

## ESTRUTURA ELÉTRICA DA CONTAMINAÇÃO HÍDRICA PROVOCADA POR FLUIDOS PROVENIENTES DOS DEPÓSITOS DE LIXO URBANO E DE UM CURTUME NO MUNICÍPIO DE ALAGOINHAS, BAHIA

Patrícia de Andrade Pereira<sup>1</sup> e Olivar Antônio Lima de Lima<sup>2</sup>

Recebido em 27 março, 2006 / Aceito em 29 janeiro, 2007  
Received on March 27, 2006 / Accepted on January 29, 2007

**ABSTRACT.** The actual sanitary landfill deposit of Alagoinhas county was constructed at the neighborhood of an old city dump and of a large tannery industry. Such dangerous pollution sources are located above the recharge area of the São Sebastião aquifer, one the most important water reservoirs of Bahia state, being exploited to supply human and animals populations in the county, irrigated agricultures and industries. To characterize the hydrological and environmental changes generated both by landfill leachates and tannery byproducts we applied electrical geophysical surface measurements combined with water samples physical chemistry analysis. The results of 49 vertical electrical soundings were used to delineate a three-dimensional conductive anomaly, which extends from the water table (about 10 m depth), to more than 40 m in depth. Such anomaly is interpreted as a result from the invasion of aqueous fluids derived from the garbage deposits and from the tannery decantation lagoon into the upper phreatic, regional aquifer of the area. Water analysis were made in six water wells and in three surface water samples collected in the Sauípe river and at one of its tributary, where industrial effluents are being disposed. The results reveal an extensive contamination of the groundwater and surface waters within the studied area. It has growth above the standard limits in the concentrations of Chromium Cr(III), Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Ammonia (NH<sub>3</sub>) and total Nitrogen (N) and Phosphorus (P), suspended and dissolved solids, and cations Na, K, Mg, Ca, and anions Cl and SO<sub>4</sub>.

**Keywords:** Vertical Electrical Soundings (VES); water contamination; leachate landfill; tannery.

**RESUMO.** O atual aterro sanitário do município de Alagoinhas foi construído nas vizinhanças do antigo depósito de lixo da cidade e de uma grande indústria de couros. Tais fontes perigosas de poluição estão situadas sobre uma área de recarga do aquífero São Sebastião, um dos mais importantes reservatórios de água doce do estado da Bahia, que é intensivamente explorado para suprimento das populações humanas e animais, irrigação e indústrias. Uma caracterização das alterações hidrológicas e ambientais geradas pela presença dos depósitos de lixo e da indústria de couros foi realizada por meio da aplicação de métodos geofísicos elétricos combinados com análises físico-químicas de amostras de águas. Os resultados interpretados de 49 sondagens elétricas verticais (SEVs) executadas na área mostraram a presença de uma anomalia condutiva tridimensional, que se estende desde a superfície até mais de 40 m de profundidade. Esta é interpretada como resultante da invasão de líquidos originados dos depósitos de lixo e da lagoa de rejeito do curtume. Uma investigação da qualidade das águas realizada a partir de coletas em poços e no rio Sauípe e seu afluente, onde são lançados os efluentes da indústria, confirma os resultados da investigação geoeletrica. Detectamos alterações nas concentrações de cromo trivalente, demandas química e bioquímica de oxigênio (DBO e DQO), amônia, nitrogênio total e fósforo, sólidos suspensos e dissolvidos, dos cátions sódio, potássio, magnésio e cálcio, dos ânions cloreto e sulfato, estando os valores obtidos muitas vezes acima dos limites fixados pela legislação.

**Palavras-chave:** Sondagem Elétrica Vertical (SEV); contaminação de águas; depósitos de lixo urbano; curtume.

<sup>1</sup>Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia, Campus Universitário de Ondina, 40170-290 Salvador, BA, Brasil. – E-mail: pandrade@ufba.br

<sup>2</sup>Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da Universidade Federal da Bahia, Campus Universitário de Ondina, 40170-290 Salvador, BA, Brasil.  
– E-mail: olivar@cpgg.ufba.br

## INTRODUÇÃO

As áreas contaminadas e os problemas sócio-ambientais que elas geram se devem a grande diversidade de poluentes existentes nos resíduos produzidos pelas atividades humanas. As contaminações hídricas e ambientais se proliferaram não só pela transformação das sociedades agrárias em urbano-industriais, mas também pelo conseqüente aumento na produção de bens de consumo para atender populações ansiosas por novidades tecnológicas e supérfluos. Nos países pobres não foi diferente. Sua industrialização, embora tardia em relação à dos países ricos, tem sido bastante intensa, principalmente para atender a demanda do neo-colonialismo. Assim, o superdesenvolvimento tecnológico-industrial alcançado pelos países ricos e ansiado pelos países pobres, se refletiu em danos ambientais graves e a um custo humano intolerável.

Segundo Furtado (1984), a idéia de desenvolvimento tecnológico-industrial imposta pela lógica do capitalismo contemporâneo é uma caricatura ideológica que tem sido útil para mobilizar as populações de baixa renda e levá-las a aceitar enormes sacrifícios, para legitimar a destruição de formas de cultura ditas arcaicas, para explicar e fazer compreender a necessidade de destruir o meio físico e para justificar novas formas de dependência que reforçam o caráter predatório do sistema produtivo.

Neste contexto, a industrialização e a crescente produção de bens de consumo se impõem como a grande esperança para os povos que almejam se desenvolver e aumentar seus níveis de renda. Contudo, tal fenômeno retirou em poucas décadas, populações inteiras da sua economia de subsistência tradicional, transformando-as em mão-de-obra barata para alimentar o processo de modernização/recolonização. A opulência, a acumulação de riqueza e a desigualdade características deste sistema representam uma grave ameaça ao futuro da humanidade e da biodiversidade. O custo ambiental deste processo também é muito alto. O acúmulo de contaminantes no ar, a degradação dos solos e das águas, a constante produção de resíduos poluentes e a destruição da biodiversidade têm acontecido em grande magnitude.

Depósitos de lixo urbanos e industriais se incluem entre as fontes mais perigosas para a contaminação do ambiente e dos recursos hídricos, mesmo aqueles construídos com projetos de proteção de suas bases e de drenagens dos efluentes. Em várias partes do mundo a contaminação das águas superficiais e subterrâneas tem sido associada a aterros sanitários e a depósitos de rejeitos industriais devido a falhas de operação ou de construção, bem como pelo desgaste das estruturas de proteção (MacFarlane

et al., 1983; Kjeldsen et al., 1998; Zhu et al., 2001; Elis & Zuquette, 2002; Butt & Oduyemi, 2003; Oygard et al., 2004; Meckenstock et al., 2004; Bjerg et al., 2005; Acworth & Jorstad, 2006).

Assim, a preocupação com a destinação dos resíduos urbano-industriais tem sido crescente. Formas adequadas e menos impactantes para conduzir o processo de descarte estão sendo pesquisadas de forma intensiva. Entretanto, qualquer saída viável precisa incluir a transformação das consciências humanas no sentido de assimilar um redirecionamento da educação formal e informal voltada à redução do consumo e reutilização dos materiais já existentes evitando-se o desperdício.

No município de Alagoinhas, BA, o despejo dos resíduos sólidos urbanos está, atualmente, sendo feito em um aterro sanitário. Contudo, antes da construção do mesmo, os resíduos produzidos pelo município eram depositados a céu aberto em área localizada entre o atual aterro e o curtume da empresa BRESPEL. Neste estudo buscamos caracterizar as contaminações provocadas por materiais depositados no novo aterro, no aterro simplificado desativado e as provenientes do curtume, através de uma investigação com geofísica elétrica e análises físico-químicas das águas subterrâneas e superficiais.

## METODOLOGIA

A metodologia do trabalho envolveu uma avaliação visual das alterações superficiais existentes com visitas técnicas as áreas dos depósitos de lixo e do curtume. Nesta etapa foi delimitada a área para realização da investigação geofísica de detalhe e dos pontos para as coletas de água, bem como um levantamento de informações junto à população residente no entorno e aos administradores dos depósitos de lixo e do curtume.

Na área delimitada para o estudo foram realizadas, entre janeiro e fevereiro de 2004, um conjunto de 41 sondagens elétricas verticais com espaçamentos AB/2 máximo de 200 m e 8 sondagens de maior profundidade de investigação, com AB/2 variando de 600 a 800 m, distribuídas conforme indicado na Figura 1. Os resultados geoeletricos foram interpretados como sondagens individuais, seções geoeletricas transversais e mapas de isorresistividades aparentes e verdadeiras do aquífero. Utilizamos na execução das sondagens elétricas verticais o sistema SYSCAL R-2 pertencente ao CPGG-UFBA, e o arranjo Schlumberger de eletrodos.

Para a investigação da qualidade das águas, amostras foram coletadas em poços produtores (PP-1 e PP-4), em poços de monitoramento do aterro sanitário (PM-2 e PM-3), em poços de monitoramento perfurados pela UFBA (PM-4, PM-5) e no

rio Sauípe (R-5, R-6) e seu afluente (R-7) nos meses de março de 2004 e abril de 2005. Os resultados das análises físico-químicas foram comparados aos valores de referência definidos pela resolução 357/05 do CONAMA (Brasil, 2005), pela portaria 518/04 do Ministério da Saúde (Brasil, 2004), e a outros dados obtidos em estudo sobre o rio Sauípe (Bahia, 2004).

### Características gerais da área

O município de Alagoinhas (Fig. 2) possui área de 1179 km<sup>2</sup>, correspondendo a 0,21% da área do estado da Bahia. É o município mais populoso e melhor urbanizado da região litoral norte, abrigando mais de um quarto da sua população. É também o mais importante em termos comerciais, se destacando como um relevante entreposto, com o maior número de estabelecimentos e pessoal ocupado, e a maior receita da região. Sua área inclui os tipos climáticos úmido e subúmido, com totais anuais de chuvas de 1.280 mm e temperatura média em torno de 24°C (SEI, 1994).

Alagoinhas se inclui na área das bacias hidrográficas do Recôncavo Norte, onde se destacam como rios principais o Catu, Cabuçu, Piabas e Sauípe. O município apresenta elevado potencial de recursos hídricos de subsuperfície representado pelo sistema aquífero São Sebastião, um reservatório natural de suma importância, uma vez que os principais cursos superficiais de água se encontram poluídos.

O rio Sauípe, de interesse desse trabalho, nasce em Alagoinhas e desemboca no Oceano Atlântico na localidade de Porto Sauípe, distrito municipal de Mata de São João. Há poucas décadas atrás, o alto curso deste rio constituía importante fonte de pescado e de lazer para a população de Alagoinhas e de outras cidades. Atualmente, apesar dos riscos a saúde devido à poluição, alguns poucos moradores ainda se arriscam a pescar ou se banhar.

Situado na região dos baixos tabuleiros, planaltos costeiros e colinas do Recôncavo o município possui cotas altimétricas pouco significativas, inferiores a 300 m. Esse conjunto morfológico pertencente ao sistema de bacias cretácicas do leste brasileiro foi preenchido com sedimentos de origem continental (Super-Grupo Bahia) de espessura superior a 6.500 m, em certas localidades. Neste pacote sedimentar, prevaleceram condições geológicas favoráveis à geração de petróleo e gás. No topo da seqüência da bacia Recôncavo-Tucano, com espessura de até 3.000 m, se encontra a Formação São Sebastião (Cretáceo Inferior) constituída de arenitos grossos a finos, amarelo-avermelhados, friáveis, feldspáticos, intercalados com argilas sílticas variegadas (Ghignone, 1979).

A Formação Marizal (Cretáceo Inferior) recobre em discordância erosiva os arenitos São Sebastião, apresentando espessuras variáveis entre 0 e 30 m (Fig. 1). Compõe-se de arenitos e conglomerados, ocorrendo ainda, siltitos, folhelhos e calcários. Os conglomerados, que ocupam a base da formação, são médios a grossos. Apresentam-se como maciços ou estratificados, possuindo matriz predominantemente arenosa, podendo conter seixos e cascalhos de gnaisses, arenitos, calcários, quartzo, siltitos, e rochas ígneas (Ghignone, 1979).

A Formação Barreiras, de idade Terciária (Plioceno), tem espessura média de 50 m. Se compõe de areias finas a grossas, argilas cinza-avermelhadas, roxas e amareladas (Fig. 1). Os arenitos são grosseiros a conglomeráticos, com matriz caulinitica, pouco consolidados, pobremente selecionados, cinza-esbranquiçados, amarelados e avermelhados. Os sedimentos da Formação Barreiras ocorrem sob a forma de extensos tabuleiros ligeiramente inclinados em direção à costa repousando discordantemente sobre as rochas das bacias sedimentares mesozóicas e do embasamento cristalino (Ghignone, 1979).

A área selecionada para estudo se situa na confluência da rodovia BR 101 com a via de ligação ao distrito de Rio Branco sendo incluída no Distrito Industrial de Sauípe (DISAI) (Fig. 1). Além do curtume e dos depósitos de lixo do município a área inclui ainda as seguintes atividades de risco para a contaminação do subsolo e das águas superficiais e subterrâneas: (i) um poço de exploração de petróleo, no momento desativado; (ii) um auto-posto de serviços para veículos pesados; (iii) extensas zonas reflorestadas com eucaliptos; e iv) uma rodovia e ferrovia com tráfego de cargas perigosas.

Os dois depósitos de lixo de Alagoinhas se situam numa vertente suave do terreno, com inclinação de sul para norte (Fig. 1). O aterro sanitário se encontra funcionalmente desconfigurado. O lixo não está sendo recoberto devido à insuficiência de material terrígeno de qualidade. O material local não possui textura adequada para isolamento da atmosfera, sendo rapidamente erodido pelas águas das chuvas. Este fato contribui para o agravamento dos problemas sociais existentes na área, uma vez que o lixo se tornou alvo de coleta de materiais por parte dos moradores do entorno. Os drenos de gás e lixiviados se encontram danificados, não havendo mais drenagem para as lagoas de tratamento. Por sua vez as lagoas, que foram superdimensionadas em relação ao tamanho do aterro, coletam águas de chuvas e lixiviados (chorume) que escorrem superficialmente das células onde o lixo está atualmente exposto.

Somente o aterro novo dispõe de impermeabilização basal com argila, o que, todavia, não garante longevidade à proteção

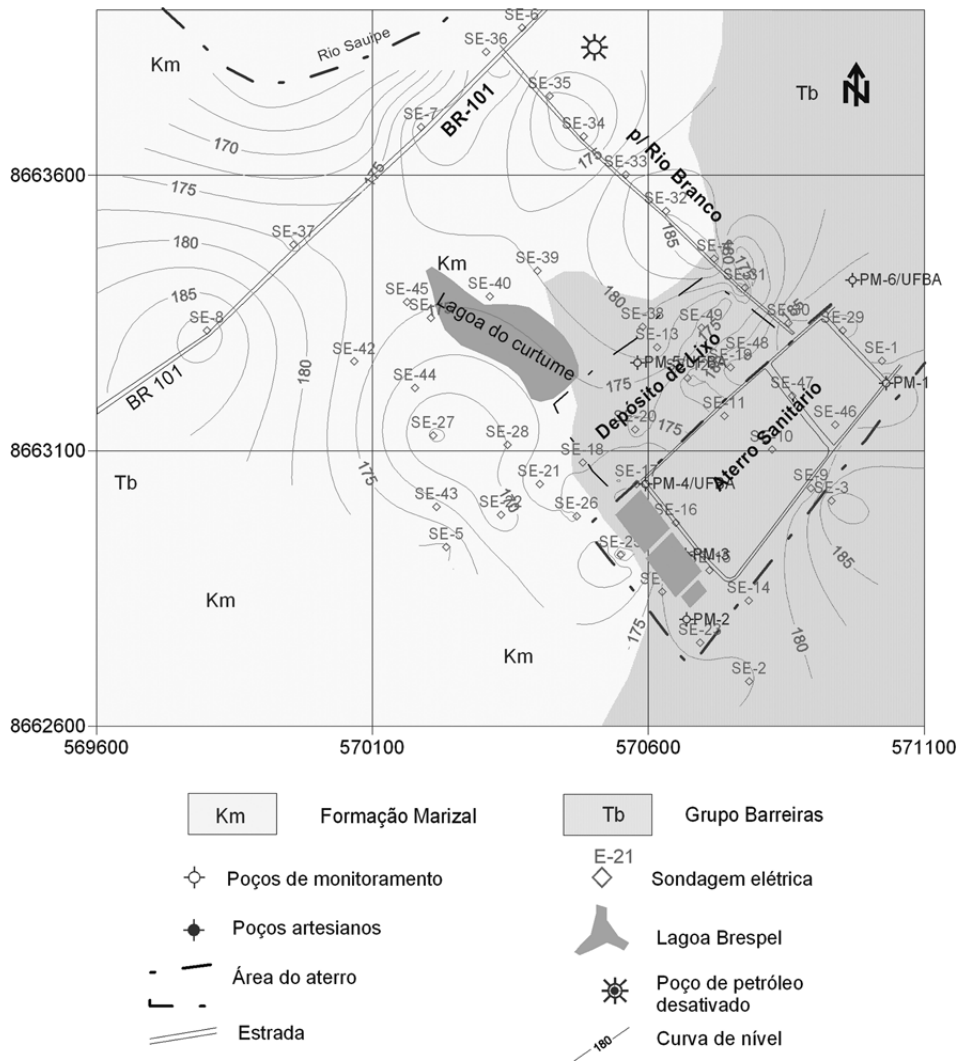


Figura 1 – Mapa geológico da área de estudo, mostrando a localização das principais fontes de poluição e centros das sondagens elétricas.

do subsolo. Contíguo a área do antigo depósito de lixo se encontra o curtume BRESPEL. Os efluentes do curtume são despejados diretamente na confluência de duas drenagens afluentes do rio Sauípe, formando uma lagoa de decantação. Uma delas foi aterrada como parte de um processo de “recomposição ambiental” do local.

### Investigação geofísica

Os resultados das 49 sondagens elétricas verticais são analisados sob as formas de curvas de sondagens individuais, seções geoeletricas transversais e mapas de isorresistividades aparentes e verdadeiras do aquífero. Esses resultados permitiram determinar a profundidade do nível estático (topo da zona saturada) e

as principais direções do fluxo hidráulico no subsolo, bem como delinear a extensão e espessura da camada de material acumulada no aterro desativado. Análises físico-químicas e bacteriológicas das amostras coletadas ajudaram a compreender a modelagem descrita.

As variações litológicas superficiais na área estão indicadas no mapa da Figura 1, que mostra as seqüências arenosas superiores das formações Marizal e Barreiras. Estas seqüências repousam, em discordância erosiva, sobre um espesso pacote predominantemente arenoso da Formação São Sebastião. Em afloramentos se observa que, tanto a Formação Marizal quanto a Formação Barreiras, são constituídas de arenitos pouco argilosos, com raras e finas lentes de argilitos ou folhelhos. Portanto, o conjunto Barreiras – Marizal – São Sebastião, de dominância

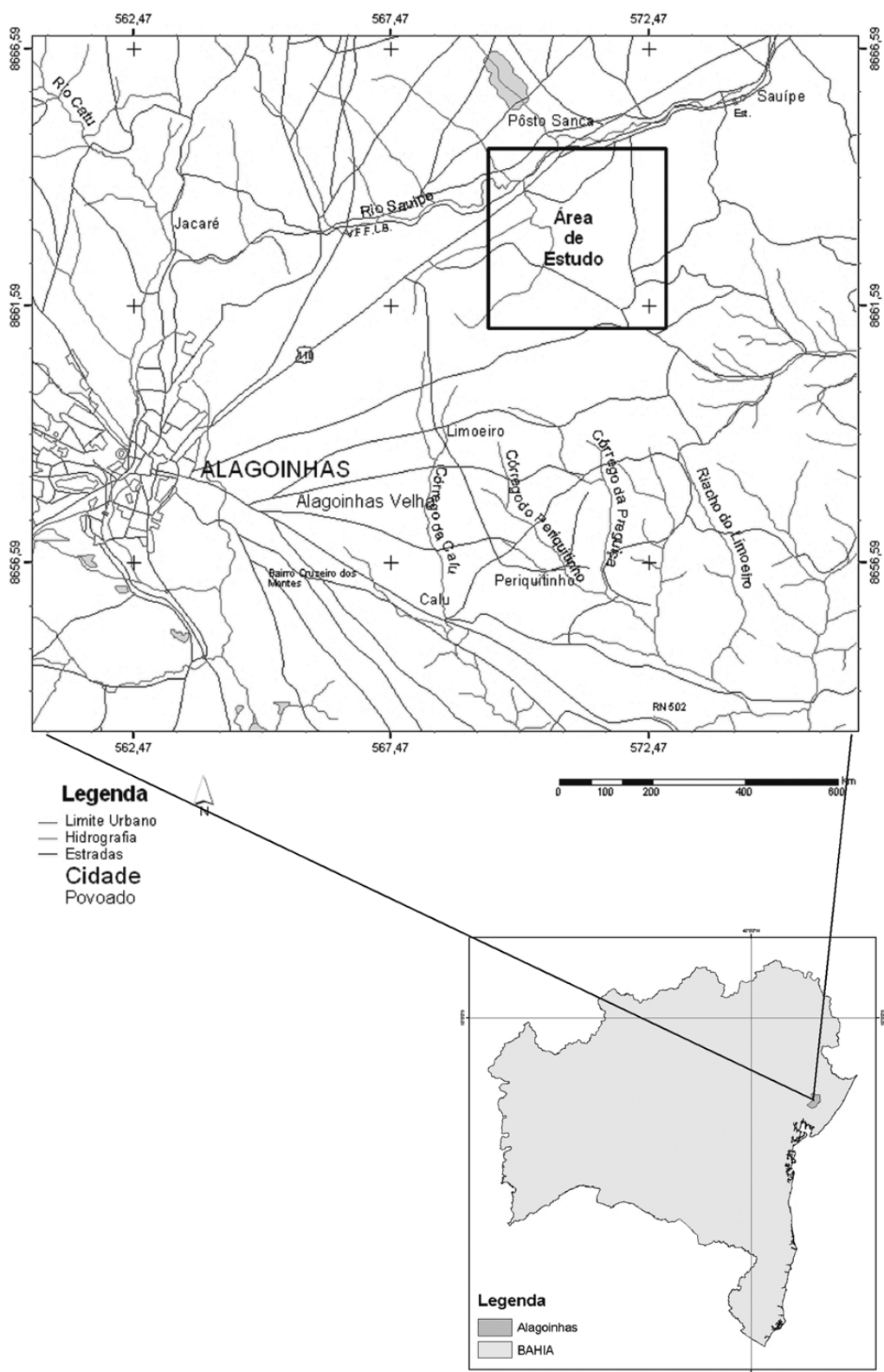
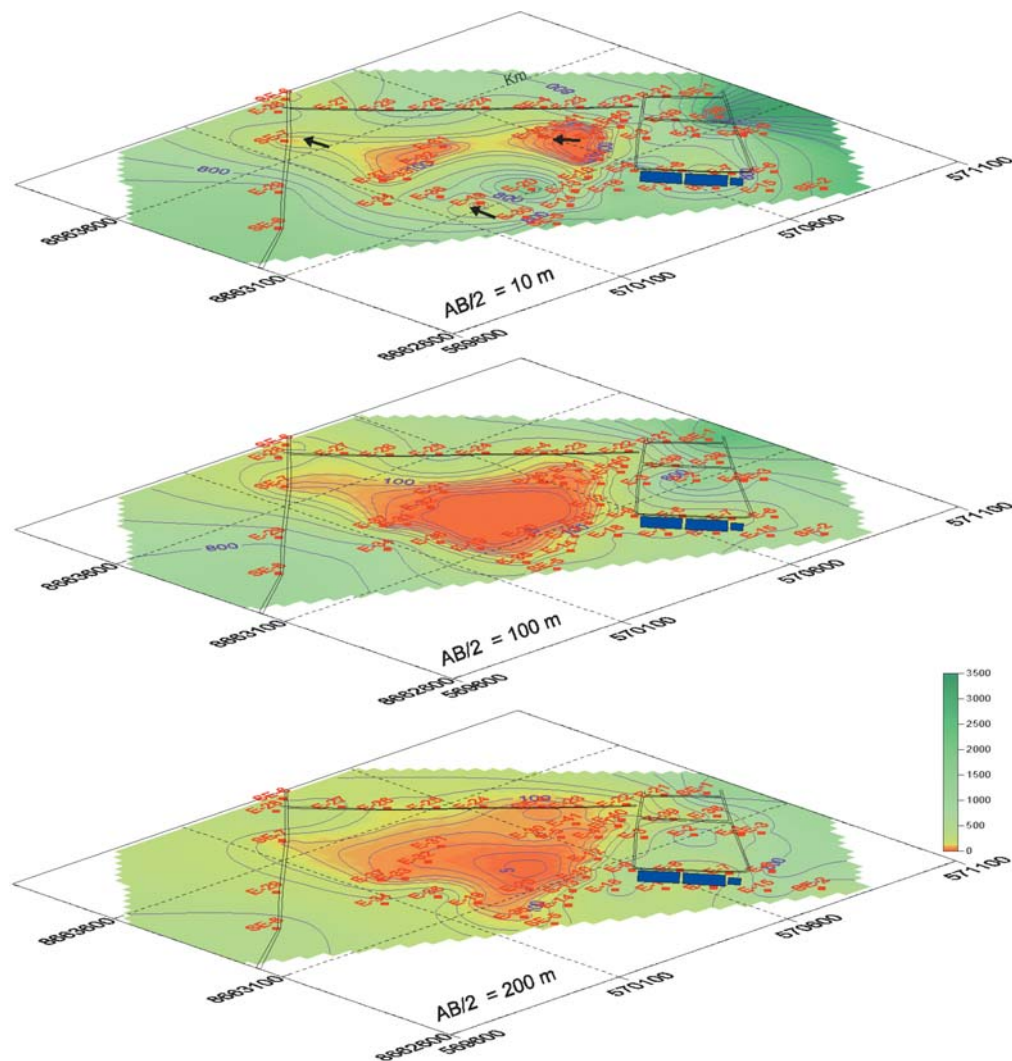


Figura 2 – Mapa de localização e acesso à área de estudo.



**Figura 3** – Distribuição da função resistividade aparente observada com espaçamentos AB/2 de 10, 100 e 200 m.

arenosa, constitui um extenso e espesso aquífero livre de grande importância regional.

Na Figura 3 são mostrados mapas de isovalores da função resistividade aparente observada com espaçamentos AB/2 de 10, 100 e 200 m. Em conjunto, esses mapas delimitam anomalias condutivas, com valores de resistividade inferiores a 100 ohm.m, que se manifestam praticamente da superfície até mais de 40 m de profundidade. Tais anomalias estão relacionadas à contaminação provocada pelos materiais provenientes dos depósitos de lixo e dos rejeitos do curtume. Os líquidos lixiviados desses resíduos atravessam a zona não saturada e atingem a zona saturada, entre 0 e 10 m de profundidade iniciando a diluição dos seus componentes. As setas incluídas nesses mapas mostram as direções do fluxo subterrâneo, que parece acompanhar a drenagem superficial

e que se origina em dois percursos distintos convergentes para o rio Sauípe do outro lado da BR 101.

Por suas dimensões, a anomalia mapeada não pode ser associada a litologias condutoras (folhelhos) nas formações Barreiras e Marizal, pois dados de poços e de afloramentos indicam que, essas formações são compostas de sedimentos predominantemente arenosos. As zonas esverdeadas de resistividade mais elevada correspondem a espessos pacotes litológicos arenosos saturados de água doce. Os mapas da Figura 3 são úteis também para destacar as sondagens que são compatíveis com terrenos horizontalmente estratificados, conforme exige a teoria geoeletrica unidimensional. Esse fato será mostrado a seguir com algumas sondagens características obtidas na área.

A Figura 4 mostra três das curvas de sondagens que investi-

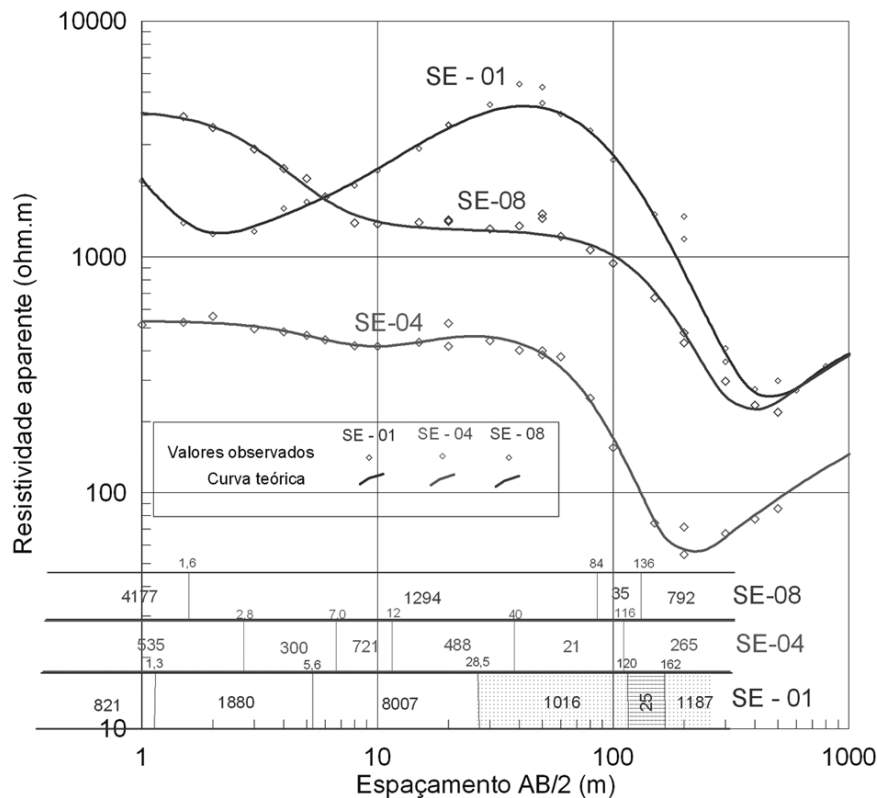


Figura 4 – Curvas das sondagens elétricas com espaçamentos AB/2 até 800 m, SE-01, SE-04 e SE-08.

garam a área em maior profundidade, respectivamente denominadas SE-1, SE-4 e SE-8. As colunas indicadas na base das curvas mostram os valores de resistividade e de profundidade das camadas interpretadas sob o centro de cada sondagem. As sondagens SE-1 e SE-8, por suas localizações, refletem a sucessão litológica regional observada sob condições normais de saturação. A camada condutora revelada entre as profundidades de 84 e 120 m, é atribuída a folhelhos da Formação São Sebastião. Os pacotes arenosos superiores, na zona saturada, tem resistividade variando entre 1.000 e 1.300 ohm.m. A sondagem SE-4, todavia, mostra efeitos de um intervalo condutor mais raso, localizado próximo de 40 m de profundidade, interpretado como resultante de alterações laterais na qualidade da água do aquífero.

As Figuras 5 e 6 contêm curvas de sondagens elétricas rasas representativas da área do aterro sanitário. Nas curvas SE-46, SE-47 e SE-48, centradas na parte oriental do aterro, a água do aquífero parece estar mudando lateralmente de sudeste para noroeste, na direção do antigo depósito de lixo. A curva SE-46 é comparável a SE-1, pois mostra um contato do aquífero com uma camada condutora, provavelmente representada por folhelhos da Formação São Sebastião, localizada a 110 m de profundidade.

Nessas sondagens, o nível estático varia de 22 a 30 m e a resistividade do aquífero cai de 882 para 164 ohm.m no sentido do depósito de lixo, como resultado da dispersão lateral da pluma.

As curvas SE-15, SE-16 e SE-17 (Fig. 6) foram centradas no lado ocidental do aterro, na lateral de suas lagoas de estabilização. Nelas o nível estático interpretado varia de 13 a 18 m de profundidade. Observa-se ainda um intervalo mais condutivo no topo do aquífero, com espessura variando de 23 a 32 m e resistividade entre 80 e 110 ohm.m, superposto a um substrato resistivo de mais de 350 ohm.m de resistividade. O intervalo condutor superior detectado resulta da infiltração vertical de líquidos das lagoas, ou da base do aterro.

Centradas na anomalia condutiva selecionamos as sondagens SE-13, SE-38 e SE-39 (Fig. 7). Nelas o nível estático interpretado varia de 6,8 a 13 m e o horizonte condutor, de espessura entre 18 e 42 m, tem resistividade muito baixa, entre 4 e 16 ohm.m. Uma zona de transição entre a pluma e o aquífero normal é sugerida pelas sondagens SE-13 e SE-38.

Seções verticais da função resistividade aparente cruzando a anomalia condutiva estão mostradas na Figura 8. Em A-A' se infere que a pluma chega a influenciar esta parte do terreno

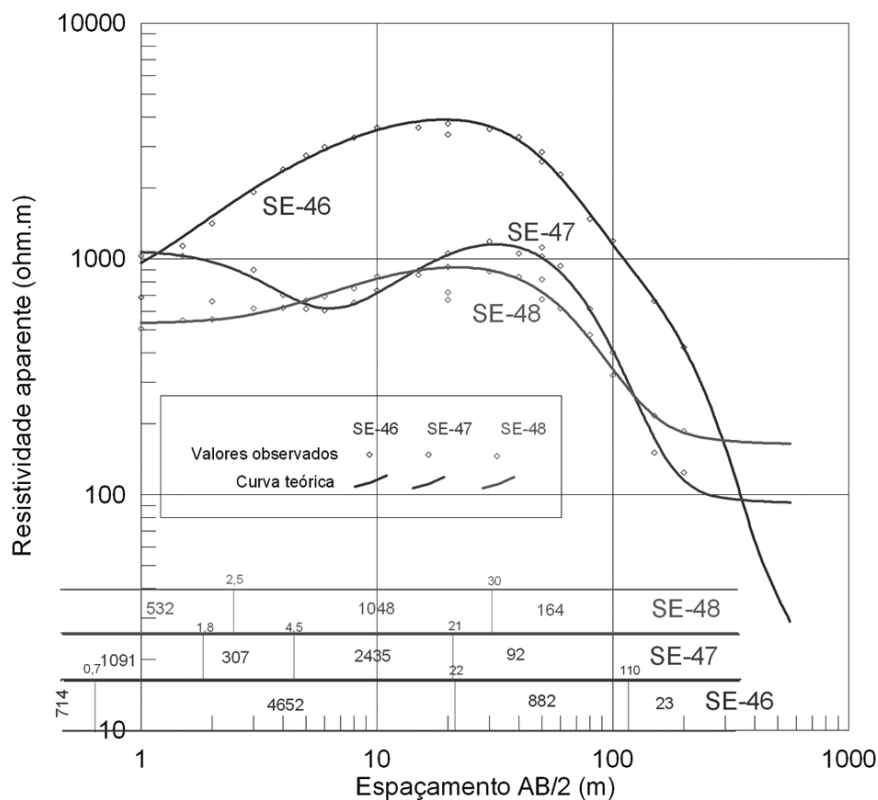


Figura 5 – Curvas das sondagens elétricas com espaçamentos AB/2 até 200 m, SE-46, SE-47 e SE-48.

como um *halus* dispersivo, principalmente quando se considera os dados de SE-30 e SE-32, que estão mais próximos ao lixão. O espalhamento transversal em plumas contaminantes é atribuído à dispersão mecânica através de poros e fraturas das rochas e a difusão molecular produzida pelo movimento dos poluentes de zonas de alta para zonas de baixa concentração. Na seção B-B', entre SE-21 e SE-44, justamente subjacente à lagoa de rejeito do curtume, a anomalia condutiva se apresenta com resistividade muito baixa (< 10 ohm.m). As linhas de contornos subverticais são interpretadas como indicativas de um contato abrupto entre fluidos de diferentes resistividades, e não como uma interface entre meios geológicos de diferentes composições.

A seção C-C' (Fig. 9) corta quase centralmente a área da anomalia geoeletrica condutora. Com base na interpretação quantitativa de suas sondagens elétricas construímos a seção geológica esquemática mostrada na mesma figura. Esta indica que a pluma possui um núcleo central onde a resistividade é de cerca de 4,0 ohm.m, capeado no topo por uma auréola de resistividade entre 30 e 40 ohm.m e, na base, por uma interface horizontal abrupta. No sentido lateral nordeste há uma zona transicional na qual a resistividade varia entre 120 e 150 ohm.m. A ex-

tensão lateral inferida para o antigo depósito de lixo é de cerca 150 m e a espessura do pacote de resíduos sólidos acumulados chega a 10 m.

A Figura 10 é um mapa da resistividade verdadeira na zona saturada do aquífero. Este permite melhor representar a extensão lateral da zona condutiva da pluma, assim como os prováveis níveis de intensidade dessa contaminação. Na parte mais central a resistividade real é inferior a 10 ohm.m. O limite entre a zona de transição e o aquífero não-contaminado pode ser aproximadamente tomado na curva de 300 ohm.m. O volume estimado para esta mancha, incluindo núcleo central e auréola de transição, é da ordem de  $3,3 \times 10^6 m^3$ , supondo uma porosidade média para os arenitos de 20%. Os números pretos neste mapa representam valores de resistividade da água medidos em amostras coletadas em poços e na rede de drenagem superficial. Os valores mais baixos observados coincidem com os locais onde a contaminação tem maior magnitude.

### Investigação da qualidade das águas

A avaliação geofísica foi confirmada pelos resultados de análises físico-químicas realizadas em amostras de águas superficiais e



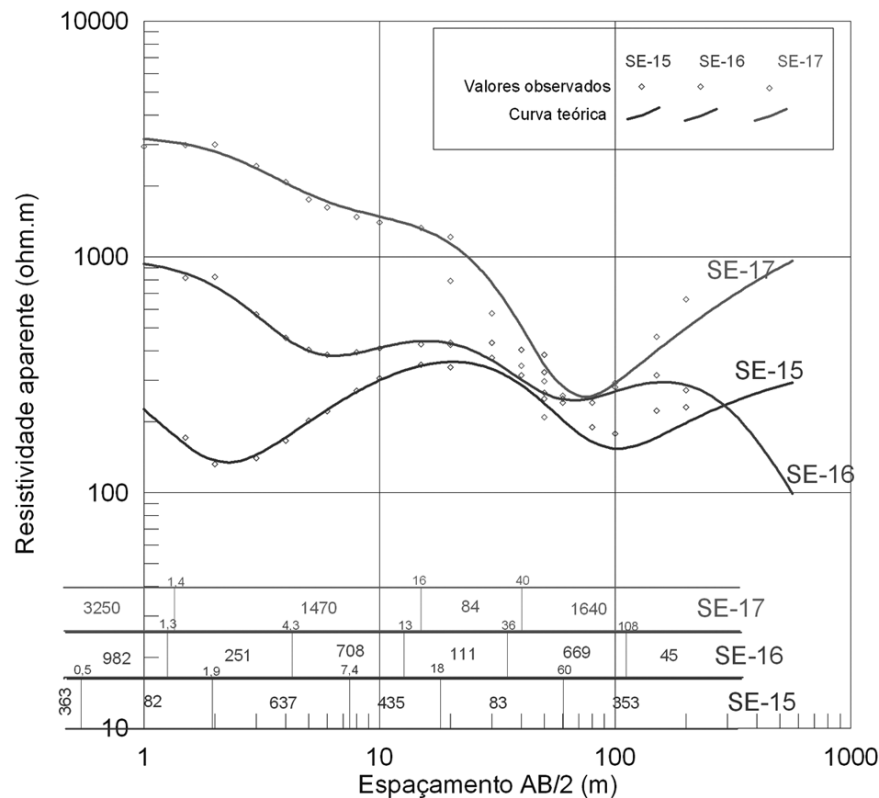


Figura 6 – Curvas das sondagens elétricas com espaçamentos AB/2 até 200 m, SE-15, SE-16 e SE-17.

subterrâneas coletadas em quatro poços pré-existent na área, em três novos poços especialmente construídos como parte desse trabalho e ao longo do rio Sauípe.

Há alterações nas concentrações em quase todos os parâmetros analisados. Alguns dos resultados destas análises são mostrados nos gráficos da Figura 11. Através deles se pode verificar a representatividade da avaliação geofísica ao dimensionar, de modo efetivo, a extensão de uma pluma de contaminação. Estes dados apontam a existência de uma severa contaminação das águas subterrâneas e superficiais. O rio Sauípe e seu afluente recebem o efluente do curtume praticamente sem tratamento. Os sinais de poluição são visíveis tanto pela cor das águas quanto por seu odor desagradável.

Os gráficos da Figura 11 representam alterações nas demandas química e bioquímica de oxigênio (DQO e DBO), dos nutrientes nitrogênio e fósforo, no total de sólidos dissolvidos e suspensos, nos totais de cátions e ânions. Há contaminação pelo metal cromo III resultante da descarga de efluentes do curtume.

À exceção do metal cromo, as águas subterrâneas também se encontram com quase todos os parâmetros físico-químicos alterados, principalmente nas amostras coletadas logo abaixo dos

depósitos de lixo no sentido do fluxo subterrâneo (poços PM-4 e PM-5). Os dados do poço de monitoramento PM-2, localizado a montante dos depósitos de lixo e usado como referência para representar a água virgem do aquífero, apresenta fortes indícios de contaminação com lixiviados do lixo. No mapa de isorresistividade do aquífero esse local é caracterizado como uma zona de transição atribuída à dispersão hidrodinâmica.

Altas concentrações de sólidos dissolvidos foram encontradas em PM-2, PM-4 e PM-5 na segunda coleta de dados. Investigações realizadas por Christensen et al. (2001) demonstram que o aumento do conteúdo em sais contribui para o aumento da densidade e as diferenças de densidade afetam, de forma significativa, o espalhamento vertical da pluma exatamente abaixo do aterro. Excetuando-se as águas que circulam em aquíferos cársticos-fissurais ou em poços mal desenvolvidos com produção de argila, silte e areias, as águas subterrâneas não possuem sólidos em suspensão (Feitosa & Manuel Filho, 1997). As amostras recolhidas nos poços apresentam, sem exceção, sólidos em suspensão em concentrações consideradas elevadas para águas subterrâneas, principalmente os poços PM-4 e PM-5 localizados sobre os depósitos de lixo.

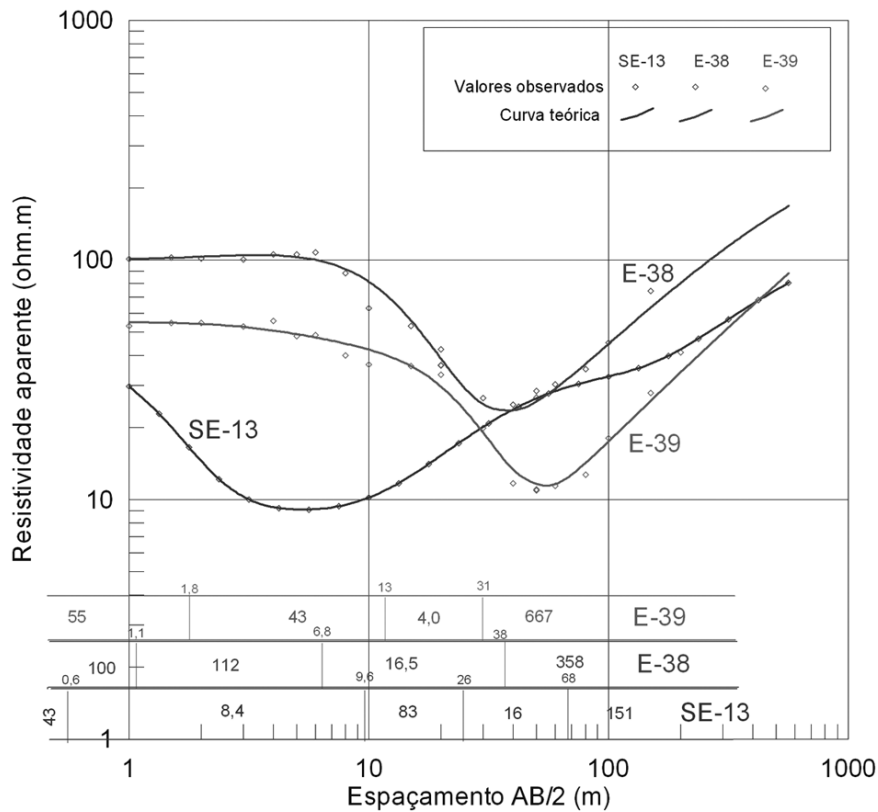


Figura 7 – Curvas das sondagens elétricas com espaçamentos AB/2 até 200 m, SE-13, SE-38 e SE-39.

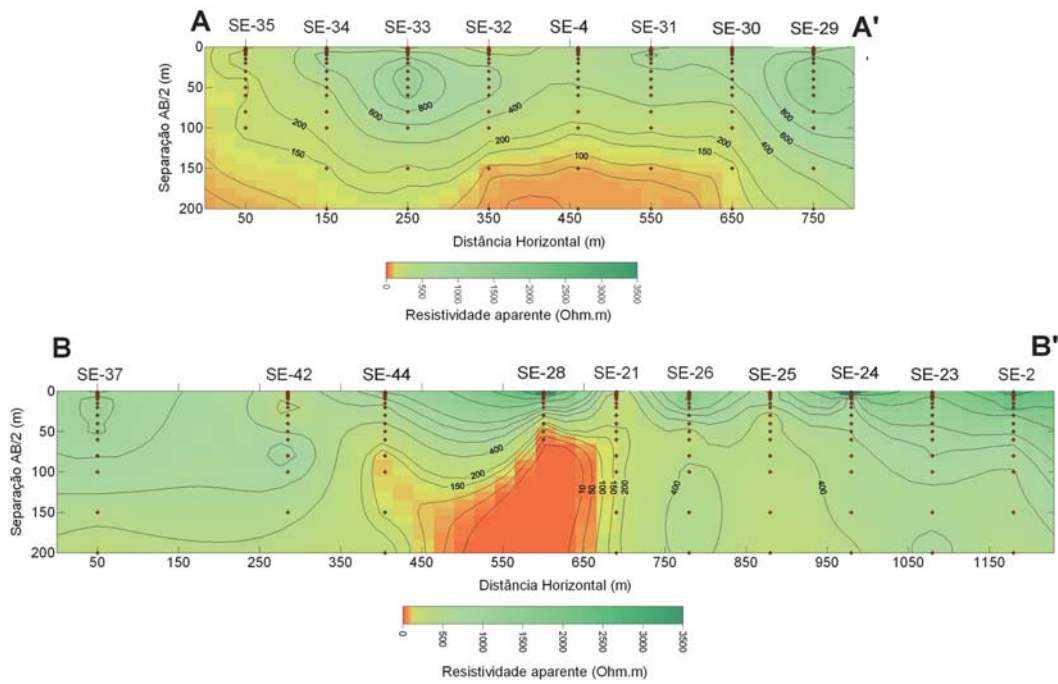


Figura 8 – Variação da resistividade com a profundidade ao longo das linhas A-A' e B-B'.

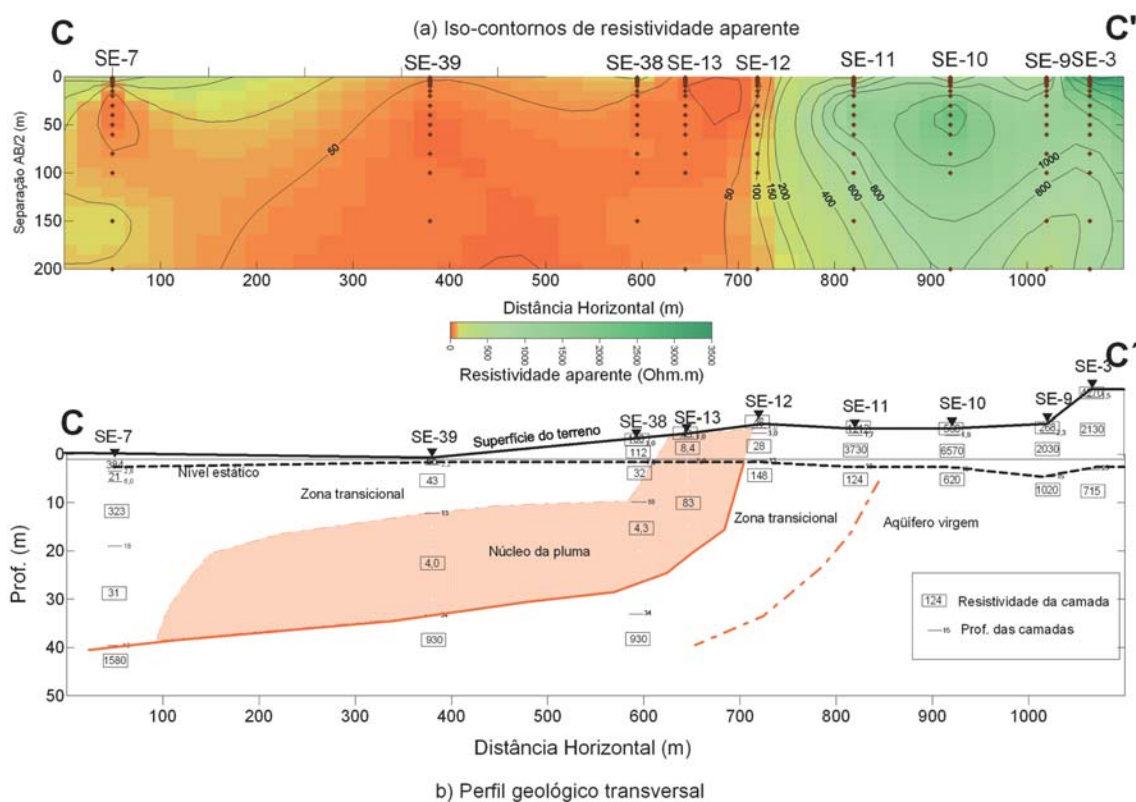


Figura 9 – Variação da resistividade com a profundidade e seção geológica ao longo da linha C-C'.

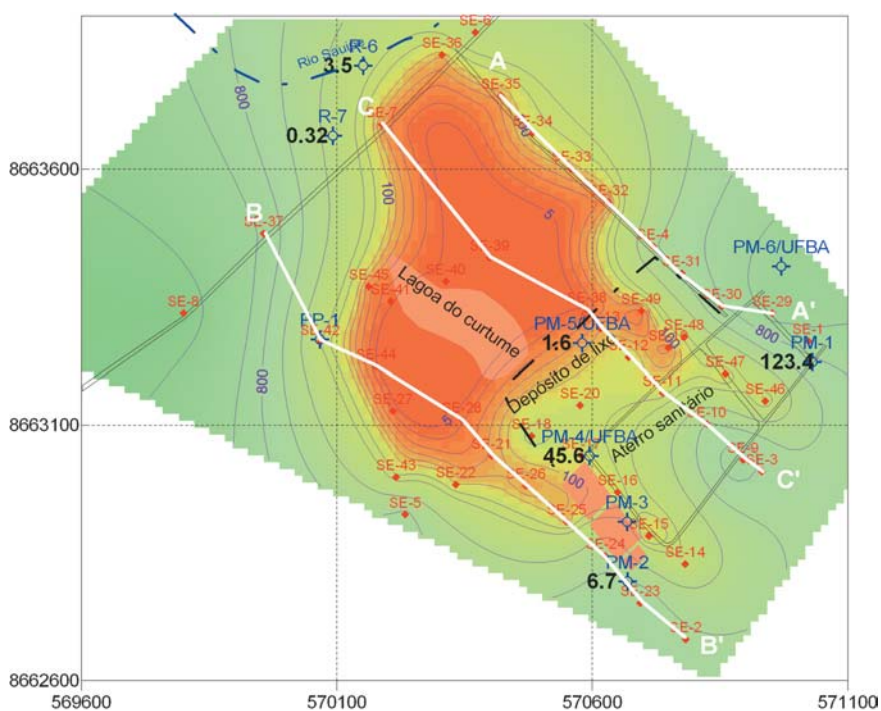
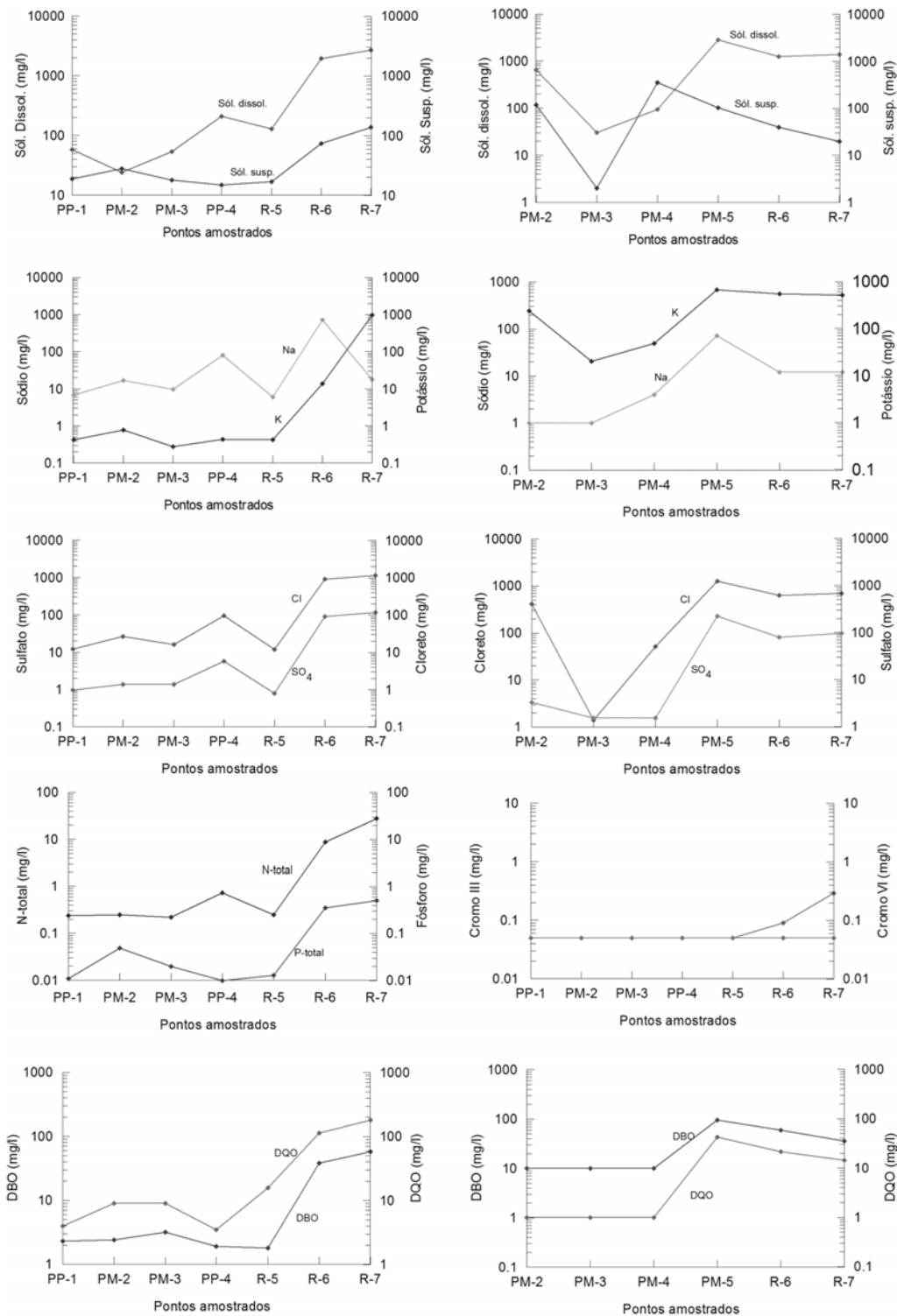


Figura 10 – Mapa da resistividade verdadeira do aqüífero imediatamente abaixo do nível estático.



**Figura 11** – Gráficos dos parâmetros sólidos dissolvidos e suspensos, cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), ânions ( $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^-$ ), nutrientes (N-total, P-total), cromo, DBO e DQO, analisados em águas de poços de monitoramento (PM-2, PM-3, PM-4 e PM-5), poços produtores (PP-1 e PP-4) e do rio Sauípe (R-5, R-6 e R-7).

No rio Sauípe, o ponto R-5, situado antes da descarga dos efluentes do curtume, apresenta sólidos dissolvidos em conformidade com os parâmetros legais. Contudo, quando se avalia os sólidos dissolvidos e suspensos nos pontos R-6 e R-7 as diferenças são realmente significativas, estando as respectivas concentrações bem acima dos padrões legais para águas das Classes 1 e 2. Tal fato implica em sérias conseqüências para a biota aquática, uma vez que, excessos de material suspenso e dissolvido em águas naturais levam a um aumento da dispersão da radiação, reduzindo a profundidade de penetração da energia fotossinteticamente ativa (Esteves, 1998).

O comportamento dos cátions em plumas de depósitos de lixo é governado por diluição, troca catiônica e precipitação. Cálcio, magnésio, sódio e potássio possuem alta afinidade pelos sítios de troca das argilas e estas estão predominantemente na base do aterro. Isto justifica talvez, as altas concentrações encontradas no poço localizado sobre o antigo depósito de lixo (PM-5). O avanço desses elementos com a frente de invasão da pluma pode ser mais lento devido às reações ocorrentes próximo ao aterro (Christensen et al., 2001).

As concentrações de cloreto e sulfato observadas em PP-1, PM-2, PM-4 e PP-4, na primeira coleta, estão compatíveis com os padrões normais previstos na legislação. O cloreto é considerado um íon inerte ou conservativo que não participa das reações físico-químicas com o material do aquífero. Existem alterações significativas nas concentrações deste ânion nos poços PM-2 e PM-5, na segunda coleta, indicativa de contaminação originada dos depósitos de lixo. Nas águas superficiais, em R-5 as concentrações estão normais, entretanto em R-6 e R-7, os valores deste ânion estão bem acima dos valores limites, fato que caracteriza a contaminação originada dos depósitos de lixo e dos despejos do curtume. O íon sulfato, cujos valores estão fortemente alterados no poço PM-5, tem sido detectado em elevadas concentrações em lixiviados de depósitos de lixo (Christensen et al., 2001).

As altas concentrações de DBO e DQO nos pontos R-6 e R-7 no rio Sauípe, apontam para uma depleção do oxigênio dissolvido. Estes parâmetros avaliados conjuntamente com as alterações na concentração dos nutrientes nitrogênio e fósforo, dos sólidos dissolvidos e em suspensão e da condutividade e turbidez, revelam processo de eutrofização das águas do rio. Estas condições são ampliadas por uma alteração no fluxo normal (barramento) a que foi submetido o rio para a construção de um clube balneário. No poço PM-5 situado no antigo depósito de lixo se observa também altos valores de DBO, DQO e amônia caracterizando a contaminação proveniente de seus lixiviados.

## DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os dados geofísicos levantados sugerem uma extensa contaminação do aquífero definida por uma expressiva anomalia de resistividade delineada em mapas e seções verticais. Em virtude de não haver nenhum tipo de impermeabilização no antigo depósito de lixo e da provável conectividade da lagoa de despejo do curtume com o aquífero subjacente, é sugerido que esta anomalia se deva a infiltração e percolação de líquidos lixiviados do lixo e do despejo do curtume.

Os dados das resistividades verdadeiras das unidades geológicas em subsuperfície delineiam a pluma lateralmente e em profundidade. Esta se caracteriza por conter um núcleo central mais concentrado envolvido por uma auréola de transição. É possível que esta mancha de contaminação esteja fluando dinamicamente sobre águas mais doces abaixo de uma profundidade de cerca de 40 m. Através de uma zona transicional esta pluma se estende até as áreas do aterro atual e de um bosque de eucaliptos localizado a oeste do aterro. A sessão mais homogênea da pluma se concentra sob a área do antigo depósito de lixo e sob a lagoa de rejeito do curtume, onde a resistividade da zona saturada alcança valores inferiores a 10 ohm.m. Esses resultados são confirmados pelos dados das análises físico-químicas de águas coletadas em poços a montante do curtume.

As águas do rio Sauípe também estão contaminadas. Os resultados de DBO e DQO altos apontam para uma depleção do oxigênio dissolvido. As implicações disso para a biota aquática são sérias, uma vez que, o processo de eutrofização quebra a estabilidade do ecossistema (homeostasia), resultado do equilíbrio existente entre a produção de matéria orgânica e o seu consumo e decomposição. Com o rompimento do equilíbrio, o ecossistema passa a produzir mais matéria orgânica do que é capaz de consumir e decompor, levando ao aparecimento de "*blooms*" de algas fitoplanctônicas e perda da biodiversidade.

Alterações na concentração do metal cromo no rio Sauípe caracterizam a contaminação promovida pela descarga de efluentes do curtume. O curtimento do couro utilizando o cromo é hoje o principal método aplicado para estabilizar as fibras de colágeno da pele animal (Alcântara, 1999). A toxidez dos elementos-traços reside principalmente na sua capacidade de interferir em processos enzimáticos, e na sua pouca mobilidade no organismo vivo, em virtude do pequeno tamanho e das cargas elétricas duplas e triplas. Esta baixa mobilidade faz com que estes se acumulem, provocando profundas modificações no metabolismo e podendo causar a morte do organismo afetado. Por meio das cadeias alimentares, estes elementos são distribuídos pela biota do ambi-

ente aquático podendo atingir populações humanas que, devido aos efeitos cumulativos na cadeia alimentar, são as mais penalizadas pelas conseqüências da contaminação.

Neste trabalho, a integração de estudos geofísicos com conhecimentos de outras áreas, tais como a geoquímica e as ciências biológicas, revelou uma nova e estimulante perspectiva de interdisciplinaridade para o diagnóstico de áreas contaminadas. Estes resultados se configuram também como de suma importância para as fases de monitoramento e de remediação, tendo como vantagens principais a economia dos recursos empregados e a rapidez nos resultados.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa PROSAB/FINEP pelo financiamento da pesquisa, ao CPGG/UFBA por ter propiciado ambiente e infra-estrutura essenciais à realização do trabalho, bem como a Prefeitura de Alagoinhas pelo apoio logístico. O.A.L. de Lima agradece também ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa.

### REFERÊNCIAS

- ACWORTH RI & JORSTAD LB. 2006. Integration of multi-channel piezometry and electrical tomography to better define chemical heterogeneity in a landfill leachate plume within a sand aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*, 83(1): 200–220.
- ALCÂNTARA MAK de. 1999. Eluviação de crômio (III) de resíduo de curtume em colunas de dois latossolos com diferentes texturas. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – UNICAMP, Campinas, São Paulo. 154 pp.
- BAHIA. 2004. Plano Diretor de Recursos Hídricos. Bacia do rio Sauípe. Disponível em: <<http://www.cra.ba.gov.br>>. Acesso em: 28 maio 2004.
- BRASIL. 2004. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.saude.gov.br>>. Acesso em: 28 maio 2004.
- BRASIL. 2005. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 28 maio 2004.
- BJERG PL, ALBRECHTSEN P, KJELDEN P & CHRISTENSEN TH. 2005. The Groundwater geochemistry of waste disposal facilities. *Environmental Geochemistry*. London: Elsevier, 1st ed. 629 pp.
- BUTT TE & ODUYEMI KOK. 2003. A holistic approach to concentration assessment of hazards in the risk assessment of landfill leachate. *Environmental International*, 28: 597–608.
- CHRISTENSEN TH, KJELDEN P, BJERG PL, JENSEN DL, CHRISTENSEN JB, BAUN A, ALBRECHTSEN H-J & HERON G. 2001. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, 16: 659–718.
- ELIS VR & ZUQUETTE LV. 2002. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(1): 119–134.
- ESTEVES F de A. 1998. Fundamentos de limnologia. Rio de Janeiro: Interciência, 2 ed. 602 pp.
- FEITOSA FAC & MANUEL FILHO J. 1997. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID – UFPE, 412 pp.
- FURTADO C. 1984. Teoria e política do desenvolvimento econômico. São Paulo: Ed. Abril, 240 pp.
- GHIGNONE JI. 1979. Geologia dos sedimentos fanerozóicos do Estado da Bahia. In: INDA HAV. (Ed.). *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia – Textos Básicos*. Salvador, SME/CPM, 1: 23–117.
- KJELDEN P, BJERG PL, RÜGG K, CHRISTENSEN TH & PEDERSEN JK. 1998. Characterization of an old municipal landfill (Grindsted, Denmark) as a groundwater pollution source: Landfill hydrology and leachate migration. *Waste Management Research* 16(1): 14–22.
- MacFARLANE DS, CHERRY JA, GILLHAM RW & SUDICKY EA. 1983. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study: 1. Groundwater flow and plume delineation. *Jour. Hydrol.*, 63: 1–29.
- MECKENSTOCK RU, MORASCH B, GRIEBLER C & RICHNOW HH. 2004. Stable isotope fractionation analysis as a tool to monitor biodegradation in contaminated aquifers. *Journal of Contaminant Hydrology*, 75: 215–255.
- OYGARD JK, MAGE A & GJENGEDAL E. 2004. Estimation of the mass-balance of selected metals in four sanitary landfills in Western Norway, with emphasis on the heavy metal content of the deposited waste and the leachate. *Water Research*, 38: 2851–2858.
- SEI. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. 1994. Perfil da região econômica litoral norte, Salvador: Série Perfis Regionais, 288 pp.
- ZHU C, HU FQ & BURDEN DS. 2001. Multi-component reactive transport modeling of natural attenuation of an acid groundwater plume at a uranium mill tailings site. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52: 85–108.

## NOTAS SOBRE OS AUTORES

**Patrícia de Andrade Pereira.** Graduada em Ciências Biológicas – Bacharelado em Recursos Ambientais (1999), pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Mestre em Geoquímica e Meio Ambiente (2004) e, atualmente doutoranda do Curso de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia. Áreas de atuação: Estudos diagnósticos e de monitoramento e remediação de áreas contaminadas; Recuperação de áreas degradadas; Educação ambiental e Etnobiologia.

**Olivar Antônio Lima de Lima.** Graduado em Geologia (1967) e Mestre em Geologia Estrutural (1970) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Doutor em Geofísica (1979) pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Pós-Doutorado (1989-1990) no Departamento de Engenharia de Petróleo da Universidade do Texas, Austin. Professor Titular da UFBA. Áreas de atuação: Aplicação de métodos geofísicos na exploração de água subterrânea, petróleo e problemas ambientais; Petrofísica. É sócio da SBGf, SBG e ABAS; e da SEG, EAGE, AGU e SPWLA.