

## O IMPACTO NA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA GERADO PELA DEPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. ESTUDO DE CASO EM TATUÍ (SP, BRASIL)

Manoel G. dos Santos Filho & Ricardo Hirata - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Rua do Lago 562, São Paulo (SP), Brasil. CEP 05508-900. e-mail: [rhirata@usp.br](mailto:rhirata@usp.br).

**Abstract.** The aim of this study was to assess the impact caused by improper disposal of urban solid waste on the groundwater quality at the Vazadouro Municipal in Tatuí, São Paulo State (Brasil). The plant occupies 14,87 ha, and since 1991 has received all the waste from this town. Two geophysical methods - electrorresistivity and electromagnetic - provided informations whose was confirmed by 12 monitoring wells and groundwater quimical analysis. The vertical electrical survey demonstrated the existence of a resistive layer spread through all the area and related to an aquitard, whose surfaces represents the base level and the discharge level of groundwater. Electromagnetical method, performed with the EM31 at maximum depths of 6 meters, allowed to detect electrical conductivity anomalies related to the buried waste, and also contributed for the identification of contaminant plumes that flow from the contamination sources to the discharge zones. The groundwater potenciometric surface is conditioned by the rainfall and the topographic surface of the landfill, which acts as a large area of infiltration. This infiltration results in an elevation of the water table below the disposed waste area, and also causes contamination of groundwater through percolation of the leachate. The main indicators of groundwater contamination are electrical conductivity, chloride and sodium.

**Resumo.** O objetivo principal deste trabalho foi o de caracterizar o impacto na qualidade das águas subterrâneas gerado pela deposição inadequada de resíduos sólidos urbanos no Vazadouro Municipal de Tatuí (SP). O empreendimento ocupa uma área de 14,87 ha e iniciou o seu funcionamento em 1991, recebendo todo o lixo proveniente da cidade de Tatuí. O uso dos métodos geofísicos eletrorresistivo e eletromagnético forneceram informações confirmadas por 12 poços de monitoramento perfurados, e análises químicas das águas subterrâneas. As sondagens elétricas verticais identificaram em toda a área a ocorrência de uma camada resistiva interpretada como um aquitarde, cuja superfície caracteriza o nível de base e de descarga das águas subterrâneas. Os caminhamentos eletromagnéticos, com o EM31, investigando profundidades até seis metros detectaram anomalias de condutividade elétrica relacionadas ao lixo enterrado e às plumas contaminantes. A potociometria do aquífero está condicionada à pluviometria e às características fisiográficas do lixão, que o transformam numa grande superfície de infiltração das águas percoladas. Esta infiltração causa uma elevação dos níveis freáticos dentro e abaixo do lixão e um impacto na qualidade das águas subterrâneas. Hidroquimicamente é nítida a influência do lixo na qualidade das águas do aquífero. A condutividade elétrica, cloreto e o sódio são bons indicadores de contaminação do aquífero.

**Palavras-chaves:** Águas subterrâneas, contaminação, resíduos sólidos, lixão, Tatuí, Brasil.

### INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de dar um destino ao lixo gerado pela população de 100.000 habitantes foi iniciado em janeiro de 1991 a disposição de resíduos sólidos urbanos numa área de 14,87 ha, anteriormente degradada pela atividade de exploração mineral de argila usada para abastecer as olarias locais. Desde então, esta área foi transformada num lixão que tem recebido até os dias de hoje todos os resíduos sólidos do município, não havendo controle ou informações precisas sobre suas composições quantitativas, qualitativas e aspectos físico-químicos.

Calcula-se que o empreendimento receba cerca de 40 t/dia de lixo com grande predomínio de resíduos de origem domiciliar, ocorrendo também

resíduos de origem comercial e público, verificados pela presença de papéis, plásticos, embalagens diversas e resíduos de varrição de vias públicas. Resíduos dos serviços de saúde e hospitalar também estão presentes, porém as quantidades lançadas são desconhecidas, estima-se por informações dos operadores locais que estas quantidades situam-se entre 400 e 800 kg/dia. O mesmo ocorre com os resíduos industriais, estes estão presentes na área do lixão, pois observam-se peças plásticas e metálicas, aparas diversas e borras amontoadas, empilhadas ou contidas em latões.

O estudo objetivou caracterizar o impacto na qualidade das águas subterrâneas gerado pelo lançamento de resíduos sólidos urbanos situada no Município de Tatuí, Estado de São Paulo, Brasil, através da aplicação de um estudo clássico de

avaliação, utilizando técnicas indiretas e diretas de investigação para caracterizar a geologia e hidrogeologia local, localizar massas de lixo enterradas e delinear plumas de contaminação.

## METODOLOGIA

Inicialmente foram realizadas atividades de campo que objetivaram o levantamento geológico de superfície, inspeção das áreas do empreendimento e circunvizinhanças, levantamento do histórico de uso e ocupação do aterro e de feições hidrogeológicas locais.

A seguir o estudo prosseguiu com a aplicação de técnicas de investigações indiretas e diretas.

No primeiro caso foram aplicados os métodos geofísicos da eletrorresistividade utilizando um resistivímetro TDC-1000/12 da *Tectrol* num arranjo *Schlumberger*, e o eletromagnetismo indutivo com o uso de equipamentos da *Geonics* (EM31 e EM34). E no segundo caso compreendeu a execução de 12 sondagens de 100 mm de diâmetro até a profundidade máxima de 20 m realizadas com equipamento de trado manual, com instalação de poços de monitoramento e análises químicas realizadas segundo as técnicas apresentadas por APHA (1999).

## RESULTADOS OBTIDOS

### Investigações Geofísicas

#### Sondagens elétricas verticais

Foram realizadas 9 sondagens elétricas verticais (SEVs) com espaçamento entre os eletrodos de corrente AB de 120 metros distribuídas ao redor do lixão nas vertentes e topo das colinas próximas aos limites a montante e jusante e fora das áreas de disposição.

Numa primeira interpretação das curvas de campo das SEVs, como exemplificado na figura 1, verificou-se que estas apresentaram morfologias bastante semelhantes. Basicamente mostraram a ocorrência de uma camada geoelétrica resistiva muito evidente em todas as sondagens, apesar destas

apresentarem resistividades diferentes quando comparadas entre si. Isto foi interpretado como resposta às diferentes espessuras das camadas saturadas ou não, da presença de rocha de embasamento impermeável, da maior ou menor quantidade de água do meio poroso e também, da concentração de íons presentes nestas águas subterrâneas, atribuídas principalmente à lixiviação direta destes íons no resíduo.

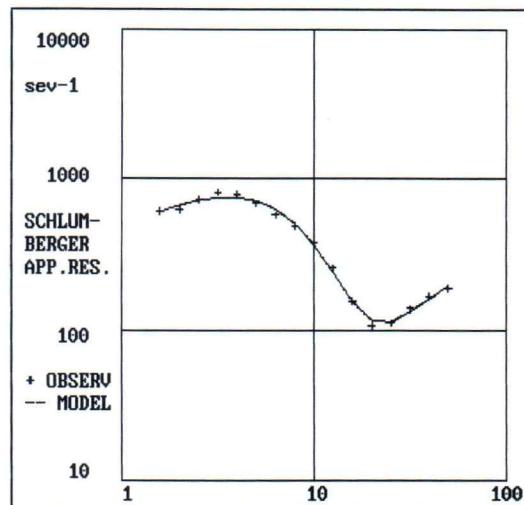


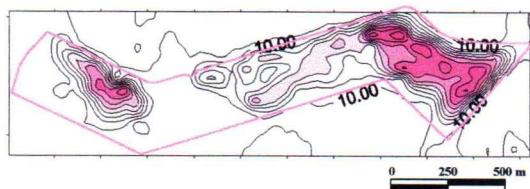
Figura 1- Interpretação da curva obtida da SEV

### Caminhamentos eletromagnéticos

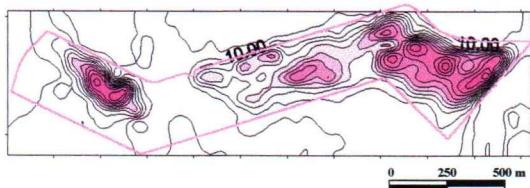
Foram realizadas estações de leituras com o equipamento EM31 distribuídas em caminhamentos eletromagnéticos (CEMs) dentro e contornando os limites do lixão, e estações com o EM34 em caminhamentos dentro e além dos limites, prolongados em direção às vertentes, a jusante. Com estes CEMs investigou-se profundidades de até 6 m, com o EM31, e até 15 m, com o EM34.

Para caracterizar os valores de *background* foram realizados caminhamentos a montante e paralelamente ao limite leste do lixão com os dois equipamentos. Estes CEMs foram iniciados em uma posição topográfica baixa coincidente com o nível de base do lixão, e sob pouca ou nenhuma influência do nível d'água nas medidas das condutividades aparentes.

As figuras 2 e 3 apresentam os contornos das isocondutividades aparentes para as profundidades investigadas de até 3 e 6 metros respectivamente, considerando como condutividade elétrica de *background* os valores até 10 mho/m. Acima destes valores as condutividades foram consideradas como anômalas para a área.



**Figura 2** – Distribuição das isocondutividades aparentes obtidas da investigação de até 3 m com o EM31



**Figura 3** – Distribuição das isocondutividades aparentes obtidas da investigação de até 6 m com o EM31

## HIDROGEOLOGIA

A área constitui-se por sedimentos predominantemente silto-arenosos muito finos intercalados por camadas mais finas, que se sobrepõem a uma camada de sedimento argiloso siltoso compacto e impenetrável ao equipamento manual de perfuração.

Dada a característica de baixa permeabilidade conferida aos sedimentos argilosos associada à distribuição lateral e profundidades da camada geoelettrica resistiva interpretada nas SEVs, tem-se que esta camada correlaciona-se com a camada geoelettrica e caracteriza-se hidráulicamente como um aquitarde.

O aquífero é livre e raso com profundidade média saturada em torno de 8 metros e fluxo predominante no sentido W-E, sendo que numa pequena porção ao sul ocorre o divisor de águas subterrâneas, cujo traçado N-S faz com que parte de suas águas convirjam para a vertente imediatamente próxima ao limite sul do lixão, comprometendo a qualidade das águas subterrâneas da microbacia vizinha (figura 4).

Ao se comparar o mapa de fluxo das águas subterrâneas com o de contorno do aquitarde, observou-se que as curvas isopotenciométricas possuem a mesma tendência das curvas de isopropfundidades, ou seja, o aquitarde caracteriza o nível de base do aquífero e da sua descarga local.

Numa análise conjunta do mapa potenciométrico (figura 4) e de isocondutividades aparentes (figuras 2 e 3), foi possível mapear as massas de lixo enterradas e, na investigação até 6 metros, identificar a pluma contaminante, que coincide com o fluxo do aquífero, a partir das fontes de contaminação para as zonas de descarga das águas.

Os CEMs que investigaram profundidades superiores a 15 metros confirmaram a presença das massas de lixo e influência do lixiviado na área do lixão, entretanto seus resultados não foram satisfatórios quanto ao mapeamento da pluma.

Esses resultados se devem à maior influência da camada resistiva, em relação às camadas superiores menos resistivas na condutividade aparente global. Tal evidência é mais notada nas porções centro-norte da área, onde o aquitarde é mais raso, e mesmo onde há o aumento da condutividade elétrica da água subterrânea, quando o lixiviado produzido é suficiente para conferir à condutividade global valores superiores às do *background*.

## As Variações dos Níveis d'Água no Tempo

As observações dos níveis d'água dos poços de monitoramento durante os períodos de seca e úmido demonstraram que há uma variação sazonal condicionada pelas características pluviométricas. Com a chegada das primeiras chuvas, os níveis d'água elevaram-se respondendo rapidamente à recarga induzida por elas. A partir daí, os níveis acompanharam as variações pluviométricas (figura 5). Entretanto, há poços com características diferentes, quando observadas as variações de seus níveis ao longo do tempo:

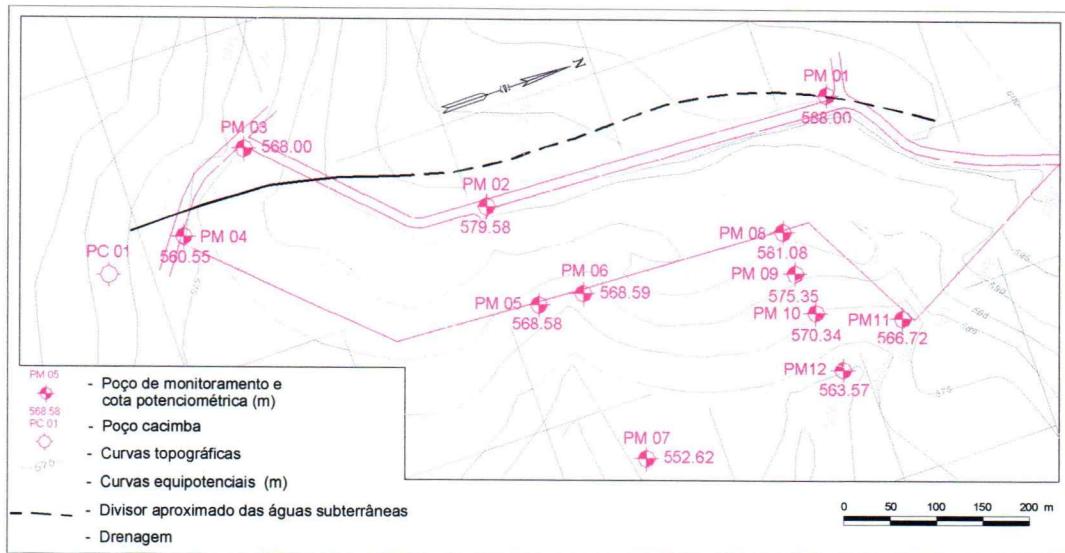


Figura 4- Mapa potenciométrico

- os poços situados a montante e na linha dos divisores d'água (PMs 01, 02 e 04) apresentam as menores variações de seus níveis d'água;
- os poços próximos às massas de lixo (PMs 03, 06, 08, 09 e 10, exceto o PM11), apresentaram variações de níveis d'água mais significativas.

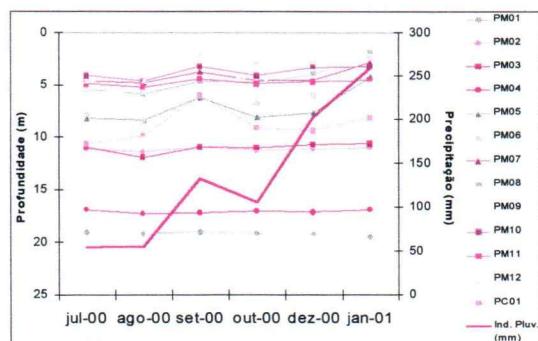


Figura 5- Variações dos níveis d'água

Quanto ao PM11, este está situado imediatamente a jusante de um dos diques de captação de águas superficiais e percoladas no lixão. Este dique encontra-se com água durante todo o ano, mantendo assim com poucas variações os níveis d'água registrados no poço.

Ao contrário do que ocorre a montante, a superfície do lixão apresenta-se bastante regularizada, com baixas declividades e, apesar da cobertura vegetal estar restrita à porção sul, toda a área do lixão intercepta as águas precipitadas, pois não há sistemas de drenagem que separem as águas pluviais das percoladas. Estas misturam-se, parte escoa superficialmente, e também infiltram-se. Como existe um grande volume infiltrado, isso acaba causando uma elevação do nível freático,

imediatamente abaixo do resíduo, devido a maior permeabilidade do lixo (figura 6). Esse efeito é observado também por (Holmes 1983, *apud* Guiguer, 1987) e Freeze & Cherry (1979).

Tal fato apresenta indícios de estar ocorrendo, pois são comuns as surgências de lixiviado na periferia das áreas com resíduos principalmente na época das chuvas. Essas águas seguem para fora das canaletas e daí para o dique de contenção. Adicionalmente, notou-se que com a precipitação há uma elevação do nível freático, ocasionando o deslocamento do divisor d'água original (PM01), junto ao limite NW da área de estudo (figura 6).

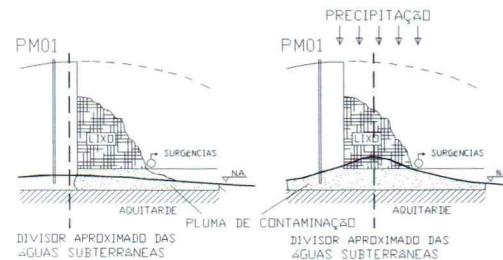


Figura 6 – Seção esquemática do nível d'água dentro e abaixo do lixão

## QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Foram realizadas seis campanhas de amostragens das águas subterrâneas nos poços de monitoramento. Estas foram realizadas no período de julho de 2000 a janeiro de 2001, sendo as campanhas de agosto e novembro mais completas e representativas de épocas mais seca e úmida, respectivamente.

## As Variações das Condutividades Elétricas (CE) ao Longo do Tempo

As condutividades elétricas (CEs) das amostras variaram de 11,8 a 1.929,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , e foi assumido que valores até 80  $\mu\text{S}/\text{cm}$  são considerados como de *background*, estabelecido a partir do PM02 localizado a montante do lixão e livre de sua influência. A figura 7 apresenta as curvas de

influência direta das chuvas na lixiviação/solubilização dos constituintes do lixo;

- o PM11 apresentou a CE mais alta registrada na área durante todas as campanhas (1650,0 a

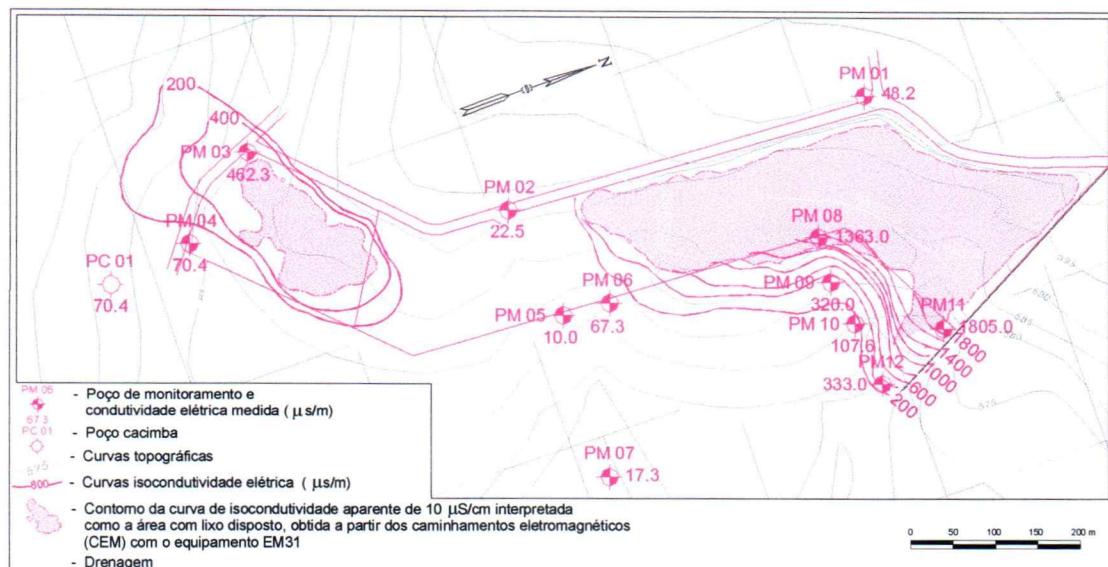


Figura 7- Distribuição das condutividades elétricas

isocondutividades do período mais seco.

A influência das chuvas, que contribuem significativamente na disponibilidade de água para infiltração (figura 8), lixiviação e solubilização, gera comportamentos interessantes a serem considerados:

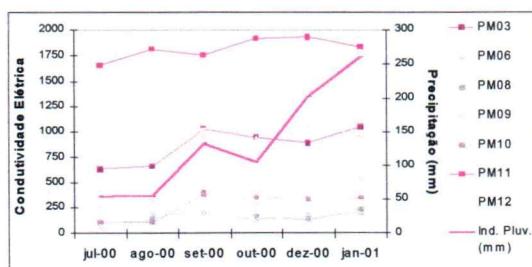


Figura 8- Variações das condutividades elétricas

- o PM06 situado sob influência da porção central, onde há menos lixo disposto e que, inicialmente possui valores abaixo do *background* no período seco, possui, entretanto, seus valores triplicados com a chegada das chuvas. Enquanto o PM05, situado na mesma vertente, mas do outro lado da drenagem, conservou valores sempre abaixo do *background*. Portanto, quando se observa a distribuição das massas de lixo (figuras 2 e 3) e o mapa potenciométrico (figura 4), nota-se que somente o PM06 está sob influência da água que percolou a área com lixo; mostrando a

1929,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), havendo um pequeno aumento com a chegada das chuvas. Novamente credita-se à influência das chuvas no percolado, embora com pouca variação ao longo do tempo. Isto se deve, conforme observado anteriormente para as variações dos níveis d'água, ao fato do poço estar situado imediatamente a jusante de um dos diques de captação de águas superficial e percolada no lixão. Este dique encontra-se com água durante todo o ano mantendo com poucas variações os níveis d'água do aquífero e da condutividade elétrica durante o período monitorado.

- o PM01 aumentou a CE significativamente na segunda campanha em decorrência do início das chuvas após um longo período de estiagem. Tal fato pode estar relacionado à infiltração e à elevação do nível d'água dentro do lixão, deslocando o divisor d'água da área do PM01 para dentro do lixão (figura 6).

A distribuição dos poços pela área e os mapas de isovalores de CE e de potenciométria indicam que a pluma de contaminação atingiu as águas subterrâneas e avançou para além dos limites do lixão:

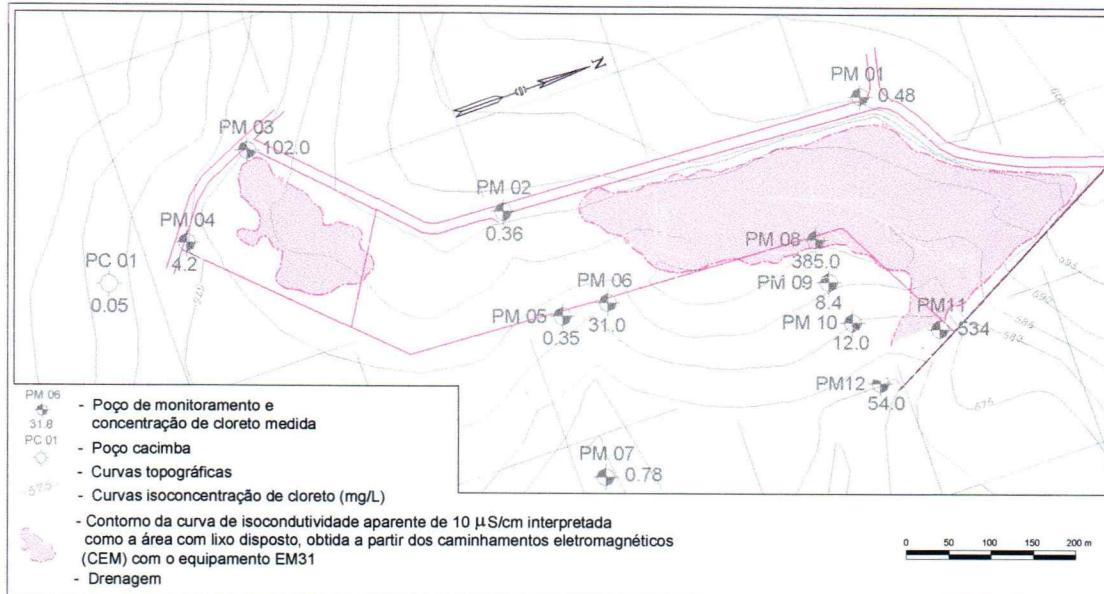


Figura 9- Distribuição da isocondutividades de cloreto

- na porção sul, a pluma avançou para a outra microbacia comprometendo a qualidade de suas águas (PM03);
- na porção central, o impacto é menor, devido à distribuição e menor quantidade de lixo nesta área. Na época de seca as CE nos PMs 05, 06 e 07 estão abaixo do *background*. Entretanto, durante a época das chuvas, a pluma avança pelo lado da vertente que possui lixo disposto, impactando as águas subterrâneas, como comprovado pela elevação da CE no PM06 (175,8  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). A 200 m a jusante, o PM07, entretanto, não se registra mais os indícios de contaminação, apresentando 50,4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;
- a porção norte é a mais impactada devido a grande quantidade de lixo ali disposto. O lixo ocupa toda esta área, cuja frente de disposição, drenos e diques de lixiviado, encontram-se muito próximos das surgências da vertente norte que contribuem ao córrego. O aumento da quantidade de lixo e da infiltração principalmente pelas chuvas sugerem o aumento do nível d'água dentro do lixão, deslocando o divisor d'água e alterando o fluxo em direção à microbacia vizinha a noroeste (Figura 6). O contínuo lançamento de lixo e a presença de valas e diques abertos no solo sem qualquer impermeabilização aumentam a superfície de infiltração. Isso é observado no PM12 (280,0 a 1063,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), situado imediatamente ao lado do córrego e do exútrio da vertente norte, ou seja, na área principal de convergência das águas subterrâneas, que compreendem para principal área de descarga da vertente.

### Distribuição dos Principais Constituintes e da Pluma de Contaminação

Nas seis campanhas de amostragens foram analisados 31 parâmetros, 21 ocorrem em concentrações acima das permitidas, caracterizando estas águas como impróprias para o consumo humano.

Destas campanhas, as águas menos mineralizadas e impactadas foram classificadas como bicarbonatadas mistas, comuns ao Sistema Aquífero Tubarão (DAEE, 1981). Já as águas consideradas contaminadas são cloretadas-sódicas bastante comuns em chorumes de lixões domésticos. O mapa da figura 9 apresenta as isoconcentrações do cloreto e demonstra estreita relação com a distribuição da condutividades elétricas (figura 7).

Há também uma boa correlação entre os resultados dos CEMs, com EM31 (figuras 2 e 3), e a distribuição de cloreto.

Para efeito de interpretação da distribuição dos constituintes, a área sob influência do lixão foi dividida em cinco porções, segundo as informações obtidas das investigações geofísicas, potenciometrias e distribuição das CEs.

A área a montante foi dividida em duas porções. Uma considerada de *background* (PM02) e, portanto, livre da influência das massas de lixo enterradas. E uma outra porção à montante noroeste (PM01) sob influência da elevação do nível d'água dentro do lixão e deslocamento do divisor das águas subterrâneas.

A jusante há três outras porções. A norte que compreende a vertente mais próxima da atual área de disposição e do córrego, onde estão situados os

poços PMs 08, 09, 10, 11 e 12. A porção central, com menos lixo, onde estão os PMs 05, 06 e 07. E por fim a porção sul sob influência da antiga área de disposição, cuja pluma avançou para a outra microbacia (PMs 03, 04 e PC01).

A maioria dos constituintes analisados (Cl, Na, K, Fe, Fe (total), Mn, Al, Ca, Mg, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Pb, Sr, Ti, V, Sn, Zn, Zr,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , N (amoniacal), N (kjedahl) e Alcalinidade ocorrem em todas as porções impactadas, mas principalmente nas vertentes norte e sul. Na porção central o impacto é menor, em geral, as maiores concentrações são observadas no PM06 que está no lado da vertente que possui lixo enterrado.

A série nitrogenada ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_3$  e  $\text{NO}_3^-$ ) está presente principalmente na vertente norte, em especial no PM08 que apresentou concentrações elevadas ao longo de todas as campanhas. Estas concentrações se devem à proximidade do poço com as valas de disposição de resíduos hospitalares e dos resíduos da indústria Lopesco ricos em matéria orgânica.

O restante dos metais estão presentes em concentrações que variam de 0,01 a <5mg/L, também em todas as porções impactadas, entretanto, nota-se que os metais pesados ( $\text{Cd}^{2+}$ , Mo, Sn,  $\text{Sr}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$ ) ocorrem quase que exclusivamente nas porções norte e sul.

Dentro da faixa de pH observado na área (4,28 a 6,40), estes metais são muito pouco móveis, sendo assim suas presenças se restringem às proximidades do lixão, até onde as condições redutoras favorecem sua mobilidade. Assim tem-se que os metais (ferro, alumínio, manganês e bário) e metais pesados ocorrem principalmente nos PMs 01, 03 e 11, que estão situados imediatamente ao lado das massas de lixo.

A tendência geral é o aumento das concentrações de todos os constituintes com o aumento das precipitações a partir do início das chuvas. Esta tendência no PM01, enfatizada principalmente pelos metais Fe, Mn, Al e Ba, confirmam o deslocamento do divisor devido ao aumento das precipitações com elevação do nível d'água dentro do lixão, criando um fluxo de águas contaminadas do lixão para o PM01 e daí para a outra microbacia a noroeste.

O cloreto sendo um íon conservativo e móvel se presta ao acompanhamento da hidráulica do sistema. Na área de estudo, nota-se que há um declínio gradual na direção do fluxo d'água subterrânea, isto é primeiramente atribuído à dispersão hidrodinâmica. Assim tem-se:

- na vertente norte, os teores de cloreto nos limites do lixão (PMs 08 e 11 durante os períodos seco e úmido) são cerca de 770 vezes (385mg/L) a mais de 1200 vezes (648mg/L) maiores que os de *background* (próximo a 0,5 mg/L);
- na vertente central, a concentração máxima encontrada no limite do lixão, dada pelo PM06, foi de 44 mg/L, mas a 200 m a jusante, o PM07 não apresentou mais cloreto acima do *background*;
- na porção sul não há poços suficientes para a delimitação da pluma, porém o PM03 apresentou uma concentração máxima de 236 mg/L, demonstrando que a pluma avança para além dos limites do lixão, já em outra microbacia, podendo atingir a urgência existente na drenagem próxima, que contribui no córrego principal;

Salienta-se, ainda, que não foi possível realizar análises microbiológicas e de compostos orgânicos; contudo, a presença de coliformes e fenol detectado por PROMINER (1996), pode estar indicando a presença destes nas águas subterrâneas.

## CONCLUSÕES

A deposição imprópria de resíduos sólidos no Vazadouro Municipal de Tatuí tem causado a contaminação das águas subterrâneas na área.

Para a caracterização do impacto foram utilizados métodos diretos (descrição do empreendimento, perfuração de poços de monitoramento e coleta regular de água e análises químicas) e indiretas (SEV e CEM).

A aplicação dos métodos geofísicos nos procedimentos de SEV e CEM mostrou-se útil no estudo de caracterização do impacto, contribuindo para uma melhor representatividade das investigações diretas.

Os métodos geofísicos se prestaram para mapear o lixo enterrado, bem como para detectar a pluma contaminante. Tanto a SEV como o CEM permitiram também definir camadas geolétricas correlacionáveis às camadas saturada e não saturada e ao aquitarde.

O uso conjunto de técnicas geofísicas e diretas apresentam-se como uma importante metodologia na caracterização de áreas contaminadas por resíduos sólidos

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA. 1999. Standard methods for the examination of water and wastewater, 14<sup>th</sup> edition.

Mendes G.M.B. 1987. Técnicas geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas. Tese de Doutorado, Instituto de geociências, Universidade de São Paulo.

Guiguer N. 1987. Poluição das águas subterrâneas causadas por aterros sanitários: uma abordagem matemático-experimental. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Freeze A.R., & Cherry J.A. 1979. Groundwater, New Jersey, Prentice Hall.

DAEE. 1981. Estudo das águas subterrâneas – região administrativa 5 – Campinas, São Paulo. Dept. de águas e energia elétrica/Dir. de planejamento e controle, v.2, 112p.

Prominer. 1996. Diagnóstico preliminar e plano de recuperação do vazadouro municipal de Tatuí, São Paulo, 32p.