

Caracterização geofísica em aterro de resíduos sólidos para avaliação de condicionantes de instabilidade geotécnica

Geophysical characterization in solid waste landfill for evaluation of geotechnical instability conditioners

César Augusto Moreira¹, Letícia Hirata Godoy², Diego de Souza Sardinha³, Fabiano Tomazini da Conceição², Carolina Del Roveri³

¹Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Avenida 24-A, 1515, Caixa Postal 178, Bela Vista, CEP 13506-900, Rio Claro, SP, BR (moreirac@rc.unesp.br)

²Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Rio Claro, SP, BR (leticiahirata@gmail.com; ftomazini@rc.unesp.br)

³Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL, Poços de Caldas, MG, BR (diegosardinha@yahoo.com.br; carolina.roveri@unifal-mg.edu.br)

Recebido em 26 de junho de 2012; aceito em 16 de outubro de 2012

Resumo

A disposição de resíduos sólidos pode gerar problemas ao ambiente, além do risco potencial de instabilidades geotécnicas mesmo em obras planejadas, como disposições em pilhas elevadas ou pontas de aterro, por representarem meras adaptações em obras de engenharia civil. A cidade de Leme, SP, produz aproximadamente 35 t/dia de resíduos sólidos urbanos, depositados em um aterro localizado no distrito de Barro Preto. Este trabalho é um diagnóstico ambiental de um aterro de resíduos sólidos, a partir da análise hidrogeológica e levantamento geofísico, com indícios de instabilidade geotécnica verificados na área, para análise dos condicionantes que provocam a surgência de chorume nas laterais do aterro e sua relação com movimentos de massa e instalação de ravinas no solo de cobertura, com consequente exposição dos resíduos. Os resultados indicam horizontes de baixa resistividade conectados com pontos de surgência, gerados pela decomposição de matéria orgânica. Tais horizontes resultam da concentração de chorume em alguns locais, que, por sua vez, devem provocar a perda de coesão dos materiais que constituem a pilha. Os resultados são áreas com fluxo de massa por movimentos rotacionais, que, aliado ao fluxo superficial de águas pluviais, evolui para ravinas e exposição de resíduos, preferencialmente nos pontos de surgência. O fluxo de chorume em superfície atinge áreas além dos limites do aterro, com impacto direto na agricultura local e risco aos transeuntes que utilizam a rodovia margeada pelo aterro.

Palavras-chave: Eletroresistividade; Chorume; Surgência; Movimento de massa; Ravina.

Abstract

The disposal of solid waste can create environmental problems, in addition to the potential risk of instability even in planned geotechnical works, such as provisions in stacks or high ends of the landfill, because they represent mere adjustments in civil engineering works. The Leme city, SP, generates about 35 t/day of municipal waste, that are deposited in a landfill located in the Barro Preto neighborhood. This work conducted a geophysical survey, based on geotechnical instability evidence in area, for analysis of the conditioners that cause on the sides leachate resurgence landfill and its relationship to mass movements and ravines installation in cover soil, with consequent waste exposure. The results indicate horizons of low resistivity connected with resurgence points generated by the organic matter decomposition contained in the waste. Such horizons result in leachate concentration in some places, which, in turn, may lead to loss of cohesion of the materials constituting the residues mass. The results are areas with mass flow by rotational movements, which, together with the surface flow of rainwater, evolves into ravines and exposed residues, preferably at the resurgence point. The leachate flow on the surface affects areas beyond the limits at landfill with direct impact on local agriculture and risk to pedestrians using the highway bordered by the landfill beyond the soil and the local aquifer.

Keywords: Electrical resistivity; Leachate; Seepage; Mass movement; Ravine.

INTRODUÇÃO

O lixo gerado pela atividade cotidiana dos cidadãos, pelos hábitos de consumo e pela produção industrial é um dos principais problemas vividos pelos centros urbanos. Esse problema é agravado à medida que a população urbana e a quantidade de resíduos gerada por habitante diariamente aumentam a taxas significativas, enquanto diminuem as alternativas de áreas para a disposição final desses resíduos. Somado a esse fato, na maioria das cidades brasileiras, o destino final dos resíduos sólidos urbanos é totalmente inadequado.

A disposição incorreta ou o manuseio indevido de resíduos sólidos geram sérios problemas ao homem e ao ambiente, principalmente se ocorrerem de maneira inadequada a céu aberto, com poluição do solo, da água e do ar (Consoni e Peres, 1995; Reichert, 1999). Aterros sanitários bem construídos (impermeabilizados e com drenos de coleta de lixiviados), operados com eficiência (com cobertura de solo ao final de cada período de serviço) e em localização correta (onde a vulnerabilidade do aquífero subjacente não tenha índices altos) são alternativas seguras para muitos resíduos, mas não para todos (Oliveira e Pasqual, 2004).

Outro risco potencial são instabilidades geotécnicas em aterros com características específicas, como disposições em pilhas elevadas ou em pontas de aterro. Essa é uma alternativa interessante do ponto de vista de otimização de espaço, por possibilitar o acúmulo de materiais em quantidades muito superiores em relação a formas de disposição, como aterros em vala ou em patamar único, embora haja um desnível entre a extremidade superior e a base da pilha de resíduos. Tais soluções são adaptações usadas em obras de engenharia, em muitas das quais se utilizam materiais como solo, saprólito ou fragmentos de rocha, que, após o lançamento e compactação, resultam em estruturas relativamente homogêneas e contínuas, com possibilidade de controle da porosidade e permeabilidade internas pela seleção dos materiais, além de dispositivos externos para escoamento de águas superficiais.

Contudo, a adaptação desse procedimento em aterro é algo complexo em razão da heterogeneidade intrínseca dos materiais utilizados, além do fator principal, relacionado a modificações temporais ocasionadas por processos físico-químicos que resultam na liberação de líquidos e gases que, pelo escape ou migração, provocam a redução do volume total inicialmente disposto. Essa geração de líquidos é algo natural e resulta da decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos, cujo fluxo interporo, ou seja, entre resíduos de decomposição bastante lenta, como plástico ou borracha, resulta em risco geotécnico pela possibilidade de rastejo, escorregamento e fluxo de massa.

A Geofísica é uma ferramenta caracterizada como uma forma indireta de investigação efetiva em estudos geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos, aplicada para determinação da espessura de solo, profundidade de topo rochoso, zonas

saturadas e insaturadas, dados essenciais para a realização de perfurações voltadas à coleta de amostras para ensaios geotécnicos, análises químicas, instalação de sistemas de bombeamento ou monitoramento ambiental.

Além de ser procedimento mais rápido e de custos mais baixos em relação aos métodos de investigação direta, os métodos geofísicos apresentam a vantagem de não causar nenhuma modificação no local a ser estudado (Santos et al., 2009; Moreira, Aquino, Dourado, 2007). Constituem uma alternativa no diagnóstico de áreas contaminadas em razão da rapidez e do baixo custo em estudos ambientais. Essa ferramenta pode auxiliar na detecção e no monitoramento de áreas contaminadas, associada a métodos diretos de investigação (Moreira e Braga, 2009a; Moreira, Aquino, Dourado, 2007; Mondelli et al., 2010).

O presente trabalho realizou uma avaliação do histórico de evolução, seguido por estudo geofísico, numa área de disposição de resíduos sólidos domiciliares, construída em pilha com rampas e patamares, para uma avaliação hidrogeológica e relação entre pontos de surgência de chorume nas laterais na pilha e áreas com escorregamento e erosão do solo de cobertura com exposição dos resíduos.

CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Atualmente, a cidade de Leme gera cerca de 35 t/dia de lixo urbano, depositado em uma área localizada no bairro do Barro Preto. O aterro foi construído em 1997 em atendimento às exigências do órgão ambiental estadual (CETESB), que autorizou a implantação dele de forma provisória, condicionada ao compromisso firmado pela prefeitura de Leme de construir brevemente um aterro sanitário definitivo, em local mais adequado e de acordo com os procedimentos e normas técnicas em vigor.

Oito anos após sua criação, em dezembro de 2005, a área não dispunha de controle algum, seja de acesso, cobertura dos resíduos ou proteção do solo. O chorume corria em superfície, com as águas pluviais, com parte infiltrada no solo e parte escoada para áreas vizinhas (Figura 1). Essa área atingiu sua capacidade máxima em 2009 e atualmente está desativada. As 1.050 t/mês de lixo produzidas na cidade estão sendo depositadas ao lado desta (Figura 2).

O aterro está assentado sobre arenitos pertencentes à Formação Piramboia, localmente caracterizados por solo arenoso silto pouco espesso, resultantes da alteração de arenitos eólicos litificados de granulação fina a média. Essa formação representa um importante sistema aquífero, que, com as rochas da Formação Botucatu, constitui o Sistema Aquífero Guarani.

Localmente, ocorre aquífero livre contido em solo arenoso, com profundidade em torno de 10 m, assentado sobre



Figura 1. Histórico de ocupação do aterro sanitário de Leme (SP). (A e B) Disposição de resíduos na área em 2005. (C e D) Vista lateral do aterro a partir do lado da rodovia de acesso e a partir de área de cultivo de cana-de-açúcar em 2012. (E e F) Área de disposição atual de resíduos, com detalhe para manta de impermeabilização e dutos de emissão de gases.

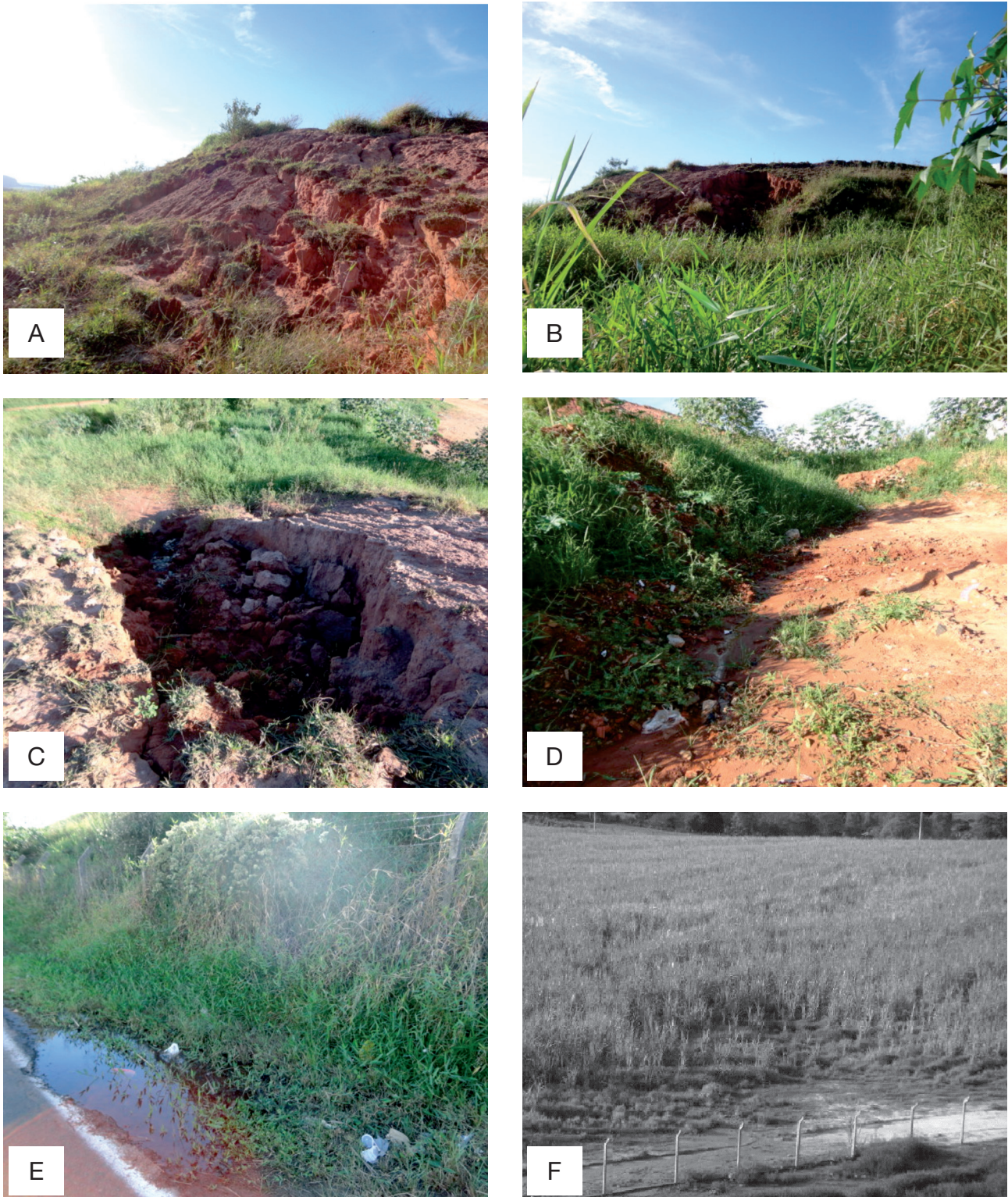


Figura 2. Situação atual do aterro sanitário. (A e B) Instabilidade geotécnica, com fluxo gravitacional do solo de cobertura e ação de processos erosivos em diversos pontos. (C e D) Detalhe do avanço do processo erosivo, com exposição de resíduos enterrados. (E e F) Áreas de aporte de cromo por escoamento superficial ao longo da rodovia de acesso ao aterro e em área lateral com cultivo de cana-de-açúcar.

arenitos da Formação Piramboia. O sentido de fluxo superficial e subterrâneo acompanha o gradiente topográfico no sentido nordeste da área de estudos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Eletroresistividade é um dos métodos geofísicos mais aplicados em estudos ambientais e hidrogeológicos em razão da ampla variabilidade do parâmetro físico resistividade elétrica na natureza. Além da sensibilidade desse método geofísico, a presença de compostos orgânicos e inorgânicos no ambiente geológico, como chorume, necrochorume, vinhaça, derivados de petróleo, pouco ou bastante degradados (Moura e Malagutti Filho, 2003; Silva, Malagutti, Moreira, 2009; Cruz et al., 2008; Moreira e Braga, 2009b).

Esse método geofísico emprega corrente elétrica artificial introduzida no terreno através de eletrodos de corrente, ao passo que mede a diferença de potencial gerada por meio de eletrodos de potencial (Orellana, 1972). Este trabalho utilizou as técnicas de caminhamento elétrico (CE) e de sondagem elétrica vertical (SEV).

Na técnica de caminhamento elétrico, foi adotado o arranjo dipolo-dipolo, definido pelo uso de pares de corrente e pares de potencial, com espaçamento fixo entre eletrodos de corrente e potencial, com aberturas crescentes dos pares de potencial em relação aos pares de corrente para medidas em maiores profundidades (Keary, 2010). Essa técnica possibilita medidas do parâmetro físico resistividade elétrica em duas dimensões (2D).

Na técnica de sondagem elétrica vertical, foi adotado o arranjo Schlumberger, caracterizado por um par de eletrodos de potencial no centro do alinhamento e eletrodos de corrente nos extremos da linha, com aumento sucessivo dos eletrodos de corrente em relação aos eletrodos fixos de potencial, para o alcance de maiores profundidades de investigação (Keary, 2010). Essa técnica permite medidas do parâmetro físico resistividade elétrica em uma dimensão (1D).

Foram realizadas quatro linhas de caminhamento elétrico, com espaçamento entre eletrodos de 20 m e dez níveis ou profundidades de investigação, além de três sondagens elétricas verticais com abertura máxima dos eletrodos de corrente de 320 m (Figura 3).

CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DO CONTAMINANTE

A decomposição de resíduos orgânicos em aterros de resíduos sólidos por longos períodos envolve processos físico-químicos e químicos, notavelmente hidrólise, hidratação, carbonatação, oxidação e redução, além de degradação biológica — microbial —, que resultam na dissolução e deterioração, geração de gás e produção de chorume.

A infiltração de águas de chuva, além de outros líquidos presentes nos resíduos, promove dissolução de constituintes minerais e aumento da porosidade, com consequente elevação da condutividade hidráulica. Esse processo de lixiviação pode remover elementos minerais abundantes no meio geológico, como Ca, Mg, K, N e P, ou remover materiais estruturados como argilominerais, com alteração na cimentação ou concentração de íons na matriz dos materiais drenados por chorume, com alterações significativas nas propriedades físicas (Meju, 2000).

Reações de troca catiônica acelerada por atividade bacteriana podem causar mudanças na estrutura, composição e porosidade dos materiais que sustentam o aterro. Por exemplo, o CH_4 pode ser convertido em CO_2 e H_2O por metabolismo microbiano, em que a combinação $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ pode formar ácido carbônico, instável e de curta duração. Esse líquido é rico em bactérias, sais inorgânicos e matéria orgânica (Meju, 2000).

Grandes quantidades de água podem permear os resíduos pouco compactados em aterros antigos, quando comparados a aterros recentemente compactados, que resulta de forma relativa em baixas concentrações de constituintes químicos em chorume proveniente de aterros antigos, com elevada porosidade e permeabilidade (Radnoff, Hollingshead, Anderson, 1992).

Os fluidos produzidos em aterros muitas vezes são ácidos, com variações associadas ao tipo de substrato, clima, tipos de resíduos, variações sazonais, entre outros. O metano bacteriogênico é formado pela fermentação de material orgânico sob baixos teores de oxigênio. A partir da produção de chorume, ocorrem diversas mudanças que envolvem estágios aeróbicos — acetogênico — e

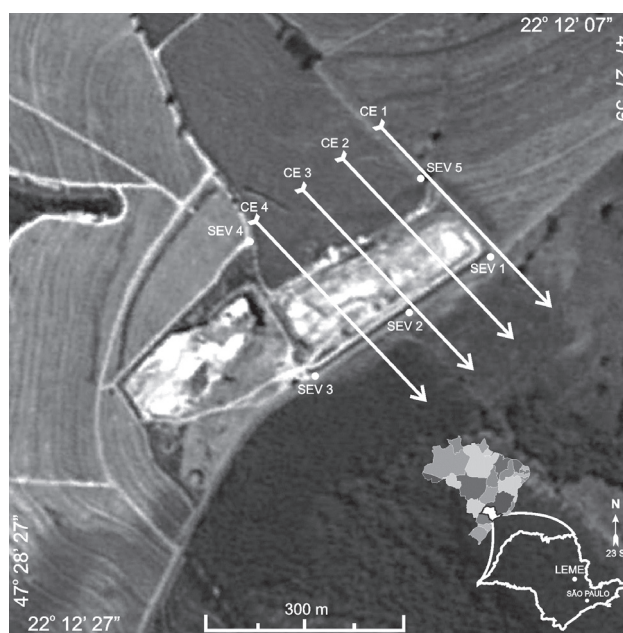


Figura 3. Localização da área, com detalhe para os pontos de aquisição de dados geofísicos.

anaeróbicos — metanogênico. O conteúdo de carbono orgânico total, ácidos graxos totais ou acetonas e sólidos totais dissolvidos é alto durante a acetonação e baixo durante a metanogênese (Birks e Eyles, 1997).

Dessa forma, o chorume proveniente de aterros recentes é caracterizado por altos níveis de ácidos orgânicos, amônia e sólidos totais dissolvidos, mas grande parte da massa biodegradada é fragmentada com o tempo, e a concentração desses parâmetros decresce no material livixiado de aterros antigos (Farquhar, 1989).

O chorume pode conter substâncias tóxicas e perigosas em formas sólida e gasosa e pode apresentar elevadas concentrações dos íons cloreto, ferro e zinco. Os elementos com elevada mobilidade iônica geralmente apresentam altas concentrações em comparação aos elementos de baixa mobilidade iônica (Bagchi, 1987).

A composição do chorume depende do tipo e da idade do resíduo depositado, taxa de infiltração de água e pH. Entretanto, a quantidade de gás e chorume pode ser afetada pela profundidade de disposição do material, condições climáticas, variações do nível freático, espessura do material de recobrimento e controle de entrada e saída de líquidos da área (Farquhar, 1989). É esperado que nas partes rasas do material ocorra rápida decomposição aeróbica, enquanto nos resíduos em profundidade, somente a decomposição parcial sob condições aeróbicas.

O transporte de chorume através do aterro é lento, inconsistente, não uniforme e descontínuo em muitos casos, dependendo do grau de compactação do material e de mudanças sazonais no suprimento de água do sistema (Fang, 1995).

Reações exotérmicas de controle biogeoquímico são reconhecidas por causarem aumento da temperatura na água subterrânea em aterros por causa do ingresso de chorume das partes rasas do aterro. Consequentemente, ocorre grande atividade de bactérias e reações de troca iônica de forma progressiva nas porções inferiores do aterro. Tais reações podem resultar em alterações na porosidade dessas porções e no substrato geológico em contato direto.

O chorume que adentra num aquífero anaeróbico é lentamente biodegradado, com a produção de ácidos graxos que podem reagir com os materiais do aquífero, com consequentes mudanças no fluxo químico próximo ao nível freático (Bennett e Siegel, 1987). Num ambiente com baixos teores de oxigênio, materiais inorgânicos contidos no chorume podem ser dissolvidos na água subterrânea.

A quantidade de água subterrânea contaminada resultante da invasão de chorume depende da hidrogeologia da área e da capacidade de atenuação do substrato. Esse processo pode ser efetivo por diluição e dispersão em água subterrânea, em aquíferos de alta permeabilidade e com elevada condutividade hidráulica. No caso de aquíferos menos permeáveis ou de baixa condutividade hidráulica, a contaminação carregada com sais inorgânicos pode provocar mineralizações (Meju, 2000).

Abaixo do nível freático, a mistura de chorume com a água subterrânea e reações com o material do substrato forma uma pluma eletricamente condutiva. Além dos limites da pluma, a quantidade de sólidos totais dissolvidos e a condutividade elétrica apresentam valores intrínsecos aos do ambiente natural (Bennett e Siegel, 1987).

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foi utilizado o resistivímetro Terrameter SAS 4000 para aquisição de dados geofísicos, equipamento que possibilita leituras de resistividade elétrica, cargabilidade e potencial elétrico natural, por meio de ciclos periódicos de leitura em intervalos de tempo programados (ABEM, 2006).

Os resultados do caminhamento elétrico CE 1 foram insatisfatórios, provavelmente em decorrência da elevada resistência de contato em razão do solo bastante seco. Dessa forma, essa linha não foi considerada neste trabalho.

As demais linhas foram processadas no programa Res2Dinv (Loke e Baker, 1996), que permite a inversão de dados brutos e a geração de modelos geoeletricos. O produto da inversão de dados são seções distância *versus* profundidade e valores de resistividade real. Em decorrência de desníveis topográficos acentuados, todas as seções apresentam correção de elevação.

As linhas de caminhamento são caracterizadas pela resistividade bastante elevada, com áreas que apresentam valores superiores a 46.000 Ω .m, seja sobre o intervalo de resíduos seja sobre os terrenos externos acima ou abaixo do aterro (Figuras 4A a 4C). Tais valores predominam nas porções mais profundas dos modelos, abaixo da camada de resíduos. A ocorrência de arenitos litificados, aquisição em estação climática seca, espaçamento entre eletrodos, dentre outros, são fatores que podem justificar valores de resistividade elevados.

A linha CE 2 é caracterizada por intervalos de baixa resistividade bastante acentuados nas áreas externas do aterro, entre 0 e 10 m de profundidade a sudeste e entre 0 e 20 m de profundidade a noroeste, com valores abaixo de 800 Ω .m. Sobre os resíduos também ocorrem áreas de baixa resistividade lateralmente contínuas e com profundidades máximas em torno de 8 m (Figura 4A).

A linha CE 3 apresenta um padrão semelhante ao descrito para a linha CE 2, embora nesse caso haja peculiaridades distintas, como uma área de baixa resistividade acentuadamente mais profunda na área externa a sudeste do aterro, entre 0 e 20 m de profundidade, e valores de resistividade semelhantes à linha anteriormente descrita. Outra característica é a presença de área de baixa resistividade lateralmente limitada, mas que cruza todo o intervalo de resíduos, desde a superfície até cerca de 40 m de profundidade. A altura dos resíduos empilhados varia entre 20 e 25 m e, portanto, esse intervalo de baixa

resistividade é contínuo desde o intervalo de resíduos até o solo da base do aterro (Figura 4B).

A linha CE 4 é caracterizada por valores de resistividade acima de 60.000 Ω .m em porções mais profundas, além de uma faixa rasa marcadamente mais resistiva na área externa noroeste e ausente nas seções anteriormente descritas. Em semelhança à seção CE 2, há uma área de baixa resistividade no intervalo com resíduos, desconexa da superfície, mas aparentemente conectada a uma faixa rasa externa a sudeste do aterro. Essa área externa a sudeste é definida por uma faixa contínua de baixa resistividade e que varia desde a superfície até 15 m de profundidade (Figura 4C).

A continuidade das camadas de baixa resistividade do aterro para a área externa a noroeste, ou seja, o montante do fluxo da água subterrânea, indica que o chorume produzido pela decomposição de matéria orgânica contida nos resíduos atinge áreas além dos limites do aterro e deve contaminar o solo e o aquífero livre local.

Diferenças quanto ao grau de compactação dos materiais que compõem o aterro, isto é, baixa compactação dos resíduos em relação ao solo de cobertura, resultam em camadas altamente drenáveis sustentadas por camadas de baixa permeabilidade, análogas a sistemas aquíferos naturais.

A conjugação desse contexto ao potencial de fluxo por gravidade ocasionado pela altura da pilha de resíduos são

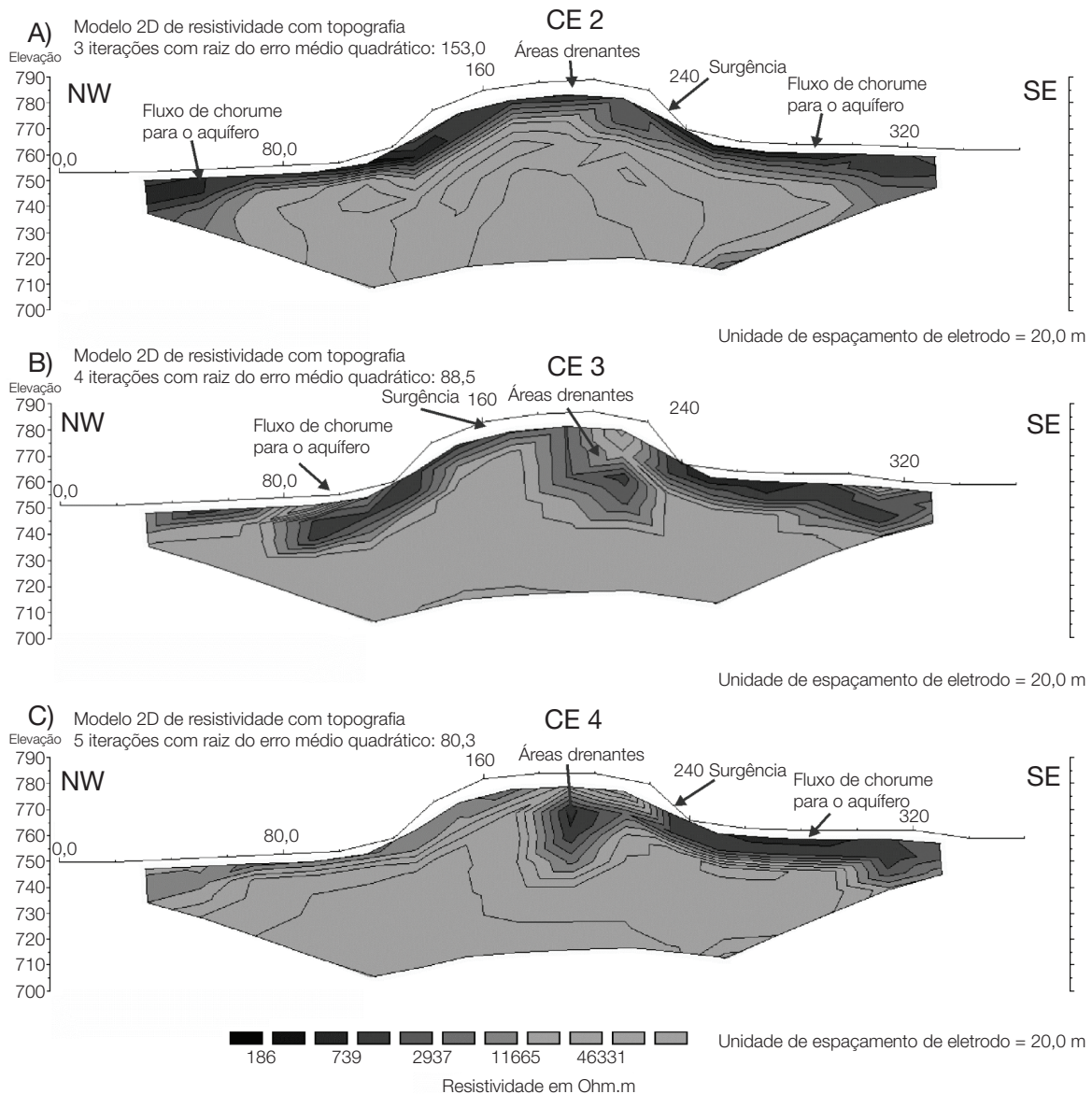


Figura 4. Interpretação dos modelos de inversão (A) CE 2; (B) CE 3; (C) CE 4.

fatores que estimulam o fluxo de chorume para camadas mais profundas e até a base do aterro. As áreas de baixa resistividade que cruzam os resíduos de cima a baixo corroboram essa hipótese.

De forma concomitante, ocorre também um vetor de fluxo lateral predominante, com surgência de chorume nas laterais basais da pilha de resíduos e migração superficial para áreas além dos limites do aterro, seguido de infiltração e acesso ao aquífero livre.

Esses pontos de surgência aparentemente evoluem para ravinas e possivelmente estimulados pelo escoamento superficial das águas das chuvas nestes caminhos preferenciais acabam em área fortemente erodidas (Figuras 2C e 2D), com exposição dos resíduos enterrados e fluxo de chorume em superfície para além dos limites do aterro. Foi constatada em campo a malformação de cana-de-açúcar em áreas onde ocorre esse fenômeno em superfície, possivelmente por causa da concentração de chorume, com seu caráter ácido e tóxico, além de pontos de acumulação ao longo da rodovia de acesso à área (Figuras 2E e 2F).

O formato das zonas centrais de baixa resistividade dentro da pilha de resíduos deve indicar áreas de acúmulo de

chorume, ou seja, zonas altamente porosas e permeáveis abastecidas pelo líquido drenado dos resíduos e que, por sua vez, contribuem para a surgência desse líquido verificada durante o levantamento geofísico.

Os dados obtidos por meio de sondagem elétrica vertical foram tabelados e processados no programa IX1D, que permite o ajuste dos valores medidos a curvas teóricas geradas por meio do método de inversão, cujos modelos são camadas com espessura determinada e valores de resistividade elétrica (Figura 5).

Em razão das semelhanças entre os modelos geoeletricos, são apresentadas apenas as medidas de campo e o modelo geoeletrico para a SEV-01, representativa das demais sondagens elétricas. Os resultados modelados indicam a existência de três horizontes rasos, isto é, até 10 m de profundidade, soto-postos a uma camada espessa e altamente resistiva (Figura 5). O horizonte inicial com resistividade abaixo de $10 \Omega.m$ e alguns centímetros de espessura indica a presença de solo orgânico argiloso úmido. O horizonte intermediário com resistividade de $2.000 \Omega.m$ deve representar uma camada de solo seco silto-arenoso, descrito na área de estudos (Figura 5).

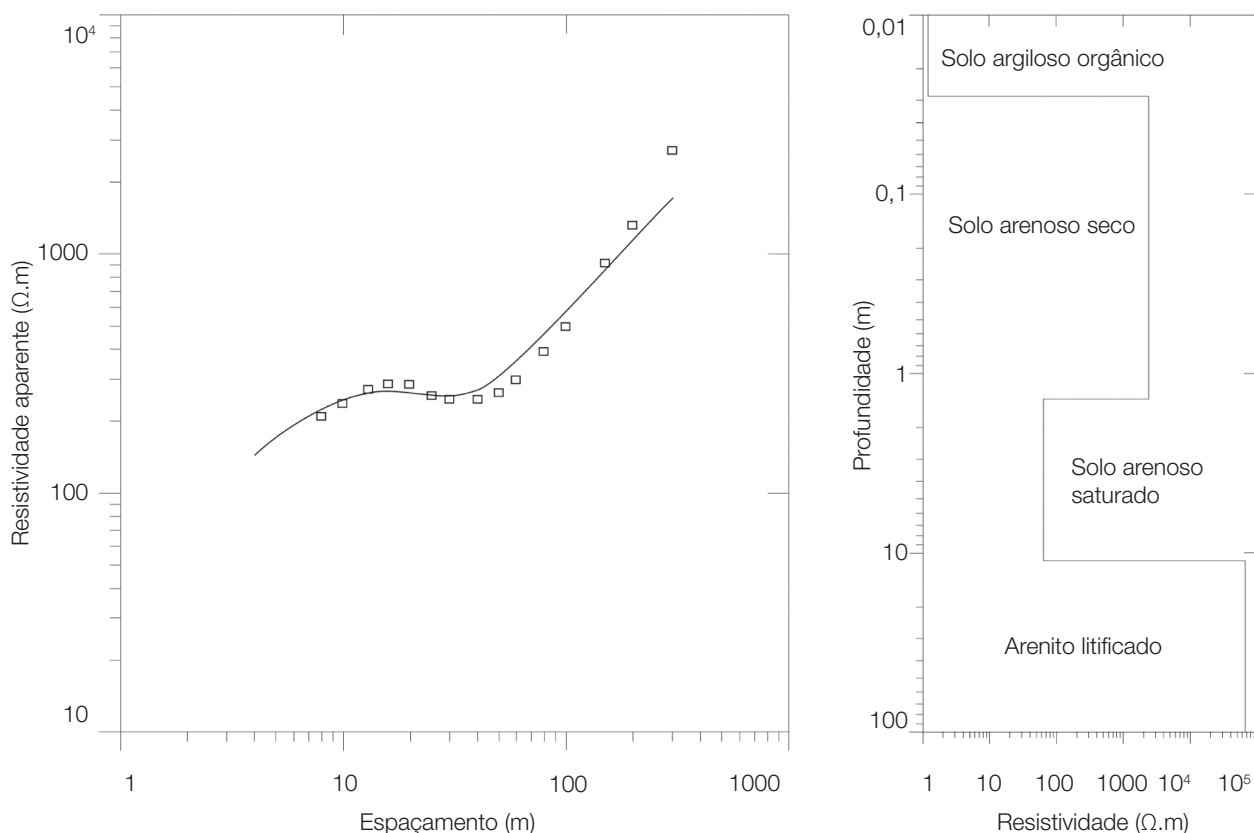


Figura 5. Medidas de campo e modelo de inversão para a SEV-01 com níveis geoeletricos, interpretados a partir dos materiais geológicos descritos em campo. Esse modelo é representativo das demais sondagens elétricas realizadas na área de estudos.

Abaixo de 10 m de profundidade ocorre uma camada altamente resistiva, com valores em torno de 100.000 Ω .m, o que indica a presença de arenitos secos possivelmente litificados, que sustentam o nível aquífero livre.

O perfil descritivo obtido a partir da análise interpretativa dos dados de sondagem elétrica vertical revela a existência de um aquífero livre na área, constituído por solo argiloso orgânico úmido superficial, zona não saturada pouco espessa e zona saturada com espessura em torno de 8 m e profundidade basal em torno de 10 m (Figura 5).

Diferenças quanto ao grau de compactação dos materiais que compõem o aterro, ou seja, baixa compactação dos resíduos em relação ao solo de cobertura, resultam em camadas altamente drenáveis sustentadas por camadas de baixa permeabilidade, análogas a sistemas aquíferos naturais.

CONCLUSÕES

A análise integrada do histórico de disposição de resíduos na área, o reconhecimento da dinâmica superficial e o cruzamento com levantamentos geofísicos permitiram um diagnóstico factual e preocupante quanto à estabilidade geotécnica da antiga área de disposição de resíduos na área estudada.

O chorume proveniente de aterros recentes é caracterizado por altos níveis de ácidos orgânicos, amônia e sólidos totais dissolvidos. Sob a ótica do método da Eletroresistividade, essa solução é caracterizada como um condutor elétrico que contrasta com o solo ou materiais contidos nos resíduos. Dessa forma, zonas de baixa resistividade elétrica podem refletir áreas de acúmulo ou fluxo de chorume em aterro.

As zonas de surgência de chorume constatadas nas laterais da pilha de resíduos durante os levantamentos de campo puderam ser reconhecidas nos resultados geofísicos, que, por sua vez, permitiram uma análise e compreensão apurada dos mecanismos de drenagem interna e fluxo superficial de chorume.

Essas zonas constituem um fator preocupante no que tange à estabilidade da pilha de resíduos, pois as seções indicam uma continuidade lateral de zonas de baixa resistividade, conectada aos pontos de surgência.

Tais superfícies aparentemente induzem a perda de coesão dos resíduos por causa do fluxo de chorume, que, aliado ao desnível topográfico nas laterais, provoca movimentos rotacionais de massa (Figura 2A). A evolução desse processo, estimulado pelo escoamento superficial das águas de chuva, acaba por ocasionar a remoção do solo de cobertura em alguns pontos, com exposição dos resíduos enterrados e incremento no fluxo de chorume para a superfície (Figuras 2C e 2D).

Os intervalos de baixa resistividade desde os pontos de surgência em superfície até 10 m de profundidade indicam que o aquífero livre local está sendo contaminado por chorume além dos limites do aterro tanto em superfície quanto em subsuperfície.

O fluxo superficial de chorume afeta o crescimento e o desenvolvimento de plantas cultivadas em terrenos limítrofes ao aterro, bem como representa um risco potencial aos transeuntes que utilizam a rodovia municipal lateral ao aterro, onde foram descritas acumulações de chorume em suas margens.

A presença de camadas altamente resistivas abaixo de 10 m de profundidade, aliada ao reconhecimento geológico em campo, sugere a presença de arenito litificado, que serve de substrato ao aquífero livre. Tais valores indicam também que o chorume não ultrapassa a base do aquífero livre, devendo apenas ocorrer dissolução dos sólidos totais e ácidos contidos.

O caráter altamente resistivo predominante na pilha de resíduos na área estudada é algo peculiar e incomum quando comparado a diversos casos de aplicação de métodos geofísicos elétricos em outros aterros (Moura e Malagutti Filho, 2003; Moreira e Braga, 2009b; Bortolin e Malagutti Filho, 2010; Moreira, Braga, Hansen, 2011). Esse fato provavelmente reflete a elevada capacidade de drenagem do chorume em subsuperfície para zonas preferenciais e conseqüente surgimento nas superfícies laterais da pilha de resíduos.

O diagnóstico resultante deste trabalho justifica a proposição de sistemas de canalização e contenção de águas pluviais e de chorume em superfície, além de obras para estabilidade geotécnica das laterais das pilhas de resíduos, para impedimento de fluxo superficial de chorume e mitigação de riscos de escorregamento de resíduos para além dos limites do aterro.

REFERÊNCIAS

- ABEM. Terrameter SAS 4000/SAS 1000 - Instruction Manual, 136 f., 2006.
- BAGCHI, A. Natural attenuation mechanisms of landfill leachate and effects of various factors on the mechanism. *Waste Management Research*, n. 5, p. 453-464, 1987.
- BENNETT, P.; SIEGEL, D. I. Increased solubility of quartz in water due to complexing by organic compounds. *Nature*, v. 326, p. 684-686, 1987.
- BIRKS, J.; EYLES, C. A. Leachate from landfill along the Niagara Escarpment. In: EYLES, N. *Environmental Geology of Urban Areas*. St. John's: Geological Association of Canada, 1997. p. 347-363.
- BORTOLIN, J. R. M.; MALAGUTTI FILHO, W. Método da eletroresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, p. 367-374, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v15n4/a09v15n4.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2012.

- CONSONI, A. J.; PERES, C. Origem e composição do lixo. In: *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. São Paulo: IPT/CEMPRE, 1995. Capítulo II.
- CRUZ, J. I.; PORTUGAL, R. S.; LUCENDO, M. C. H.; ELIS, V. R.; FACHIN, S. J. S.; USTRA, A. T.; BORGES, W. R. Detecção de contaminantes de solo por vinhaça através de análise de dados de Eletroresistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, n. 4, p. 481-492, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v26n4/v26n4a08.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2012.
- FANG, H. Y. Bacteria and tree root attack on landfill liners. In: SARSBY, R. W. *Waste Disposal Landfill – GREEN'93*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1996. p. 419-426.
- FARQUHAR, G. J. Leachate: production and characterization. *Canadian Journal of Civil Engineering*, n. 16, p. 317-325, 1989.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *Geofísica de Exploração*. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2010. p. 340-348.
- LOKE, M. H.; BAKER, R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, v. 44, p. 131-152, 1996.
- MEJU, M. A. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics*, v. 44, n. 1, p. 115-150, 2000.
- MONDELLI, G., GIACHETI, H. L., BOSCOV, M. E. G., ELIS, V. R., HAMADA, J. Geoenvironmental Site Investigation using different techniques in a Municipal Solid Waste Disposal Site in Brazil. *Environmental Geology*, v. 52, p. 871-887, 2010.
- MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, n. 2, 257-264, 2009a. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v14n2/a13v14n2.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2012.
- MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O. Caracterização geoeétrica de contaminantes provenientes da decomposição de resíduos sólidos domiciliares. *Revista Água e Ambiente*, v. 4, n. 2, p. 104-114, 2009b. Disponível em: <http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/148/pdf_250>. Acesso em: 14 jun. 2012.
- MOREIRA, C. A.; AQUINO, W. F.; DOURADO, J. C. Aplicação do método Eletromagnético Indutivo (EM) no monitoramento de contaminantes em subsuperfície. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, n. 4, p. 413-420, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v25n4/a05v25n4.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2012.
- MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O.; HANSEN, M. A. F. Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 43, n. 3, 549-557, 2011. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/rbg/article/view/21281/17148>>. Acesso em: 14 jun. 2012.
- MOURA, H. P.; MALAGUTTI FILHO, W. Métodos de Eletroresistividade e Polarização Induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: aterro controlado de Rio Claro - SP. *Geociências*, v. 22, p. 129-139, 2003. Disponível em <<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/1701/1457>>. Acesso em: 14 jun. 2012.
- OLIVEIRA, S.; PASQUAL, A. Avaliação de parâmetros indicadores de poluição por efluente líquido de um aterro sanitário. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, vol 9, nº 3, pp. 240-249, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v9n3/v9n3a10.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2012
- ORELLANA, E. *Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua*. Biblioteca Tecnica Philips. Madrid: Paraninfo, 1973. 523 p.
- RADNOFF, D.; HOLLINGSHEAD, S.; ANDERSON, G. What legacy are we leaving with future landfill leachates? *Environmental Science Technology*. n. 26, p. 58-60, 1992.
- REICHERT, G. A. Gerenciamento integrado de resíduos, uma proposta inovadora. *Ciência e Ambiente*, v. 18, p. 78-102, 1999.
- SANTOS, A. A.; SHIRAIWA, S.; SILVINO, A. N. O.; SILVA, W. T. P.; SILVA, N. A.; SILVEIRA, A.; MIGLIORINI, R. B. Comparação de investigação direta da água subterrânea e radar de penetração no solo (GPR) na área do aterro sanitário de Cuiabá-MT. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, p. 768-772, 2009. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/rbg/article/view/11778/11769>>. Acesso em: 14 jun. 2012.
- SILVA, R. W. C.; MALAGUTTI FILHO, W.; MOREIRA, C. A. Emprego do método da Eletroresistividade no estudo da contaminação subterrânea do cemitério municipal de Vila Rezende, Piracicaba – SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 27, n. 3, p. 257-264, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v27n3/a07v27n3.pdf>>. Acessado em: 14 jun. 2012.