

GEOFÍSICA APLICADA NO ESTUDO DE ÁREA DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

César Augusto MOREIRA ¹, João Carlos DOURADO ², Kátia dos SANTOS ³

(1) Curso de Pós-Graduação em Geociências em Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro. Rua 10, 2527 – Bairro Santana.

CEP 13500-230. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: cesargeologia@yahoo.com.br.

(2) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro/SP. Endereço eletrônico: jdourado@rc.unesp.br.

(3) Curso de Graduação em Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro. Rua 10, 2527 – Bairro Santana. CEP 13500-230. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: katia_sbr@yahoo.com.br.

Introdução
Materiais e Métodos
 Descrição do Processo
 Processo de Tratamento em Lagoas Anaeróbicas
 Utilização de Efluentes de ETE na Agricultura
Eletrorresistividade
 Sondagem Elétrica Vertical
 Caminhamento Elétrico
Área de Estudos
 Geologia
Resultados
 Aquisição e Processamento
 Interpretação
Conclusões
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – Este trabalho apresenta os resultados da aplicação do método geofísico de eletrorresistividade, especificamente das técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico, no estudo de campo experimental, monitorado pela Escola Superior de Agronomia Luis de Queiroz – ESALQ, irrigado por efluentes gerados em lagoas de estabilização do tipo aeróbica-facultativa na ETE (Estação de Tratamento de Esgotos) da SABESP, no município de Lins (SP).

Palavras-chave: Caminhamento elétrico, sondagem elétrica vertical, efluentes, fertilização, pluma de contaminação.

ABSTRACT – *C.A. Moreira, J.C. Dourado, K. dos Santos – Geophysics applied to the study of an area of effluent throwing from sewers treatment.* This paper presents the results of the application of the electric resistivity geophysical method, specifically of the techniques of vertical electric sounding and electric profiling, in the study of an experimental field monitored by the Superior School of Agronomy Luis de Queiroz (ESALQ) of the University of São Paulo, irrigated by effluent generated in lagoons of stabilization of the type aerobic-physician in the Sewers Treatment Station of SABESP in the city of Lins (SP).

Keywords: Electric profiling, vertical electric sounding, effluents, fertilization, contamination plume.

INTRODUÇÃO

Intervenções antrópicas no meio ambiente geram impactos negativos, que atualmente constituem uma das grandes preocupações mundiais.

A contaminação dos solos e águas subterrâneas pode se dar a partir de áreas de disposição de resíduos domiciliares, efluentes industriais e outros tipos de atividades antrópicas como, por exemplo, disposição de esgoto, atividades agrícolas e outras.

Na avaliação destes tipos de contaminação, os conhecimentos adquiridos dos aspectos de natureza geológico-geotécnica e hidrogeológica da área, e as características do material poluente, devem ser levados em consideração para se determinar o comportamento

dos contaminantes no meio físico, e na definição de medidas para proteção, conservação ou recuperação desse meio.

A Geofísica, cujos métodos, ao longo dos anos, têm sido aperfeiçoadas e adaptadas em função da solicitação crescente nos mais variados campos de atuação, tem um papel de extrema importância para as questões relacionadas à Geologia Ambiental, estudando e ajudando a solucionar problemas decorrentes da contaminação de solos e águas subterrâneas, por diversos tipos de contaminantes.

Entre os métodos geofísicos de prospecção, a eletrorresistividade é um dos mais usados no estudo

da contaminação do meio ambiente, como se pode constatar pelo exposto por autores como, por exemplo, Elis (1998), Gallas (2000) e Moura (2002).

Os diferentes tipos litológicos existentes apresentam como uma de suas propriedades fundamentais o parâmetro físico a resistividade elétrica, o qual tem correspondência com algumas de suas características, servindo para caracterizar seus estados, em termos de alteração, fraturamento, saturação etc., e até identificá-los quanto à natureza, sem necessidade de escavações (Braga, 1997).

Segundo pesquisa realizada pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) em 1996, a disposição final na agricultura representa alternativa promissora para o problema de destinação dos lodos e efluentes de estações de tratamento de esgoto (ETEs),

tanto pela adequação sanitária e ambiental como pela viabilidade econômica, desde que o resíduo atenda aos padrões mínimos de qualidade e sejam seguidos os critérios e cuidados preconizados pela Norma Técnica.

Neste trabalho, a eletrorresistividade será utilizada para identificação de plumas de contaminação, no “campo experimental para reuso de esgotos tratados”, de propriedade da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (SABESP), que está localizado próximo à zona urbana do município de Lins (SP). Este campo é utilizado pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), no plantio experimental de café, cana-de-açúcar, milho, palmeira pupunha e capim *tifton*, cuja irrigação está sendo feita por efluentes de tratamento de esgoto residencial.

MATERIAIS E MÉTODOS

DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Processo de Tratamento em Lagoas Anaeróbicas

As lagoas anaeróbicas são utilizadas no tratamento de esgotos domésticos e despejos industriais predominantemente orgânicos e de elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO), como laticínios, bebidas etc. São usualmente profundas, da ordem de 4 a 5 m, com o objetivo de reduzir a possibilidade da penetração do oxigênio produzido na superfície.

A eficiência da remoção de DBO nas lagoas anaeróbicas é da ordem de 50% a 60%. O esgoto afluente, ainda com elevada DBO, é posteriormente tratado em lagoas facultativas.

O esgoto afluente entra em uma extremidade da lagoa facultativa e sai na extremidade oposta. Ao longo deste percurso, que demora vários dias, uma série de mecanismos contribui para a purificação dos esgotos. Estes mecanismos ocorrem em três estratos da lagoa, denominados: zona aeróbia, na interface água/atmosfera, zona facultativa, intermediária, onde ocorrem processos aeróbicos e anaeróbicos, e zona anaeróbia, o estrato de fundo, formado pela sedimentação de material particulado. O processo consiste na retenção do esgoto por um período de tempo longo o suficiente para que os processos naturais de estabilização da matéria orgânica se desenvolvam. As principais vantagens e desvantagens das lagoas facultativas estão associadas à predominância dos fenômenos naturais.

O resultado são efluentes constituídos essencialmente pelo lodo de fundo e água, com reduzida DBO, altamente fértil devido à concentração de matéria orgânica e elementos químicos como nitrogênio e fósforo, além de potássio, sódio e magnésio.

Utilização de Efluentes de ETE na Agricultura

Segundo a SANEPAR, a reciclagem de efluentes de ETE deve ser implementada sempre que possível, por representar a alternativa mais adequada sob o aspecto ambiental e geralmente a mais econômica de transformação de um resíduo urbano em um importante insumo para a agricultura, capaz de melhorar a produtividade, diminuir a dependência de adubos químicos e melhorar as características físicas do solo (SANEPAR, 1999, 2000).

Esta alternativa de disposição depende também de um adequado planejamento que considere um conjunto de informações tais como: estimativa de produção, avaliação da qualidade, aptidão de áreas de aplicação (tipo de solo, proximidade a drenagens, contexto socioeconômico da região etc.), organização e operação da distribuição, alternativas de higienização, adequações necessárias à ETE e ao monitoramento ambiental (SANEPAR, 1999, 2000).

A viabilização da reciclagem agrícola dos efluentes/lodos de ETEs depende também da sua aceitabilidade perante o público, atualmente um fator determinante em sua aplicação como insumo agrícola. A informação adequada aos consumidores é um fator decisivo para a aceitabilidade do lodo e efluente das ETEs.

ELETRORRESISTIVIDADE

O método de eletrorresistividade é baseado na introdução de corrente elétrica no terreno, a partir de um arranjo denominado dispositivo eletródico (Orellana, 1972). Em geral, este dispositivo é constituído de quatro eletrodos (Figuras 1 e 2).

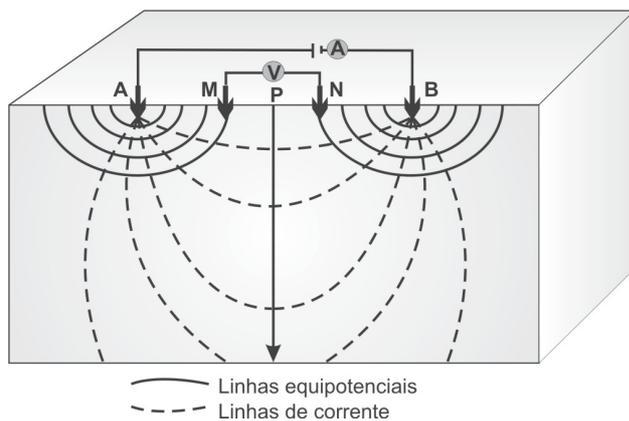


FIGURA 1. Arranjo Schlumberger para medidas de resistividade. Modificado de Braga (1999).

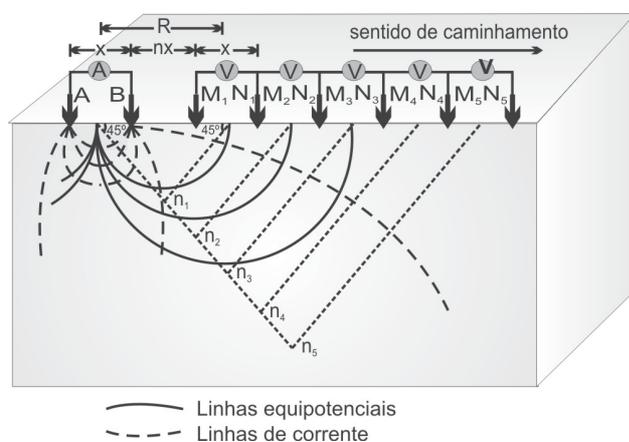


FIGURA 2. Técnica de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo (modificado de Braga, 1999).

Os eletrodos a e b são convencionados como circuito de corrente ou eletrodos de corrente, a partir dos quais é aplicada uma corrente elétrica em subsuperfície. Este circuito é conectado a um amperímetro, por meio de cabos elétricos.

Os eletrodos M e N são convencionados como circuito de potencial ou eletrodos de potencial, utilizados para medir a diferença de potencial criada pelo circuito de corrente. Este circuito, por sua vez, é conectado a um voltímetro capaz de medir a diferença de potencial entre eles.

Sondagem Elétrica Vertical

A técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

permite uma série de determinações de resistividade aparente efetuadas com o mesmo arranjo de eletrodos, separação crescente entre os eletrodos de emissão e recepção ou separação crescente apenas dos eletrodos de emissão, segundo uma mesma direção (Orellana, 1972).

Os arranjos de campo mais utilizados na realização de uma SEV compreendem a disposição simétrica de quatro eletrodos em relação a um ponto central P (Figura 1). Este ensaio permite leituras pontuais de resistividade em diversas profundidades à medida em que os eletrodos são espaçados de forma crescente.

Este trabalho utiliza o arranjo Schlumberger, caracterizado pela pequena distância dos eletrodos de potencial em relação aos eletrodos de corrente, sempre próximo da relação $MN \leq (AB/5)$ (Figura 1). Na prática, a distância MN é aumentada quando o sinal medido (ΔV) fica muito fraco, procedimento denominado de embreagem, e novamente é realizada uma série de medidas com variação apenas dos eletrodos de corrente.

Caminhamento Elétrico

A técnica de Caminhamento Elétrico está baseada na realização de medidas de resistividade aparente ao longo de uma linha com o objetivo de investigar variações em um ou mais níveis em profundidade (Braga, 1999).

Dentre os diversos tipos de arranjos de campo disponíveis para a técnica do caminhamento elétrico, o presente trabalho utiliza o arranjo dipolo-dipolo (Figura 2), devido à sua precisão e rapidez na aquisição de dados.

O arranjo dipolo-dipolo é caracterizado por utilizar espaçamento igual entre MN e AB, com deslocamento do centro de ambos os dipolos ao longo da linha. O espaçamento entre os dipolos AB e MN pode ser variado a partir do uso simultâneo de vários dipolos MN ao longo da linha (Figura 2).

A profundidade de investigação cresce com o espaçamento entre os centros de AB e MN, que, em teoria, corresponde a $R/2$ ou ao cruzamento de duas retas com ângulo de 45° , uma que parte do centro de AB e outra, do centro de MN (Figura 2). Desta maneira, a leitura de resistividade é feita a partir do par de eletrodos de potencial M_1N_1 , que correspondem à profundidade teórica n_1 e assim sucessivamente.

ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudos está localizada no município de Lins, Estado de São Paulo, distante 455 km a noroeste da capital (Figura 3).

GEOLOGIA

O município de Lins assenta-se sobre a Formação Adamantina (Coelho, 1999), pertencente ao Grupo

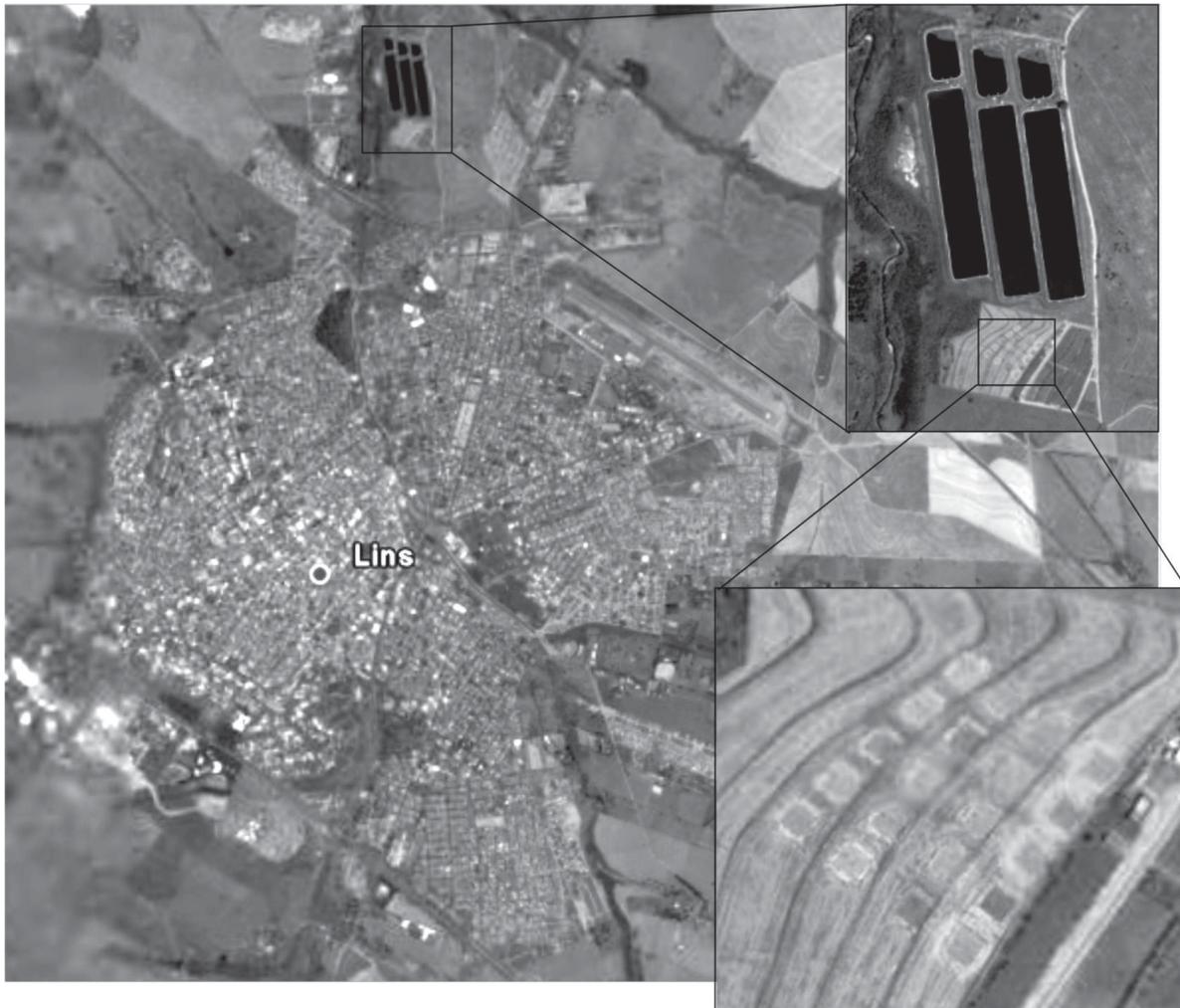


FIGURA 3. Área de estudo.

Bauru, constituída por arenitos finos a muito finos, às vezes argilosos ou siltosos, constituídos por quartzo, pequena quantidade de feldspatos, sílica amorfa, opacos e mica. Apresentam boa seleção, arredondamento e esfericidade variáveis. Possuem cores avermelhadas e, às vezes, com tons amarelados.

O Município de Lins encontra-se na região da média Noroeste do Estado de São Paulo e situa-se no Planalto Ocidental Paulista (IPT, 1981). A rede de drenagem do Município de Lins pertence à bacia hidrográfica do Ribeirão Campestre e possui, na região urbana, uma área de 13 km². Desde suas nascentes, o ribeirão Campestre segue aproximadamente 30 km no sentido norte, até desaguar no Rio Dourados. A área de estudos possui relevo suavemente ondulado, onde a vertente tem ligeira declividade.

A Formação Adamantina, em toda sua extensão, constitui um sistema de aquífero livre. A sua espessura máxima na cidade de Lins, encontrada em perfuração

de poço tubular profundo, é de 164 m (Coelho, 1999). A espessura saturada é em média de 150 m; a porosidade efetiva está entre 16% e 26% e sua permeabilidade média aparente varia de 0,1 a 1 m/dia.

Em função da litofácies, expressão geomorfológica e dos parâmetros hidráulicos e hidroquímicos, este aquífero é classificado com potencial explorável médio a baixo, com águas relativamente salinizadas, fortemente bicarbonatadas cálcicas, potencialmente incrustantes ou corrosivas (Rocha et al., 1982).

A partir de ensaios de bombeamento em poços tubulares profundos, o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) determinou os parâmetros hidrodinâmicos para o aquífero Adamantina na região de Lins. Os resultados obtidos foram: transmissividade entre 5 a 100 m³/dia, permeabilidade aparente entre 0,01 a 1 m/dia e capacidade específica entre 0,1 a 2 m³/h (DAEE, 1984).

Na área de estudos, a profundidade do nível freático está em torno de 13 m, com valores de condutividade hidráulica em torno $9,01 \times 10^{-2}$ cm/s.

Foram perfurados três poços de monitoramento na área (Figura 4). A partir de amostras coletadas

nestes poços, foram realizadas análises químicas para avaliar a qualidade das águas subterrâneas frente aos padrões determinados pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB (Tabela 1).

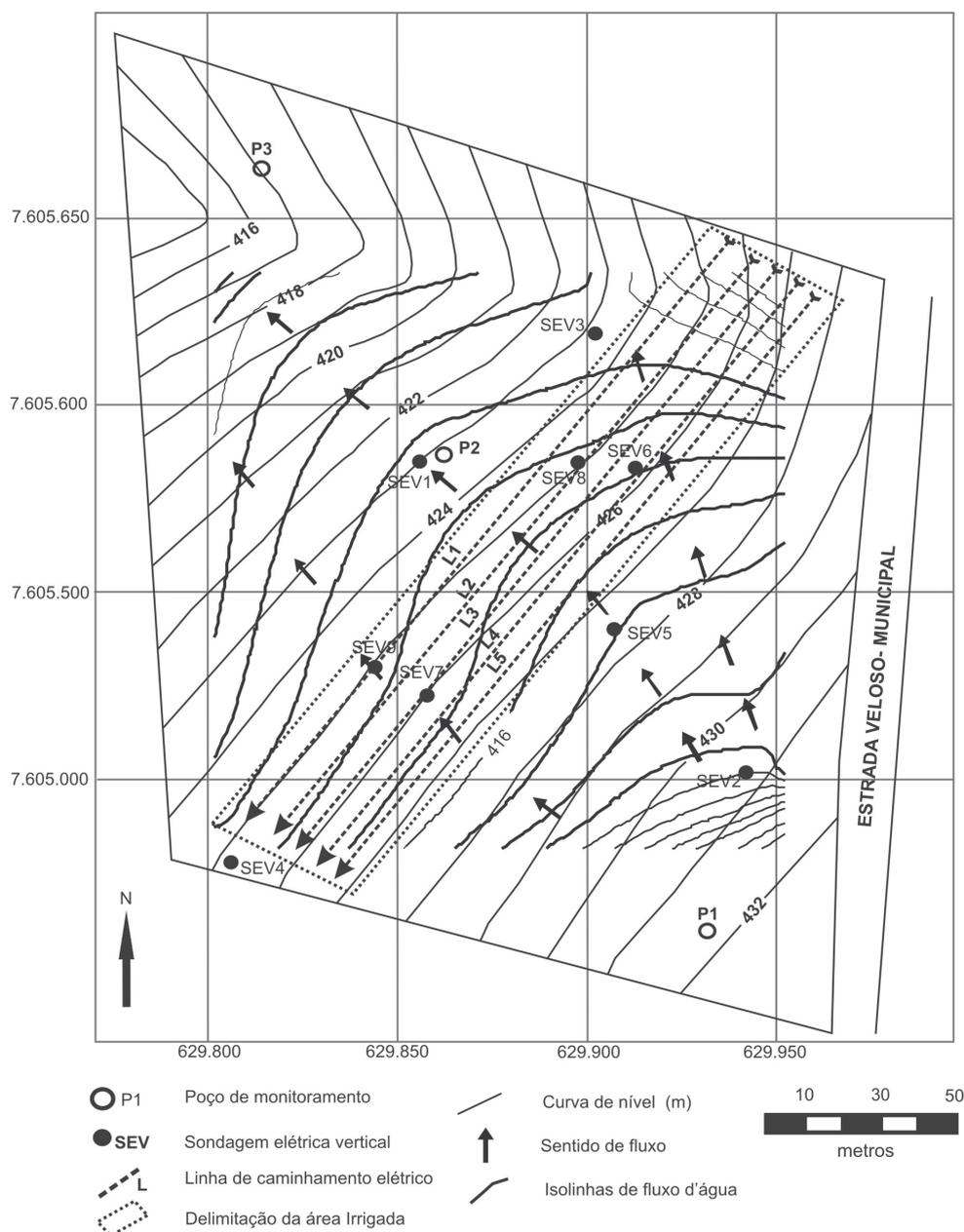


FIGURA 4. Localização das linhas de caminamento elétrico e pontos de sondagem elétrica vertical e sentido de fluxo d'água subterrânea.

TABELA 1. Análises químicas em amostras de poços de monitoramento (em mg/L), com realce dos valores acima dos padrões da CETESB.

Poço	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	pH
P1	1,76	6,23	5,32	2,81	0,49	0,02	4,10	0,01	4,93
P2	1,54	3,98	2,34	2,43	1,31	0,04	3,11	0,01	4,46
P3	35,56	1,69	0,43	0,56	21,20	0,02	5,23	0,01	4,73

RESULTADOS

AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO

O trabalho de campo foi realizado no mês de abril de 2005, com a aplicação das técnicas de Sondagem Elétrica Vertical em arranjo Schlumberger e de Caminhamento Elétrico em arranjo dipolo-dipolo (Figura 4). Foram realizadas cinco linhas de caminhamento com espaçamento de 20 m entre os eletrodos, com 4 níveis de investigação e 200 m por linha, com sentido NE para SW. Foram efetuadas nove sondagens elétricas com abertura AB/2 de 50 e 100 m.

A partir da interpretação das sondagens elétricas, foi possível definir a profundidade do nível freático em diversos pontos, reunidos sob a forma de mapa potenciométrico, com indicação do sentido preferencial de fluxo d'água subterrânea (Figura 4).

INTERPRETAÇÃO

Analisando-se as curvas das SEVs, observa-se que é mantido um padrão no qual as primeiras camadas do substrato são mais resistivas e, conforme a profundidade aumenta, a resistividade diminui, não havendo nenhuma curva fora deste padrão. Este comportamento tem correspondência com as cinco seções de caminhamento elétrico realizadas.

A última camada refere-se ao lençol freático. O modelo geoeletrico obedece aos seguintes padrões na distribuição das resistividades com a profundidade: $r_1 < r_2 > r_3 > r_4$ (SEVs 1, 3, 4, 5 e 6) e $r_1 < r_2 > r_3$ (SEVs 7, 8 e 9) (Figura 5). A SEV 2, situada a montante da área, foi o que apresentou a maior espessura de material resistivo superficial.

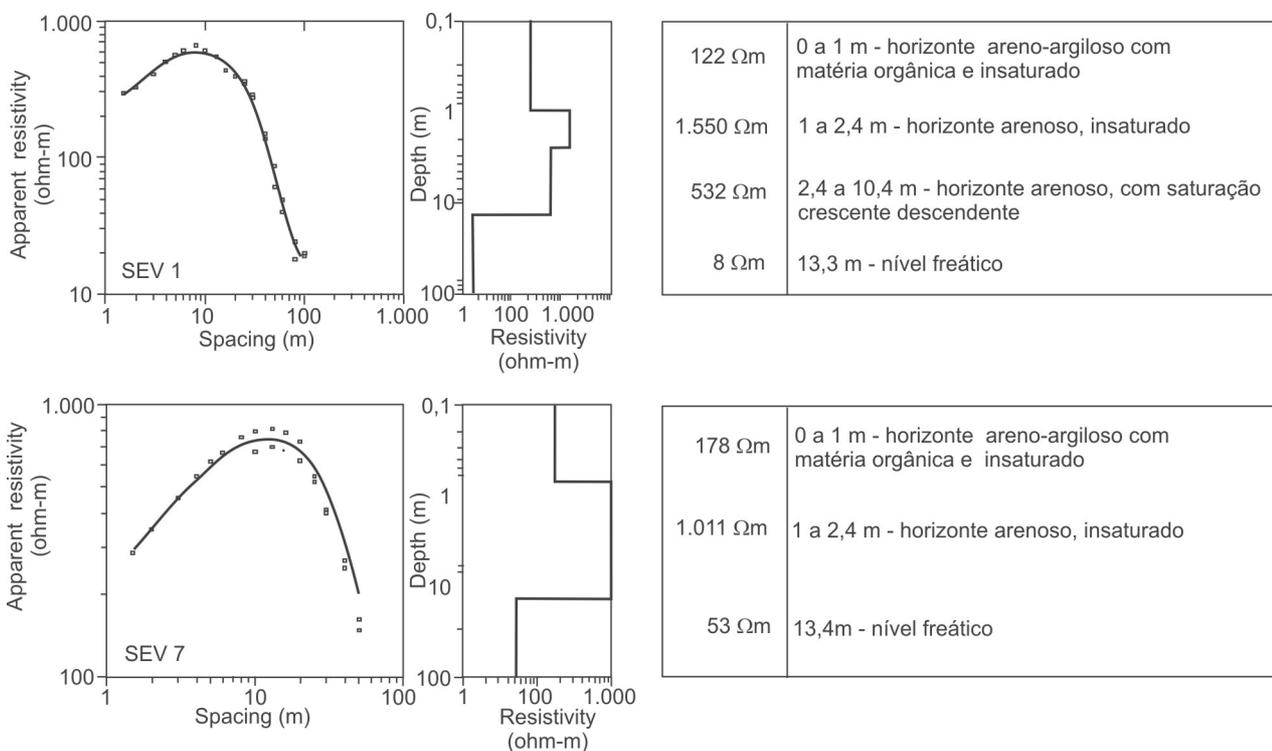


FIGURA 5. Sondagens elétricas representativas da área de estudos, SEV 1 e SEV 7.

Quanto às linhas de caminhamento elétrico, após os dados de campo serem invertidos, foram obtidas seções geoeletricas. Nestes perfis é confirmado o padrão de resistividade descrito nas SEVs, no qual as primeiras camadas do substrato são mais resistivas e, conforme a profundidade aumenta, a resistividade diminui.

As curvas das sondagens refletem as camadas superiores dos perfis do caminhamento, uma vez que para este foi utilizado espaçamento de 20 m entre

eletrodos, com conseqüente alcance de maior profundidade de investigação.

As seções de caminhamento elétrico indicam a presença de uma anomalia condutiva localizada na porção NE da área (Figura 6). Esta anomalia ocorre nas linhas do caminhamento elétrico nas seguintes posições: entre as posições 20 a 60 m na L1 (Figura 6A), entre as posições 0 a 20 m na L2 (Figura 6B), entre as posições 0 e 60 m na L3 (Figura 6C), entre as posições 0 e 15 m na L4 (Figura 6D), e entre as posições 0 a 40 m na L5 (Figura 6E).

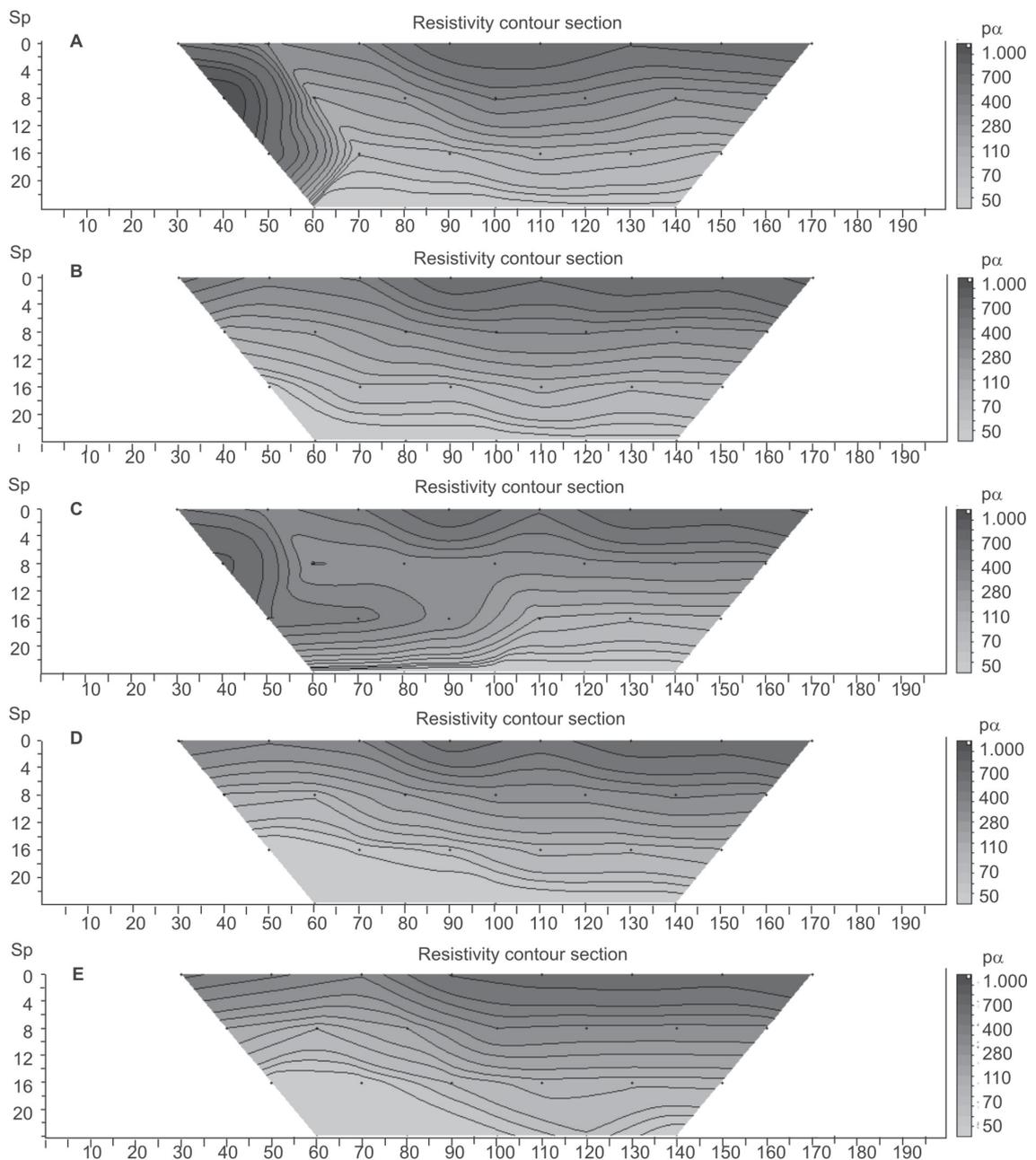


FIGURA 6. A, B, C, D e E: seções de caminhamento elétrico das linhas 1, 2, 3, 4 e 5.

CONCLUSÕES

A aplicação da técnica de caminhamento elétrico se mostra eficaz na determinação de uma anomalia de baixa resistividade (Figura 7). Esta anomalia coincide com um dos locais de injeção de efluentes da área de estudo, por meio da instalação de tanque do tipo “australiano” – sem fundo, com infiltração direta do efluente no solo a partir da pressão exercida pela coluna de líquido contida no tanque.

A caracterização da anomalia como de baixa resistividade está diretamente associada aos compostos presentes no efluente. A elevada quantidade de íons em solução, quando injetados no ambiente geológico

– particularmente arenoso e resistivo –, resulta na redução da resistividade elétrica, com conseqüente caracterização por métodos geoeletricos.

Os ensaios geofísicos realizados indicam uma conexão entre o efluente injetado em superfície e a zona saturada do perfil de alteração. Nos primeiros metros do solo é patente a presença de efluentes injetados devido à redução nos valores de resistividade em relação às áreas adjacentes ao local de injeção, também presentes nas seções de caminhamento elétrico (Figura 6 A, B, C, D e E).

Análises em amostras dos poços 1 e 2, localizados

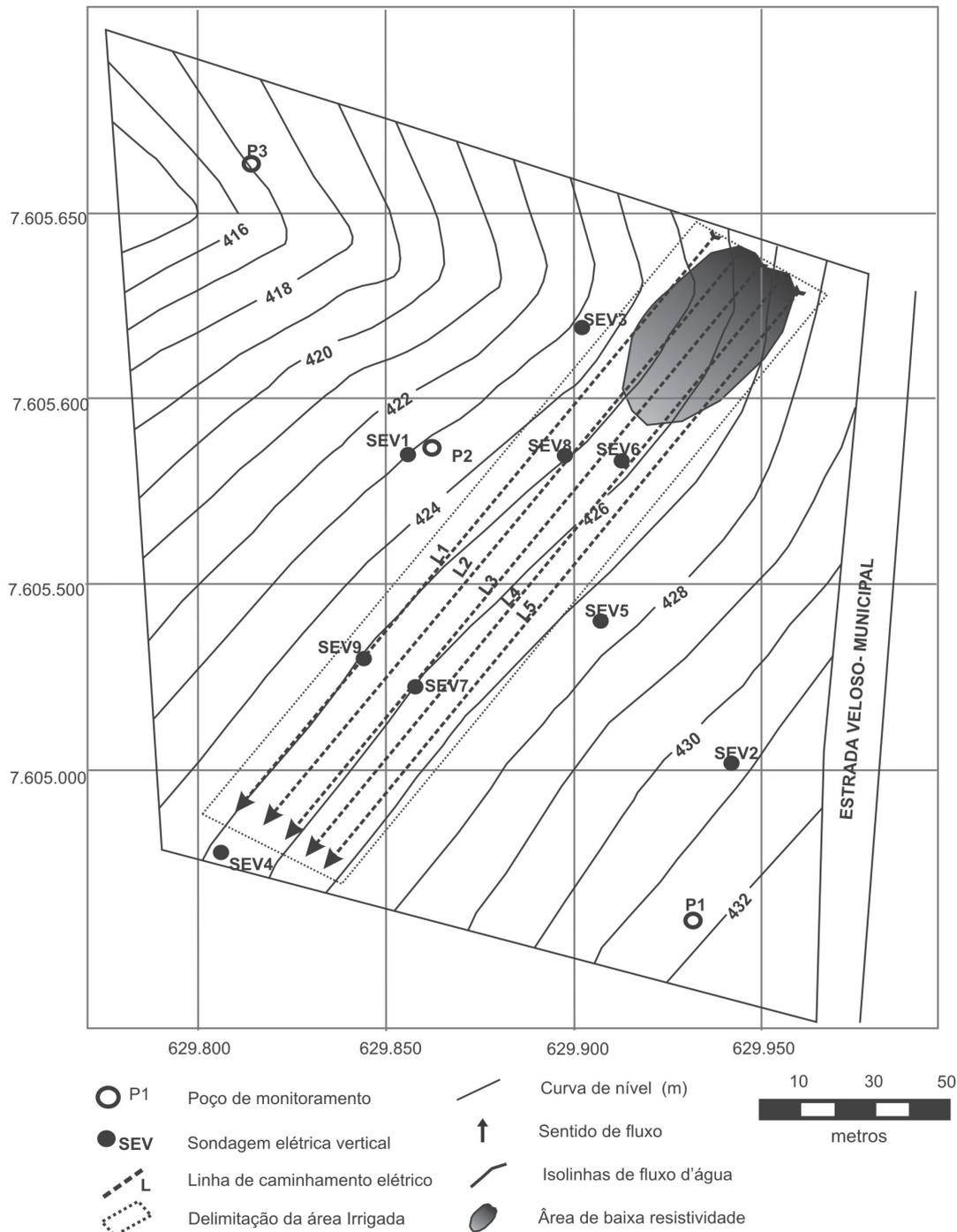


FIGURA 7. Linhas de caminhamento elétrico com posição aproximada da anomalia de baixa resistividade.

respectivamente juzante e a montante das linhas de caminhamento elétrico, indica teores dentro dos padrões vigentes (Tabela 1). Contudo, o poço 3 apresenta anomalias nos teores de NA^+ e Cl^- que, aparentemente, não possui relação direta com o local de injeção de efluentes e intercepta o poço 2 na seqüência, o qual apresenta baixos valores nos respectivos elementos.

É possível concluir que as técnicas geofísicas em conjunto com as análises químicas em amostras de

água subterrânea proveniente dos arredores do ponto de injeção de resíduos, permitiram uma análise integrada da injeção de efluentes como fertilizante. A conexão das anomalias de baixa resistividade de superfície e de profundidade indica que o efluente atinge a zona saturada.

A ausência de valores anômalos nos poços 1 e 2 mostra que a quantidade de efluentes injetados nos teores atuais indica diluição e dispersão na zona saturada e que a capacidade de retenção do solo não

foi atingida em relação aos elementos que constituem o efluente injetado. Os valores anômalos descritos no poço 3 estão abaixo do padrão CETESB e, ao que tudo indica, não apresenta relação com a área de injeção de efluentes.

Desta forma, a injeção de efluentes nos teores atualmente utilizados pode resultar na fertilização do solo, sem indícios de impacto para as águas subterrâneas, com base nos padrões atuais adotados pela CETESB.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Profa. Dra. Célia Regina Montes e a sua orientada Célia Alves Surita, ambas integrantes do Núcleo de Pesquisas em Geoquímica e Geofísica da Escola Superior de Agricultura Luís de Queiroz (NUPEGEL/ESALQ), pela disponibilização da área de estudos e das análises químicas. Agradecemos também ao técnico Francisco Manuel Garcia Barrera pelo auxílio nos trabalhos de campo e aos revisores que, por meio de uma análise criteriosa, contribuíram com sugestões e comentários pertinentes e relevantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRAGA, A.C.O. **Métodos geoeletricos aplicados**. Curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Campus de Rio Claro, Texto de Curso, 1999.
2. BRAGA, A.C.O. **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica - Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro - SP**. Rio Claro, 1997. 169 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Campus de Rio Claro.
3. COELHO, T.A.F. **Diagnóstico geo-ambiental da cidade de Lins - SP**. Rio Claro, 1998. 149 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Campus de Rio Claro, 1999.
4. DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Caracterização dos recursos hídricos no Estado de São Paulo**. São Paulo, DAEE, 1984.
5. ELIS, V.R. **Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos**. Rio Claro, 1998. 264 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Campus de Rio Claro.
6. GALLAS, J.D.F. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental**. Rio Claro, 2000. 174 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Campus de Rio Claro.
7. IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:1.000.000. São Paulo: IPT, Monografia, n. 3, 1981.
8. MOURA, H.P. **Emprego da eletroresistividade e da polarização induzida na caracterização geoeletrica de áreas de disposição de resíduos sólidos urbano**. Rio Claro, 2002. 231 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Campus de Rio Claro.
9. ORELLANA, E. **Prospeccion geoelectrica en corriente continua**. Madrid: Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips, 523 p., 1972.
10. ROCHA, G.A.; BERTACHINI, A.C.; CAMPOS, H.C.N.S.; CAIXETA, J.B. **Tentativa de zoneamento das características hidráulicas e hidroquímicas do aquífero Bauru**. In: ENCONTRO DE GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA, 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia e Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 1982, p. 37-56.
11. SANEPAR – COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. Curitiba, **Revista Técnica da SANEPAR**, v. 12, n. 12, p. 57-65, 1999.
12. SANEPAR – COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. Curitiba, **Revista Técnica da SANEPAR**, v. 13, n. 13, 47-59, 2000.

*Manuscrito Recebido em: 21 de julho de 2006
Revisado e Aceito em: 17 de março de 2007*

