fina pouco argilosa com intercalações arenosas decimétricas a centimétricas, resíndias. Ocorrem localmente conchas de bivalves e lençóis predominantemente argilosos e homogêneos. Sua coloração predominante é cinza.

**Pacote Inferior** - Formado por argila marinha com intercalações arenosas finas esparsas de dimensões centimétricas e conchas de bivalves. A coloração predominante é cinza escura.

GEOCIÊNCIAS

Projeto: Krigagem de Indicadoras para o Mapeamento de Pluma de Contaminação em Água Subterrânea de uma Área Industrial  
Aluno: Pedro Machado Simões  
Orientador: Profº Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

**Figura 3-1h: Perfil de Sondagens e Poços de Monitoramento**

Monografia de  
Trabalho de  
Fomatura  
Novembro/2006

## **ANEXO II**

**Tabela 3-1: Dados dos Poços de Monitoramento na Área de Estudo**

Poço	Coord. Norte (UTM)	Coord. Leste (UTM)	Cota Boca do Tubo (m)	Nível d'água (m)	Carga Hidráulica (m)	Condutividade Hidráulica (m/s)
PM-01	152.458	133.191	3.990	0.650	3.340	1.56E-04
PM-02	204.675	0.452	4.208	0.540	3.668	5.66E-07
PM-03	219.900	44.912	3.789	0.360	3.429	1.25E-06
PM-04	229.658	127.594	4.030	0.630	3.400	7.45E-07
PM-05	206.181	190.662	4.074	0.430	3.644	1.18E-07
PM-06	182.973	239.279	4.180	0.720	3.460	8.13E-07
PM-07	259.584	157.525	4.317	0.430	3.887	9.34E-07
PM-07B	258.575	161.045	4.667	0.813	3.854	-
PM-08	206.429	407.192	4.643	0.520	4.123	-
PM-09	236.477	599.373	4.272	0.600	3.672	1.18E-06
PM-10	175.461	649.211	4.360	0.510	3.850	2.95E-06
PM-11	206.565	743.461	4.046	0.600	3.446	3.89E-07
PM-12	264.871	689.698	4.190	0.280	3.910	5.49E-07
PM-13	345.898	695.632	3.894	0.480	3.414	2.80E-07
PM-14	333.902	699.153	4.086	1.180	2.906	2.02E-07
PM-15	227.155	41.138	3.704	0.330	3.374	-
PM-16	219.253	55.332	3.827	0.450	3.377	1.92E-07
PM-17	271.926	152.131	4.672	0.920	3.752	2.64E-06
PM-18	277.070	691.003	4.024	0.540	3.484	2.91E-07
PM-19	155.546	227.678	4.040	0.559	3.481	4.28E-07
PM-20	159.031	245.747	4.119	0.515	3.604	-
PM-21	143.115	268.401	4.209	0.539	3.670	2.02E-07
PM-22	192.751	262.853	4.017	0.304	3.713	1.52E-06
PM-23	194.118	233.829	4.052	0.200	3.852	-
PM-24	181.216	254.208	4.077	0.406	3.671	-
PM-25	219.190	289.971	4.220	0.318	3.902	4.20E-06
PM-26	207.743	156.256	3.984	0.366	3.618	-
PM-27	169.560	33.557	4.358	0.790	3.568	-
PM-28	176.153	58.014	4.289	0.750	3.539	2.19E-07
PM-28B	175.838	65.032	4.289	1.310	2.979	-
PM-29	175.495	5.888	4.385	0.614	3.771	3.73E-07
PM-30	227.495	415.075	4.702	0.650	4.052	1.03E-07
PM-31	188.158	389.998	4.398	0.410	3.988	4.69E-07
PM-32	182.611	428.254	4.420	0.329	4.091	-
PM-33	272.381	694.136	4.093	0.200	3.893	5.57E-07
PM-34	263.065	692.866	4.173	0.310	3.863	-
PM-35	262.931	686.491	4.146	0.350	3.796	-
PM-36	267.027	686.920	4.240	0.250	3.990	-
PM-37	248.169	536.475	4.266	0.385	3.881	-
PM-38	228.687	548.425	4.357	0.333	4.024	3.62E-07
PM-39A	257.829	168.171	4.667	0.812	3.855	-
PM-39B	257.058	172.028	4.667	0.735	3.932	-
PM-40	164.277	47.830	4.358	0.480	3.878	-
PM-41	284.278	180.178	4.667	0.640	4.027	-
PM-42	266.557	214.864	4.358	3.000	-	-
PM-43	202.327	57.207	-	2.010	-	-
PAs-01	200.920	153.730	-	0.621	-	-
<b>Média</b>	-	-	<b>4.234</b>	<b>0.621</b>	<b>3.696</b>	<b>6.83E-06</b>

## **ANEXO III**

**Tabela 6-1: Resultados Analíticos de Cis 1,2 Dicloroeteno na Água Subterrânea**

Poço	Unidade	LQ	Resultado Analítico de Cis 1,2 DCE
PM-01	µg/L	5	< 5
PM-02	µg/L	5	38
PM-03	µg/L	5	< 5
PM-04	µg/L	5	< 5
PM-05	µg/L	5	< 5
PM-06	µg/L	5	< 5
PM-07	µg/L	5	368
PM-07B	µg/L	5	72500
PM-08	µg/L	5	-
PM-09	µg/L	5	-
PM-10	µg/L	5	-
PM-11	µg/L	5	-
PM-12	µg/L	5	-
PM-13	µg/L	5	-
PM-14	µg/L	5	-
PM-15	µg/L	5	< 5
PM-16	µg/L	5	< 5
PM-17	µg/L	5	< 5
PM-18	µg/L	5	-
PM-19	µg/L	5	< 5
PM-20	µg/L	5	135
PM-21	µg/L	5	< 5
PM-22	µg/L	5	< 5
PM-23	µg/L	5	< 5
PM-24	µg/L	5	< 5
PM-25	µg/L	5	< 5
PM-26	µg/L	5	11
PM-27	µg/L	5	< 5
PM-28	µg/L	5	693
PM-28B	µg/L	5	< 5
PM-29	µg/L	5	< 5
PM-30	µg/L	5	-
PM-31	µg/L	5	-
PM-32	µg/L	5	-
PM-33	µg/L	5	-
PM-34	µg/L	5	-
PM-35	µg/L	5	-
PM-36	µg/L	5	-
PM-37	µg/L	5	< 5
PM-38	µg/L	5	< 5
PM-39A	µg/L	5	23640
PM-39B	µg/L	5	30600
PM-40	µg/L	5	< 5
PM-41	µg/L	5	< 5
PM-42	µg/L	5	1180
PM-43	µg/L	5	< 5
PAs-01	µg/L	5	35050

LQ - Limite de Quantificação do Laboratório

Obs.: A cor verde assinala os dados que ultrapassam o Limite de Intervenção estabelecido pela CETESB de 50 µg/L

