

# SIMULAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE BAREIRAS HIDRÁULICAS PARA A PLUMA DE POLUENTES DO ANTIGO LIXÃO DE SÃO CARLOS BASEADA NO MÉTODO DOS ELEMENTOS ANALÍTICOS

José Anderson do Nascimento Batista<sup>1</sup>; Giovanni Chaves Penner<sup>1</sup> & Harry Edmar Schulz<sup>1</sup>

**Resumo** – A destinação final de resíduos sólidos urbanos em geral ainda é um dos graves problemas enfrentados pelos gestores públicos municipais no Estado de São Paulo. Diversas pesquisas realizadas na área, anteriormente utilizada como lixão no município de São Carlos, identificaram a presença de substâncias poluentes nas águas subterrâneas do local. Neste artigo, simulamos pelo método dos elementos analíticos três técnicas de controle hidráulico (poço de captura, dreno horizontal e dipolo) para a contenção do avanço de uma possível pluma formada por essas substâncias. Por se tratar de um método computacional não convencional, utilizamos a alternativa de poço de captura para uma comparação com uma outra simulação já empregada à contenção da pluma do lixão encontrando bons resultados. A partir daí, a simulação da alternativa de dreno horizontal produziu a captura aspirada com a menor vazão de bombeamento dentre as alternativas. A aplicação da alternativa do dipolo, apesar de trazer em geral um bom isolamento da pluma, não teve um bom ajuste aos contornos da região.

**Abstract** – Solid waste destination is still a serious problem to many cities in the State of São Paulo. Several search studies in the old garbage destination site in São Carlos city have found pollutant substances in the groundwater. In this work, we simulate, based on Analytic Element Method, three hydraulic barriers alternatives (capture well, horizontal drain and two wells in dipole) in order to evaluate the control the advance of that likely plume of pollutants. Since the applied method is not popular we compared the AEM model results to a finite difference model ever applied for the capture well alternative. Once the match of the models is similar, the following alternatives are evaluated. Among the alternatives, the horizontal drain requires the smallest pumping discharge. The well dipole arrangement though it is a common technique in groundwater remediation does not fit to the local contours.

---

<sup>1</sup> Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SHS-EESC-USP). End: Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, São Carlos-SP, Cep 13566-590, Tel (16) 273-9555, Fax (16) 273-9550, e-mail: [nbatista@sc.usp.br](mailto:nbatista@sc.usp.br).

## **INTRODUÇÃO**

Há décadas é comum a priorização das águas subterrâneas para usos múltiplos em todos os estados do país, tanto pela menor vulnerabilidade à poluição<sup>2</sup> com relação às águas superficiais quanto pelo menor custo operacional. Nesse mesmo sentido, no Estado de São Paulo os centros urbanos situados sobre aquíferos de alta produtividade vêm substituindo a prioridade dada antes aos recursos hídricos superficiais pelas águas subterrâneas. Segundo dados da CETESB em CCPERH [1], 308 municípios paulistas (67%) utilizam, exclusivamente, água subterrânea para o abastecimento público e 23,9% complementam a captação com poços, como é o caso do município de São Carlos, que vem ampliando seu sistema de abastecimento com poços profundos, constituindo-se já 60% do sistema.

No entanto, o controle de poluição das águas subterrâneas só passou a ser considerado relevante por volta do início da década de 90, com a capacitação de técnicos dos órgãos de tecnologia e controle ambiental, possibilitando estudos de diagnóstico e avaliação dos riscos de poluição das águas subterrâneas de São Paulo [2]. Já naquele período se observavam os primeiros sinais da contaminação nos poços usados para abastecimento, provocados pelo crescimento populacional e industrial. Em monitoramento realizado pela CETESB em 1990, foi identificada água contaminada em 30% dos poços do aquífero Bauru. Para o uso sustentável das águas subterrâneas, assim como das águas superficiais, deve-se observar tanto a conservação de seu armazenamento (ou controle da disponibilidade hídrica) quanto dos índices de sua qualidade física, química e bacteriológica (ou controle de cargas poluidoras). Mais recentemente, o Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos [1] concluiu seu relatório, que subsidiou o Plano Estadual de Recursos Hídricos 2000-2003, indicando riscos de rebaixamento acentuado do lençol subterrâneo e risco crítico de poluição das águas subterrâneas nas regiões de Araraquara e de Bauru (próximas ao município de São Carlos). Uma das principais fontes de poluição para as águas subterrâneas (e não menos para as águas superficiais) é a disposição inadequada de resíduos sólidos. Este problema é pelo menos tão grave quanto os problemas mais aparentes, como a coleta de resíduos, a ausência de tratamento de esgotos domésticos e a situação grave da erosão atual [1].

---

<sup>2</sup> Segundo BRANCO (1991), contaminação refere-se à simples transmissão, pela água, de elementos, compostos ou microorganismos que possam prejudicar a saúde do homem ou de animais que a bebem. Já a poluição se caracteriza muito mais por seus efeitos ecológicos, que produzem transformações do meio ambiente, de forma a este tornar-se impróprio ao desenvolvimento normal das populações aquáticas. BRANCO, S. M. (1991). A água e o homem. In: PORTO, R. La L. (org.). Hidrologia ambiental. Editora da Universidade de São Paulo. Cap. 1, p.14-15.

A disposição dos resíduos até recentemente foi realizada sem o balizamento de normas técnicas. MATSUZAKI [3] afirma que, no Brasil, a locação, manejo e controle dos aterros sanitários só foram normatizados a partir de 1979. Ainda hoje, segundo apresentado pela CCPERH [1], na bacia do Tietê-Jacaré 40% dos aterros estão instalados de forma inadequada, outros 40% estão em situação controlada e apenas 20% estão em instalações adequadas. No município de São Carlos, um dos integrantes da bacia do Tietê-Jacaré, a área até recentemente (1997) destinada à deposição dos resíduos sólidos recebia lixo doméstico, industrial e hospitalar. Apesar de desativada, o resíduo continua no local, sem proteção. O local está situado sobre a formação Botucatu (área de recarga do aquífero Guarani), na bacia do Ribeirão do Feijão, principal fonte superficial de abastecimento de água do município. Por se tratar de uma área ocupada por atividades rurais e estar próxima a um centro urbano, MATSUZAKI [3] realizou um estudo da possível trajetória que os contaminantes estariam descrevendo pela zona saturada do aquífero, utilizando um modelo computacional de escoamento advectivo.

Ao serem depositados no solo, os resíduos liberam substâncias que percolam através da zona não-saturada até atingir o aquífero, onde o meio é saturado e a presente discussão está situada. Os trabalhos anteriores realizados por pesquisadores da Escola de Engenharia de São Carlos na área do depósito forneceram dados e informações relevantes sobre o avanço da pluma de contaminantes gerada pelo depósito de lixo. Esses trabalhos buscaram tanto a caracterização do meio físico [4] [5] como das alterações provocadas pelo lixo [6] [5], além da simulação computacional da trajetória da pluma no aquífero, com dados da geologia, da hidrografia e da pluviometria local [3]. Nesse último trabalho, foi demonstrado o deslocamento da frente da pluma em direção a um reservatório de água do córrego São José e alguns poços das proximidades.

Nesse sentido, torna-se conveniente abrir discussão sobre alternativas para o controle do avanço da pluma. Há diversas maneiras de intervenção do avanço de uma pluma de poluentes, algumas das quais são apresentadas adiante. Aqui são consideradas alternativas de controle hidráulico para o avanço da pluma, levando em conta as atuais condições dos resíduos sólidos no local e o posicionamento da pluma simulado por MATSUZAKI [3]. Inicialmente, contudo, uma revisão dos conceitos teóricos básicos é apresentada, visando permitir o trânsito mais fácil pelas ferramentas utilizadas na presente avaliação deste problema prático.

## **MÉTODOS DE MODELAGEM**

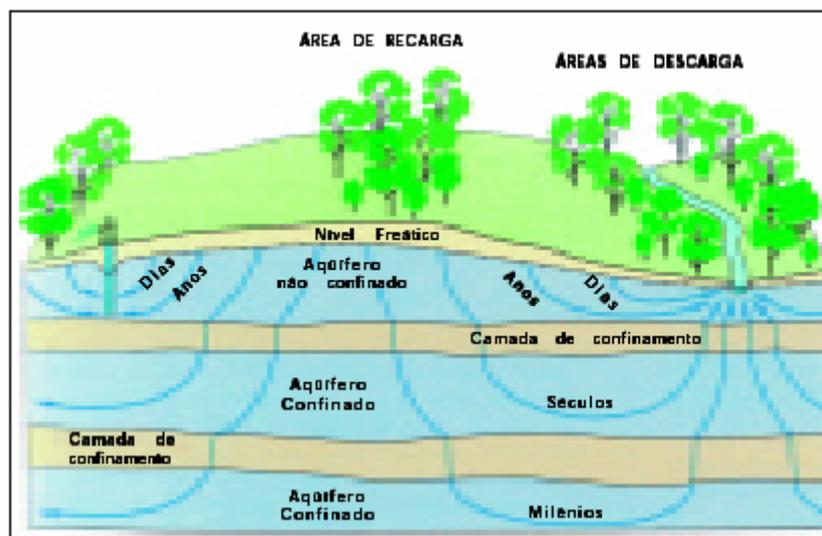
A aplicação das equações dominantes em hidrogeologia exige, em geral, mais dados sobre propriedades físicas do aquífero e suas condições de contorno do que geralmente se dispõe, introduzindo-se, portanto, algumas simplificações. Algumas dessas simplificações estão

relacionadas à escala do problema abordado. Por exemplo, em estudos regionais de aquíferos confinados é comumente a hipótese de que a seção transversal ao escoamento seja constante e a distribuição de pressão hidrostática. ou seja, as linhas equipotenciais na seção independem da posição  $z$ . Isso leva a equação da continuidade em aquíferos confinados a considerar variações em apenas duas dimensões. Em aquíferos livres (freáticos) a espessura não pode ser considerada constante porque ela depende da carga hidráulica. No entanto, observando-se que geralmente o escoamento subterrâneo de superfície livre tem inclinações muito suaves. Dupuit em 1863 na França e Forchheimer em 1886 na Alemanha verificaram que (1) a perda de carga na direção do escoamento é igual à queda de altura d'água; (2) a direção do escoamento é horizontal; e (3) as linhas equipotenciais na seção independem da posição  $z$  (vertical):  $h = p/\gamma + z$ , sendo  $p$  a distribuição vertical de pressões hidrostáticas. Dessa forma os escoamentos de superfície livre também podem ser expressos em apenas duas dimensões horizontais. Tais hipóteses são conhecidas simplificações de Dupuit-Forchheimer. No entanto a utilização dessas simplificações deve observar alguns aspectos relacionados à escala do problema escoamento.

### Escala de Modelagem

Segundo HAITJEMA [7], as componentes verticais de descarga na verdade exercem um papel importante no escoamento mesmo em escala regional (Figura 1). Três condições contradizem as simplificações de Dupuit-Forchheimer do ponto de vista prático em recursos hídricos:

- 1) Quando a profundidade e a extensão lateral do aquífero são da mesma ordem de grandeza;
- 2) Quando a superfície freática do aquífero é controlada pela topografia;
- 3) Quando a condutividade hidráulica tem valores relativamente baixos.



**Figura 1** – Linhas de fluxo da recarga à descarga em diversas escalas de tempo (Fonte: USGS).

O escoamento nas áreas de recarga dos aquíferos, pela sua própria disposição (vertical), imprime componentes verticais de descarga. HAITJEMA [8], comparando resultados de STRACK [9] com casos tridimensionais de escoamento em áreas de recarga local (como pivôs de irrigação), verifica que o padrão de escoamento determinado pelas simplificações de Dupuit-Forchheimer são aceitáveis para o caso de áreas cuja extensão seja seis ou mais vezes a espessura do aquífero. Uma outra questão pode ser ainda levantada sobre a dominialidade do problema. Quando da modelagem matemática do escoamento, o método adotado implicará em diferentes abordagens sobre o domínio adotado.

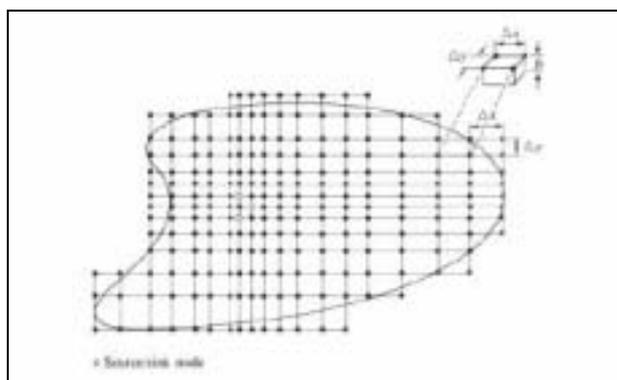
### **Elementos Analíticos (AEM): Domínios Infinitos**

Comumente associa-se de imediato o termo "modelagem" com o uso de malhas computacionais. O uso de malhas na modelagem de escoamentos, na verdade, trata-se de um processo exigido pelos métodos "numéricos" de manipulação de equações diferenciais (processo de discretização). O espaço das variáveis de espaço e/ou tempo onde a aplicação de um equacionamento matemático é válido é chamado domínio. O espaço contínuo, onde as variações das grandezas pesquisadas são suaves e contínuas, denomina-se domínio contínuo. Sendo assim, essas variações podem ser acompanhadas em qualquer direção e em qualquer ponto, mesmo que localizado a distâncias infinitas.

Uma vez que o escoamento de águas subterrâneas é linear, pode ser tratado simplesmente por meio do princípio da sobreposição de efeitos. O método dos elementos analíticos é fundamentalmente desenvolvido com base na sobreposição de efeitos e assim oferece melhor interação na construção de modelos. Dessa forma, uma vez que não há restrições de domínio, é possível, por exemplo, avaliar a interferência de cada efeito sobre o comportamento do sistema na escala em que se deseja modelar e até mesmo redefinir qual a escala apropriada.

### **Diferenças Finitas (FDM): Domínios Finitos**

Desde a década de setenta, em contrapartida à popularização dos micro-computadores, a elegância das fórmulas analíticas vem sendo trocada pela versatilidade dos métodos de solução numérica. Nos métodos de aproximação numérica, a solução é construída a partir de intervalos freqüentemente chamados de células ou elementos e são relacionados segundo equacionamento de variáveis discretas. A esse processo dá-se o nome de discretização. Dessa forma as variáveis independentes ( $x, y, z, t$ ) são referidas em cada células por índices ( $i, j, k, l$ ) para os quais a variável dependente (por exemplo  $h_{i,j,k,l}$ ) é determinada (Figura 2).



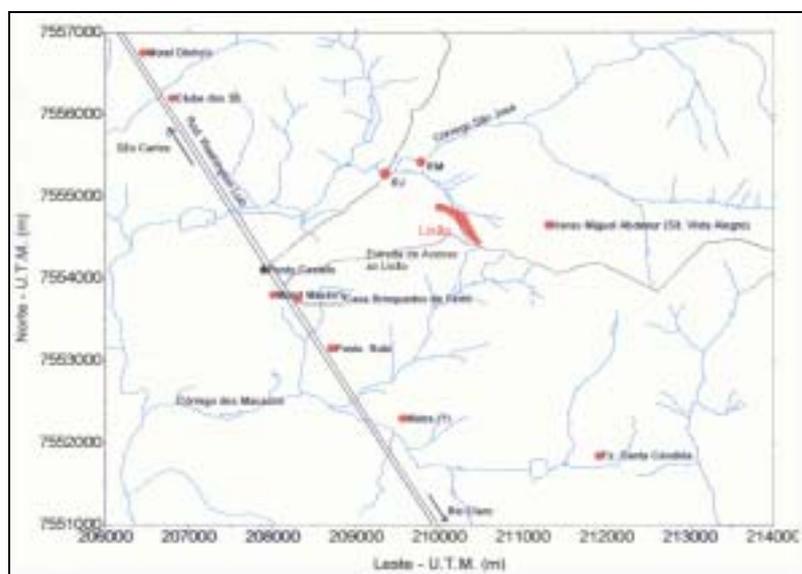
**Figura 2** – Malha para construção de modelos em diferenças finitas (discretização).

Um dos métodos mais empregados no desenvolvimento de modelos é o de Diferenças Finitas. Esse método é baseado em aproximações de funções pela série de Taylor, fornecendo expressões que se aproximam da equação diferencial considerada, redefinindo-se as derivadas dessa equação. Talvez a principal desvantagem dos métodos discretos (ou numéricos) como o de Diferenças Finitas esteja no fato de os contornos terem de ser necessariamente fechados, sendo em geral utilizados os contornos de bacias hidrográficas.

## ÁREA DE ESTUDO

### Localização

O depósito de lixo do município de São Carlos localiza-se numa área de alta suscetibilidade a erosão, próxima ao município de Analândia, nas imediações do Km 221 da Rodovia SP 310 com coordenadas centrais UTM são 210,200 Km W e 7554,78 Km S (Figura 3).

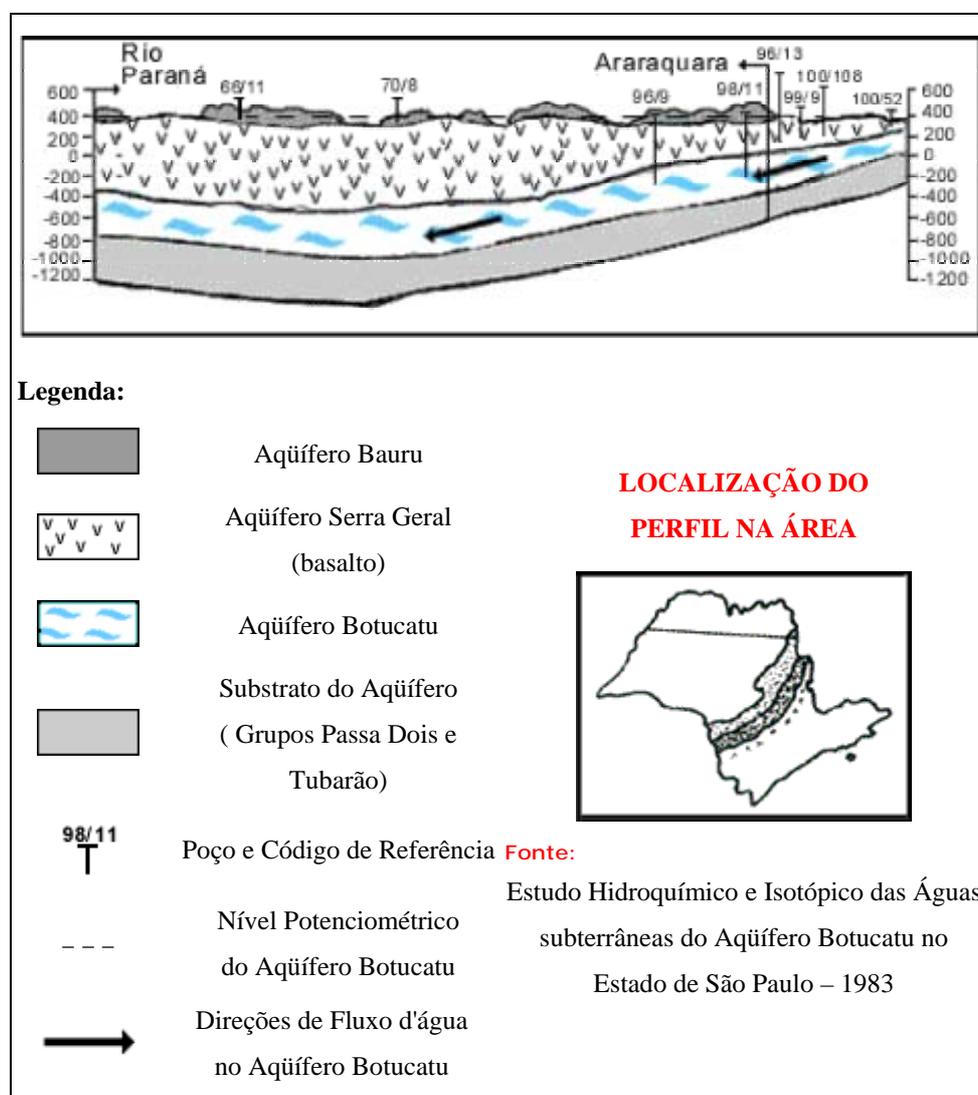


**Figura 3** – Localização do antigo lixão de São Carlos (Fonte: MATSUZAKI [3]).

A área utilizada para a coleta de dados e para análise de resultados está compreendida entre as coordenadas UTM 208 e 210 Km W e 7554 e 7558 Km S.

### Caracterização hidrogeológica

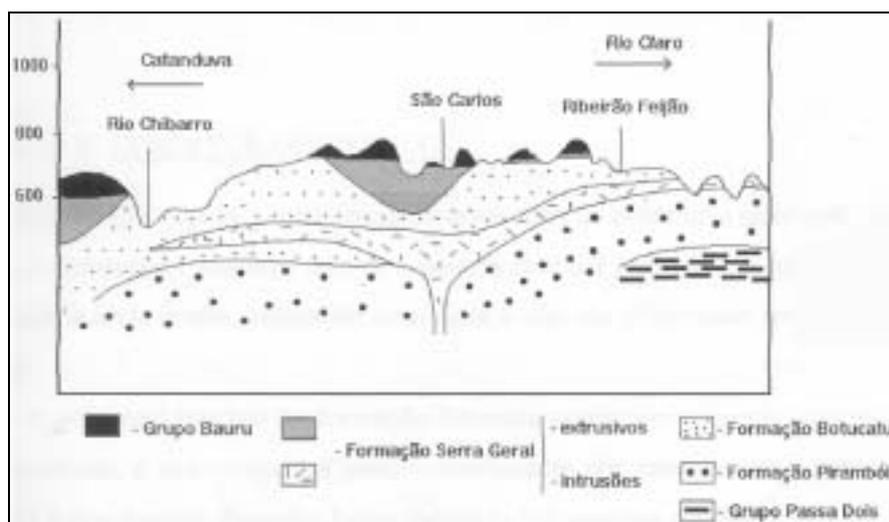
O sistema aquífero Guarani é um dos mais importantes mananciais de águas subterrâneas de São Paulo. Além de sua extensão e sua potencialidade, o aquífero oferece uma ótima proteção natural as suas águas devido à cobertura de 90% de sua área pela formação Serra Geral, de oeste para leste. No leste torna-se disponível na forma livre (Figura 4). O último relatório da situação dos recursos hídricos no Estado de São Paulo [1] classifica o eixo Botucatu - São Carlos - Ribeirão Preto como de Alta Vulnerabilidade. Numa escala de seis níveis este eixo ocupa o segundo nível mais crítico, considerando os critérios baseados em relações entre a caracterização geológica (litológica) do aquífero e a carga poluidora, estabelecidos em por FOSTER & HIRATA [10].



**Figura 4** - Perfil Botucatu SP (Fonte: DAEE Araraquara)

A área de estudo encontra-se sobre três sistemas aquíferos: o aquífero Serra Geral, o aquífero Bauru e o aquífero Guarani. Segundo FREITAS [4], o aquífero Serra Geral é composto por rochas magmáticas com espessuras elevadas a oeste e reduzidas a leste, onde encontra-se aflorante. Essa formação possui porosidade de fratura e é considerada pouco permeável, apresentando transmissividades da ordem de  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s, funcionando apenas como uma camada de troca de escoamento entre aquíferos adjacentes FREITAS [4]. O aquífero Bauru é livre (aflorante) em toda sua extensão ocupando grande parte do oeste do Estado. Segundo FREITAS [4] as transmissividades variam entre  $3 \times 10^{-6}$  e  $2 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. Para o aquífero Guarani, FREITAS [4] determinou, na região de São Carlos, valores de transmissividade variando entre  $2,4 \times 10^{-6}$  e  $4,5 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

Em trabalho de campo realizado no local do depósito de lixo de São Carlos, FREITAS [4] conclui, de levantamentos geológicos, geofísicos e ensaios de granulometria, pela predominância de “solos coluvionares da formação Botucatu” e “solos residuais da formação Botucatu” com possíveis ocorrências de intrusões de diabásio encaixadas em falhas. As medidas de resistividade elétrica indicaram ainda variações nas propriedades da água no subsolo, que indicam a presença de poluentes provenientes do lixo, poluentes estes que estariam se deslocando com relativa facilidade através da zona saturada. A autora ressalta ainda evidências de heterogeneidades (transmissividade) e anisotropia (condutividade hidráulica) no aquífero. Vale citar que é diretamente desse aquífero que são abastecidos os poços públicos do município de São Carlos. Nas regiões de coleta o aquífero já se encontra confinado, sendo que sobre o afloramento desse aquífero é que está disposto o lixo do município (Figura 5).



**Figura 5** - Perfil Ribeirão Feijão, São Carlos (Fonte: FREITAS [4]) –  
Ver direção para Rio Claro na Figura 1

GADOTTI [6] estudou a contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao lixão da cidade de São Carlos-SP. O autor concluiu que existe um escoamento na direção SW que é compatível aos resultados das simulações de escoamento fornecidas pelo modelo numérico. Ainda segundo o autor, os principais indicadores de alterações na qualidade da água foram os cloretos e a condutividade. Foi constatado que as concentrações de bário, nitrato e cloreto ultrapassaram o limite de potabilidade estabelecido pela portaria n36 do Ministério da Saúde. Inferiu-se, adicionalmente, que a formação geológica apresentaria alta capacidade de atenuação de contaminantes.

Pelo mapa do escoamento subterrâneo apresentado pelo autor é perceptível a presença de duas direções principais de escoamento, uma obedecendo à direção da drenagem superficial, NW, e outra em direção WSW, seguindo para os poços que suprem atualmente as atividades comerciais do Posto Castelo e do Motel Maxim's.

O processo construtivo dos poços pode ter provocado a determinação de concentrações baixas de compostos, sendo que algumas substâncias não foram detectadas (por exemplo, metais pesados). Como os poços são parcialmente penetrantes, uma eventual pluma de contaminantes com densidade superior à densidade da água poderia ser apenas parcialmente detectada. Vale acrescentar que os efeitos da sazonalidade podem influir sobremaneira durante o monitoramento. Embora não evidenciando qualquer carência de detalhamento, pode-se mencionar que os poços não são multi-níveis (eventuais dificuldades práticas no contexto da pesquisa conduzida), o que, segundo a literatura, pode implicar em maior diluição das amostras quando coletadas. Quanto ao procedimento de amostragem, usualmente mede-se o nível da água no poço antes do esgotamento, para em seguida realizar esse esgotamento. Daí aguarda-se a recuperação, que pode se completar em escalas de tempo de minutos, horas ou mesmo dias, dependendo das características hidráulicas do aquífero. Apenas após essa recuperação é que se deve realizar a coleta da amostra. No caso em pauta, não há certeza de que este procedimento tenha sido seguido. Finalmente, observou-se que todos os poços foram locados na região que circunda a ravina onde foi depositado o lixo e em direção ao córrego de drenagem superficial. Pode-se argumentar que idealmente seria adequada a existência adicional de poços na lateral oeste, a uma distância estimada de até 200 metros.

### **Contaminantes de interesse neste trabalho**

Nos estudos realizados por MENEZES [11] e FREITAS [4] foi determinada a capacidade de troca catiônica e feita a análise granulométrica conjunta. Para solos com baixa capacidade de troca catiônica, como é o caso solo local (2,71 - 7,3 meq/100g), a retenção (adsorção) de íons positivos aponta para valores pequenos, que podem ser esperados devido ao baixo percentual de argila nesse solo. Outro fator importante na adsorção de substâncias em sub-superfície é a fração de carbono

orgânico, que as características do solo local (residual de arenito) sugerem ser frações mínimas. Essas características apontam para a conclusão de baixa capacidade de atenuação de contaminantes nessa formação geológica, o que, entretanto, se contrapõe ao constatado por GADOTTI [6]. ÁLVARES [5] contribuiu, por meio de estudos geológicos, geofísicos, topográficos e químicos, para o conhecimento do meio físico da região do lixão de São Carlos-SP. O autor acredita que haja transporte superficial advectivo de contaminantes muito superior ao de sub-superfície. Foi identificada a presença de superfícies resistivas que supostamente protegem o aquífero profundo. Concordando com GADOTTI [6] foi confirmada a contaminação do aquífero freático local. Contudo, ÁLVARES [5] afirma que o escoamento subterrâneo local segue a topografia do terreno, portanto, NW.

ÁLVARES [5] considerou que o escoamento superficial é composto tanto pela água que escoar na superfície do terreno como pela que escoar no aquífero freático (devido à proximidade entre os dois). Entretanto, admitindo a discriminação entre o aporte de contaminantes pela água superficial e pela subterrânea, este procedimento fica prejudicado. Finalmente, apenas métodos geofísicos foram aplicados. Embora seu uso seja sempre válido, os procedimentos usuais sugerem que as constatações abstraídas das resistividades encontradas (no caso de métodos elétricos) sejam confirmadas pelo uso de métodos invasivos como, por exemplo, sondagens.

Neste trabalho são considerados como contaminantes de interesse aqueles que se movimentam pelo transporte advectivo e que não sofrem degradação e/ou retardamento (denominados contaminantes conservativos). Vale mencionar que não são considerados os efeitos da dispersão. Como informação básica, menciona-se que íons cloro e bromo são amplamente utilizados como traçadores em águas subterrâneas para determinar os caminhos do escoamento (hidrodinâmica do meio), velocidade, tempo de residência e propriedades do meio poroso como condutividade hidráulica, dispersividade e porosidade efetiva [12]. Particularmente, GADOTTI [6] mencionou a existência de concentrações de cloretos superiores ao padrão de potabilidade estabelecido pelo Ministério da Saúde e recomenda-o como bom indicativo de alteração do meio. Portanto, o transporte advectivo de partículas de cloreto é considerado na simulação aqui efetuada.

## **SIMULAÇÃO DA CONTENÇÃO DA PLUMA**

### **Breve apresentação de técnicas de contenção**

Avaliar se um aquífero contaminado pode ser recuperado e qual o procedimento mais adequado para esta recuperação é uma questão que depende das propriedades hidrogeológicas e geoquímicas do aquífero e das propriedades físicas e químicas do contaminante. Opções de

recuperação que podem ser consideradas incluem: avaliação da atenuação natural gerada pelo aquífero, bombeamento da água subterrânea, contenção física e hidráulica, escavação e remoção de parte do aquífero contaminado e tratamento biológico e químico no local. Neste trabalho são abordados os métodos de drenagem em sub-superfície, bombeamento e bombeamento e injeção (arranjo dipolo).

De forma simples, esta técnica consiste em um poço de captação posicionado da direção do avanço da pluma de contaminantes, o qual pode ser usado para estabilizar o avanço da pluma. O poço de estabilização bombeia água contaminada, que necessita de tratamento antes da sua disposição. Isto previne o contato da pluma de contaminação com partes do aquífero não contaminado. Tendo isolado o avanço da pluma, trabalhos no controle da fonte e outras medidas de remediação podem ser executadas em ritmo usual [13]. Uma variação para o poço de captura é o uso de dreno horizontal. Os drenos são amplamente utilizados na engenharia de hidrogeologia, geralmente para rebaixamento da superfície freática. Atualmente este método vem sendo adaptado para a contenção do avanço de plumas de contaminantes.

Segundo SATKIN & BEDIANT [14] o bombeamento da água subterrânea é, provavelmente, o método mais comum empregado em casos de recuperação. A injeção da água tratada elimina os altos custos de disposição dos efluentes e, ao mesmo tempo, acelera a remoção dos contaminantes pelo aumento no gradiente hidráulico. Adicionalmente, permite o controle hidráulico da contenção da pluma de contaminantes em uma área específica. O dipolo, como em qualquer esquema de extração e injeção, aumenta o ritmo de lavagem comparado com um poço de bombeamento simples, por causa da elevação no gradiente hidráulico em direção ao poço de extração. Entretanto, o dipolo está associado a grandes volumes de água contaminada com baixas concentrações, requerendo tratamento.

### **Resultados das simulações**

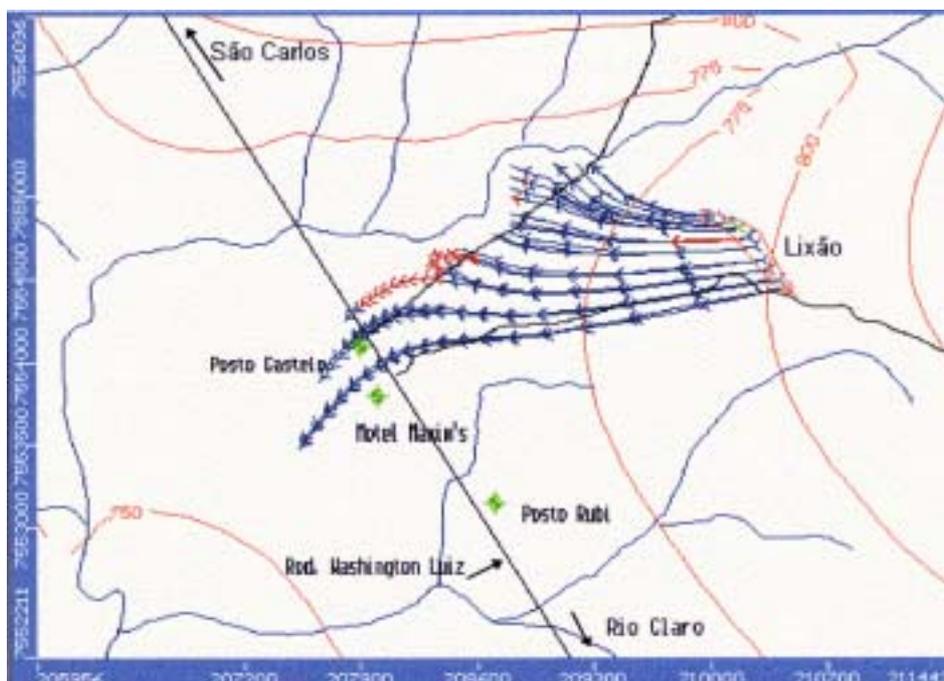
Para a modelagem do avanço da pluma contaminante na região do lixão utilizou-se a metodologia de elementos analíticos, aplicando-se o programa PYTHON TIMSL 0.3 [15], considerando-se um domínio aberto. A modelagem foi comparada com os resultados de MATSUZAKI [3], obtidos pelo método de diferenças finitas. Além das diferenças entre as metodologias (apresentadas no item 3) vale acrescentar que os dados de recarga do aquífero foram atualizados a partir do banco do DAEE [16]. Neste artigo foram utilizados dados de regionalização do Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo seguindo os demais parâmetros hidrogeológicos adotados por MATSUZAKI [3].

Na Tabela 1, apresenta-se os resultados obtidos por ambos os modelos, em comparação com dados obtidos em poços de observação.

**Tabela 1** – Comparação dos resultados obtidos no FDM e AEM

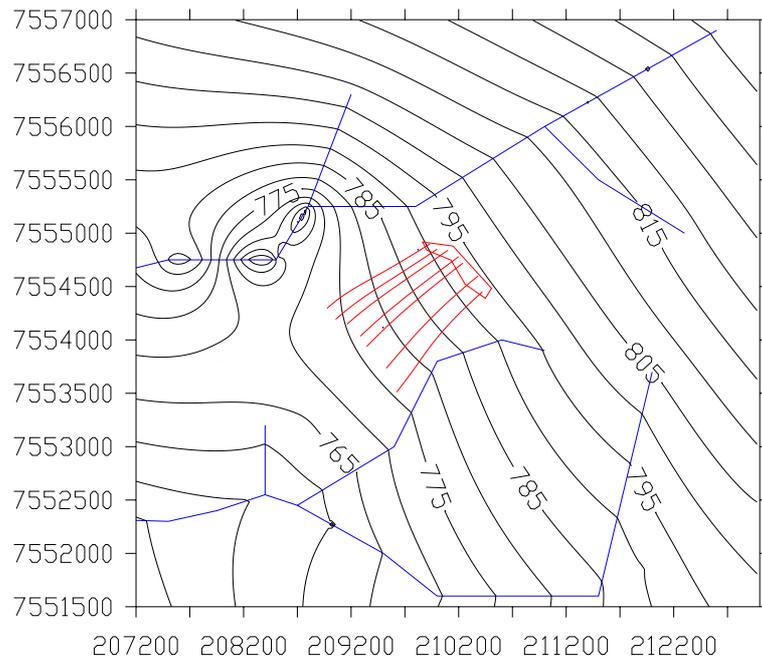
UTM E (Km)	UTM S (Km)	Nível estático observado (m)	Nível estático FDM (m)	Nível estático AEM (m)
208,0	7553,8	767,0	768,35	767,0
208,7	7553,15	760,0	-	757,28
209,55	7552,3	757,5	765,87	769,6
211,9	7551,85	785,0	784,82	790,4

Diversos fatores não considerados nos cálculos levam às diferenças em relação aos valores observados. Um dos principais fatores é a irregularidade da superfície de base do aquífero na região, conforme dados apresentados por MATSUZAKI [3], que contribui para a heterogeneidade da transmissividade. Adicionalmente, influi na distribuição irregular das cargas hidráulicas. As distâncias notadas entre os contornos da região (hidrografia, poços e área de recarga) possuem uma relação que caracteriza bem uma escala regional, uma vez que a espessura média do escoamento é de apenas cerca de 60m. Entretanto, a base de dados levantada da hidrogeologia não permite ainda um mapeamento desses parâmetros na escala do modelo. Apesar das diferenças entre os valores observados e calculados, verifica-se que a trajetória obtida para o deslocamento da pluma originada pelo lixão segue as tendências principais simuladas por MATSUZAKI [3] e levantadas em GADOTTI [6], conforme ilustrado nas Figuras 6 e 7, que trazem os resultados do modelo de elementos analíticos e os de diferenças finitas, respectivamente. A Figura 8 ilustra a construção do modelo AEM além da área de interesse.

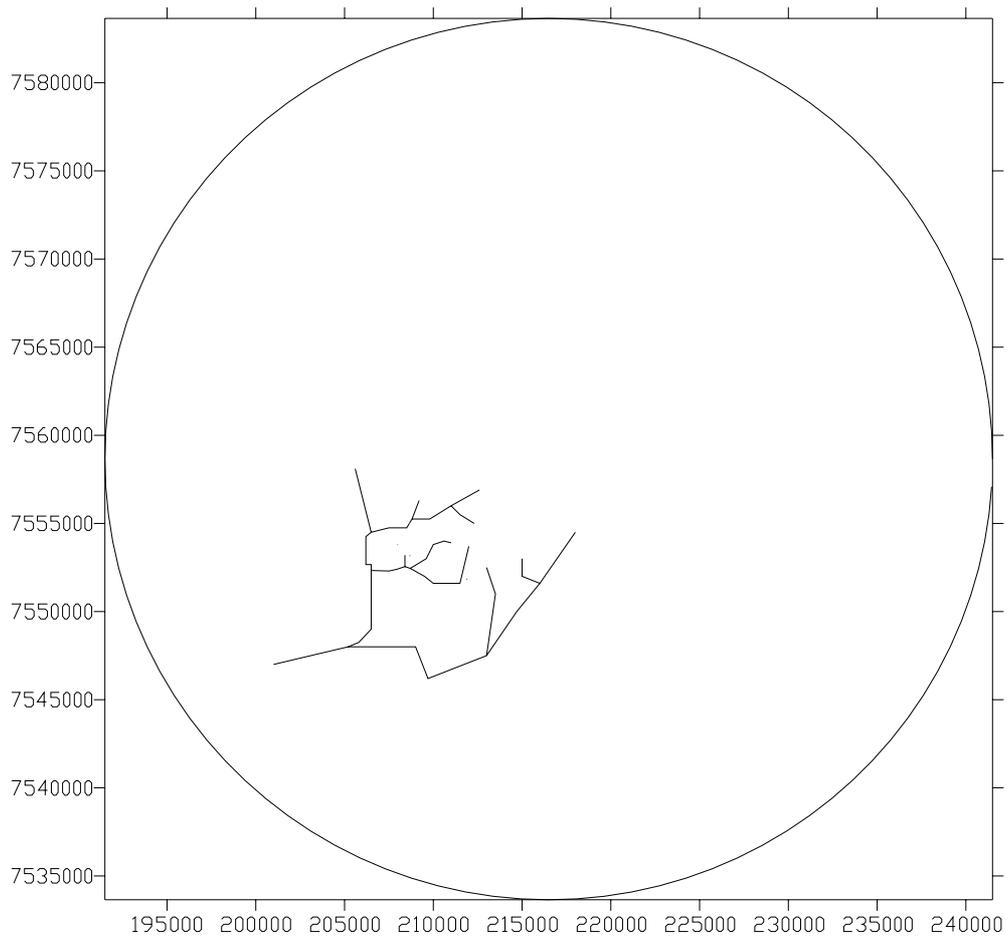


(Fonte: MATSUZAKI, 1998).

**Figura 6** – Trajetórias obtidas para a pluma pelo FDM. Gráfico produzido no Visual Modflow 95 ®

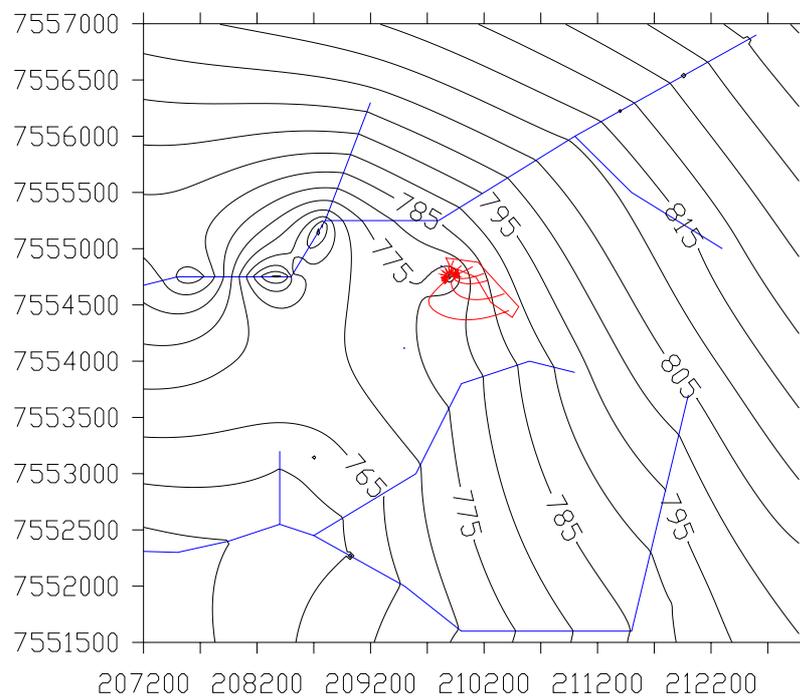


**Figura 7** – Trajetórias obtidas para a pluma pelo AEM. Gráfico produzido em Surfer 8.0®.



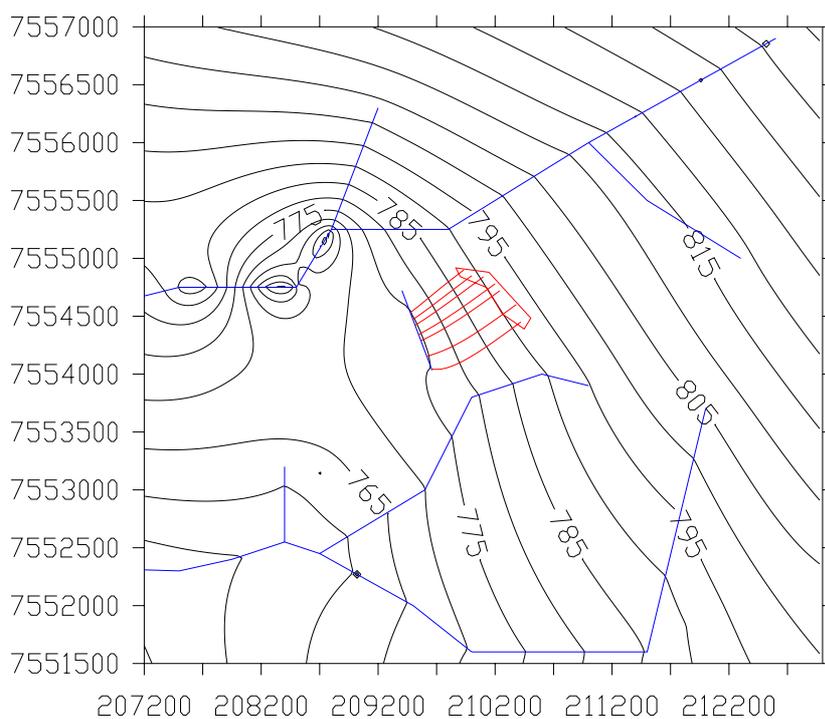
**Figura 8** – Esquema AEM da região do lixão –Gráfico produzido em Surfer 8.0®.

Como mencionado anteriormente, o método de controle de poluição mais comum para águas subterrâneas é o bombeamento da pluma por poços de captura para tratamento. Locando-se um poço de bombeamento à frente do avanço da pluma, gera-se uma área de influência tal que abrange todas as linhas de fluxo onde está situada a pluma. MATSUZAKI [3] simulou o bombeamento de um poço para um determinado posicionamento à frente do avanço da pluma, encontrando um bombeamento suficiente com vazão de 250 m<sup>3</sup>/h. Verifica-se muito bem essa ordem de grandeza de bombeamento (no caso, 260 m<sup>3</sup>/h) adicionando-se, no modelo AEM, um poço com condições idênticas às consideradas por MATSUZAKI [3]. Na Figura 9, representa-se a trajetória descrita pelos poluentes em direção ao poço simulado.



**Figura 9** – Bombeamento da pluma por um poço de captura. Gráfico gerado em Surfer® 8.0.

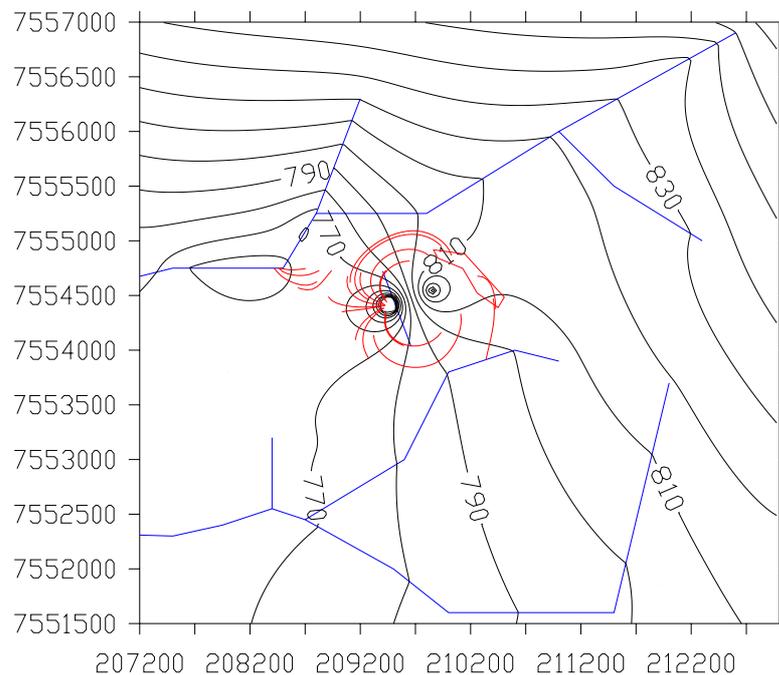
Seguindo as alternativas de controle hidráulico mencionadas, foi disposto ainda um dreno horizontal para a remoção da pluma. Este dreno deve ter uma orientação transversal à direção preferencial do deslocamento dos poluentes liberados pelo lixão. O posicionamento do dreno em um ponto do eixo longitudinal do escoamento foi arbitrado de forma a melhor coincidir com a frente de avanço da pluma. Hidraulicamente, os drenos produzem, para uma mesma vazão, uma área de influência maior que a dos poços, provocando, ainda, um menor rebaixamento da superfície piezométrica. No caso da região do lixão, a pluma pode ser contida com uma vazão de 122,0 m<sup>3</sup>/h. Menor que a metade daquela exigida pelo poço de captura. Na Figura 10, ilustra-se a extração da pluma por um dreno com as características mencionadas.



**Figura 10** – Drenagem da pluma poluente. Gráfico gerado em Surfer® 8.0

Considerando-se a alternativa de arranjo dipolo, a principal vantagem da adaptação da injeção ao poço de bombeamento (ver item 5) é que as descargas são majoradas pela elevação dos gradientes hidráulicos. Isso acelera o processo de “lavagem” do solo quando a água poluída recebe algum tratamento (geralmente *in situ*) sendo então recirculada no mesmo local. Um caso interessante para a aplicação do arranjo dipolo é a utilização da área de circulação de forma análoga a um tanque de tratamento. Ou seja, para elementos degradáveis biologicamente, seria necessário apenas a introdução de oxigênio dissolvido na água recirculada. Adaptou-se um arranjo dipolo à pluma de poluentes da região do lixão posicionando-os simetricamente em relação ao centro geométrico da pluma, uma vez que o dipolo produz uma área de curto circuito onde os poluentes permanecem circulando. Sua orientação em relação ao deslocamento da pluma, diferentemente do dreno, é feita longitudinalmente. Entretanto, conforme já mencionado, o arranjo dipolo exige vazões muito elevadas (injeção e extração) já que todo o campo de descarga em volta da pluma é desviado em torno do curto circuito. Para o arranjo disposto na área de estudo, foi encontrada uma vazão mínima necessária de  $1.446 \text{ m}^3/\text{h}$  com um espaçamento de 400 m. Adicionalmente, tanto o rebaixamento quanto a elevação produzidos foram excessivamente elevados. Na borda do poço de injeção foi calculada uma cota piezométrica de 887 m, enquanto que no poço de extração o rebaixamento calculado atinge 700 m, que coincide com a cota média da base do aquífero no local (Figura 11). Vale mencionar, ainda, que na região considerada no estudo, a circulação gerada não se

enquadrou perfeitamente aos contornos (hidrografia) do local, notando-se a exclusão de pontos extremos da pluma.



**Figura 11** – Contenção da pluma na área de circulação do dipolo. Gráfico gerado em Surfer® 8.

## CONCLUSÕES

Um aspecto importante a ser mencionado, mesmo que elementar, é a alteração do campo de descarga natural local por qualquer uma das alternativas de controle hidráulico estudadas. O conhecimento detalhado destas alterações propicia, na prática, a captura das trajetórias da pluma, uma vez que esta esteja corretamente identificada.

Para cada situação aplicada verifica-se, como esperado, uma diferenciação para os valores de vazão necessários ao êxito do controle desejado. A alternativa de dreno horizontal conseguiu a captura aspirada com a menor vazão de bombeamento. Vale acrescentar, mais uma vez visando a aplicação prática, que diferentes vazões empregadas aos sistemas acarretam diferentes custos operacionais.

Os níveis piezométricos da região aumentam com a aplicação do dipolo. A superfície freática eleva-se pelo efeito da obstrução do escoamento na área onde circula a pluma, que é então forçado a desviar "pelas laterais". Essa elevação ocasiona, por exemplo, um aumento no escoamento de base nos rios.

Finalmente, observa-se que a aplicação do Método dos Elementos Analíticos a problemas de poluição como o abordado permite, de forma objetiva e elegante, estudar cada problema específico. De forma expedita, foi possível observar os comportamentos gerais que podem advir do uso de três alternativas diferentes para resolver o problema do avanço da pluma poluente gerada no lixão da cidade de São Carlos. Os resultados apontam para a adequação deste método a casos semelhantes.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à FAPESP, que apóia este trabalho com os processos 00/09933-0 e 01/10302-7, bem como ao CNPq, que apóia este trabalho com os processos 520540/00-0 e 141354/2001-1. Esses recursos permitem a continuidade dos trabalhos.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] COMITÊ COORDENADOR DO PERH, (1999). Relatório de situação dos recursos hídricos do Estado de São Paulo, 128 p.
- [2] DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. (1990) .Plano estadual de recursos hídricos. São Paulo: DAEE, 137 p.
- [3] MATSUZAKI, S. S. (1998). Aplicação de modelo computacional de escoamento de água subterrânea no lixão de São Carlos. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 113p.
- [4] FREITAS, A. L. S. de. (1996). Caracterização do aquífero Botucatu na região do lixão de São Carlos. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 113p.
- [5] ÁLVARES, C. M. B. (2000). Contribuição ao conhecimento do meio físico da região do lixão de São Carlos-SP, através de estudos geológicos, geofísicos, topográficos e químicos. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 158p.
- [6] GADOTTI, R. F. (1997). Avaliação da contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao lixão da cidade de São Carlos. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 150p.
- [7] HAITJEMA, H. M., (1995). Analytic element modeling of groundwater flow. Academic Press. San Diego. 394 p.
- [8] HAITJEMA, H. M., (1987). Comparing a three-dimensional and a Dupuit-Forchheimer solution for a circular recharge area in a confined aquifer. Journal of Hydrology. n.91 pp.83-101.

- [9] STRACK, O. D. L., (1984). Three-dimensional streamlines in Dupuit-Forchheimer models. *Water Resources Research*. n. 20 pp. 812-822.
- [10] FOSTER, S. & HIRATA, R. (1993). Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes. Instituto Geológico (Boletim 10), São Paulo.
- [11] MENEZES, D. B. (1995). Diagnóstico dos impactos do lixão de São Carlos – SP, no meio físico. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 101p.
- [12] UNITED ESTATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994). Office of research and development. Methods for monitoring pump-and-treat performance. EPA/600/R-94/123.
- [13] FETTER, C. W. (1993). Contaminant hydrogeology. First Edition. Book Press, Inc. New York. 458p.
- [14] SATKIN, R. L.; BEDIANT, P. B. (1988). Effectiveness of various aquifer restoration schemes under variable hydrogeologic conditions. *Ground Water*. v. 26, No. 4, p. 488 – 498.
- [15] BAKKER, M., KELSON, V., ZAADNOORDJIK, W. J. (2002). An object oriented analytic element program written in Python. <http://www.engr.uga.edu/~mbakker/timsingle.html>
- [16] DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. (1999). Regionalização hidrológica do estado de São Paulo. São Paulo: DAEE,. 1 CD.