



Aplicação integrada de métodos geoeletricos no aterro controlado de Rio Claro/SP

Helyelson Paredes Moura*. Universidade Federal do Amapá. e-mail: helyelson@unifap.br

Walter Malagutti Filho. Departamento de Geologia Aplicada, UNESP-Rio Claro. e-mail: malaguti@rc.unesp.br

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This paper reports the results of a geophysical research in the waste disposal area located at Rio Claro – SP. The main objectives were: to characterize the structure of the waste disposal, to determine the depth of the water table and the direction of the groundwater flow.

The regional geology is characterized by the Rio Claro formation which consist of sandy sediments that overlies argyles or silt layers.

Vertical electrical sounding (VES) and electrical profiling were used in an integrated way by the measure of resistivity and induced polarization data. As a final product were obtained a potentiometric map of the area and a uni-bidimensional geoelectric models of the waste disposal.

Introdução

A disposição de resíduos sólidos urbanos e/ou industriais em aterros controlados, antigos lixões, tem preocupado os geocientistas ligados a caracterização geoambiental, pois os mesmos, geralmente não possuem impermeabilização com camadas de argila ou mantas plásticas no solo que serve como base do depósito de resíduos. Essa forma de deposição pode trazer sérias conseqüências como a contaminação do solo e das águas subterrâneas pelo percolado produzido pela decomposição dos resíduos. Dentro desse contexto, após um longo período de aplicações restritas à prospecção mineral, os métodos geoeletricos vêm sendo cada vez mais aplicados em estudos ambientais no mapeamento, no monitoramento e na determinação da estrutura dos aterros (MOURA, 2002; CARPENTER et al., 1990).

Neste trabalho apresentam-se alguns resultados da aplicação integrada dos métodos eletrorresistividade e da polarização induzida (IP-domínio do tempo) que subsidiaram a avaliação do impacto ambiental causado pelo aterro controlado da cidade de Rio Claro-SP. Esse aterro existe a cerca de 20 anos e situa-se ao lado da Rodovia Fausto Santo Mauro (SP-127) que interliga os municípios de Rio Claro e Piracicaba, na altura do km 2.

Geologia e aspectos geotécnicos do local

A geologia do município da cidade de Rio Claro, sobre a qual está assentado o aterro, é constituída por rochas das Formações Rio Claro e Corumbataí, pertencentes à Bacia sedimentar do Paraná. Litologicamente, têm-se

arenitos inconsolidados com níveis de argilitos intercalados da Formação Rio Claro e siltitos argilosos e argilitos da Formação Corumbataí (ZAINÉ, 1994).

Em outubro de 1999 foram executadas no aterro várias sondagens do tipo SPT, das quais nota-se: (a) os níveis freáticos foram encontrados nas profundidades de 9,6 m à jusante e 13,5 m à montante do aterro; (b) a base da cava do aterro encontra-se em sedimentos predominantemente arenosos e/ou areno-argilosos da Formação Rio Claro, chegando a um máximo de profundidade de 14,5 m; (c) o topo das rochas da Formação Corumbataí foi encontrado no mínimo a 13 m; (d) o material de empréstimo utilizado para cobrir as células de resíduos constitui-se de sedimentos areno-argilosos;

MELO (1995) realizou análises mineralógicas da fração argila da Formação Rio Claro, encontrando a seguinte proporção dos minerais argilosos: caulinita, muito abundante (50% a 80%); illita, escassa (1 a 5%); camada mista, rara (<1%); gibbsita, rara (<1%) e goethita, rara (<1%).

A condutividade hidráulica da Formação Rio Claro intemperizada possui valor médio de $2,3 \times 10^{-4}$ cm/s e a da Formação Corumbataí possui valor médio de $6,5 \times 10^{-7}$ cm/s (COTTAS, 1983).

Metodologia geofísica

No presente trabalho foram empregados os métodos geofísicos eletrorresistividade (ER) e a polarização elétrica induzida (IP). A eletrorresistividade baseia-se no fato de que as rochas, em função de suas composições mineralógicas, texturais e disposições, apresentam a propriedade elétrica da resistividade. Já o método IP baseia-se no comportamento elétrico do contato do condutor ôhmico (metal, semicondutor e grafita) ou da argila com a solução eletrolítica que permeia os poros das rochas. Esse comportamento elétrico e o contraste entre as resistividades das rochas, dos sedimentos e dos minerais, viabilizam a utilização dos métodos como forma de investigação geológica, geotécnica, prospecção mineral, hidrogeológica e ambiental.

O método da eletrorresistividade tem como princípio a passagem pelo solo de uma corrente elétrica de intensidade I , transmitida por um par de eletrodos denominados A e B , conectado a uma fonte de corrente (bateria). Mede-se a diferença de potencial (ΔV) entre dois eletrodos de recepção denominados M e N . A partir daí, pode-se calcular a resistividade aparente ρ_a , dada pela equação:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\Omega.m) \quad (1)$$

onde K é o fator geométrico do arranjo geral do quadrípulo $AMNB$ (KELLER & FRISCHKNECHT, 1977)

que depende somente das posições de injeção de corrente e de medida do potencial, dado por:

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (\text{m}) \quad (2)$$

sendo AM , AN , BM e BN as distâncias entre os eletrodos.

A polarização induzida é um fenômeno físico elétrico, estimulado pela transmissão de uma corrente elétrica pulsante e periódica no subsolo, observada como uma resposta defasada de voltagem nos materiais terrestres (SUMNER, 1976). A detecção e medida dessa resposta, conhecida na literatura geofísica como curva de relaxação ou transiente, indicará a presença de material polarizável no subsolo, constituindo-se, portanto, a base do método IP. Nesta pesquisa, empregou-se o equipamento IPR-12 da Scintrex, que define a medida do efeito IP como (SCINTREX, 1995):

$$M_a = \frac{1}{(t_2 - t_1)V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_{IP}(t) dt \quad (3)$$

onde: M_a é a polarizabilidade aparente em mV/V (PARASNIS, 1986); t_1 é o tempo inicial da janela em ms; t_2 é o tempo final da janela em ms; V_p é a voltagem primária durante a corrente no estado ligado; $V_{IP}(t)$ é a voltagem transiente medida durante o período de integração ($t_2 - t_1$) no estado de corrente desligado.

Utilizou-se na área de estudo, um tempo de recepção do sinal de 2 segundos (injeção e medição). Os tempos iniciais e finais utilizados para o cálculo do efeito IP foram de 340 ms e 520 ms, respectivamente. Esses tempos foram escolhidos de acordo com os ensaios de testes realizados na área estudada.

Na área do aterro foram executados ensaios geofísicos utilizando as técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) com arranjo Schlumberger e caminhamento elétrico (CE) dipolo-dipolo. Nos ensaios de SEV o espaçamento dos eletrodos de corrente foi variado em média de 100 m, enquanto nos ensaios de CE foram utilizados espaçamentos entre os dipolos de 5 e de 10 metros, com cinco níveis de investigações, atingindo profundidades teóricas máximas de 15 e 30 metros, respectivamente.

A interpretação geofísica dos dados consistiu do uso de modelagem numérica, utilizando os métodos direto e inverso. Informações de tipo litológico de solos, das posições do nível freático em poços de monitoramento e cacimbas, e medidas de condutividade elétrica realizadas em amostras de água coletadas nesses poços, corroboraram com a geofísica na interpretação dos dados.

Na modelagem direta dos dados de SEV, calculou-se, a partir de um método numérico que envolve filtros digitais lineares (SEARA & GRANDA, 1987), espessura, resistividade e polarizabilidade das camadas. Nos dados de CE, utilizou-se o método dos elementos finitos (RIJO, 1977) para obter-se a solução aproximada de modelos com as mais complexas geometrias. Na modelagem direta os parâmetros dos modelos são modificados até que a curva de sondagem (ou a pseudo-seção de CE)

teórica ajuste visualmente com a curva (ou pseudo-seção) de campo.

Na interpretação inversa calculou-se iterativamente novos modelos iniciados com os parâmetros fornecidos pelo método direto até atingir certo critério de convergência que minimizou as diferenças entre as curvas (ou pseudo-seções) teórica e de campo. Este processo é baseado na técnica da regressão múltipla - Ridge Regression (INMAN, 1975).

Apresentação e análise dos resultados

Os resultados obtidos da interpretação das SEVs estão apresentados nas Tabelas 1 e 2. Na Figura 1 estão as curvas de sondagens SEVIP(10) e SEVIP(2), representativas das sondagens realizadas dentro e fora dos limites da área de disposição de resíduos, respectivamente.

Conhecidas as cotas de cada SEV, de sondagens SPT, de poços de monitoramento e de cacimba, e a profundidade do nível d'água (N.A.), determinou-se a cota do lençol freático no ponto. Posteriormente foram traçadas as isolinhas do N.A., gerando o mapa potenciométrico (Figura 2).

Com o objetivo de mapear os limites laterais da cava de resíduos e avaliar se a polarizabilidade seria sensível à presença de resíduos urbanos, foi executada a linha CEIP(3), conforme mostra a Figura 3, constando das pseudo-seções de resistividade e de polarizabilidade e o modelo interpretado. Na Figura 4, observam-se as pseudo-seções e o modelo interpretado da linha CEIP(1a), ensaiada com o objetivo de detectar a presença da pluma de contaminação nos arredores do aterro.

Com base nos resultados dos ensaios anteriormente descritos, tem-se:

a) Os sedimentos predominantemente arenosos saturados (Tabela 1) é o que apresenta maior continuidade lateral encontrado em todas as SEVs, e é o mais condutivo quando está contaminado por chorume. Comparando as medidas de condutividade, realizadas com condutímetro digital, de amostras de água coletadas nos poços de monitoramento PM-1, PJ-1 e PJ-2, respectivamente, 185,2 $\mu\text{S/cm}$ (54 $\Omega\cdot\text{m}$), 243,9 $\mu\text{S/cm}$ (41 $\Omega\cdot\text{m}$) e 122,4 $\mu\text{S/cm}$ (89 $\Omega\cdot\text{m}$), com relação a medida de 36,6 $\mu\text{S/cm}$ (273 $\Omega\cdot\text{m}$) em amostra coletada no poço tipo cacimba, localizado a montante do aterro, distante da cava (Figura 2), interpreta-se a influência de contaminantes na zona saturada, indicando contaminação, conforme constatado pela metodologia geofísica.

b) A interpretação conjunta da polarizabilidade e da resistividade permitiu determinar os diferentes litotipos predominantes na Formação Corumbataí, identificando materiais silte-arenosos (baixa polarizabilidade) e materiais silte-argilosos com altos valores de polarizabilidade (Tabela 1). Assim sendo, a polarizabilidade distinguiu os sedimentos silte-arenosos do silte-argilosos, o que não foi possível com a resistividade analisada sozinha, utilizando somente as sondagens de resistividade.

c) Os resíduos apresentam baixas resistividades e predominantemente altas polarizabilidades (Tabela 2). Os valores respectivos de polarizabilidade refletem a presença de materiais polarizáveis como latas, refugos eletrônicos, pedaços de ferro, papeis impressos e material de construção presentes na cava de resíduos (VOLGESANG, 1995).

d) O substrato resistivo, relacionado à base do aterro, compõem-se dos sedimentos predominantemente arenosos, apresentando o fenômeno de IP baixíssimo, devido ao baixo teor de argila presente nesse horizonte (Tabela 2).

e) O sentido do fluxo subterrâneo na área do aterro de Rio Claro é predominantemente para SW (Figura 2), conforme indicado pelas direções preferenciais do fluxo d'água subterrâneo.

f) A Linha CEIP(3) (Figura 3) mostra que os altos valores de ρ_a (maiores que 300 $\Omega.m$) associados a baixos valores de M_a (menores que 20 mV/V) podem ser interpretados como "background" que aparecem nos extremos esquerdos das pseudo-seções, fora da cava de resíduos. Os valores de ρ_a menores que 30 $\Omega.m$, associados a altos valores de M_a (maiores que 30 mV/V) encontrados dentro da cava, caracterizam a presença de resíduos. Separando essas zonas (meio natural e dos resíduos), observam-se tanto anomalias de resistividade e de polarizabilidade localizadas na posição de 75 m, caracterizando uma descontinuidade lateral correspondente ao limite lateral da cava de resíduos. O intervalo de resistividade, de 30 $\Omega.m$ a 300 $\Omega.m$, associado ao intervalo de polarizabilidade de 20 mV/V a 30 mV/V, é interpretado como sendo relativo à zona de transição entre o meio natural e os resíduos, refletindo a zona afetada pela contaminação por chorume e/ou pela presença de resíduos.

g) A linha CEIP(1a) (Figura 4), ensaiada ao lado do aterro (Figura 2), apresenta valores de ρ_a inferiores a 300 $\Omega.m$, predominando valores inferiores a 150 $\Omega.m$, que refletem a presença da contaminação proveniente do aterro, conforme medidas de condutividade elétrica de amostras de água de poços de monitoramento, descritas anteriormente. Quanto aos valores de M_a , o comportamento de crescimento dos valores, com o aumento da profundidade teórica, associa-se a sedimentos predominantemente arenosos da Formação Rio Claro na parte superior (baixas polarizabilidades), e na parte inferior (mais alta polarizabilidade), os sedimentos siltosos da Formação Corumbataí. Não é evidente a sensibilidade da polarizabilidade no mapeamento da contaminação fora da área de resíduos, ao contrário da resistividade.

Conclusões

Os resultados mostram que a resistividade e a polarizabilidade são sensíveis à presença dos resíduos urbanos, que apresentaram altos valores de polarizabilidade refletindo a presença de materiais polarizáveis dentro da cava de resíduos, como metais enferrujados (latas), restos eletrônicos (pilhas, componentes de circuito elétrico) e papel impresso (jornais, revistas). As resistividades baixas encontradas devem-se as elevadas concentrações de íons cloreto e

outros íons, tais como sódio, sulfatos e nitratos que contribuem para o aumento da condutividade elétrica do percolado. Além disso, foi possível mapear o limite lateral da cava de resíduos, com base no resultado do ensaio de CE.

Na área do aterro de Rio Claro, o sentido do fluxo das águas subterrâneas é predominantemente para SW

Na definição do modelo geológico para a Formação Rio Claro e Corumbataí, nos locais estudados, a interpretação conjunta da resistividade e da polarizabilidade, além de reduzir a ambigüidade do modelo, permitiu determinar os diferentes litotipos predominantes nessas Formações, identificando materiais predominantemente arenosos, silte-argilosos e silte arenosos.

Agradecimentos

Ao departamento de geologia aplicada do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP pelo apoio nos trabalhos de campo que resultou no presente artigo. A Universidade Federal do Amapá pelo apoio necessário para a realização desse trabalho. À CAPES pelo apoio financeiro na forma de bolsa do PICDT.

Referências

- CARPENTER, P. J., KAUFMANN, R. S., PRICE, B. Use of resistivity soundings to determine landfill structure. **Ground Water**, Dublin, Ohio, v. 28, n. 4, p.569-575, July/aug. 1990.
- COTTAS, L.R. **Estudos geológicos-geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro- SP**. 1983. 2 v. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.
- INMAN, J. R. Resistivity inversion with ridge regression. **Geophysics**, Tulsa, OK, n.40, p.789-817, 1975.
- KELLER, G. V.; FRISCHKNECHT, F. C. **Electrical methods in geophysical prospecting**. Oxford: Pergamon Press, 1977. 517 p.
- MELO, M. S. **A Formação Rio Claro e depósitos associados**: sedimentação neocenozoica na depressão periférica paulista. 1995. 144 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- MOURA, H. P. **Emprego da eletrorresistividade e da polarização induzida na caracterização geológica de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos**. 2002. 231 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.
- PARASNIS, D. S. **Principles of applied geophysics**. 5th ed. [S.I.]: Chapman & Hall, 1986. 402 p.
- RIJO, L. **Modeling of electric and eletromagnetic data**. 1977. 242 f. Ph. D. Thesis - University of Utah, Salt Lake City, 1977.
- SCINTREX LIMITED. **IPR - 12 time domain IP/resistivity receiver**: Operation manual. Ontario, 1995. Paginação irregular.

SEARA, J. L.; GRANDA, A. Interpretation of IP time domain/resistivity soundings for delineating sea – water intrusions in some coastal areas of the northeast of Spain. **Geoexploration**, Trondheim, NO, n.24, p.153-167, 1987.

SUMNER, J. S. **Principles of induced polarization for geophysical exploration**. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. 277 p.

VOGELSANG, D. **Environmental Geophysics**. A practical guide. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 174 p.

ZAINE, J. E. **Geologia da formação Rio Claro na folha Rio Claro-SP**. 1994. 89 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1994.

Tabela 1 – Modelo geoeletrico fora dos limites da área de disposição de resíduos.

Horizonte Geoeletrico		SEVs IP/ER		SEVs ER	
		mV/V	$\Omega.m$	$\Omega.m$	
Formação Rio Claro	Solo Superficial (Sedimentos pred. arenosos)		1,5 – 2,6	91 – 380	76 – 1587
	Sedimentos pred. arenosos	meio natural	1,8– 6,3	270 – 4796	105 [*] – 3359
		contaminado	6,9	60	22 – 64
	Sedimentos pred. arenosos (N. A.)	meio natural	4,5	328	296 – 318
		contaminado	4,4 – 7,4	54	8 – 12
Formação Corumbataí	Sed. silte-arenoso	1,3	21	24 – 149 **	
	Sed. silte-argiloso	11– 28,4	81 – 98		
Formação Irati (Calcário)		0,01	2986	3354-6464	

* Valor relacionado a níveis argilosos; ** Valor relacionado ao contato entre as Formações Rio Claro e Corumbataí.

Tabela 2 – Modelo geoeletrico dentro da área do aterro.

Horizonte Geoeletrico	SEVs IP/ER		SEVs ER
	mV/V	$\Omega.m$	$\Omega.m$
Sedimentos pred. arenosos (cobertura)	1,7 – 2,5	125 – 141	6 – 103
Resíduos	5,6 – 34,4	23 – 41	7 – 13
Cobertura c/ influência dos resíduos	19,8	68	19 – 35
Resíduos	4,7–48,5	4 – 21	3 – 14
Sed. pred. arenosos (contaminado/base da cava)	-	-	15 – 29
Sed. pred. arenosos da Fm. Rio Claro (base da cava)	0,1	817 – 927	786 – 1998

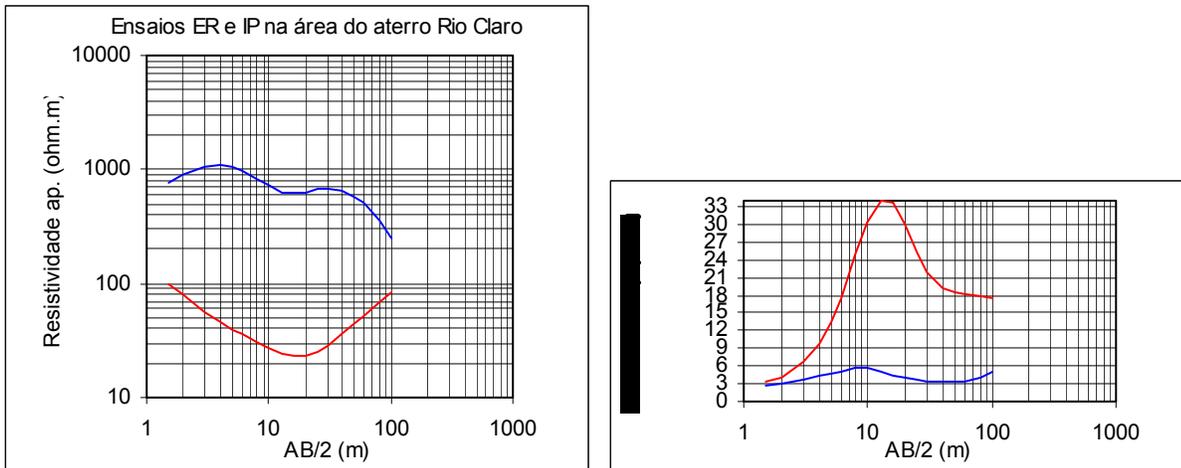


Figura 1 – Curvas de campo das sondagens SEVIP(10) (cor vermelha) e SEVIP(2) (cor azul).

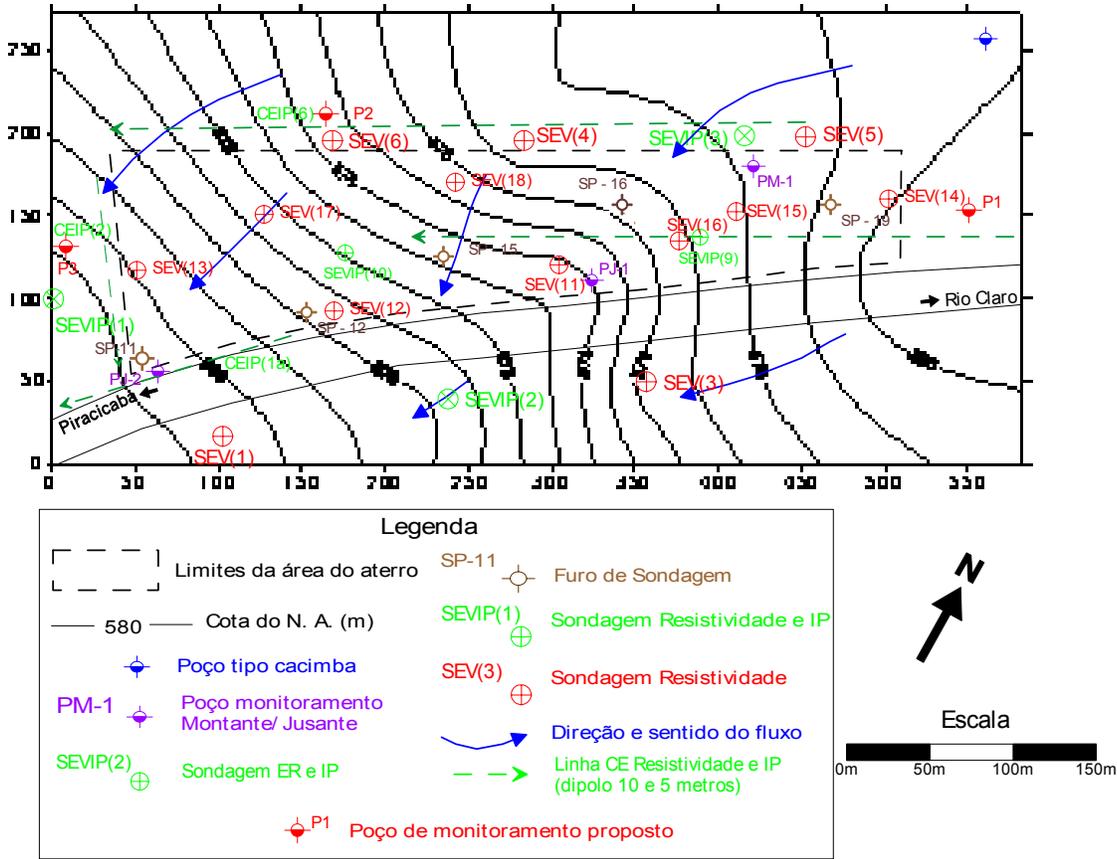


Figura 2 – Mapa potenciométrico na área do aterro Rio Claro.

Linha CEIP(3) - Caminhamento de Resistividade e IP (dipolo 10 metros)

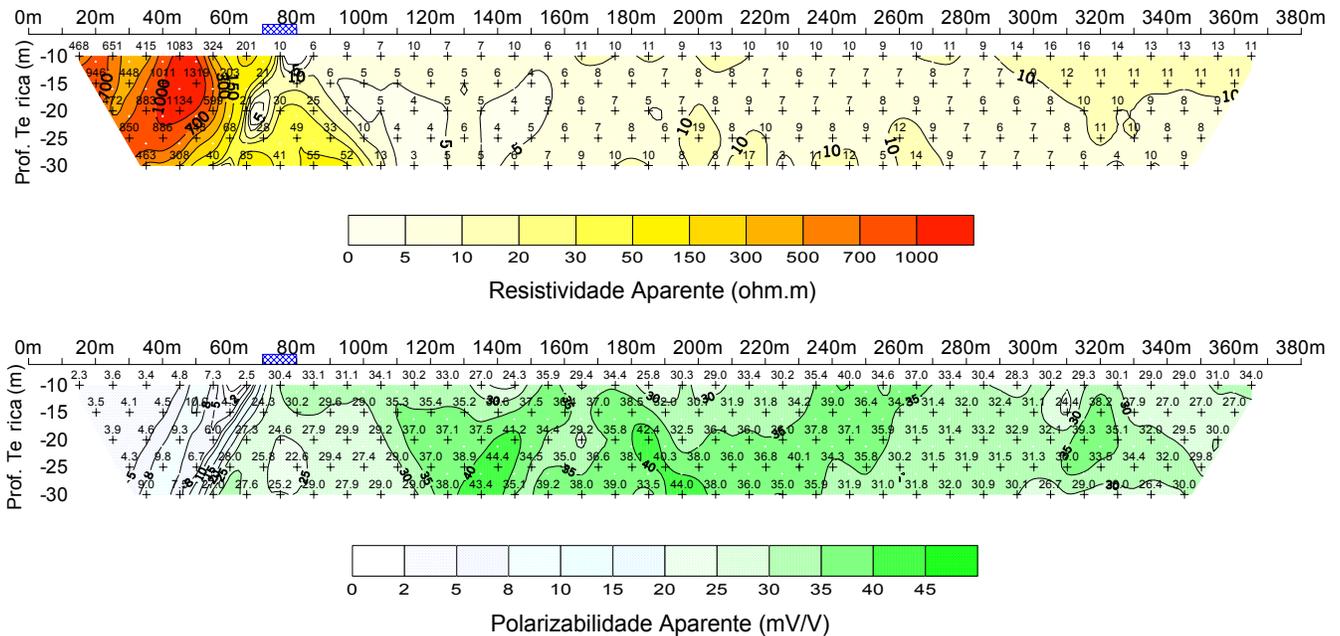


Figura 3 – Pseudo-seções de resistividade e polarizabilidade aparentes da Linha CEIP(3).

Linha CEIP(1a) – Caminhamento de Resistividade e IP (dipolo 10 m)

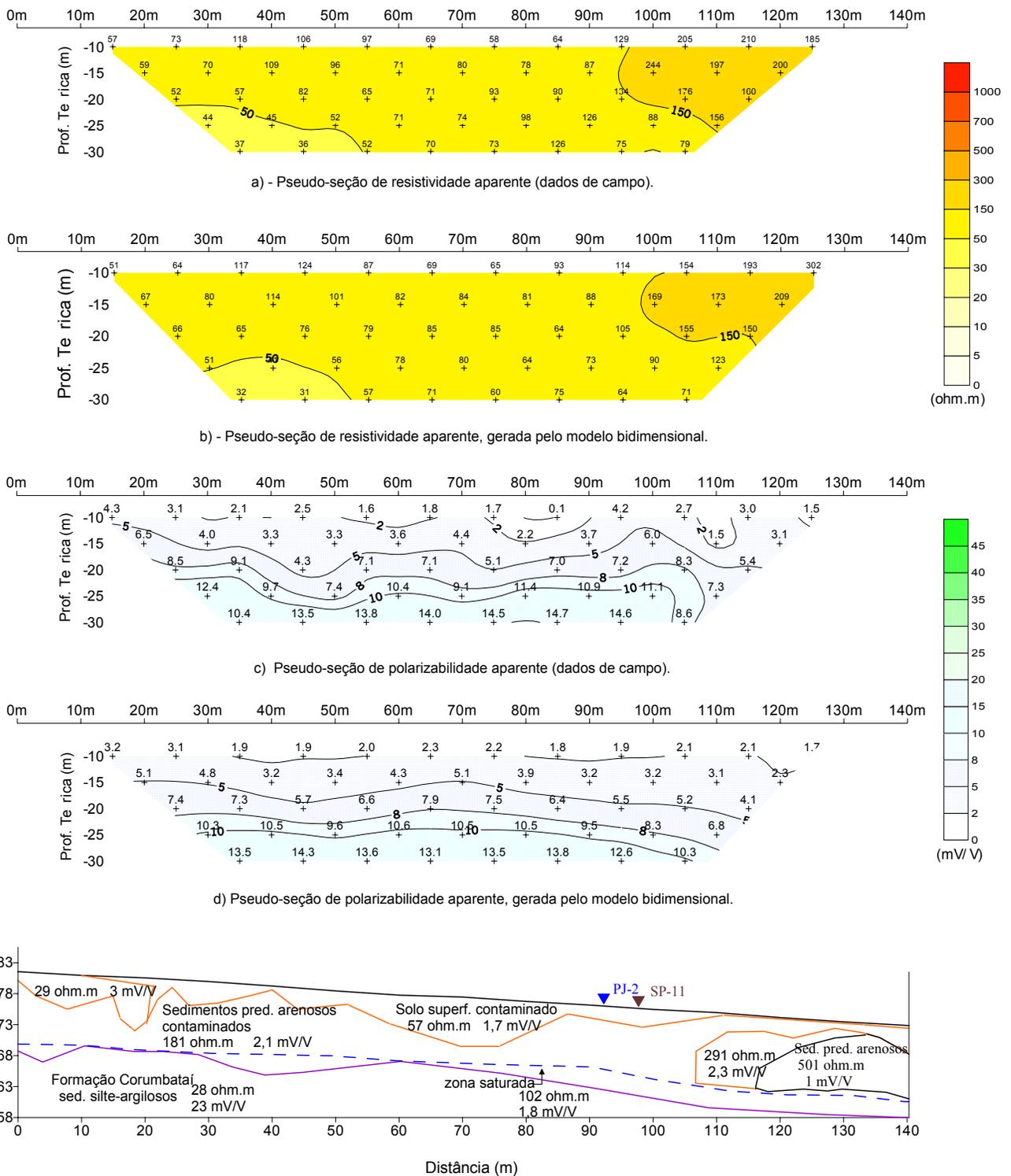


Figura 4 – Pseudo-seções de resistividade e polarizabilidade aparentes e o modelo interpretado da Linha CEIP(1a).