

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
*Campus* de Rio Claro

JOSÉ RICARDO MELGES BORTOLIN

**MÉTODOS GEOELÉTRICOS EMPREGADOS NA  
CARACTERIZAÇÃO E MONITORAMENTO DE  
ANOMALIAS INERENTES À INFILTRAÇÃO  
CONTROLADA DE VINHAÇA**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do *Campus* de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Walter Malagutti Filho  
Co-Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro – SP  
2014

551 Bortolin, José Ricardo Melges  
B739me Métodos geoeletricos empregados na caracterização e monitoramento de anomalias inerentes à infiltração controlada de vinhaça / José Ricardo Melges Bortolin. - Rio Claro, 2014  
234 f. : il., figs., gráfs., tabs., quadros

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Walter Malagutti Filho  
Coorientador: César Augusto Moreira

1. Geofísica. 2. Potencial espontâneo. 3. Resistividade elétrica. 4. Polarização induzida. 5. Eletromagnético. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP  
Campus de Rio Claro/SP

JOSÉ RICARDO MELGES BORTOLIN

**MÉTODOS GEOELÉTRICOS EMPREGADOS NA  
CARACTERIZAÇÃO E MONITORAMENTO DE ANOMALIAS  
INERENTES À INFILTRAÇÃO CONTROLADA DE VINHAÇA**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do *Campus* de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. Walter Malagutti Filho  
Orientador  
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

---

Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga  
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

---

Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas  
IG/USP/São Paulo (SP)

---

Prof. Dr. João Carlos Dourado  
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

---

Prof. Dr. Otávio Coaracy Brasil Gandolfo  
CT/IPT/São Paulo (SP)

Resultado: Aprovado

Rio Claro (SP), 15 de maio de 2014.

À minha família, à minha noiva Amanda e ao  
meu tio Mário Antônio Gianotti (*in memoriam*)

## Agradecimentos

Por mais simples que possa parecer, escrever os agradecimentos de uma monografia pode ser tão difícil quanto escrever a própria monografia. Ou porque não queremos nos esquecer de ninguém que foi de fundamental importância para a conclusão do trabalho ou porque não sabemos expressar com palavras o quão importante a pessoa é, foi ou tornou-se nos âmbitos pessoal e profissional.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder saúde, sabedoria e discernimento por todos os dias dos últimos quatro anos, para que eu pudesse concluir com êxito este projeto.

Aos meus pais, José e Véra Lucia, que sempre caminharam ao meu lado (inclusive nos trabalhos de campo) e fizeram o possível e o impossível para dar a mim e ao meu irmão todas as condições necessárias para que pudéssemos alcançar nossos objetivos.

Ao meu irmão, Luís Rodrigo, por me acompanhar várias vezes durante minha jornada, seja em trabalhos de campo, em viagens ou em discussões científicas que sempre terminavam em descontraídos e alguns memoráveis bate-papos.

Assim como na minha dissertação de mestrado, agradeço novamente à minha família, que esteve ao meu lado sempre que precisei, e à minha “nova” família, que me acolheu e também me ajudou por diversas vezes.

Ao meu orientador, Prof. Walter Malagutti Filho, e ao meu co-orientador, Prof. César Augusto Moreira, por novamente confiarem em mim e acreditarem tanto quanto (ou, às vezes, até mais do que) eu neste projeto; pelas inúmeras idéias e sugestões, sempre construtivas, por todas as conversas, auxílios em campo, soluções de dúvidas e por compartilharem comigo suas experiências de vida profissional e pessoal.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico – CNPq pelo auxílio financeiro na forma de bolsas de estudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa Científica do Estado de São Paulo – FAPESP pelo financiamento da compra de equipamentos (processo 2011/21659-5).

Aos técnicos Francisco Manoel Garcia Barrera (Paco) e Alan de Oliveira pelo imensurável e fundamental auxílio nos inúmeros trabalhos de campo.

Aos integrantes da banca do exame de qualificação, Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga e Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas, aos quais vieram somar-se na banca

de defesa, Prof. Dr. João Carlos Dourado e Prof. Dr. Otávio Coaracy Brasil Gandolfo, por todas as correções, sugestões e contribuições direcionadas ao êxito do meu projeto.

Ao Sr. Edmur Altarugio, proprietário do Sítio Altarugio, e ao meu tio, Antonio Guilherme Scatolin, proprietário da Chácara Santana, por permitirem incondicionalmente a realização de todos os procedimentos necessários à conclusão deste projeto em suas propriedades.

À Usina Granelli, representada na pessoa do Sr. José Granelli, por ceder toda a vinhaça necessária infiltrada nas áreas de estudos.

Aos amigos e familiares que também me ajudaram nas várias etapas de campos: meu tio, Robson “Bill” e meu cunhado e geólogo Thiago Oliveira Santos (Ganso).

Aos colegas de pós-graduação e geofísicos: Camila Belló Schweig, Felipe Stefani Silva, Lenon Melo Ilha, Henrique Garcia Pereira e em especial à Syngra Machado Lopes e à Alice Marques Pereira.

Ao “anjo da guarda” da Pós-Graduação em Geociências, Rosângela Vacello, por todo apoio em relação à documentação, formulários, malotes, cobranças de prazos e relatórios,....

Aos funcionários da Estação Meteorológica do Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA/IGCE/UNESP) pelos dados de precipitação pluviométrica.

E, novamente, por último, mas em hipótese alguma menos importante, uma pessoa que esteve ao meu lado o tempo todo, mesmo quando distante. Alguém que sofreu quando eu sofri, riu quando eu ri, enfrentou centenas de quilômetros inúmeras vezes pra estar comigo. Alguém que, mais que amiga, mais que companheira, mais que noiva, está prestes a se tornar minha esposa: minha eterna namorada, Amanda.

*So understand  
Don't waste your time always searching for those wasted years  
Face up... make your stand  
And realize you're living in the golden years*

**Adrian Smith**

*Simplesmente me perco nos pensamentos quando o  
assunto é continuar ou parar. Pelo menos terei a certeza  
que tentei se eu parar. E se eu continuar, pode ser que eu  
diga que venci.*

**Amanda Oliveira Santos**

## Resumo

A vinhaça é um resíduo líquido resultante do processo de produção de etanol, na proporção aproximada de 13 litros de vinhaça para cada litro de etanol. Este resíduo é utilizado como fertilizante em lavouras de cana-de-açúcar, pois é rico, principalmente, em potássio, sódio, magnésio e cálcio. Entretanto, o excesso de vinhaça pode causar contaminação do solo e da água subterrânea. Nesta tese, três diferentes volumes de vinhaça (60, 300 e 900 litros) foram infiltrados em duas valas (A e B) escavadas em duas áreas geologicamente distintas, e a pluma de contaminação resultante foi investigada por meio de quatro métodos geofísicos: potencial espontâneo (SP), resistividade elétrica (ER), polarização induzida (IP) e eletromagnético (EM). A Área 1 situa-se na Formação Corumbataí, caracterizada principalmente por sedimentos siltosos e argilosos. A Área 2 está localizada sobre sedimentos arenosos da Formação Pirambóia. Na Área 1, foi possível observar anomalias somente após a infiltração de 900 litros de vinhaça na vala B. No método ER, verificou-se uma anomalia de baixa resistividade próxima à vala. No método IP, a anomalia é caracterizada por reduzidos valores de cargabilidade. Os resultados dos métodos EM e SP não revelaram quaisquer anomalias que pudessem ser correlacionadas ao contaminante. Na Área 2, as anomalias foram observadas após a infiltração de 60 litros de vinhaça na vala A (método EM) e de 300 e 900 litros na vala B (método ER e EM). No método ER, as anomalias foram caracterizadas por reduzidos valores de resistividade, contrastando com os elevados valores de *background*. No método EM, as anomalias foram identificadas por meio de elevados valores de condutividade elétrica. Neste caso, os resultados de métodos de IP e SP não revelaram quaisquer anomalias correlacionadas ao contaminante. Os resultados obtidos na área 1 foram associados à capacidade de troca catiônica (CTC) dos sedimentos siltosos e argilosos da Formação Corumbataí. Na Área 2, os resultados indicam a permanência temporária de eletrólitos solubilizados da vinhaça em subsuperfície. Assim, os resultados sugerem que os métodos elétricos utilizados nesta tese (com exceção do método de SP) podem ser aplicados na investigação de áreas impactadas por vinhaça, porém é necessário considerar alguns fatores limitantes, como os tipos litológicos da área de estudo, as condições climáticas e o volume de vinhaça infiltrada.

**Palavras-chave:** vinhaça; potencial espontâneo; resistividade elétrica; polarização induzida; eletromagnético.



## Abstract

The vinasse is a liquid waste that results of the ethanol production process, in approximate ratio of 13 liters of vinasse for each ethanol liter. This waste is used as fertilizer in sugar cane plantations because it's mainly rich in potassium, sodium, magnesium, and calcium, but, the excess of vinasse can cause soil and groundwater's contamination. In this thesis, three different volumes of vinasse (60, 300, and 900 liters) were infiltrated into two ditches (A and B) excavated in two geologically distinct areas, and the resultant contamination plume was investigated by mean of four geophysical methods: spontaneous potential (SP), electrical resistivity (ER), induced polarization (IP) and electromagnetic (EM). The first area is located on the Corumbataí Formation, that's mainly characterized by silty and clayey sediments. The second area is located over sand sediments of the Pirambóia Formation. At the Area 1, anomalies were observed only after the infiltration of 900 liters of vinasse in the ditch B. In the ER method, an electrical resistivity profile showed a low resistivity anomaly in the location where the vinasse was infiltrated. In the IP method, a chargeability profile showed a low chargeability anomaly in the same location. The results of EM and SP methods do not revealed any anomaly that could be correlated with vinasse infiltration. At the Area 2, anomalies were observed after the infiltration of 60 liters of vinasse in the ditch A (EM method) and 300 and 900 liters of vinasse in the ditch B (ER and EM methods). In the ER method, the anomalies were characterized by low resistivity values, contrasting with the high resistivity background values. In the EM method, the anomalies were identified by mean of high values of electrical conductivity. In this case, the results of IP and SP methods do not revealed any anomaly, and could not be correlated with vinasse infiltration. The results obtained at the Area 1 were associated to cation-exchange capacity (CEC) of the silty and clayey sediments of the Corumbataí Formation. At the Area 2, the results indicate the temporary permanency of solubilized electrolytes of the vinasse in the underground. Thus, the results suggest that the electrical methods used in this thesis (with exception of SP method) can be applied in the investigation of vinasse impacted areas, but it's necessary to consider some limiting factors, such as the lithological types of the study area, the climatic conditions, and the volume infiltrated of vinasse.

**Key words:** vinasse; spontaneous potential; electrical resistivity; induced polarization; electromagnetic.

## Lista de figuras

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.1:</b> Participação na produção mundial de cana-de-açúcar, por países, no ano de 2011 (FAO, 2014).....	5
<b>Figura 1.2:</b> Uso do Solo Agrícola no município de Rio Claro (SP), no ano de 1999 (ISLER E OLIVEIRA, 2005, p.43).....	7
<b>Figura 1.3:</b> Fluxograma do balanço de massa genérico de uma usina de açúcar e álcool (CETESB, 2002, p.9).....	9
<b>Figura 2.1:</b> Representação esquemática do fenômeno SP, com a localização das principais reações químicas. Fonte: adaptado de Sato e Mooney (1960, p.246).....	21
<b>Figura 2.2:</b> Efeito da profundidade da mineralização sobre o potencial medido em superfície.....	22
<b>Figura 2.3:</b> Definição dos estimadores de Petrowsky. Fonte: adaptado de Orellana (1972, p.486).....	23
<b>Figura 2.4:</b> Efeito SP do tipo “potencial eletro-cinético <i>per descensum</i> ”. Fonte: adaptado de Orellana (1972, p.486).....	26
<b>Figura 2.5:</b> Representação esquemática de um eletrodo não polarizável.....	28
<b>Figura 2.6:</b> Representação esquemática da técnica dos potenciais. Fonte: adaptado de Gallas (2005, p.137).....	29
<b>Figura 3.1:</b> Condutor cilíndrico homogêneo usado para obter a expressão da resistividade elétrica.....	33
<b>Figura 3.2:</b> Dispositivo para determinação da resistividade elétrica de um meio homogêneo.....	35
<b>Figura 3.3:</b> Dispositivo tetraeletródico <b>A M N B</b> para aplicação do método da elctorresistividade.....	37
<b>Figura 3.4:</b> Exemplo hipotético de sucessão de camadas geológicas com heterogeneidades e anisotropias distribuídas lateralmente e em profundidade.....	39
<b>Figura 3.5:</b> Vista superior da distorção do campo elétrico causada por um corpo heterogêneo e anisotrópico. Fonte: Sheriff (1989, p.184).....	39
<b>Figura 3.6:</b> Técnica da Sondagem Elétrica Vertical com arranjo Schlumberger.....	41
<b>Figura 3.7:</b> Técnica do Imageamento Elétrico com arranjo Dipolo-Dipolo.....	42
<b>Figura 4.1:</b> Polarização de membrana. Fonte: adaptado de Kearey, Brooks e Hill (2002, p.200).....	50
<b>Figura 4.2:</b> Polarização metálica. Fonte: adaptado de Kearey, Brooks e Hill (2002, p.200).....	51
<b>Figura 4.3:</b> Polarização Induzida – Domínio do tempo.....	52
<b>Figura 5.1:</b> Esquema representativo da Lei de Ampère. Fonte: adaptado de Telford, Geldart e Sheriff (1990, p.63).....	58
<b>Figura 5.2:</b> Princípio do método eletromagnético.....	60
<b>Figura 5.3:</b> a) Dipolo Magnético Vertical – DMV; b) Dipolo Magnético Horizontal – DMH.....	60
<b>Figura 5.4:</b> Técnica do Caminhamento Eletromagnético (vista superior).....	63

<b>Figura 6.1:</b>	Vista por satélite do Sítio Altarugio. A localização da área de estudos está explicitada pelo círculo branco. Data da imagem: 05/10/2005. Fonte: Google (2012a).....	66
<b>Figura 6.2:</b>	À esquerda: edificação atual onde se encontra o alambique. À direita: antiga edificação, próxima ao salto do Rio Cabeça, onde funcionava o alambique.....	67
<b>Figura 6.3:</b>	Irrigação de parte da lavoura com vinhaça.....	67
<b>Figura 6.4:</b>	Vista geral da área de estudos. À esquerda: visão a partir da montante. À direita: visão a partir da jusante.....	68
<b>Figura 6.5:</b>	Mapa topográfico da área de estudos (tracejada em vermelho).....	68
<b>Figura 6.6:</b>	Mapa geológico regional da área de estudos 1. Fonte: modificado de Instituto Geológico (1986).....	69
<b>Figura 6.7:</b>	Afloramento de sedimentos alterados da Fm. Corumbataí. Local: entrada do Sítio Altarugio.....	70
<b>Figura 6.8:</b>	Afloramento de diabásios da Fm. Serra Geral. Local: barranco da estrada não pavimentada à jusante da área de estudos.....	71
<b>Figura 6.9:</b>	Ocorrências de temperatura <sup>1</sup> (1961-1990) e pluviosidade <sup>2</sup> (1936-2006) no município de Rio Claro. Fonte: <sup>1</sup> CEPAGRI [20--a]; <sup>2</sup> DAEE (2011).....	73
<b>Figura 6.10:</b>	Mapa pedológico regional da área de estudos 1. Fonte: modificado de Oliveira, Prado e Almeida (1981).....	74
<b>Figura 6.11:</b>	Vista por satélite da Chácara Santana. A localização da área de estudos está explicitada pelo círculo preto. Data da imagem: 30/09/2009. Fonte: Google (2012b).....	75
<b>Figura 6.12:</b>	Mapa topográfico da área de estudos (tracejada em vermelho).....	76
<b>Figura 6.13:</b>	Mapa geológico regional da área de estudos 2. Fonte: modificado de Instituto Geológico (1986).....	77
<b>Figura 6.14:</b>	Ocorrências de temperatura <sup>1</sup> (1961-1990) e pluviosidade <sup>2</sup> (1939-2004) no município de Corumbataí. Fonte: <sup>1</sup> CEPAGRI [20--b]; <sup>2</sup> DAEE (2011).....	79
<b>Figura 6.15:</b>	Mapa pedológico regional da área de estudos 2. Fonte: modificado de Oliveira, Prado e Almeida (1981).....	80
<b>Figura 7.1:</b>	Mapas de localização dos ensaios de condutividade hidráulica. À esquerda: Área 1. À Direita: Área 2.....	81
<b>Figura 7.2:</b>	Permeâmetro Guelph 2800K1. À esquerda: Área 1. À direita: Área 2.....	81
<b>Figura 7.3:</b>	Coleta de amostras de solo do fundo dos furos dos ensaios de condutividade hidráulica na Área 1.....	82
<b>Figura 7.4:</b>	Etapas do processo de separação das frações argila+silte e areia+cascalho. As fotos exibem materiais coletados na Área 1.....	83
<b>Figura 7.5:</b>	Resistivímetro ABEM TERRAMETER SAS4000.....	85
<b>Figura 7.6:</b>	Acima: os limites da área de estudos estão inseridos totalmente na seção. Abaixo: os limites da mesma área não são completamente abrangidos no nível 5.....	87
<b>Figura 7.7:</b>	Detalhe da tela de configuração do modo IP do resistivímetro ABEM TERRAMETER SAS4000.....	87
<b>Figura 7.8:</b>	Condutivímetro GEONICS EM31-MK2. À esquerda, acima: painel de controle. À esquerda, abaixo: em operação no campo. À direita: é possível visualizar o <i>data logger</i> na mão do operador.....	89
<b>Figura 7.9:</b>	Módulo de medição de potencial BISON 2390 – R.....	91

<b>Figura 7.10:</b>	DGPS Trimble. À esquerda: receptor Navigation Pathfinder Pro XR 12 (painel frontal – acima – e painel traseiro – abaixo) (TRIMBLE, 2001, p.40 e 42). Ao centro: em operação no campo. À direita, acima: antena integrada GPS/MSK beacon (TRIMBLE, 2001, p.11). À direita, abaixo: coletor Recon ( <a href="http://www.trimble.com/Outdoor-Rugged-Computers/recon.aspx">http://www.trimble.com/Outdoor-Rugged-Computers/recon.aspx</a> ).....	92
<b>Figura 7.11:</b>	Modelo de células (ou blocos) utilizado pelo software Res2Dinv. Fonte: Geotomo Software (2003, p.2).....	94
<b>Figura 7.12:</b>	Vista geral da Usina Granelli, no município de Charqueada (SP).....	97
<b>Figura 7.13:</b>	Coleta de vinhaça na Usina Granelli.....	97
<b>Figura 7.14:</b>	Vista da lagoa de armazenamento de vinhaça da Usina Granelli. É possível notar o tubo condutor por onde a vinhaça é trazida desde a usina e parte do revestimento impermeabilizante de PAD da lagoa.....	98
<b>Figura 7.15:</b>	Enchimento de uma carreta-tanque com vinhaça.....	98
<b>Figura 7.16:</b>	Aplicação de vinhaça na lavoura canvieira por meio de canhão hidráulico.....	98
<b>Figura 7.17:</b>	Abertura das valas de infiltração na Área 1.....	99
<b>Figura 7.18:</b>	Abertura das valas de infiltração na Área 2.....	99
<b>Figura 7.19:</b>	Mapa de localização das valas na Área 1.....	100
<b>Figura 7.20:</b>	Mapa de localização das valas na Área 2.....	100
<b>Figura 8.1:</b>	Mapa de localização das SEV da Área 1 (ao centro) e suas respectivas curvas de campo (no entorno).....	103
<b>Figura 8.2:</b>	Mapa de localização dos IE pré-infiltração executados na Área 1.....	105
<b>Figura 8.3:</b>	Seções de resistividade das Linhas 1 a 5 (pré-infiltração) da Área 1. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo. Abertura dos dipolos ( $x$ ) = 3m.....	106
<b>Figura 8.4:</b>	Seções de cargabilidade das Linhas 1 a 5 (pré-infiltração) da Área 1. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo. Abertura dos dipolos ( $x$ ) = 3m.....	107
<b>Figura 8.5:</b>	Acima: seção de resistividade da Linha 0. Abertura dos dipolos ( $x$ ) = 5m. Abaixo: seção de resistividade combinada pelas Linhas 0 e 3. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.....	108
<b>Figura 8.6:</b>	Acima: seção de cargabilidade da Linha 0. Abertura dos dipolos ( $x$ ) = 5m. Abaixo: seção de cargabilidade combinada pelas Linhas 0 e 3. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.....	108
<b>Figura 8.7:</b>	Mapa de localização dos IEM pré-infiltração executados na Área 1.....	109
<b>Figura 8.8:</b>	Mapas de condutividade elétrica (pré-infiltração) para a Área 1.....	110
<b>Figura 8.9:</b>	Mapa de localização das estações de SP da Área 1.....	110
<b>Figura 8.10:</b>	Mapa de potencial espontâneo (pré-infiltração) da Área 1.....	111
<b>Figura 8.11:</b>	Infiltração de vinhaça na Área 1.....	113
<b>Figura 8.12:</b>	Redução dos limites da área de estudos.....	114
<b>Figura 8.13:</b>	Mapa de localização dos IE pós-infiltração executados na Área 1.....	115
<b>Figura 8.14:</b>	Seção de resistividade da Linha de referência da fase pós-infiltração da Área 1. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo...	116
<b>Figura 8.15:</b>	Seção de cargabilidade da Linha de referência da fase pós-infiltração da Área 1. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo...	116
<b>Figura 8.16:</b>	Seções de resistividade da Linha A executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.....	117

<b>Figura 8.17:</b> Seções de resistividade da Linha A executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.....	118
<b>Figura 8.18:</b> Seções de cargabilidade da Linha A executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.....	119
<b>Figura 8.19:</b> Seções de cargabilidade da Linha A executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.....	120
<b>Figura 8.20:</b> Seções de resistividade da Linha B executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.....	122
<b>Figura 8.21:</b> Seções de cargabilidade da Linha B executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.....	123
<b>Figura 8.22:</b> Seções de resistividade da Linha B executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.....	125
<b>Figura 8.23:</b> Seções de cargabilidade da Linha B executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.....	126
<b>Figura 8.24:</b> Correlação entre a pluviometria diária do mês de setembro de 2013 e as flutuações da cargabilidade no entorno da vala B.....	128
<b>Figura 8.25:</b> Mapa de localização dos IEM pós-infiltração executados na Área 1.....	129
<b>Figura 8.26:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 1 dia após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).....	130
<b>Figura 8.27:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 8 dias após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).....	130
<b>Figura 8.28:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 15 dias após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).....	131
<b>Figura 8.29:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 22 dias após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).....	131
<b>Figura 8.30:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 1 dia após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).....	133
<b>Figura 8.31:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 8 dias após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).....	143
<b>Figura 8.32:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 15 dias após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).....	134
<b>Figura 8.33:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 22 dias após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).....	134
<b>Figura 8.34:</b> Mapa de localização dos ensaios de SP pós-infiltração executados na Área 1.....	135
<b>Figura 8.35:</b> Mapas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).....	136
<b>Figura 8.36:</b> Pluviometria diária do mês de agosto de 2013.....	137

<b>Figura 8.37:</b>	Mapas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).....	138
<b>Figura 9.1:</b>	Mapa topográfico da Chácara Santana indicando a localização das SEV	142
<b>Figura 9.2:</b>	Curvas de campo das SEV da Área 2.....	142
<b>Figura 9.3:</b>	Afloramentos observados na Área 2. À esquerda: sedimentos arenosos da Fm. Pirambóia. À direita: sedimentos silto-argilosos da Fm. Corumbataí.....	143
<b>Figura 9.4:</b>	Mapa de localização dos IE da Área 2.....	144
<b>Figura 9.5:</b>	Seções de resistividade das Linhas 1 a 5 (pré-infiltração) da Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo. Abertura dos dipolos (x) = 3m.....	145
<b>Figura 9.6:</b>	Seções de cargabilidade das Linhas 1 a 5 (pré-infiltração) da Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo. Abertura dos dipolos (x) = 3m.....	146
<b>Figura 9.7:</b>	Acima: seção de resistividade da Linha 0. Abertura dos dipolos (x) = 5m. Abaixo: seção de resistividade combinada pelas Linhas 0 e 3. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.....	147
<b>Figura 9.8:</b>	Acima: seção de cargabilidade da Linha 0. Abertura dos dipolos (x) = 5m. Abaixo: seção de resistividade combinada pelas Linhas 0 e 3. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.....	147
<b>Figura 9.9:</b>	Mapa de localização dos IEM da Área 2.....	148
<b>Figura 9.10:</b>	Mapas de condutividade elétrica (pré-infiltração) para a Área 2.....	149
<b>Figura 9.11:</b>	Mapa de localização das estações de SP da Área 2.....	150
<b>Figura 9.12:</b>	Mapa de potencial espontâneo (pré-infiltração) da Área 2.....	150
<b>Figura 9.13:</b>	Infiltração de vinhaça na Área 2.....	153
<b>Figura 9.14:</b>	Redução dos limites da área de estudos.....	154
<b>Figura 9.15:</b>	Mapa de localização dos IE pós-infiltração executados na Área 2.....	154
<b>Figura 9.16:</b>	Seção de resistividade da Linha de referência da fase pós-infiltração da Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo...	155
<b>Figura 9.17:</b>	Seção de cargabilidade da Linha de referência da fase pós-infiltração da Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo...	156
<b>Figura 9.18:</b>	Seções de resistividade da Linha A executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala A.....	157
<b>Figura 9.19:</b>	Seções de resistividade da Linha A executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala A.....	158
<b>Figura 9.20:</b>	Seções de cargabilidade da Linha A executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala A.....	160
<b>Figura 9.21:</b>	Seções de cargabilidade da Linha A executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala A.....	161
<b>Figura 9.22:</b>	Correlação entre a pluviometria diária do mês de outubro de 2013 e as flutuações da cargabilidade nas seções referentes à vala A.....	162
<b>Figura 9.23:</b>	Correlação entre a pluviometria diária do mês de novembro de 2013 e as flutuações da cargabilidade nas seções referentes à vala A.....	162
<b>Figura 9.24:</b>	Seções de cargabilidade da Linha B executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala B.....	165

<b>Figura 9.25:</b> Seções de cargabilidade da Linha B executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala B.....	166
<b>Figura 9.26:</b> Seções de cargabilidade da Linha B executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala B.....	168
<b>Figura 9.27:</b> Seções de cargabilidade da Linha B executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala B.....	169
<b>Figura 9.28:</b> Mapa de localização dos IEM pós-infiltração executados na Área 2.....	170
<b>Figura 9.29:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 1 dia após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).....	172
<b>Figura 9.30:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 3 dias após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).....	172
<b>Figura 9.31:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 8 dias após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).....	173
<b>Figura 9.32:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 10 dias após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).....	173
<b>Figura 9.33:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 1 dia após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).....	176
<b>Figura 9.34:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 3 dias após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).....	176
<b>Figura 9.35:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 6 dias após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).....	177
<b>Figura 9.36:</b> Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 8 dias após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).....	177
<b>Figura 9.37:</b> Mapa de localização dos ensaios de SP pós-infiltração executados na Área 2.....	178
<b>Figura 9.38:</b> Mapas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).....	180
<b>Figura 9.39:</b> Mapas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).....	181
<b>Figura A.1:</b> Curvas de condutividade elétrica dos IEM pré-infiltração executados na Área 1.....	210
<b>Figura B.1:</b> Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 1 dia após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.....	212
<b>Figura B.2:</b> Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 8 dias após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.....	213
<b>Figura B.3:</b> Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 15 dias após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.....	214
<b>Figura B.4:</b> Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 22 dias após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.....	215

<b>Figura B.5:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 1 dia após a infiltração de 900 litros na vala B.....	216
<b>Figura B.6:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 8 dias após a infiltração de 900 litros na vala B.....	217
<b>Figura B.7:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 15 dias após a infiltração de 900 litros na vala B.....	218
<b>Figura B.8:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 22 dias após a infiltração de 900 litros na vala B.....	219
<b>Figura B.9:</b>	Curvas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.....	220
<b>Figura B.10:</b>	Curvas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 900 litros na vala B.....	221
<b>Figura C.1:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM pré-infiltração executados na Área 2.....	223
<b>Figura D.1:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 1 dia após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.....	225
<b>Figura D.2:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 3 dias após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.....	226
<b>Figura D.3:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 8 dias após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.....	227
<b>Figura D.4:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 10 dia após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.....	228
<b>Figura D.5:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 1 dia após a infiltração de 900 litros na vala B.....	229
<b>Figura D.6:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 3 dias após a infiltração de 900 litros na vala B.....	230
<b>Figura D.7:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 6 dias após a infiltração de 900 litros na vala B.....	231
<b>Figura D.8:</b>	Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 8 dias após a infiltração de 900 litros na vala B.....	232
<b>Figura D.9:</b>	Curvas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.....	233
<b>Figura D.10:</b>	Curvas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 900 litros na vala B.....	234

### Lista de tabelas

	<b>Página</b>	
<b>Tabela 1.1:</b>	Principais lavouras em território brasileiro, em área cultivada (safra 2012/2013) (Conab, 2014, p.13, 16, 18).....	4
<b>Tabela 1.2:</b>	Os dez maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar no ano de 2011 (FAO, 2014).....	5
<b>Tabela 1.3:</b>	Produção mundial de etanol no ano de 2012 (RFA, 2014).....	6



<b>Tabela 1.4:</b>	Maiores produtores estaduais de cana-de-açúcar: por produção (à esquerda) e por área cultivada (à direita). Os dados referem-se à safra 2012/2013 (Conab, 2014, p.19e 20).....	6
<b>Tabela 1.5:</b>	Volume de vinhaça gerada para cada 1 litro de álcool produzido, segundo diferentes autores.....	10
<b>Tabela 1.6:</b>	Características da vinhaça resultante de mostos de melaço, de caldo de cana e mistos de caldo e melaço (CETESB, 1982 apud ANA ET AL, 2009, p.178).....	11
<b>Tabela 1.7:</b>	DBO da vinhaça em relação a outros resíduos industriais (LUDOVICE, 1997, p.10).....	11
<b>Tabela 2.1:</b>	Expressões para o cálculo da profundidade de mineralizações, segundo o método dos estimadores de Petrowsky. Obs.: $z_0$ = profundidade em relação ao centro de simetria do corpo; $z_1$ = profundidade em relação à borda superior do corpo.....	23
<b>Tabela 5.1:</b>	Profundidades de investigação típicas dos condutivímetros fabricados pelas Geonics Limited.....	62
<b>Tabela 6.1:</b>	Dados de temperatura <sup>1</sup> (1961-1990) e pluviosidade <sup>2</sup> (1936-2006) para o município de Rio Claro.....	72
<b>Tabela 6.2:</b>	Dados de temperatura <sup>1</sup> (1961-1990) e pluviosidade <sup>2</sup> (1939-2004) para o município de Corumbataí.....	78
<b>Tabela 7.1:</b>	Dados gerais das SEV executadas na Área 1.....	84
<b>Tabela 7.2:</b>	Dados gerais das SEV executadas na Área 2.....	84
<b>Tabela 7.3:</b>	Dados gerais dos IE pré-infiltração executados na Área 1.....	86
<b>Tabela 7.4:</b>	Dados gerais dos IE pré-infiltração executados na Área 2.....	86
<b>Tabela 7.5:</b>	Dados gerais dos IE pós-infiltração executados na Área 1.....	86
<b>Tabela 7.6:</b>	Dados gerais dos IE pós-infiltração executados na Área 2.....	86
<b>Tabela 7.7:</b>	Parâmetros de configuração do modo IP do resistivímetro ABEM SAS 4000.....	87
<b>Tabela 7.8:</b>	Dados gerais dos IEM pré-infiltração executados na Área 1.....	88
<b>Tabela 7.9:</b>	Dados gerais dos IEM pré-infiltração executados na Área 2.....	88
<b>Tabela 7.10:</b>	Dados gerais dos IEM pós-infiltração executados na Área 1.....	88
<b>Tabela 7.11:</b>	Dados gerais dos IEM pós-infiltração executados na Área 2.....	89
<b>Tabela 7.12:</b>	Dados gerais dos ensaios de SP pré-infiltração executados na Área 1.....	90
<b>Tabela 7.13:</b>	Dados gerais dos ensaios de SP pré-infiltração executados na Área 2.....	90
<b>Tabela 7.14:</b>	Dados gerais dos ensaios de SP pós-infiltração executados na Área 1.....	90
<b>Tabela 7.15:</b>	Dados gerais dos ensaios de SP pós-infiltração executados na Área 2.....	90
<b>Tabela 8.1:</b>	Localização dos ensaios e respectivos valores de condutividade hidráulica, para a Área 1.....	101
<b>Tabela 8.2:</b>	Classificação da condutividade hidráulica da zona não saturada.....	101
<b>Tabela 8.3:</b>	Fração silte+argila obtida no ensaio de peneiramento para cada amostra coletada na Área 1.....	102
<b>Tabela 8.4:</b>	Resumo do modelo geoeletrico proposto para a Área 1.....	104
<b>Tabela 8.5:</b>	Resultados das análises físico-químicas executadas em amostras de solo da Área 1.....	112

<b>Tabela 8.6:</b>	Resultados das análises físico-químicas executadas em amostras de vinhaça da Usina Granelli.....	112
<b>Tabela 9.1:</b>	Localização dos ensaios e respectivos valores de condutividade hidráulica, para a Área 2.....	140
<b>Tabela 9.2:</b>	Classificação da condutividade hidráulica da zona não saturada.....	140
<b>Tabela 9.3:</b>	Fração areia+pedregulho obtida no ensaio de peneiramento para cada amostra coletada na Área 2.....	141
<b>Tabela 9.4:</b>	Resumo do modelo geoelectrico proposto para a Área 2.....	143
<b>Tabela 9.5:</b>	Resultados das análises físico-químicas executadas em amostras de solo da Área 2.....	151
<b>Tabela 10.1:</b>	Tipos de anomalias identificadas em cada litologia estudada.....	184
<b>Tabela 10.2:</b>	Limites de detecção dos métodos empregados, para cada litologia estudada.....	184

### Lista de quadros

	<b>Página</b>	
<b>Quadro 1.1:</b>	Taxonomia da cana-de-açúcar, segundo Cronquist (1988).....	1
<b>Quadro 1.2:</b>	Diferentes metodologias para destinação final da vinhaça (adaptado de CORAZZA, 1996, p.10-12).....	12

## Sumário

<b>Capítulo 1 – Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Breve história da cana-de-açúcar.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.1 Origem e distribuição das espécies .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.2 Registros históricos.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 A cana-de-açúcar no Brasil.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Produção local.....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 Colheita e processamento.....</b>	<b>7</b>
<b>1.5 A vinhaça .....</b>	<b>9</b>
<b>1.6 Métodos de investigação.....</b>	<b>14</b>
<b>1.7 Métodos geofísicos aplicados na investigação de áreas contaminadas por vinhaça.....</b>	<b>16</b>
<b>1.8 Premissas .....</b>	<b>18</b>
<b>1.9 Hipótese .....</b>	<b>19</b>
<b>1.10 Objetivos.....</b>	<b>19</b>
 <b>Capítulo 2 – O método do Potencial Espontâneo .....</b>	 <b>20</b>
<b>2.1 Introdução .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Fundamentação teórica.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.1 Potencial de mineralização .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2 Potencial de difusão.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.3 Potencial eletrocinético.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.4 Biogeobaterias.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3 Instrumentação e técnicas de campo .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.1 Técnica dos potenciais .....</b>	<b>28</b>
<b>2.4 Aplicações .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.1 Prospecção mineral.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.2 Geotecnia e Geologia de Engenharia .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.3 Hidrogeologia .....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.4 Estudos ambientais .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4.5 Arqueologia .....</b>	<b>31</b>
 <b>Capítulo 3 – O método da Eletrorresistividade .....</b>	 <b>32</b>
<b>3.1 Introdução .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2 Fundamentação teórica.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.1 Medição da resistividade elétrica de um meio geológico.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.2 Resistividade aparente .....</b>	<b>38</b>
<b>3.3 Instrumentação e técnicas de campo .....</b>	<b>39</b>
<b>3.3.1 Técnica da Sondagem Elétrica Vertical e o Arranjo Schlumberger.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.2 Técnica do Imageamento Elétrico e o Arranjo Dipolo-Dipolo .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4 Aplicações.....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.1 Prospecção mineral.....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.2 Geotecnia e Geologia de Engenharia .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4.3 Hidrogeologia .....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.4 Estudos ambientais .....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.5 Arqueologia .....</b>	<b>46</b>
 <b>Capítulo 4 – O método da Polarização Induzida .....</b>	 <b>48</b>

4.1	Introdução .....	48
4.2	Fundamentação teórica .....	48
4.3	Mecanismos de origem do efeito IP .....	49
4.3.1	Polarização de membrana .....	49
4.3.2	Polarização metálica .....	50
4.4	Domínios do efeito IP .....	51
4.4.1	Domínio do tempo .....	52
4.5	Medição da polarização induzida em um meio geológico .....	53
4.6	Aplicações .....	53
4.6.1	Prospecção mineral .....	53
4.6.2	Geotecnia e Geologia de Engenharia .....	54
4.6.3	Hidrogeologia .....	54
4.6.4	Estudos ambientais .....	55
4.6.5	Arqueologia .....	56
<b>Capítulo 5 – O método Eletromagnético .....</b>		<b>57</b>
5.1	Introdução .....	57
5.2	Fundamentação teórica .....	57
5.3	Medição da condutividade elétrica de um meio geológico .....	59
5.3.1	Técnica do Imageamento Eletromagnético .....	62
5.4	Aplicações .....	63
5.4.1	Prospecção mineral .....	63
5.4.2	Geotecnia e Geologia de Engenharia .....	64
5.4.3	Hidrogeologia .....	64
5.4.4	Estudos ambientais .....	64
5.4.5	Arqueologia .....	65
<b>Capítulo 6 – Detalhamento das áreas de estudo .....</b>		<b>66</b>
6.1	Área 1: Sítio Altarugio .....	66
6.1.1	Localização e descrição .....	66
6.1.2	Contexto geológico .....	69
6.1.2.1	Formação Corumbataí .....	69
6.1.2.2	Formação Serra Geral .....	70
6.1.3	Clima .....	71
6.1.4	Hidrografia e hidrogeologia .....	73
6.1.5	Pedologia .....	74
6.2	Área 2: Chácara Santana .....	75
6.2.1	Localização e descrição .....	75
6.2.2	Contexto geológico .....	76
6.2.2.1	Formação Pirambóia .....	76
6.2.2.2	Formação Corumbataí .....	77
6.2.3	Clima .....	78
6.2.4	Hidrografia e hidrogeologia .....	79
6.2.5	Pedologia .....	79
<b>Capítulo 7 – Materiais e Métodos .....</b>		<b>81</b>
7.1	Aquisição dos dados .....	81
7.1.1	Ensaio de condutividade hidráulica da zona não saturada .....	81
7.1.2	Amostragem de solo e procedimentos laboratoriais .....	82
7.1.3	Ensaio geofísicos .....	84

7.1.3.1	Sondagens Elétricas Verticais (SEV) .....	84
7.1.3.2	Imageamentos Elétricos (IE) .....	85
7.1.3.3	Imageamentos Eletromagnéticos (IEM) .....	88
7.1.3.4	Levantamento de SP .....	89
7.1.4	Georreferenciamento com DGPS .....	91
7.2	Processamento dos dados .....	92
7.2.1	Sondagens Elétricas Verticais .....	92
7.2.2	Imageamentos Elétricos .....	93
7.2.3	Imageamentos Eletromagnéticos e Técnica dos Potenciais .....	95
7.2.4	Correção dos dados de DGPS .....	96
7.3	Aquisição de vinhaça .....	96
7.4	Valas de infiltração .....	99
<b>Capítulo 8 – Área 1: Resultados e Discussões .....</b>		<b>101</b>
8.1	Ensaio geotécnicos .....	101
8.1.1	Condutividade hidráulica da zona não saturada .....	101
8.1.2	Ensaio de peneiramento .....	101
8.2	Ensaio geofísicos pré-infiltração .....	102
8.2.1	Sondagens Elétricas Verticais .....	102
8.2.2	Imageamentos Elétricos .....	104
8.2.3	Imageamentos Eletromagnéticos .....	109
8.2.4	Potencial Elétrico Natural .....	110
8.3	Análises físico-químicas .....	111
8.3.1	Amostras de solo .....	111
8.3.2	Amostra de vinhaça .....	112
8.4	Infiltração da vinhaça .....	113
8.4.1	Cálculo do volume a ser infiltrado .....	113
8.4.2	Infiltração .....	113
8.5	Ensaio geofísicos pós-infiltração .....	114
8.5.1	Imageamentos Elétricos .....	114
8.5.1.1	Linha de referência .....	115
8.5.1.2	Monitoramento: Linha A .....	116
8.5.1.3	Monitoramento: Linha B .....	121
8.5.2	Imageamentos Eletromagnéticos .....	128
8.5.3	Potencial Elétrico Natural .....	135
<b>Capítulo 9 – Área 2: Resultados e Discussões .....</b>		<b>140</b>
9.1	Ensaio geotécnicos .....	140
9.1.1	Condutividade hidráulica da zona não saturada .....	140
9.1.2	Ensaio de peneiramento .....	140
9.2	Ensaio geofísicos pré-infiltração .....	141
9.2.1	Sondagens Elétricas Verticais .....	141
9.2.2	Imageamentos Elétricos .....	144
9.2.3	Imageamentos Eletromagnéticos .....	148
9.2.4	Potencial Elétrico Natural .....	149
9.3	Análises físico-químicas .....	150
9.3.1	Amostras de solo .....	150
9.3.2	Amostra de vinhaça .....	152
9.4	Infiltração da vinhaça .....	152
9.4.1	Cálculo do volume a ser infiltrado .....	152

9.4.2	Infiltração .....	152
9.5	Ensaio geofísico pós-infiltração .....	153
9.5.1	Imageamentos Elétricos .....	154
9.5.1.1	Linha de referência.....	155
9.5.1.2	Monitoramento: Linha A.....	156
9.5.1.3	Monitoramento: Linha B .....	163
9.5.2	Imageamentos Eletromagnéticos.....	170
9.5.3	Potencial Elétrico Natural.....	178
<b>Capítulo 10 – Discussão integrada dos resultados, considerações finais e conclusões ...</b>		<b>182</b>
10.1	Discussão integrada dos resultados.....	182
10.2	Conclusões .....	183
10.3	Considerações finais .....	185
10.4	Recomendações .....	185
<b>Referências bibliográficas.....</b>		<b>187</b>
<b>Anexo I.....</b>		<b>202</b>
<b>Anexo II.....</b>		<b>204</b>
<b>Apêndice A .....</b>		<b>209</b>
<b>Apêndice B .....</b>		<b>211</b>
<b>Apêndice C .....</b>		<b>222</b>
<b>Apêndice D .....</b>		<b>224</b>

## Capítulo 1 – Introdução

A cana-de-açúcar é representada por, pelo menos, seis espécies de gramíneas perenes do gênero *Saccharum* spp. (Quadro 1.1). Dentre elas, existem duas espécies selvagens – *Saccharum spontaneum* L. e *Saccharum robustum* Brandes & Jeswiet ex Grassl – e quatro espécies cultivadas – *Saccharum officinarum* L., *Saccharum barberi* Jeswiet, *Saccharum sinense* Roxb. e *Saccharum edule* Hassk. As quatro espécies cultivadas são híbridos complexos que se cruzam facilmente; assim, todas as variedades comerciais cultivadas atualmente são híbridos interespecíficos (PURSEGLOVE, 1979, p.214). Outros representantes conhecidos da família *Poaceae* são o milho, o sorgo, o arroz e diversas espécies de grama. As principais características desta família são a forma da inflorescência em espiga, o crescimento do caule em colmos, as folhas com lâminas de sílica em suas bordas e bainha aberta.

<b>Taxon</b>	
Reino	<i>Plantae</i>
Sub-reino	<i>Tracheobionta</i>
Super-divisão	<i>Spermatophyta</i>
Divisão	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Liliopsida</i>
Subclasse	<i>Commelinidae</i>
Ordem	<i>Cyperales</i>
Família	<i>Poaceae</i>
Tribo	<i>Andropogonae</i>
Subtribo	<i>Saccharinae</i>
Gênero	<i>Saccharum</i>
Espécies	<i>Saccharum spontaneum</i> <i>Saccharum robustum</i> <i>Saccharum officinarum</i> <i>Saccharum barberi</i> <i>Saccharum sinense</i> <i>Saccharum edule</i>

**Quadro 1.1:** Taxonomia da cana-de-açúcar, segundo Cronquist (1988).

### 1.1 Breve história da cana-de-açúcar

#### 1.1.1 Origem e distribuição das espécies

A origem da cana-de-açúcar remonta cerca de 100 milhões de anos, quando parte da Ásia e a Austrália estavam unidas em um único supercontinente chamado Gondwana. Acredita-se que a cana-de-açúcar tenha se originado na atual região Sul do Pacífico (SHARPE, 1998).

Purseglove (1979, p.215, 217, 219) descreve os locais de disseminação das 6 espécies supracitadas. A espécie *Saccharum spontaneum* L. ocorre desde o Leste e Norte da África, passando pelo Oriente Médio, Índia, China, Taiwan, Malásia, e chegando até à Nova Guiné. Tudo indica que o centro de origem desta espécie seja o Norte da Índia, pois aí foram encontradas exemplares com número reduzido de cromossomos. As espécies *Saccharum robustum*, *Saccharum officinarum* L. e *Saccharum edule* podem ser encontradas na Nova Guiné e em algumas de suas ilhas adjacentes, sendo que a segunda espécie é conhecida como “cana nobre”, adequada para regiões tropicais, com clima e solo favoráveis, e a última acredita-se que seja uma forma estéril da *Saccharum robustum*. Por fim, a espécie *Saccharum barberi* originou-se, provavelmente, na Índia e a *Saccharum sinense* ocorre em partes da Índia, Indochina (Vietnã, Laos, Camboja, e, às vezes, Tailândia e Myanmar), Sul da China e Taiwan.

### 1.1.2 Registros históricos

As informações contidas neste subitem, salvo quando referenciadas, foram extraídas de Purseglove (1979, p.214-255).

A cana-de-açúcar é conhecida pela humanidade há, pelo menos, 2.200 anos. Há relatos de que o açúcar cristal já era conhecido na Índia há cerca de 5.000 anos atrás, mas foi por volta dos séculos V a.C. a III a.C., durante invasões à Índia, que povos conquistadores a (re)descobriram (MCT, 2005). Alguns historiadores afirmam que tal descoberta se deve ao Imperador Darius, da então Pérsia (atual Irã), em 510 a.C.; porém, os relatos mais detalhados se referem a Alexandre, o Grande, em 327 a.C.

Nearchus, um dos oficiais do exército de Alexandre, relatou o encontro de cana-de-açúcar no Oeste da Índia, em 325 a.C., e Teofrasto, filósofo, estudioso da botânica e, também, amigo de Alexandre, descreveu em uma de suas obras que os habitantes locais mastigavam “uma cana maravilhosa, que produzia uma espécie de mel, sem ajuda das abelhas” (MCT, 2005).

Na China, a cana-de-açúcar foi introduzida, provavelmente, no ano 110 a.C., quando um jardim botânico foi fundado próximo a Pequim para a introdução de plantas exóticas (DEER, 1949 apud SHARPE, 1998).

Dioscórides, no século I d.C., descreveu “um mel chamado sakkharon, extraído das canas da Índia e da Arábia, com a consistência de sal e que parecia estalar entre os dentes, quando mastigado”.



Ao longo de vários séculos, as montanhas e os desertos do Afeganistão, o Baluchistão (região de domínio do grupo étnico Balúchi, que compreende parte do Paquistão, Irã e Afeganistão) e a parte oriental da Pérsia serviram como barreiras naturais contra a disseminação da cana para outras áreas; porém, a cana-de-açúcar chegou à Pérsia somente no século VI d.C.

Grande parte da propagação da cana pelo mundo antigo é devida aos árabes: em 641, eles a levaram para o Egito, durante suas conquistas; enquanto avançavam em torno do Mar Mediterrâneo, também a levaram para a Síria, Chipre e Creta, chegando à região da Andaluzia (atual Espanha) em 714. Neste local, a “indústria” açucareira obteve grande sucesso e quatro séculos após sua introdução em terras espanholas, no ano de 1150, a área destinada ao cultivo da cana era de, aproximadamente, 30.000 hectares.

Somente no Século XI d.C. é que povos europeus ocidentais descobriram o açúcar, como resultado das Cruzadas, sendo que o primeiro registro deste “novo tempero” data do ano de 1099, na Inglaterra. Nos séculos seguintes, ocorreu a expansão do comércio entre a Europa ocidental e a oriental, inclusive com importação de açúcar. Este se tornou um produto de luxo, restrito às classes mais altas da sociedade da época. Em um registro do ano de 1319 descobriu-se que, em Londres, 1 libra de açúcar ( $\approx 453,6$  gramas) era vendido ao preço de dois xelins; convertendo aos valores atuais têm-se cerca de US\$100 o quilograma (MCT, 2005).

Com o advento das grandes navegações, em meados do Século XV d.C., a cana-de-açúcar foi levada a novas localidades e a produção açucareira adentrou uma nova etapa de desenvolvimento. Por volta de 1420, os portugueses levaram a cana-de-açúcar para a Ilha da Madeira, de onde logo chegou às Ilhas Canárias, Açores e Oeste da África.

Cristóvão Colombo, em sua segunda viagem, em 1493, levou a cana-de-açúcar das Ilhas Canárias para Hispaniola (hoje, República Dominicana e Haiti) (DEER, 1949 apud SHARPE, 1998) e, por volta de 1516, a primeira usina do Novo Mundo começou a moer cana-de-açúcar, na República Dominicana. A produção do açúcar se propagou para Cuba, Jamaica, Porto Rico e Grandes Antilhas até o final do século XVI d.C. (HAGELBERG, 1985 apud SHARPE, 1998).

No Brasil, as primeiras mudas foram trazidas da Ilha da Madeira por Martim Afonso de Souza. Ele também instalou o primeiro engenho de cana, em 1533, na cidade de São Vicente. Muitos outros engenhos surgiram pela costa brasileira, sendo que o Nordeste – em especial, os litorais pernambucano e baiano – sorveu a maior parte da produção açucareira da colônia.

Desde então, a produção de cana-de-açúcar cresceu em todo o mundo, até atingir os patamares atuais. Hoje, ela é cultivada em cerca de 110 países, principalmente em regiões tropicais. As maiores latitudes onde a cana é cultivada encontram-se em Natal, na Argentina,

e no extremo sul da Austrália (aproximadamente 30° S), e no Noroeste do Paquistão (34° N) e sul da Espanha (37° N) (JENKINS, 1966, p.2).

## 1.2 A cana-de-açúcar no Brasil

Historicamente, a agricultura é uma das bases da economia brasileira, desde o início da colonização – com as extensas monoculturas de cana-de-açúcar –, passando pelo café e chegando aos dias atuais, onde se verifica a diversificação da produção, porém com predomínio de algumas poucas espécies.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (BRASIL, 2010), a área territorial brasileira compreende 8.515.767,049 km<sup>2</sup>. Destes, uma parcela aproximada de 9% – ou 76.697.324 ha – é destinada ao cultivo de vegetais (lavouras permanentes, temporárias e cultivo de flores, inclusive hidroponia e plasticultura, viveiros de mudas, estufas de plantas e casas de vegetação e forrageiras para corte; pastagens não estão incluídas) (IBGE, 2007, p.33). A Tabela 1.1 exibe as áreas destinadas ao cultivo dos principais produtos agrícolas do Brasil.

**Tabela 1.1:** Principais lavouras em território brasileiro, em área cultivada (safra 2012/2013) (Conab, 2014, p.13, 16, 18).

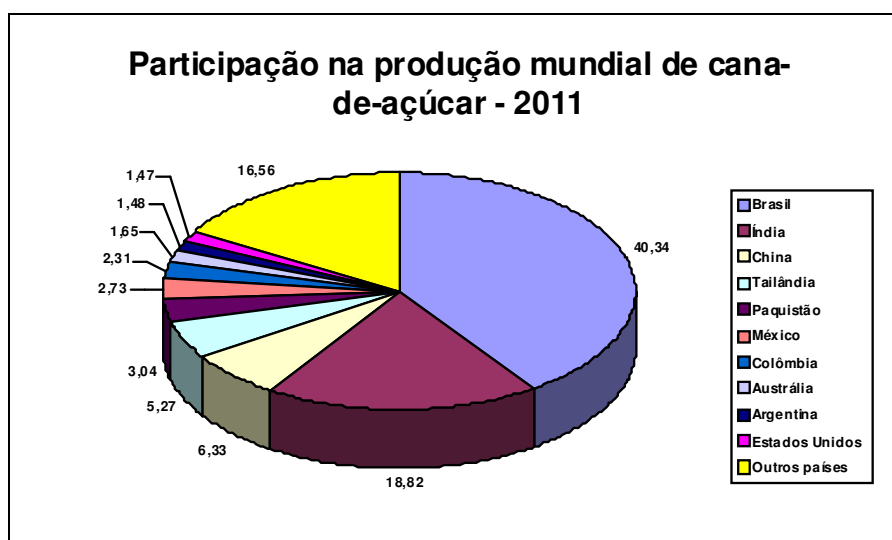
<b>Produto</b>	<b>Área cultivada (hectares)</b>
Soja	27.736.100
Milho	15.821.900
<b>Cana-de-açúcar</b>	<b>8.485.000</b>
Feijão	3.115.100
Arroz	2.390.900
Café	2.016.425
Trigo	1.895.400

Segundo a FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tendo produzido, no ano de 2011, mais de 734 milhões de toneladas (Tabela 1.2), o que equivale a mais de 40% da produção mundial (Figura 1.1) (FAO, 2014).

O Brasil também é o maior produtor mundial de açúcar, obtido a partir da cana-de-açúcar, de acordo com a ISO (International Sugar Organization) (2009, p.iii), com 32,29 milhões de toneladas produzidas somente no ano de 2008. Esse valor é cerca de 24,5% superior à produção total do segundo colocado no *ranking*, a Índia, com 25,94 milhões de toneladas produzidas no mesmo período.

**Tabela 1.2:** Os dez maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar no ano de 2011 (FAO, 2014).

<b>Ranking</b>	<b>País</b>	<b>Produção (toneladas)</b>
1º	Brasil	734.006.059
2º	Índia	342.382.000
3º	China	115.123.560
4º	Tailândia	95.950.419
5º	Paquistão	55.308.500
6º	México	49.735.273
7º	Colômbia	42.000.000
8º	Filipinas	30.000.000
9º	Argentina	26.960.600
10º	Estados Unidos	26.655.810

**Figura 1.1:** Participação na produção mundial de cana-de-açúcar, por países, no ano de 2011 (FAO, 2014).

Além disso, segundo os dados levantados pela ISO (op. cit.) e publicados no “Sugar Year Book 2009”, o Brasil aparece como o maior exportador mundial de açúcar, com 20,14 milhões de toneladas exportadas em 2008. Para se ter uma idéia do “poderio tupiniquim” basta mencionar que o segundo maior exportador mundial de açúcar, a Tailândia, exportou, no mesmo ano, pouco mais de 25% do índice brasileiro ou 5,11 milhões de toneladas.

Ainda dentro das estatísticas, o Brasil ocupa a terceira posição no *ranking* mundial de produtores de etanol elaborado pela RFA (Renewable Fuels Association) (2014). No ano de 2012, aproximadamente 19,67% de toda a produção mundial foi produzida em terras nacionais (Tabela 1.3).

**Tabela 1.3:** Produção mundial de etanol no ano de 2012 (RFA, 2014).

<b>Abrangência geográfica</b>	<b>Volume (milhões de litros)</b>
América do Norte e Central	52.117,55
América do Sul	21.955,39
Brasil	21.111,24
Europa	4.311,58
Ásia	3.603,71
China	2.100,90
Canadá	1.699,65
Austrália	268,76
África	158,99

As grandes dimensões do território brasileiro e o clima favorável são responsáveis, entre outros fatores, pela oferta de terras disponíveis para a expressiva produção de cana-de-açúcar. Para a safra 2013/2014, estima-se que 8.810.790 hectares sejam utilizados no cultivo de cana destinada à atividade sucroalcooleira (Conab, 2013, p.5).

Desse total de área plantada, deverão ser colhidas 659.850.100 toneladas de cana, das quais 304.243.300t serão destinadas à produção de açúcar e 355.606.800t à produção de etanol. Espera-se, então, que sejam produzidas 38.809.700t de açúcar e 27.655.482.800 litros de etanol, sendo 11.728.384.000 litros de etanol anidro e 15.927.098.800 litros de etanol hidratado (Conab, 2013, p.9 a 11).

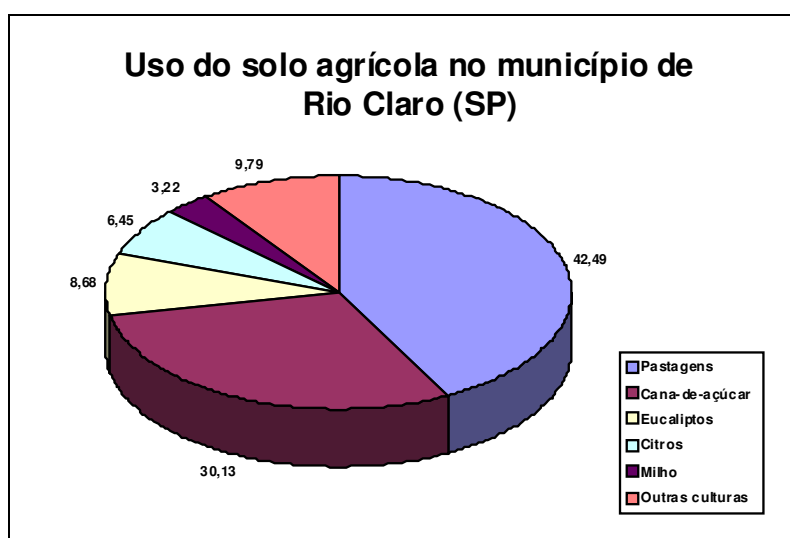
Regionalmente, o Sudeste é o maior produtor nacional de cana-de-açúcar, registrando um total de 387.228.300 toneladas de cana colhidas na safra 2012/2013. Em seguida, aparece a região Centro-Oeste, com 106.001.400 toneladas; na terceira colocação está a região Nordeste, com 52.972.300 toneladas colhidas. Por fim, encontram-se as regiões Sul e Norte, com 39.756.400t e 2.957.400t de cana colhida, respectivamente (Conab, 2014, p.20). Ainda, segundo a CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) (2014, p.19 e 20), os maiores produtores estaduais de cana-de-açúcar e com maior área destinada à lavoura canavieira estão relacionados na Tabela 1.4.

**Tabela 1.4:** Maiores produtores estaduais de cana-de-açúcar: por produção (à esquerda) e por área cultivada (à direita). Os dados referem-se à safra 2012/2013 (Conab, 2014, p.19 e 20).

<b>Estado</b>	<b>Produção (toneladas)</b>	<b>Estado</b>	<b>Área cultivada (hectares)</b>
São Paulo	330.649.900	São Paulo	4.419.500
Goiás	52.727.200	Goiás	725.900
Minas Gerais	51.208.000	Minas Gerais	721.900
Paraná	39.723.500	Paraná	610.800
Mato Grosso do Sul	36.955.200	Mato Grosso do Sul	542.700

### 1.3 Produção local

Com base em dados coletados no ano de 1999 e fornecidos pelo SEPLADEMA (Secretaria de Planejamento, Desenvolvimento e Meio Ambiente), Isler e Oliveira (2005, p.40 a 43) puderam traçar um perfil do uso do solo agrícola no município de Rio Claro (SP) (Figura 1.2). Dos 40.286 hectares da área rural do município, 17.121ha eram destinados às pastagens (naturais e cultivadas), 12.190ha ao cultivo da cana-de-açúcar, 3.500ha eram ocupados por eucaliptos, 2.600ha destinados à cultura de citros, 1.300ha ocupados por cultura de milho e o restante envolve todas as outras culturas desenvolvidas no município.



**Figura 1.2:** Uso do Solo Agrícola no município de Rio Claro (SP), no ano de 1999 (ISLER E OLIVEIRA, 2005, p.43).

Sete anos após o levantamento dos dados pelo SEPLADEMA, a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) (2006a) divulgou os resultados de uma pesquisa sobre uso e ocupação do solo na região Nordeste do Estado de São Paulo. Na safra 2002/2003, aproximadamente 14,9 mil hectares do município de Rio Claro (SP) eram compostos por plantações de cana-de-açúcar, representando um aumento de cerca de 22% relativamente ao ano de 1999. Já o município vizinho de Corumbataí (SP), na mesma safra, apresentava área de quase 5,4ha destinada à lavoura canavieira.

### 1.4 Colheita e processamento

Após atingir a maturação – processo fisiológico que envolve a formação de açúcares nas folhas e seu deslocamento e armazenamento no colmo (EMBRAPA, 2007a) –, a cana-de-

açúcar pode ser colhida por meio de três métodos (EMBRAPA, 2007b): **manual:** onde o corte e o carregamento são feitos manualmente, empregando trabalhadores braçais (bóias-frias); **semi-mecanizado:** o corte é manual e o carregamento nas unidades de transporte é feito por carregadoras mecânicas; **mecanizado:** utiliza cortadoras de cana e carretas de transbordo, empregando somente mão-de-obra especializada, como operadores de máquinas e tratoristas.

Os métodos manual e semi-mecanizado envolvem a possibilidade da queima do canavial antes da colheita, facilitando o corte dos caules pelos trabalhadores. Entretanto, o uso do fogo como método despalhador e facilitador do corte da cana-de-açúcar vem sendo eliminado do Estado de São Paulo, de acordo com a Lei Estadual n.º 11.241, de 19 de setembro de 2002.

A cana colhida é levada, então, até uma usina de processamento, onde passa pelas seguintes principais etapas (EMBRAPA, 2007c):

- Lavagem;
- Preparo para moagem ou difusão;
- Extração do caldo por moagem ou difusão;
  - Produção de açúcar:
    - Purificação do caldo: peneiramento e clarificação;
    - Evaporação do caldo;
    - Cozimento;
    - Cristalização da sacarose;
    - Centrifugação: separação entre cristais e massa cozida;
    - Secagem e estocagem do açúcar.
  - Produção de álcool:
    - Tratamento do caldo para produção de álcool;
    - Fermentação do caldo;
    - Destilação do vinho;
    - Retificação;
    - Desidratação: álcool anidro ou hidratado.

De acordo com a CETESB (2002, p.9), para cada 1000 toneladas de cana-de-açúcar processadas, são obtidos cerca de 96 litros de açúcar e 36m<sup>3</sup> de álcool (Figura 1.3). Além destes principais produtos, podem ser gerados quase 70 outros secundários, além de 4 diferentes tipos resíduos (ICIDCA, 1999), sendo a vinhaça o que mais gera preocupações

ambientais. Existe ainda a possibilidade da geração de energia elétrica a partir da queima do bagaço da cana.

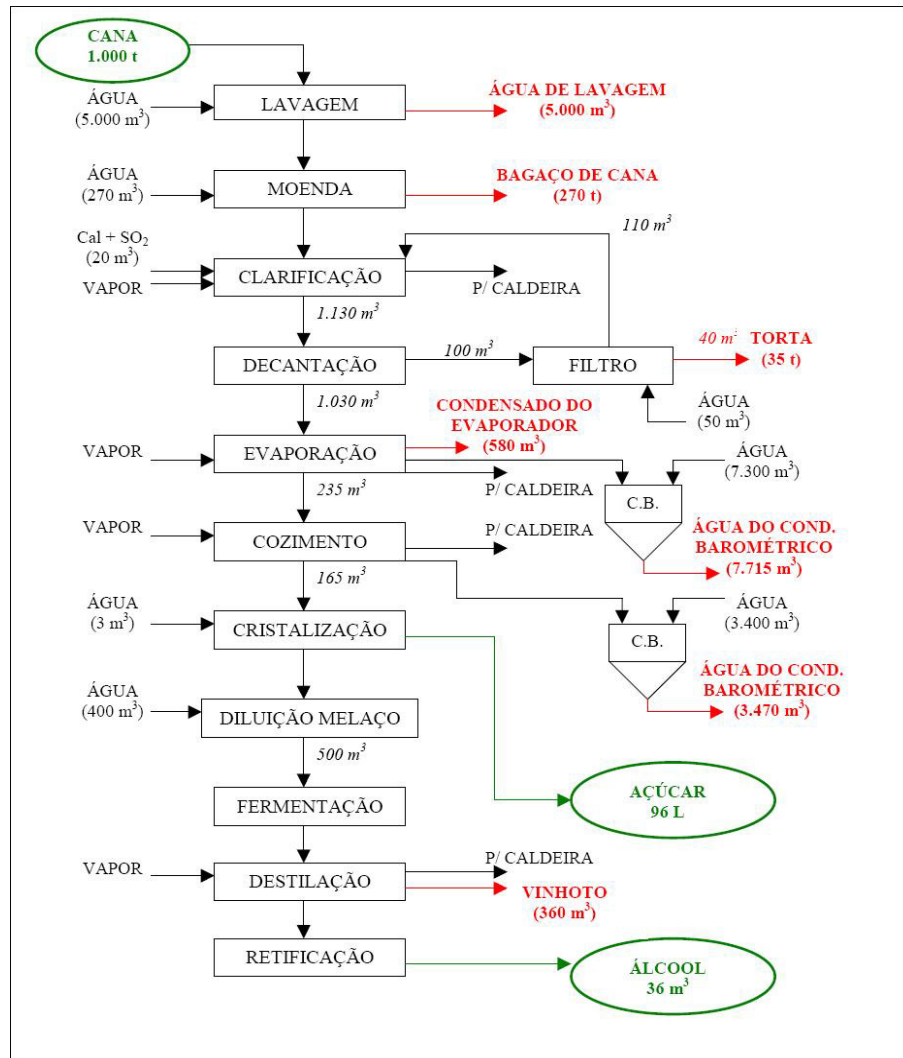


Figura 1.3: Fluxograma do balanço de massa genérico de uma usina de açúcar e álcool (CETESB, 2002, p.9).

## 1.5 A vinhaça

A vinhaça é o resíduo líquido obtido na operação de destilação fracionada do caldo de cana fermentado, no processo de produção do etanol (GONZÁLEZ E GARLOBO, 1999, p.435). No Brasil, a vinhaça também é conhecida, dentre outros nomes, como vinhoto, vinhote, calda, caldo, restilo, garapão, tiborna, caxixi ou mosto.

É uma substância líquida, de cor parda clara, tornando-se marrom escuro à medida que sofre oxidação pela exposição ao ar. Apresenta pH baixo, é corrosiva, exala odor desagradável, possui elevada condutividade elétrica e altos níveis de Demanda Bioquímica de

Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), tornando-se altamente poluidora. Sua temperatura, na saída da bica de destilação, pode atingir valores entre 80°C e 107°C.

Basicamente, sua composição é de 93% de água e 7% de sólidos; destes, aproximadamente 75% correspondem à matéria orgânica e 25% correspondem à fração mineral (ALMEIDA, 1952 apud LUDOVICE, 1997, p.5).

Não existe um consenso em relação à taxa de produção de vinhaça para cada litro de etanol produzido; entretanto, foi possível levantar na literatura os seguintes valores (Tabela 1.5):

**Tabela 1.5:** Volume de vinhaça gerada para cada 1 litro de álcool produzido, segundo diferentes autores.

<b>Autores</b>	<b>Volume (l)</b>
ANA, 2009, p.167	7 - 18
Albers, 2007, p.1	10 - 15
CETESB, 2002, p.9	10
Hassuda, Rebouças e Cunha, 1991, p.169	12
Corazza, 2006, p.4	
Ludovice, 1997, p.2	
Gunkel et al., 2007, p.262	13
Calheiros, 2008	

A vinhaça também é caracterizada pelo alto conteúdo de potássio (K), quantidades significativas de nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), além de quantidades menores de zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn) e cobre (Cu). Entretanto, as características da vinhaça podem variar de acordo com o tipo de mosto originário (Tabela 1.6).

Por sua composição química, a vinhaça possui alto valor fertilizante e, do ponto de vista econômico, mostra-se um substituto vantajoso dos fertilizantes químicos, ou ainda, como complemento de alto teor protéico da ração animal. Porém, os mesmos elementos que conferem à vinhaça o valor fertilizante lhe tornam, também, altamente poluidora, pois a matéria orgânica e os teores significativos dos macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio fazem com que seu potencial poluidor seja cerca de cem vezes maior que o potencial poluidor do esgoto doméstico (Tabela 1.7).

Admitindo que a poluição provocada por dois litros de vinhaça (DBO = 60.000mg) é equivalente à provocada diariamente por uma pessoa, que uma destilaria tenha capacidade de produção diária de 120.000 litros de etanol e que para cada litro de etanol produzido sejam gerados 13 litros de vinhaça, têm-se 120.000 x 13 = 1.560.000 litros de vinhaça gerados num único dia. Isto, se lançado em um rio, equivaleria à produção diária de dejetos de uma cidade com 780.000 habitantes.



**Tabela 1.6:** Características da vinhaça resultante de mostos de melão, de caldo de cana e mistos de caldo e melão (CETESB, 1982 apud ANA et al., 2009, p.178).

Parâmetro	Mosto		
	Melão	Caldo	Misto
pH	4,2 – 5,0	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6
Temperatura (°C)	80 – 100	80 – 100	80 – 100
DBO (mg/L O <sub>2</sub> )	25.000	6.000 – 16.500	19.800
DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	65.000	15.000 – 33.000	45.000
Sólidos totais (mg/L)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg/L)	60.000	20.000	40.000
Sólidos fixos (mg/L)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg/L N)	450 – 1.610	150 – 700	480 – 710
Fósforo (mg/L P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	100 – 290	10 – 210	9 – 200
Potássio (mg/L K <sub>2</sub> O)	3.740 – 7.830	1.200 – 2.100	3.340 – 4.600
Cálcio (mg/L CaO)	450 – 5.180	130 – 1.540	1.330 – 4.570
Magnésio (mg/L MgO)	420 – 1.520	200 – 490	580 – 700
Sulfato (mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	6.400	600 – 760	3.700 – 3.730
Carbono (mg/L C)	11.200 – 22.900	5.700 – 13.400	8.700 – 12.100
Relação C/N	16 – 16,27	19,7 – 21,07	16,4 – 16,43
Matéria orgânica (mg/L)	63.400	19.500	3.800
Substâncias redutoras (mg/L)	9.500	7.900	8.300

**Tabela 1.7:** DBO da vinhaça em relação a outros resíduos industriais (LUDOVICE, 1997, p.10).

Resíduo	DBO (média) (mg/L)
Vinhaça	30.000
Curtumes	4.000
Enlatamento de ervilhas	3.000
Fábrica de manteiga	1.400
Indústria têxtil	1.200
Fábrica de carne em conserva	900
Fábrica de leite condensado	600
Cervejaria	600
Fábrica de papel	500
Esgotos sanitários	300

A partir da década de 1970, com o surgimento do Pró-Álcool – Programa Nacional do Álcool (por meio do Decreto N° 76.593 de 14 de novembro de 1975) as lavouras de cana-de-açúcar passaram a ocupar grandes áreas destinadas à agricultura do território brasileiro. Por conseqüência, a geração de vinhaça aumentou drasticamente nesse período e, na evolução de seu emprego e de sua destinação final, inúmeros desastres ambientais foram disseminados pelo seu lançamento em rios.

Uma das práticas adotadas naquela época era o despejo em mananciais de superfície e em áreas de sacrifício (CORAZZA, 2006, p.2). Quando despejada nos rios, a vinhaça causava

a eutrofização – superfertilização – das águas, desencadeando o desenvolvimento de plantas aquáticas, algas e microorganismos; estes, por sua vez, aumentavam, desequilibradamente, o consumo de oxigênio dissolvido na água, resultando, dentre outros efeitos nocivos: na mortandade de peixes que não mais dispunham de oxigênio na água para respirar; na ocorrência da malária e dengue, pelo aumento da população de pernilongos; no aparecimento de doenças de veiculação hídrica como amebiose e esquistossomose (CALHEIROS, 2008). Atualmente, o despejo da vinhaça nos corpos d'água é terminantemente proibido, não devendo haver, no Brasil, nenhuma destilaria que o faça.

Com a interdição do lançamento da vinhaça em rios e aquíferos superficiais, desenvolveram-se, ao longo dos anos, diversas metodologias para efetuar uma correta destinação deste resíduo, descritas sucintamente no Quadro 1.2.

<b>Metodologia</b>	<b>Descrição</b>
Aerobiose	Consiste no tratamento da vinhaça como efluente em duas fases. Na primeira fase (anaeróbia) a DBO pode ser reduzida entre 70 e 90%; na segunda fase (aeróbia), pode-se reduzi-la em até 99%. Apresenta a desvantagem de necessitar da construção, manutenção e monitoramento de grandes tanques ou lagoas para o tratamento, devido aos grandes volumes do resíduo.
Reciclagem na fermentação	Utiliza-se a vinhaça como substituto da água como diluidor (razão 1:3 entre vinhaça e água). Limitada tecnicamente no aproveitamento da vinhaça, esta técnica reduz a descarga do efluente efetivamente, mas não de modo significativo.
Combustão	A vinhaça é concentrada e queimada na caldeira. Entretanto, apresenta elevado consumo de energia para evaporar a água da vinhaça e mostra-se inviável economicamente.
Produção de levedura	Tecnologia alternativa que reduz a descarga de vinhaça. Porém, encarece a produção ao passo que se devem acrescentar sais de amônia e de magnésio à vinhaça para se obter o fermento seco, além do elevado consumo de energia elétrica para a evaporação da água da vinhaça, necessária neste processo.
Construção civil	A vinhaça pode ser adicionada à massa de cimento ou utilizada como matéria-prima na fabricação de materiais de construção (principalmente tijolos). Contudo, a redução da descarga de vinhaça é limitada pela distância entre o local de construção e a destilaria, já que são elevados os custos do transporte.
Fabricação de ração animal	A vinhaça deve ser tratada para a redução do nível de potássio, a fim de ser utilizada como ração de bovinos, suínos e aves. A ração produzida tem boa aceitação pelos animais e adequada taxa de conversão (ganho de peso com relação ao consumo de ração). Não se verifica alteração no sabor ou odor do leite e seus derivados. Devem-se respeitar as limitações de dosagem: em ruminantes, a ração feita da vinhaça não pode ultrapassar 10% da alimentação diária; em suínos, não deve ultrapassar 2 ou 3%.
Digestão anaeróbia	Viável técnica e economicamente. Garante eliminação massiva da DBO. O desenvolvimento desta tecnologia contou com esforços conjuntos de instituições públicas e privadas. Ao menos, uma unidade de escala industrial em operação na Usina São Martinho, em Pradópolis (SP). Entretanto, é limitada pela falta de valorização do biogás como combustível alternativo, pela difusão bem sucedida da fertirrigação (que não sofreu nenhum controle ambiental mais rigoroso) e pelo declínio do Pro-Álcool, que não permitia investimentos.
Fertirrigação	Técnica que utiliza a vinhaça como fertilizante combinada com a irrigação das lavouras. É despejada <i>in natura</i> no solo, após resfriamento e decantação. Ao mesmo tempo em que se efetua a disposição do resíduo, traz a redução de custos com fertilizantes químicos. Porém, é necessário calcular corretamente a quantidade a ser aplicada por unidade de área para que não ocorra a saturação de nutrientes e conseqüente poluição do solo e águas subterrâneas.

**Quadro 1.2:** Diferentes metodologias para destinação final da vinhaça (adaptado de CORAZZA, 1996, p.10-12).

Com o passar do tempo, a fertirrigação mostrou-se a alternativa mais vantajosa ambiental e economicamente, e transformou-se numa forma racional de emprego dessa substância. A aplicação é feita após o resfriamento e a decantação da vinhaça, em lagoa de recepção. A quantidade a ser aplicada por unidade de área é calculada de modo que a lavoura absorva efetivamente os macronutrientes e que a biota do solo possa promover a degradação e a incorporação, na forma de húmus, da matéria orgânica presentes na vinhaça, evitando a permanência indesejada destes no solo. Esse cálculo é feito com base no elemento de maior teor – no caso, o potássio – para os macronutrientes e/ou na quantidade de matéria orgânica que o solo suporta receber.

A CETESB estabelece através da norma P4.231, de Dezembro de 2006, os critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça, gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana-de-açúcar, no solo do Estado de São Paulo.

Assim, a dosagem máxima de vinhaça a ser aplicada no tratamento de solos agrícolas em cultura de cana-de-açúcar será determinada pela Equação 1.1 (CETESB, 2006, p.9-10):

$$\text{m}^3 \text{ de vinhaça/ha} = \frac{[(0,05 \cdot CTC - k_s) \cdot 3744 + 185]}{k_{vi}} \quad (\text{Equação 1.1})$$

onde:

- 0,05 = 5% da CTC;
- CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em  $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ , dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo e utilizando metodologia de análise do solo do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC);
- $k_s$  = concentração de potássio no solo, expresso em  $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ , à profundidade de 0 a 0,80m, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo utilizando metodologia de análise de solo do IAC;
- 3744 = constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em  $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$  ou  $\text{meq}/100\text{cm}^3$ , para kg de potássio em um volume de 1 (um) hectare por 0,80m de profundidade;
- 185 = massa, em kg, de  $\text{K}_2\text{O}$  extraído pela cultura por hectare, por corte;
- $k_{vi}$  = concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de  $\text{K}_2\text{O}/\text{m}^3$ , apresentada em boletim de resultado analítico.

A não observância deste e outros cuidados técnicos, quando da prática da fertirrigação, pode causar severos impactos no solo e nas águas subterrâneas: saturação, por nutrientes, e poluição do solo; degradação de áreas de plantio; percolação de elementos químicos e contaminação de águas subterrâneas, principalmente pela transferência de significativas concentrações de amônia, magnésio, alumínio, ferro, manganês, cloretos e matéria orgânica (HASSUDA; REBOUÇAS; CUNHA, 1990, p.18 e 19).

O consumo dessas águas contaminadas, por seres humanos, pode acarretar doenças, como a metahemoglobinemia (CALHEIROS, 2008), causada pela ingestão excessiva de nitrato. Nesta condição clínica, ocorre a conversão excessiva de hemoglobina em metahemoglobina, que perde a capacidade dos glóbulos vermelhos do sangue de transportarem o oxigênio, levando o indivíduo contaminado à morte. A metahemoglobina é formada pela oxidação do ferro da molécula heme, passando do estado ferroso ( $Fe^{2+}$ ) para o estado férrico ( $Fe^{3+}$ ).

Por isso, regiões canavieiras assentadas principalmente em áreas de recarga de aquíferos devem receber especial atenção em relação ao uso da vinhaça como fertilizante.

Diante desse contexto, surge a necessidade de se buscar formas viáveis de investigação, que conduzam a uma metodologia adequada de detecção e de diagnóstico de áreas impactadas.

## 1.6 Métodos de investigação

De um modo geral, investigações da influência da vinhaça em solos e águas subterrâneas são efetuadas por meio de análises físico-químicas em amostras de solos e de águas coletadas em áreas de cultivo de cana-de-açúcar onde é praticada a fertirrigação ou em áreas de sacrifício onde é feita a infiltração.

Hassuda (1989) estudou uma área de sacrifício administrada pela Usina São José da Estiva e localizada no município de Novo Horizonte (SP). Foram instalados 20 piezômetros, em 3 linhas paralelas à zona de infiltração, objetivando a coleta de amostras para análise físico-química. As amostras foram coletadas em novembro de 1985, setembro de 1986 e abril de 1987. Em suma, verificou-se diminuição do valor de pH e aumento da condutividade elétrica das amostras, além de valores excessivos de nitrogênio amoniacal, magnésio, alumínio, ferro, manganês e cloreto, tornando as águas subterrâneas do local estudado impróprias para o consumo humano. Apesar de relatar o emprego de métodos geofísicos neste estudo (a fim de alocar corretamente os piezômetros), os resultados apresentados foram compilados de Mendes (1987) (ver item 1.7).

Ludovice (1997) desenvolveu um estudo em um canal condutor de vinhaça não impermeabilizado na Destilaria São João, no município de São João da Boa Vista (SP), de modo a verificar se o transporte da vinhaça pelo canal condutor promove alteração das características da água subterrânea (pH, condutividade elétrica, DQO, nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito e kjeldahl) e determinar a taxa de remoção, avaliando a capacidade do solo em reter as várias substâncias presentes na vinhaça. Ao longo da extensão do canal foram instaladas seis estações de monitoramento, cada qual composta por duas sondas de cápsula porosa e duas caixas coletoras de água de drenagem, colocadas a 0,5m e 1,5m sob o canal, visando a coleta de amostras de água para análise química. Os resultados obtidos mostraram a ineficiência nas remoções, confirmando que a infiltração de vinhaça no canal de transporte tem efeito poluente sobre o lençol freático.

Lyra, Rolim e Silva (2003. p.525-532) avaliaram a qualidade da água do lençol freático de uma área cultivada com cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça ao longo do tempo. Para isto, foi desenvolvido um dispositivo experimental composto por uma malha referenciada de 19 poços de monitoramento, distribuídos em 12 hectares, constituídos por duas áreas cultivadas. Foram realizadas 3 coletas para avaliação da qualidade da água do lençol freático através da determinação da DQO, DBO, Condutividade Elétrica (CE) e Sólidos Dissolvidos Totais (SDT). Os resultados das análises mostram significativas alterações dos parâmetros investigados, indicando que a qualidade da água do lençol freático foi comprometida.

Silva et al. (2006, p.76-83) estudaram alterações nas condições químicas do solo em virtude de diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. Para tanto, foram escolhidos quatro locais de estudo: uma área não irrigada, uma área irrigada, uma com aplicação de vinhaça e uma sob floresta nativa como condição original. Concluíram, entre outras coisas, que no sistema de manejo onde se fez a aplicação de vinhaça, além de ter sofrido a menor redução nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis, apresentou um aumento significativo do teor de  $\text{K}^+$  trocável em relação aos outros tratamentos, possivelmente devido aos teores elevados deste elemento na composição da vinhaça. Também observaram que os valores de condutividade elétrica na área com vinhaça foram significativamente maiores em relação às outras áreas com diferentes tratamentos e restringindo-se às camadas superficiais do solo (0,00 a 0,40m de profundidade).

Brito, Rolim e Pedrosa (2007, p.773-781) desenvolveram um experimento para avaliar a qualidade do lixiviado de solos que receberam diferentes doses de vinhaça em diferentes tempos de incubação. O aparato experimental contava com 27 colunas de PVC, onde foram reproduzidos três diferentes tipos de solos, com horizontes, espessuras e densidades semelhantes à original. As doses de vinhaça aplicadas aos solos foram equivalentes a 0

(testemunha), 350 e 700m<sup>3</sup>/ha. A análise dos efluentes coletados após 30 e 60 dias indicaram diminuição da concentração de K<sup>+</sup>, relativamente à concentração da vinhaça, proporcionalmente ao teor de argila presente em cada solo. Além disso, a concentração dos cátions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Na<sup>+</sup> no lixiviado, em comparação à concentração verificada na vinhaça *in natura*, foi significativamente menor, indicando que os solos tiveram elevado poder de retenção.

Entretanto, os métodos tradicionais de investigação acabam por encarecer e aumentar demasiadamente o tempo de execução de estudos em grandes áreas, já que se torna necessário coletar e analisar um grande número de amostras, ou ainda, construir inúmeros poços de monitoramento, de modo que possam abranger toda a extensão da área em questão. É justamente nesse ponto – em relação ao tempo de execução e aos custos de operação – que os métodos geofísicos de investigação mostram-se mais eficientes que os métodos tradicionais.

### **1.7 Métodos geofísicos aplicados na investigação de áreas contaminadas por vinhaça**

Métodos geofísicos de investigação são um conjunto de procedimentos, que se baseiam em propriedades físicas e ferramentas matemáticas, aplicados à exploração do subsolo e de corpos d'água, para a busca e estudos de depósitos de substâncias úteis ou perigosas, corpos estranhos ou caracterização hidrogeomorfológica, por meio de observações efetuadas na superfície da Terra, furos de sondagens ou levantamentos aerotransportados.

Uma das principais vantagens da aplicação dos métodos geofísicos em relação aos métodos tradicionais de investigação ambiental é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor (CETESB, 1999). Além disso, são de natureza não invasiva, o que significa que, a priori, não alteram o meio físico.

Entretanto, são escassos os trabalhos técnicos/acadêmicos que tratam da utilização de métodos geofísicos, tanto como ferramenta auxiliar quanto como principal, na investigação de contaminação causada pela disposição irregular de vinhaça.

Mendes (1987) desenvolveu um trabalho pioneiro ao utilizar os métodos da Eletrorresistividade (ER) – aplicado com as técnicas da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e do Caminhamento Elétrico (CE – ou Imageamento Elétrico (IE)) – e o Eletromagnético (EM) – aplicado com a técnica do Caminhamento Eletromagnético (CEM – ou Imageamento Eletromagnético (IEM)) na investigação ambiental de duas áreas de infiltração de vinhaça.

A primeira delas trata-se de uma área de sacrifício da Usina São José da Estiva, localizada no município de Novo Horizonte (SP). Neste local, foram executadas 6 SEV, 3 linhas de IE e 7 perfis de IEM. As SEV indicaram a presença de 4 a 5 camadas, onde a

penúltima camada de cada ensaio (zona saturada) apresentou valores entre 20 e 40 $\Omega$ .m, decrescentes à medida que os ensaios se aproximavam do local de maior concentração dos tanques de deposição de vinhaça. As linhas de IE mostraram que os valores de resistividade elétrica decaíam à medida que o ponto de investigação se aproximava dos tanques de deposição e/ou que a profundidade aumentava. Os dados de IEM deram origem a mapas de isovalores com duas características principais: (1) zonas de elevada condutividade próximas aos tanques de deposição; (2) menores valores de condutividade em profundidades maiores, sugerindo que o grau de contaminação diminui com o aumento da profundidade.

A segunda área estudada – também uma área de sacrifício – localiza-se no município de Ribeirão Preto (SP) e pertence à Usina da Pedra. Os valores de condutividade elétrica, obtidos pelo método do IEM variaram entre 7 e 60mS/m, onde os menores valores (da ordem de 7mS/m) localizados à montante da área de infiltração indicaram o *background* da área. À jusante da área, para onde a vinhaça deslocava-se por gravidade, os valores cerca de 10 vezes maiores que o *background* sugerem a contaminação do meio. A execução dos ensaios nos períodos de safra e de entre-safra revelou valores de condutividade reduzidos neste último relativamente ao primeiro período, indicando que o volume de vinhaça infiltrada no solo está diretamente relacionado aos valores medidos de condutividade elétrica.

Gloeden et al. (1991, p.147-157) empregaram métodos geofísicos como parte de uma pesquisa desenvolvida em uma área de recarga do Aquífero Botucatu, localizada no município de Serrana (SP), afim de determinar a dinâmica dos constituintes da vinhaça através das zonas não saturada e saturada. Em uma área de, aproximadamente, 20m x 20m, dividida em 3 unidades menores, foram executadas duas Sondagens Elétricas Verticais (SEV) – método da Eletrorresistividade (ER) – e uma malha regular com 81 medidas de condutividade elétrica utilizando o método Eletromagnético (EM). Por meio das SEV, foi possível identificar três camadas geoeletricas: (1) zona não saturada da Formação Botucatu (resistividade de 1200 $\Omega$ .m e 2,5m de espessura), (2) zona saturada (resistividade de 4,7 $\Omega$ .m e 28m de espessura) e (3) sedimentos da Formação Pirambóia (resistividade de 600 $\Omega$ .m e espessura indefinida). Os ensaios com o método EM exibiram baixos valores de condutividade elétrica (entre 0,4 e 3,5mS/m, decrescentes com a profundidade), corroborando os resultados da SEV e indicando tratar-se dos valores de *background* locais. Neste caso, os métodos geofísicos foram empregados somente na fase de caracterização natural da área, precedente à infiltração controlada de vinhaça.

Cruz (2008) desenvolveu um trabalho de pesquisa no Assentamento Sepé Tiarajú, nos municípios de Serrana e Serra Azul (SP), objetivando avaliar a eficiência do método da

eletrorresistividade para a detecção e mapeamento das anomalias causadas pela disposição inadequada de grandes quantidades de vinhaça em um antigo tanque de infiltração. Além deste, também buscou caracterizar o tipo de anomalia inerente ao resíduo no local estudado e diagnosticar sua influência dentro e fora dos limites do tanque. Assim, foram executados onze perfis de Imageamento Elétrico, com arranjo Dipolo-Dipolo e espaçamento entre eletrodos de 10m. Além de mapear as anomalias decorrentes da disposição de grandes quantidades de vinhaça no solo, foi possível apontar suas áreas de influência e concluir que a contaminação extrapola os limites do tanque. A influência da vinhaça foi caracterizada pelos baixos valores de resistividade – entre  $10\Omega.m$  e  $90\Omega.m$  –, apresentando comportamento semelhante ao do churume, que também é bastante condutivo.

## 1.8 Premissas

Com base no que foi exposto até então, foram elaboradas as seguintes premissas:

- A partir da década de 1980, a vinhaça passou a ser utilizada como fertilizante da lavoura canavieira
- A utilização sem critérios de vinhaça como fertilizante causa a contaminação de solos e águas subterrâneas
- A contaminação de solos e de águas subterrâneas por vinhaça é um problema recorrente em terras nacionais
- A região que envolve os municípios de Rio Claro (SP) e Corumbataí (SP) está inserida próxima à zonas de grande produção canavieira, tornando o problema de contaminação ainda mais evidente e preocupante
- Métodos geofísicos começaram a ser empregados no estudo de áreas contaminadas por vinhaça na segunda metade da década de 1980
- No período entre 1991 e 2008 aparentemente ocorreu um hiato na produção científica quanto ao emprego de métodos geoeletricos na avaliação de áreas contaminadas por vinhaça
- Neste tempo, novos métodos e técnicas surgiram e/ou foram aperfeiçoados
- Levantamentos bibliográficos sugerem que alguns métodos geoeletricos nunca foram experimentados em ambientes contaminados por vinhaça



## 1.9 Hipótese

Os métodos geofísicos do potencial espontâneo, da eletrorresistividade, da polarização induzida (domínio do tempo) e o eletromagnético (domínio da frequência) podem ser empregados conjuntamente na detecção e no monitoramento de anomalias, em subsuperfície, oriundas da infiltração de vinhaça em um ambiente geológico.

## 1.10 Objetivos

Este trabalho tem como proposta principal caracterizar o tipo de anomalia geofísica inerente à infiltração controlada de vinhaça em diferentes contextos geológicos, mediante a aplicação dos métodos geofísicos de investigação: potencial espontâneo, eletrorresistividade, polarização induzida (domínio do tempo) e eletromagnético (domínio da frequência).

Paralelamente, pretende-se:

- Adequar uma metodologia de monitoramento de áreas impactadas por vinhaça empregando-se os quatro métodos geoeletricos supracitados
- Testar os limites de detecção de cada método por meio da infiltração controlada de diferentes volumes de vinhaça
- Orientar a quantificação de vinhaça a ser disposta no solo de acordo com o contexto geológico local
- Reconhecer os processos físico-químicos decorrentes da interação vinhaça/meio geológico e associá-los às anomalias geofísicas encontradas em cada método empregado
- Contribuir com a caracterização geofísica/geoeletrica dos domínios geológicos sobre os quais estão assentadas as área de estudo

## Capítulo 2 – O método do Potencial Espontâneo

### 2.1 Introdução

Dos métodos utilizados no presente projeto, é o único que se vale de campos elétricos naturais para que possa ser desenvolvido, não necessitando do emprego de um circuito emissor de corrente.

Orellana (1972, p.27 e 461) destaca que este é o mais antigo dos métodos geoeletricos e seu descobrimento é devido a Robert Fox, em 1815. Fox percebeu que depósitos de certos minerais produzem naturalmente correntes elétricas de baixa intensidade que podem ser detectadas a partir da superfície terrestre. Eve e Keys (1954, p.80) ainda acrescentam que, em 1830, Fox descobriu depósitos de sulfeto de cobre uma mina de Cornish (sudeste da Inglaterra) medindo potenciais naturais com eletrodos e um galvanômetro.

Esta ideia foi aplicada por Carl Barus, no ano de 1882, em Comstock Lode (Nevada), valendo-se de chapas de zinco imersas em uma solução de sulfato de zinco e acondicionadas em uma membrana animal semipermeável (EVE; KEYS, 1954, p.81). Entre 1880 e 1914, foi aplicada em estudos de minas no mesmo estado norte-americano, por Barnes, Brown e Wells. Também deve-se a estes pesquisadores a construção dos primeiros eletrodos impolarizáveis.

Entretanto, a primeira utilização com êxito deste método ocorreu em 1913, quando Conrad Schlumberger descobriu um depósito de sulfetos em Bor (Sérvia), primeiro material metálico a ser detectado por meio de métodos geofísicos.

### 2.2 Fundamentação teórica

O método do potencial espontâneo – também conhecido por polarização espontânea e por método SP (*Spontaneous Potential* ou *Self Potential*) – baseia-se no fato de que é possível medir uma diferença de potencial entre dois eletrodos situados na superfície do terreno, mesmo na ausência de um campo elétrico artificial. *A priori*, todo potencial que se origina espontaneamente no solo, independentemente do processo que o origina (atividade eletroquímica, fluxo de fluido, de calor ou de íons) é chamado de potencial espontâneo.

Em condições especiais, heterogeneidades condutoras existentes no meio geológico podem se polarizar, originando “pilhas elétricas” e criando correntes elétricas no subsolo. Estas correntes produzem uma distribuição de potenciais na superfície do terreno e podem

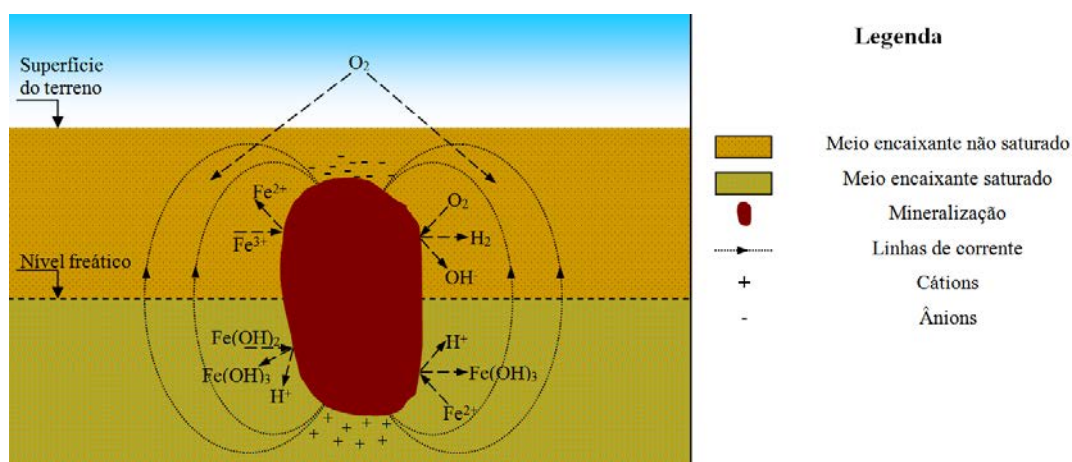
indicar a localização do corpo polarizado. O parâmetro a ser medido é a diferença de potencial (d.d.p.), normalmente expressa em *milivolts (mV)*.

Telford et al. (1978, p.442) e Lowrie (1997, p.208) afirmam que os potenciais naturais que ocorrem em subsuperfície são causados por atividade eletroquímica ou por atividade mecânica e que, em ambos os casos, o fator controlador é a água subterrânea. Estes potenciais podem estar associados a intemperismo de mineralizações de sulfetos, variações nas propriedades das rochas na região de contatos geológicos, atividade bioelétrica de materiais orgânicos, corrosão, gradientes de temperatura e de pressão em fluidos subterrâneos, entre outros.

### 2.2.1 Potencial de mineralização

É o potencial espontâneo associados a mineralizações em subsuperfície. De acordo com Telford et al. (1978, p.444), estes potenciais são comumente verificados em zonas de ocorrência de sulfetos, grafita e magnetita.

A origem deste SP, segundo Sato e Mooney (1960, p.242), é essencialmente eletroquímica. Este efeito é ocasionado por dois distintos tipos de reações que ocorrem em diferentes cotas da interface “mineralização/rocha encaixante”: acima e abaixo do nível freático, com a mineralização atuando unicamente como condutor para os elétrons (Figura 2.1).

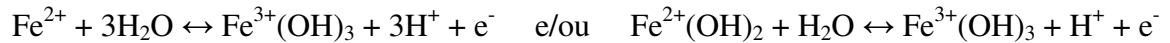


**Figura 2.1:** Representação esquemática do fenômeno SP, com a localização das principais reações químicas.  
Fonte: adaptado de Sato e Mooney (1960, p.246).

Acima do nível freático, onde existe oxigênio livre em abundância e o pH tende a ser ácido, ocorrem reações de redução: substâncias dissolvidas próximas à mineralização tomam elétrons do corpo. As prováveis reações que ocorrem neste ponto são:



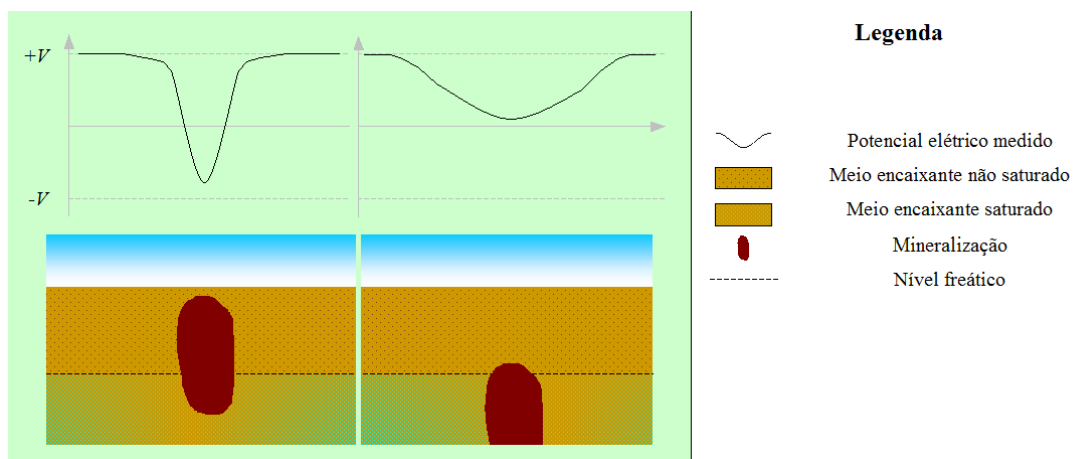
Abaixo do nível freático, substâncias em solução são oxidadas e cedem elétrons ao corpo, sendo as prováveis reações:



Desse modo, a diferença do grau de oxidação/redução aparece como uma diferença do valor de Eh (potencial redox), estabelecendo uma corrente elétrica entre ambas as zonas saturada e não saturada. Os elétrons necessários para a manutenção das reações acima do nível freático são fornecidos pelas reações que ocorrem abaixo do nível freático e utilizam o corpo condutor para se locomover de um ponto ao outro. A energia necessária para a manutenção deste processo é advinda do oxigênio atmosférico que penetra o subsolo carregado pelas águas pluviais (ORELLANA, 1972, p.465).

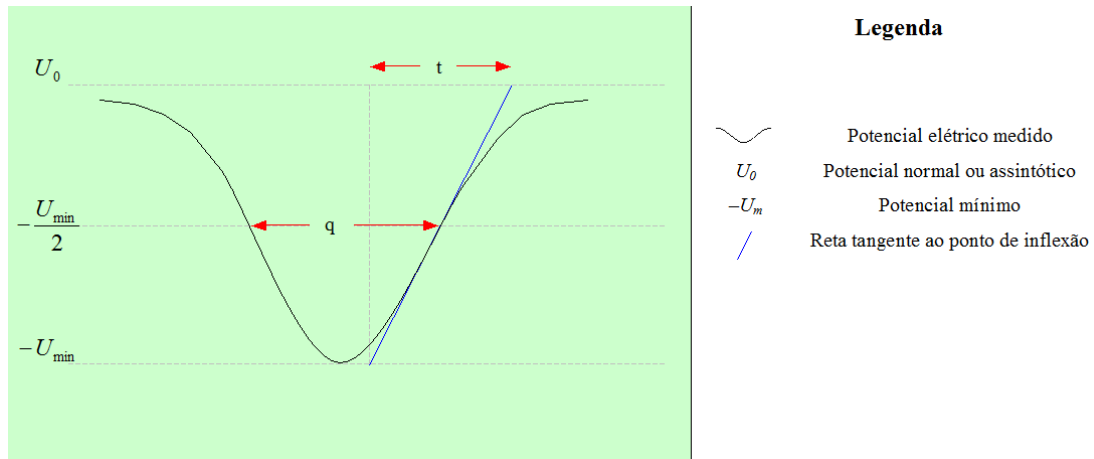
Na maioria dos casos, as condições naturais são tais que as mineralizações encontram-se no “domínio de imunidade”, isto é, não tomam parte das reações químicas e se limitam a atuar como meros condutores. Quando esta condição não ocorre, o corpo condutor torna-se instável e decompõe-se até desaparecer por completo.

A profundidade de investigação pode ser estimada a partir da observação do perfil construído com as medições de SP, sendo a largura do “pico” negativo inversamente proporcional à profundidade (Figura 2.2). Devido à sua natureza passiva, os parâmetros da fonte de corrente não podem ser alterados de modo a se variar a profundidade de investigação ou para melhorar a relação sinal/ruído (CORWIN, 1990, p.128).



**Figura 2.2:** Efeito da profundidade da mineralização sobre o potencial medido em superfície.

Orellana (1972, p.479-487) detalha o desenvolvimento matemático de expressões que permitem inferir, com certo grau de precisão, a profundidade de corpos condutores com diferentes geometrias e posições. Dentre as alternativas apresentadas, constam os “estimadores de Petrowsky”, que consiste em obter-se geometricamente dois parâmetros a partir da curva de potencial (Figura 2.3) e aplicá-los a expressões determinadas para cada situação (Tabela 2.1).



**Figura 2.3:** Definição dos estimadores de Petrowsky. Fonte: adaptado de Orellana (1972, p.486).

**Tabela 2.1:** Expressões para o cálculo da profundidade de mineralizações, segundo o método dos estimadores de Petrowsky. Obs.:  $z_0$  = profundidade em relação ao centro de simetria do corpo;  $z_1$  = profundidade em relação à borda superior do corpo.

Caso	Expressões
Dipolo vertical de pequena longitude em relação à sua profundidade	$z_0 \approx 0,65q$ $z_0 \approx 0,86t$
Dipolo vertical com qualquer longitude	$0,29q \leq z_1 \leq 0,65q$ $0,38t \leq z_1 \leq 0,86t$
Cilindro horizontal polarizado verticalmente	$z_0 \approx 0,5q$ $z_0 \approx 0,6t$
Lâmina polarizada	$0,3q \leq z_1 \leq 0,5q$ $0,4t \leq z_1 \leq 0,7t$

A princípio, traçam-se duas retas horizontais: a primeira ( $-U_{\min}$ ) intercepta o mínimo valor de potencial da curva; a segunda possui por ordenada o valor  $U_0$  normal ou assintótico tendendo ao infinito. O parâmetro  $q$  corresponde à largura da curva na ordenada  $-U_{\min}/2$ . O parâmetro  $t$  é obtido traçando-se uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva e subtraindo-se as abscissas correspondentes às duas retas horizontais ( $U_0$  e  $-U_{\min}$ ). Se a curva de potencial não for simétrica, este último procedimento deverá ser efetuado para ambos os

pontos de inflexão e o valor de  $t$  corresponderá à média dos dois valores calculados (ORELLANA, 1972, p.486).

As condições descritas até então e ilustradas pela Figura 2.1 estão reduzidas a um caso ideal. São fortemente favoráveis, mas não são totalmente necessárias. Sato e Mooney (1960, p.246) ressaltam que o SP pode ocorrer em uma metalização disseminada se a distância de separação entre os grãos é significativamente reduzida e se a condução dos elétrons entre estes grãos pode ocorrer ionicamente dentro de certas condições. Uma das condições, de acordo com Orellana (1972, p.467), é que a rocha encaixante apresente algum grau de alteração, de modo a favorecer o movimento dos íons. Por isso, rochas encaixantes demasiadamente compactas não permitem a ocorrência do fenômeno SP.

Outros ambientes onde não ocorre potencial espontâneo são zonas geladas (a baixa temperatura desacelera a velocidade das reações e o *permafrost* impede o movimento dos íons) e zonas desérticas (entre outros motivos, pela escassa umidade) (SATO; MOONEY, 1960, p.247).

Além do potencial de mineralização, é possível observar a presença de outros potenciais naturais que, por muitas vezes, sobrepõe-se entre si e impossibilitam o discernimento entre um ou outro fenômeno.

### 2.2.2 Potencial de difusão

Orellana (1972, p.467) e Telford et al. (1978, p.443) afirmam que este potencial espontâneo ocorre quando diferentes eletrólitos encontram-se em contato ou quando diferentes concentrações de um mesmo eletrólito encontram-se nos poros dos materiais geológicos.

Ainda, segundo Orellana (op cit.), a mobilidade de um íon está associada à sua polaridade e os íons com maior mobilidade tendem a se difundir mais rapidamente. Quando em subsuperfície, os íons se difundem em velocidades diferentes e formam regiões onde predomina uma polaridade. Assim, entre distintas regiões, surge uma d.d.p, a qual pode ser expressa pela Equação 2.1:

$$\Delta V = \frac{u - v}{u + v} \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2} \quad (\text{Equação 2.1})$$

onde:

- $\Delta V$  é o valor da d.d.p. entre dois pontos distintos do terreno, em V;
- $u$  e  $v$  representam a mobilidade dos cátions e ânions, respectivamente, em  $m^2/V.s$ ;

- $R$  é a constante dos gases ideais, igual a  $8,31447 \text{ J/mol.K}$ ;
- $T$  é a temperatura absoluta, em  $K$ ;
- $n$  é o número de valência dos íons;
- $F$  corresponde à constante de Faraday, com valor de  $96.485,3399 \text{ C/mol}$ ;
- $C_1$  e  $C_2$  expressam as concentrações dos eletrólitos em contato, em  $\text{mol/m}^3$ .

Na situação específica em que  $u-v = u+v$ , a Equação 2.1 é reduzida ao potencial de Nernst (Equação 2.2):

$$\Delta V = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2} \quad (\text{Equação 2.2})$$

### 2.2.3 Potencial electrocinético

Também conhecido como potencial de fluxo, potencial de eletrofiltração, potencial de electrocinese e *streaming potential*. É o potencial natural de maior interesse na geologia de engenharia, hidrogeologia e estudos ambientais, pois possibilita detectar os caminhos preferenciais da água subterrânea e mapear divisores de águas e direções de fluxo (ORELLANA, 1972, p.470; LOWRIE, 1997, p. 208).

Um eletrólito, quando forçado a passar por um capilar, tende a arrastar íons consigo, causando zonas de concentração e zonas de deficiência de íons ao longo do caminho. O capilar, por sua vez, absorve os ânions, que atraem os cátions, formando uma dupla camada elétrica em suas paredes. As diferentes concentrações de íons ao longo do capilar geram uma diferença de potencial (d.d.p.) entre suas extremidades. A intensidade do potencial gerado depende de características dos materiais envolvidos, tais como resistividade elétrica, constante dielétrica e viscosidade do eletrólito, e diferenças de pressão ao longo do percurso do fluxo (LOWRIE, 1997, p.208).

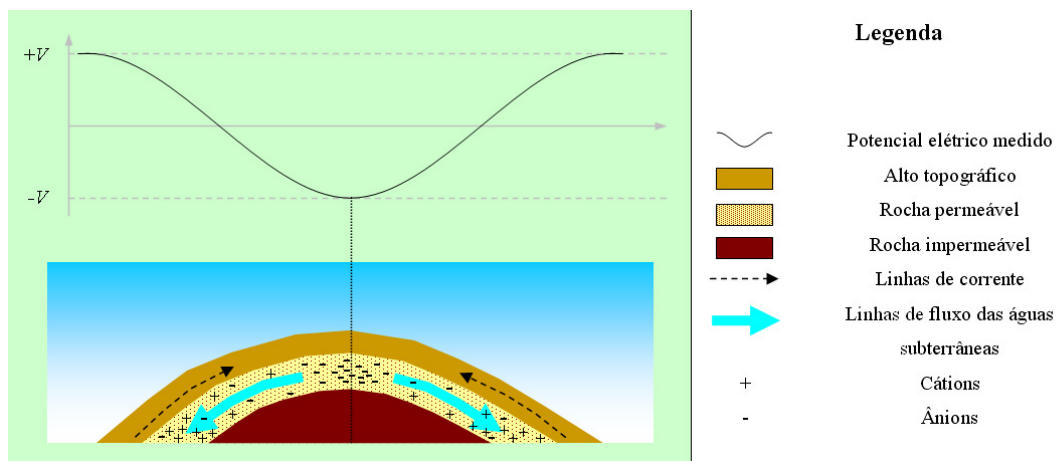
Assumindo a porosidade de um meio geológico como uma rede de capilares, através dos quais ocorre o fluxo das águas subterrâneas, é possível, então, comparar o comportamento do meio geológico ao de uma membrana porosa. Na presença de um fluxo d'água, este carrega os cátions enquanto os ânions permanecem fixos nos capilares, gerando uma d.d.p. entre cotas mais altas e mais baixas em subsuperfície, segundo a equação de Helmholtz (Equação 2.3):

$$\Delta V = \frac{\zeta \varepsilon}{\eta \sigma} \Delta P \quad (\text{Equação 2.3})$$

onde:

- $\Delta V$  é o valor da d.d.p. entre dois pontos distintos do terreno, em  $V$ ;
- $\zeta$  é a d.d.p. na dupla camada elétrica (potencial zeta), em  $V$ ;
- $\varepsilon$  é a constante dielétrica do eletrólito, em  $F/m$ ;
- $\eta$  é a viscosidade do eletrólito, em  $Pa.s$ ;
- $\sigma$  é a condutividade elétrica do eletrólito, em  $S/m$ ;
- $\Delta P$  é a diferença de pressão hidrostática entre os extremos do capilar, em  $Pa$ .

No caso de águas subterrâneas, existem dois tipos de potenciais electrocinéticos: *per ascensum* e *per descensum*, sendo o segundo correspondente ao fluxo de águas subterrâneas em rochas sedimentares permeáveis ou em fraturas/falhas em rochas cristalinas. Os cátions são transportados, pela água, para cotas menores e nos altos topográficos verificam-se núcleos eletricamente negativos (Figura 2.4) (ORELLANA, 1972, p.469).



**Figura 2.4:** Efeito SP do tipo “potencial eletro-cinético *per descensum*”. Fonte: adaptado de Orellana (1972, p.486).

## 2.2.4 Biogeobaterias

Tipo de potencial espontâneo ainda pouco estudado e que tem recebido a atenção dos pesquisadores na atualidade. Plumas de contaminação ricas em substâncias orgânicas, tais como as encontradas em aterros de resíduos urbanos e em locais de vazamentos de petróleo e alguns de seus derivados, atraem certos tipos de bactérias (como a *Shewanella oneidensis*)



que se alimentam destas substâncias. Neste processo, as bactérias geram filamentos com alguns nanômetros de espessura – e que são condutores de eletricidade – e os utilizam para lançar ao solo os elétrons que “sobram” do seu metabolismo, os quais são absorvidos por minerais. Assim como no potencial de mineralização, o fluxo de elétrons surge de áreas profundas e anóxicas rumo à superfície, onde há oxigênio livre.

Maiores informações a respeito de biogeobaterias podem ser obtidas, por exemplo, na obra de Lopes (2010) e Revil et al. (2010).

### **2.3 Instrumentação e técnicas de campo**

Para se efetuar a medição do efeito SP, ao contrário de outros métodos geoeletricos, não é necessária a injeção de uma corrente elétrica artificial no solo, já que este método utiliza correntes naturais, como mencionado anteriormente. Basta apenas um milivoltímetro de alta impedância de entrada (da ordem de  $10M\Omega$ ), com resolução de 1mV ou 0,1mV e escala de +/- 10 Vdc (PARASNIS, 1962, p.64 e 65; CORWIN, 1990, p.132), um par de eletrodos não polarizáveis e cabos de conexão.

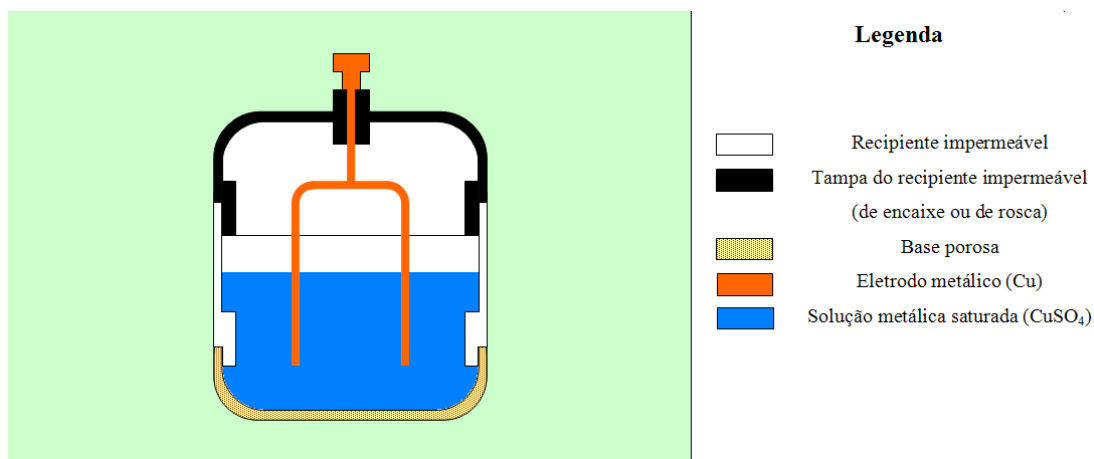
Diferentemente dos eletrodos metálicos, os eletrodos não polarizáveis não apresentam o efeito de polarização eletroquímica entre eles e o solo. Este efeito indesejável induz a erros de leitura do potencial medido, principalmente quando se trata de valores significativamente baixos (da ordem de alguns *mV*) (ORELLANA, 1972, p.236).

Os eletrodos não polarizáveis (ou impolarizáveis) são constituídos por uma haste metálica – normalmente, cobre (empregado neste projeto) ou prata – mergulhada em uma solução saturada de um sal do mesmo metal –  $CuSO_4$  ou  $AgCl$ , respectivamente – e acondicionados um em recipiente impermeável, mas com fundo poroso (Figura 2.5). Esta porosidade permite uma passagem lenta e suave da solução do recipiente para o meio geológico, estabelecendo-se o contato elétrico. Desse modo, o efeito de polarização originado em cada eletrodo tende a ter a mesma intensidade e se anulam.

Devido à sua construção, os eletrodos não polarizáveis devem ser acomodados em pequenas valas escavadas no solo e saturadas com água, de modo a evitar o vazamento da solução, além de garantir a fixação e o contato elétrico com o solo.

A aquisição dos dados é efetuada, basicamente, por meio de duas técnicas distintas: a técnica dos potenciais e a técnica dos gradientes. Neste trabalho, em específico, empregou-se a técnica dos potenciais, descrita no item 2.6. Maiores informações a respeito da técnica dos

gradientes podem ser obtidas em Parasnís (1962, p.65), Orellana (1972, p.475-477), Corwin (1990, p.128), Lowrie (1997, p.209) e Gallas (2005, p.137-138).



**Figura 2.5:** Representação esquemática de um eletrodo não polarizável.

### 2.3.1 Técnica dos potenciais

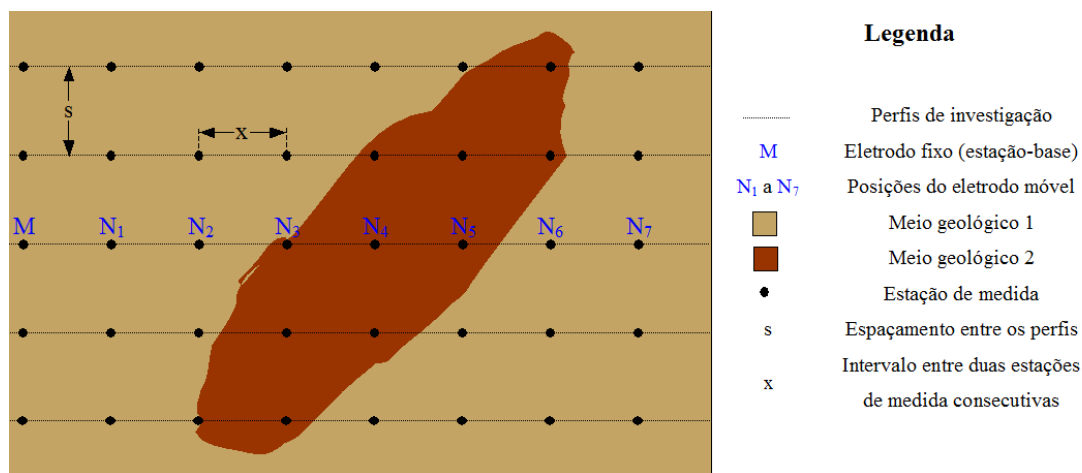
Também conhecida como *total field method* (CORWIN, 1990, p.129; LOWRIE, 1997, p.210). Consiste em determinar a diferença de potencial de uma série de estações de medida em relação a um ponto de referência. Nesta técnica, um dos eletrodos permanece fixo, em uma estação-base, junto ao equipamento de medição e fora da área de investigação, enquanto o outro percorre os pontos de medidas no perfil ou na malha de levantamento, dispostos em intervalos iguais entre si (Figura 2.6). Corwin (1990, p.130) considera a localização do eletrodo de referência como arbitrária, já que não existe um ponto de potencial zero universal.

O cabo de conexão do eletrodo móvel tem de ser comprido o suficiente para alcançar todos os pontos de medidas do ensaio. Por convenção, o terminal negativo do equipamento de medição deve ser conectado ao eletrodo de referência.

Em situações em que o perfil executado é demasiado longo ou a área de investigação é significativamente grande, o cabo de conexão passa a funcionar como uma antena, captando ruídos elétricos indesejáveis do ambiente, que interferem na precisão das medidas. Nesses casos, é necessário utilizar um cabo menor e mudar a estação-base de local, “amarrando” a nova base à anterior (PARASNIS, 1962, p.65; GALLAS, 2005, p.137 e 138).

Comparativamente à técnica dos gradientes, Corwin (1990, p.129) afirma que a técnica dos potenciais apresenta menor erro cumulativo, pois todas as medições são realizadas em relação a um único referencial, resultando em dados mais confiáveis. Ainda afirma que a reprodutibilidade dos dados é significativamente melhor em comparação à outra técnica

mencionada e que, com a técnica dos potenciais, é possível obter-se dados de boa qualidade com custos reduzidos.



**Figura 2.6:** Representação esquemática da técnica dos potenciais. Fonte: adaptado de Gallas (2005, p.137).

## 2.4 Aplicações

Inicialmente, o método do SP foi empregado na localização e exploração de jazidas minerais. Com o passar do tempo, o emprego deste método foi ampliado para outras áreas, tais como hidrogeologia, engenharia/geotecnia, estudos ambientais e arqueologia.

### 2.4.1 Prospecção mineral

Singh e Ram (1971) localizaram um depósito de grafite no distrito de Palamau (Índia) e por meio da técnica “*downward continuation*” estimaram a profundidade do corpo entre 16m e 19m, respectivamente para o topo e para a base do depósito.

Valendo-se de mais de 3.000km de perfis de SP, Corry (1985) localizou diversos depósitos de sulfetos nas localidades de Little Cottonwood Canyon (Nevada), Safford (Arizona), Buena Vista, Crested Butte e na mina do Monte Emmons (Colorado), todas na porção oeste dos Estados Unidos.

### 2.4.2 Geotecnia e Geologia de Engenharia

Erchul e Slifer (1989) monitoraram áreas cársticas no condado de Rockbridge (Virginia) e puderam relacionar as anomalias de SP ao fluxo subterrâneo e ao regime de chuvas da região.

Ainda nos Estados Unidos, Butler e Llopis (1990) detectaram fluxos e infiltrações anômalas em barragens e reservatórios no distrito de Walla Walla (Washington), no condado de Wayne (Missouri) e nos condados de Benton e Carroll (Arkansas), utilizando o método do SP, entre outros métodos.

Gallas et al. (2001) empregaram métodos geoeletricos – entre eles o SP – para delimitar a extensão da zona afetada por um colapso e desmoronamento do teto de um túnel em construção sob o Parque do Ibirapuera na cidade São Paulo (SP).

Vichabian e Morgan (2002) conseguiram relacionar anomalias positivas de SP às cavernas Indian Echo, em Hershey (Pennsylvania).

### **2.4.3 Hidrogeologia**

Anderson e Johnson (1976) identificaram uma fonte dipolar de SP na caldeira vulcânica de Long Valley (California). Os autores associaram esta anomalia ao processo de eletrofiltração causado pelas águas subterrâneas aquecidas.

Próximo à cidade de Taranto (Itália), Schiavone e Quarto (1984) desenvolveram um trabalho de pesquisa com SP e relacionaram o fluxo d'água subterrâneo às anomalias detectadas nos perfis.

No Japão, na ilha de Kyushu, Hashimoto e Tanaka (1995) detectaram anomalias positivas de SP no cume do vulcão Unzen, as quais foram atribuídas ao fluxo subterrâneo associado à convecção hidrotermal.

Na cadeia de montanhas vulcânicas de Chaîne des Puys (França), Aubert e Atangana (1996) demonstraram a eficácia do método na determinação da direção e do sentido do fluxo subterrâneo e propuseram um método quantitativo para interpretar dados de SP.

Loddo, Quarto e Schiavone (1996) empregaram diversos métodos geofísicos, incluindo o SP, num estudo de geologia estrutural e hidrogeotermal no Promontório Gargano. As anomalias (positivas e negativas) puderam ser correlacionadas a fontes e escoadouros de águas subterrâneas.

Medeiros e Lima (1999) valeram-se de medidas de SP em rochas cristalinas nos municípios de Itaberaba e Ipirá (BA) para a locação de poços.

Singarimbun, Djamal e Meilawati (2011) coletaram e interpretaram dados de SP em um estudo de prospecção de energia geotermal realizado no Monte Patuha (Indonésia). As anomalias encontradas sugerem fluxo de águas subterrâneas na direção nordeste.

#### 2.4.4 Estudos ambientais

Vichabian (1997) executou diversos perfis utilizando o método SP na Massachusetts Military Reservation (MMR) objetivando determinar a extensão da contaminação do solo por combustível de aviões a jato.

Cavalcanti, Sato e Lima (2001) puderam inferir a direção do fluxo subterrâneo no entorno do Aterro Metropolitano Centro (AMC) em Salvador (BA) por meio de medições de SP executadas no início da operação do local.

Naudet, Revil e Bottero (2003) apresentaram um estudo de caso no aterro de Entressen, na França, no qual propuseram uma metodologia para identificar a componente relacionada ao potencial eletro-cinético e, assim, correlacionar o SP e o potencial redox.

Por sua vez, Lago, Elis e Giacheti (2006) associaram as zonas de ocorrência dos maiores valores de potenciais (d.d.p.) medidos à direção do fluxo subterrâneo e à maior concentração de chorume no aterro sanitário de Bauru (SP).

Em um curtume situado em Belém (PA), Nunes e Luiz (2006) notaram que os valores mais elevados de SP concentram-se no centro da área estudada, revelando a direção do fluxo d'água subterrâneo e a maior concentração do material contaminante neste local, detectado por meio de outros métodos geofísicos.

#### 2.4.5 Arqueologia

Wynn e Sherwood (1984) empregaram o método do SP (dentre outros) para investigar três sítios arqueológicos recentes (século XVIII) situados no estado de Maryland (Estados Unidos): Forte Washington, Piscataway e Harpers Ferry. As anomalias negativas (associadas a potenciais eletro-cinéticos) indicaram, respectivamente, grandes fundações executadas em pedra, um ossuário enterrado e um pilar de sustentação.

Eppelbaum (2010) elaborou uma revisão sobre diversos métodos geofísicos aplicados na investigação arqueológica no território israelense. Especificamente no método do SP, o autor cita casos históricos por ele investigados: Baniyas (sítio arqueológico localizado aos pés do Monte Hermon, nas Colinas de Golan, 150km ao norte de Jerusalém), Shaar-Ha-Golan (pequeno povoado situado aos pés das Colinas de Golan, no vale do Rio Jordão), Halutza (sítio arqueológico próximo à cidade de Be'er-Sheva, ao sul de Israel) (EPPELBAUM; BEN-AVRAHAM; ITKIS, 2002) e Emmaus-Nikopolis (cidade histórica onde Jesus apareceu após sua morte e ressurreição).

## Capítulo 3 – O método da Eletrorresistividade

### 3.1 Introdução

As primeiras pesquisas relacionadas aos métodos geoeletricos remontam o século XVIII. O método da eletrorresistividade (em inglês *electrical resistivity* – ER), em especial, foi um dos primeiros a serem estudados. Os primeiros registros conhecidos são atribuídos a Gray e Wheeler que, em 1720, publicaram alguns trabalhos sobre a resistividade elétrica das rochas, e a Watson que, em 1746, descobriu que o solo é um condutor elétrico (ORELLANA, 1972, p.27).

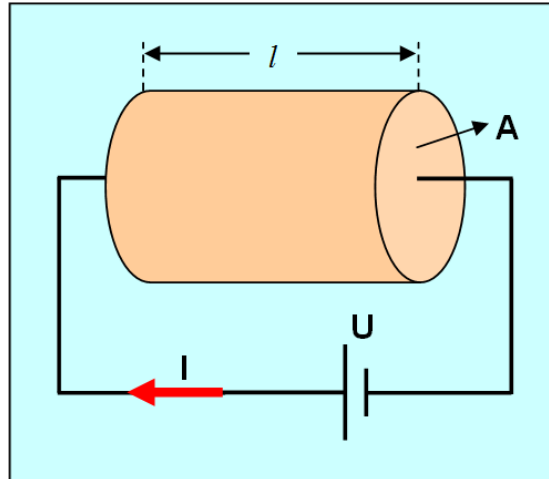
Os métodos de campo artificial passaram a receber especial atenção a partir do final do século XIX. Um marco importante na história dos métodos geoeletricos é o ano de 1915, quando Conrad Schlumberger e Frank Wenner idealizaram, independentemente, dispositivos tetraeletródicos de prospecção, os quais, posteriormente, receberam as respectivas denominações de “arranjo Schlumberger” e “arranjo Wenner”.

Nos idos de 1932, Conrad Schlumberger, junto de seu irmão Marcel, do matemático romano Sabba S. Stefanescu e do físico francês Raymond Maillet, passaram a dedicar-se à solução dos problemas matemáticos de propagação de correntes elétricas constantes (*direct current* – DC) em meios estratificados (isotrópicos e anisotrópicos), necessária para a correta aplicação e interpretação dos dados de sondagens elétricas (desenvolvidas desde 1925). Assim, em 1932, foram publicados os trabalhos de Stefanescu, que solucionou as questões sobre distribuição de potenciais em um semi-espaço estratificado, de Doll e Maillet sobre anisotropia e de Maillet sobre as equações fundamentais da prospecção elétrica.

### 3.2 Fundamentação teórica

O método da eletrorresistividade (ER) baseia-se no fato de que diferentes materiais, geológicos ou não, apresentam diferentes valores de resistividade elétrica. A resistividade elétrica ( $\rho$ ) é um parâmetro intrínseco dos materiais que indica a maior ou menor dificuldade encontrada por uma corrente elétrica para se propagar em um meio. Esse coeficiente depende, entre outras coisas, da natureza e do estado físico do corpo considerado.

Para um corpo homogêneo, de comprimento  $l$  (expresso em  $m$ ) e área da seção transversal  $A$  (dada em  $m^2$ ) (Figura 3.1), a resistividade elétrica  $\rho$ , cuja unidade de medida é o  $\Omega.m$ , pode ser calculada pela Equação 3.1:



**Figura 3.1:** Condutor cilíndrico homogêneo usado para obter a expressão da resistividade elétrica.

$$\rho = R \frac{A}{l} = \frac{U}{I} \frac{A}{l} = \frac{U}{I} K \quad (\text{Equação 3.1})$$

onde:

- $R$  é a constante de proporcionalidade, chamada resistência elétrica e expressa em *ohms* ( $\Omega$ );
- $U$  é a tensão aplicada entre as extremidades do corpo, dada em *volts* ( $V$ );
- $I$  é a intensidade da corrente elétrica que flui através do corpo, dada em *ampères* ( $A$ );
- $K$  é um coeficiente geométrico, que depende das dimensões do corpo, expresso em metros ( $m$ ).

As rochas apresentam propriedades eletromagnéticas, tais como: potencial elétrico natural, resistividade elétrica ( $\rho$ ), constante dielétrica ( $\kappa$ ) e permeabilidade magnética ( $\mu$ ) (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990, p.283). Essas propriedades são devidas, entre outros fatores, à composição mineralógica, porosidade e textura que as rochas possuem.

Especificamente, a resistividade elétrica é uma das propriedades fundamentais dos materiais geológicos e serve para caracterizar seus estados, em termos de grau de alteração, fraturamento, saturação e interpretação de litotipos, reduzindo (mas não dispensando) a necessidade de escavações físicas. A resistividade elétrica de uma rocha é influenciada, entre outros fatores:

- pela resistividade dos minerais que formam a parte sólida da rocha;
- pela resistividade dos líquidos e gases que preenchem os poros da rocha;
- pela porosidade e textura da rocha;
- por processos que ocorrem no contato dos líquidos contidos nos poros e a estrutura mineral, tais como: processo de adsorção de íons na superfície da estrutura mineral, diminuindo a resistividade total destas rochas.

Somam-se a estes fatores o tamanho dos grãos, além do tipo de mecanismo de condução de corrente elétrica: a condução eletrônica (ocorre através de elétrons livres presentes em minerais metálicos ou na grafita) ou a condução eletrolítica (ou iônica, devido ao deslocamento de íons presentes na água e/ou eletrólitos contidos em fissuras e porosidades do solo e das rochas) (GRIFFITHS; KING, 1965, p.9; SOUZA; SILVA; YOMASA, 1998, p.166). A condução iônica é o modo mais comum encontrado na natureza de condução de eletricidade, e é o modo mais significativo nos estudos geofísicos por eletrorresistividade (GALLAS *et al*, 2005, p. 52).

Telford, Geldart e Sheriff (1990, p. 284) e Lowrie (1997, p.205) ainda citam a condução dielétrica, que ocorre em maus condutores ou isolantes, onde os elétrons atômicos – isto é, ligados aos núcleos atômicos – são deslocados ligeiramente em relação aos núcleos sob a influência de um campo elétrico externo variável. Essa ligeira separação de cargas é conhecida como polarização dielétrica do material, a qual produz uma corrente conhecida como corrente de deslocamento.

### 3.2.1 Medição da resistividade elétrica de um meio geológico

Para se determinar o valor de resistividade elétrica que caracteriza um meio geológico, é necessário submetê-lo a um campo eletromagnético. Especificamente para este método, utiliza-se o procedimento galvânico, onde um par de eletrodos metálicos (**A** e **B**) são cravados na superfície terrestre e conectados a uma fonte de corrente – contínua ou variável. Surge, então, um campo eletromagnético em subsuperfície que gera uma diferença de potencial, a qual pode ser medida entre outro par de eletrodos (**M** e **N**).

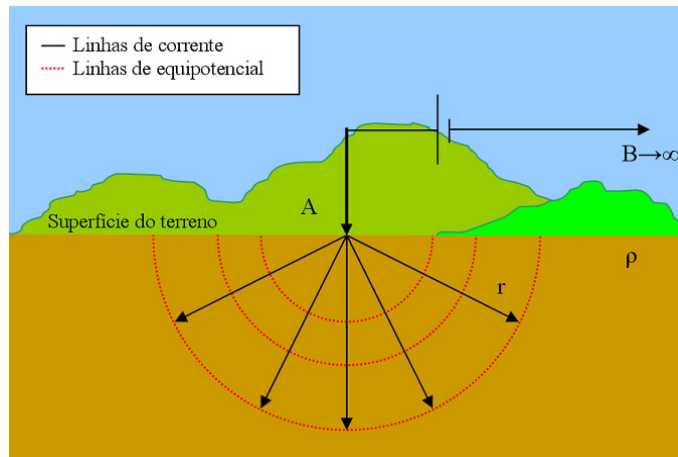
Assim, para o desenvolvimento da base teórica deste método, será considerado um dispositivo capaz de injetar uma corrente elétrica de intensidade  $I$ , através de um eletrodo metálico **A**, em um meio geológico homogêneo e isotrópico. Por suposição, o segundo eletrodo metálico **B**, que fecha o circuito de corrente, encontra-se infinitamente distante do eletrodo **A**, de modo a não interferir nas observações, conforme ilustrado na Figura 3.2.

As linhas de fluxo de corrente são radiais em relação ao ponto de injeção de corrente e assim determinam uma superfície semiesférica  $S$  (em  $m^2$ ) de área:

$$S = 2\pi r^2 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Tal superfície semiesférica localiza-se somente no meio geológico homogêneo e isotrópico, pois acima dele é suposta a existência de ar, onde a condutividade elétrica  $\sigma$  (expressa em *Siemens por metro* –  $S/m$ ), para fins de cálculo, é nula.





**Figura 3.2:** Dispositivo para determinação da resistividade elétrica de um meio homogêneo.

Dada a simetria do problema, a densidade de corrente  $J$  (em  $A/m^2$ ) num ponto a uma distância  $r$  (em  $m$ ) do ponto de injeção de corrente, em coordenadas esféricas, é:

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{Equação 3.3})$$

A densidade de corrente num meio condutor é linearmente proporcional ao campo elétrico  $E$  (em  $N/C$ ) (HOHMANN; WARD, [1981], p.3; REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1982, p.141). Essa afirmação é a tradução da Lei de Ohm na forma:

$$J_r = \sigma E_r = \frac{E_r}{\rho} \quad (\text{Equação 3.4})$$

Combinando-se as Equações 3.3 e 3.4, tem-se:

$$\frac{I}{2\pi r^2} = \frac{E_r}{\rho}$$

$$E_r = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (\text{Equação 3.5})$$

Por meio da Equação 3.5 é possível concluir que o valor do campo elétrico  $E$  de um eletrodo puntual, em coordenadas esféricas, é inversamente proporcional ao quadrado da distância  $r$ .

Sabe-se que a diferença de potencial  $\Delta V$  (expressa em  $V$ ) entre dois pontos  $r_1$  e  $r_2$  quaisquer é dada por (REITZ; MILFORD; CHRISTY, 1982, p.143):

$$\Delta V_{r_1}^{r_2} = -\int_{r_1}^{r_2} E_r dr \quad (\text{Equação 3.6})$$

Portanto, a diferença de potencial a uma distância  $r$  do eletrodo **A** é dada por:

$$\Delta V_r^\infty = -\int_r^\infty E_r dr = -\frac{I\rho}{2\pi} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (\text{Equação 3.7a})$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (\text{Equação 3.7b})$$

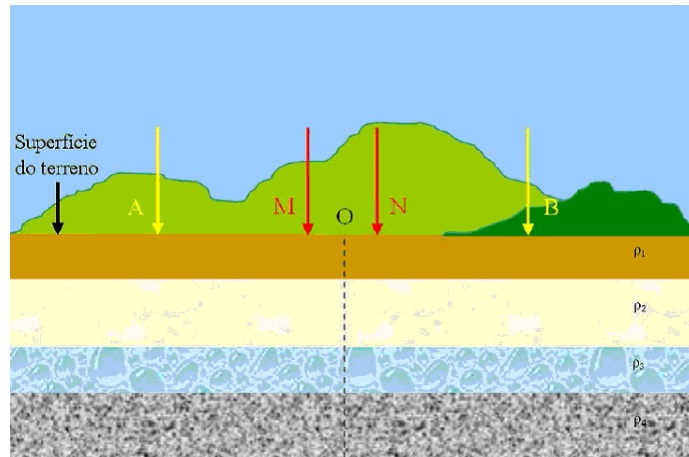
Isolando o termo  $\rho$ :

$$\rho = 2\pi r \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Equação 3.8})$$

Esta é a expressão fundamental do método da eletrorresistividade quando aplicado na superfície de um meio geológico homogêneo e isotrópico. Do mesmo modo que na Equação 3.1, o fator  $K$  é chamado de **coeficiente geométrico** e, nesse caso, depende do número de eletrodos e da disposição (configuração) utilizados.

A situação mais comumente encontrada conta com quatro eletrodos dispostos simetricamente em relação a um ponto médio (**O**), como ilustrado na Figura 3.3. Por meio dos eletrodos **A** e **B**, uma corrente elétrica é injetada no solo e a diferença de potencial gerada é medida entre os eletrodos **M** e **N**.

De acordo com Telford, Geldart e Sheriff (1990, p.524), quando os eletrodos de corrente **A** e **B** são dispostos de modo que a distância entre eles seja finita, a diferença de potencial entre dois pontos próximos da superfície será afetada por ambos os eletrodos de corrente. Portanto, o potencial medido sobre o eletrodo **M** será a soma das contribuições de cada eletrodo de corrente:



**Figura 3.3:** Dispositivo tetraeletródico **A M N B** para aplicação do método da eletrorresistividade.

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi r_1} + \left(-\frac{I\rho}{2\pi r_2}\right) = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right] \quad (\text{Equação 3.9})$$

onde  $r_1$  é a distância entre os eletrodos **A** e **M** (ou **AM**), e  $r_2$  é a distância entre os eletrodos **B** e **M** (ou **BM**).

Analogamente, o potencial medido sobre o eletrodo **N** será também a soma das contribuições dos eletrodos de corrente **A** e **B**:

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right] \quad (\text{Equação 3.10})$$

onde  $r_3$  é a distância entre os eletrodos **A** e **N** (ou **AN**), e  $r_4$  é a distância entre os eletrodos **B** e **N** (ou **BN**).

Enfim, a diferença de potencial entre **M** e **N**, dada por  $\Delta V = V_M - V_N$ , pode ser escrita como sendo:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right] \quad (\text{Equação 3.11})$$

Isolando o termo  $\rho$ , a Equação 3.11 pode ser reescrita como:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right]^{-1} \quad (\text{Equação 3.12})$$

No entanto, os fatores  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  e  $r_4$  representam, respectivamente, as distâncias entre os eletrodos **A** e **M**, **B** e **M**, **A** e **N**, e **B** e **N**, ou, como já mencionado, **AM**, **BM**, **AN** e **BN**. Portanto, a Equação 3.12 pode ser reescrita como:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (\text{Equação 3.13})$$

A Equação 3.13 é a equação fundamental do método da eletrorresistividade quando aplicado na superfície de um meio geológico homogêneo e isotrópico, e é válida para qualquer dispositivo linear com quatro eletrodos.

### 3.2.2 Resistividade aparente

A fundamentação teórica apresentada até aqui adota, para fins de cálculo, um meio geológico homogêneo e isotrópico – isto é, suas propriedades não sofrem variação conforme a localização do ponto considerado. Porém, na prática, essa situação dificilmente se verifica.

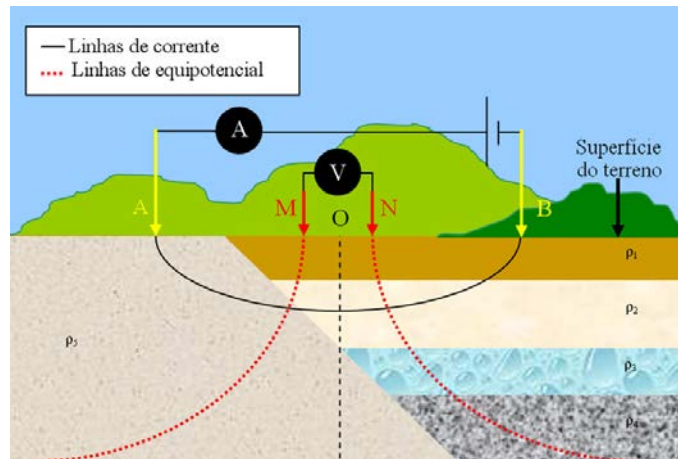
Em um caso real,  $\rho$  variará se a disposição geométrica dos quatro eletrodos for alterada ou se o todo o conjunto for mudado de local sem alterar sua geometria. Isto acontece porque um meio geológico real é constituído por uma sucessão de camadas com diferentes valores de resistividade. As heterogeneidades e anisotropias dos materiais geológicos das camadas estão distribuídas tanto lateralmente quanto em profundidade (Figura 3.4), causando distorções no campo elétrico  $E$  (Figura 3.5), e quando detectadas são traduzidas como anomalias de resistividade.

Desse modo, se efetuadas as medidas pertinentes e levados os dados obtidos à Equação 3.13, resultará uma resistividade fictícia  $\rho_a$ , a qual dependerá da resistividade de cada camada geológica e das distâncias **AM**, **BM**, **AN** e **BN**.

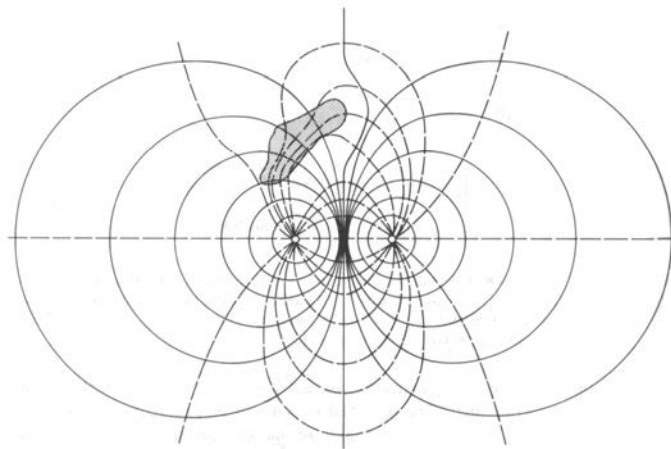
A resistividade fictícia  $\rho_a$ , que se obtém aplicando os dados obtidos sobre um meio heterogêneo à expressão correspondente a um meio homogêneo, é chamada de resistividade aparente. Esta é uma variável experimental que expressa os resultados obtidos nas medições do método da eletrorresistividade e que se toma como base para a interpretação (ORELLANA, 1972, p.112). Sua unidade de medida também é o *ohm.m* ( $\Omega.m$ ).

A resistividade aparente é um conceito formal e artificial, e não deve ser interpretada, de modo geral, como a resistividade média do meio. A artificialidade fica evidente pelo fato

de que os valores negativos de resistividade aparente são possíveis (PARASNIS, 1962, p.69). Robinson e Çoruh (1988, p.460) sugerem que  $\rho_a$  pode ser entendida como uma média ponderada das resistividades dos diferentes materiais compreendidos entre as linhas equipotenciais consideradas.



**Figura 3.4:** Exemplo hipotético de sucessão de camadas geológicas com heterogeneidades e anisotropias distribuídas lateralmente e em profundidade.



**Figura 3.5:** Vista superior da distorção do campo elétrico causada por um corpo heterogêneo e anisotrópico.  
Fonte: Sheriff (1989, p.184).

### 3.3 Instrumentação e técnicas de campo

A aquisição dos dados é feita por meio de instrumental relativamente simples, composto de um resistímetro, eletrodos metálicos e cabos de conexão. Por experiência adquirida em campo, um resistímetro capaz de injetar correntes de até 1A – contínuas (DC) ou alternadas (AC) de baixa frequência – e medir diferenças de potenciais de até 5V com resolução de 1mV é suficiente para a execução de ensaios voltados para as mais diversas aplicações. Quanto aos

eletrodos, estes são constituídos por uma haste metálica de, aproximadamente, 0,5m de comprimento e ½" de diâmetro, normalmente feitos de cobre ou aço inox.

O número de eletrodos empregados em um ensaio geofísico, bem como a ordem de disposição e o espaçamento entre eles, não necessariamente devem ser idênticos à Figura 3.3, mas podem variar conforme o arranjo. O termo “arranjo” define as combinações numéricas e geométricas de eletrodos para a execução de diferentes técnicas dos métodos geoeletricos. Conforme a técnica adotada, pode-se utilizar um arranjo em especial que favoreça o desenvolvimento do ensaio e facilite a aquisição dos dados.

### 3.3.1 Técnica da Sondagem Elétrica Vertical e o Arranjo Schlumberger

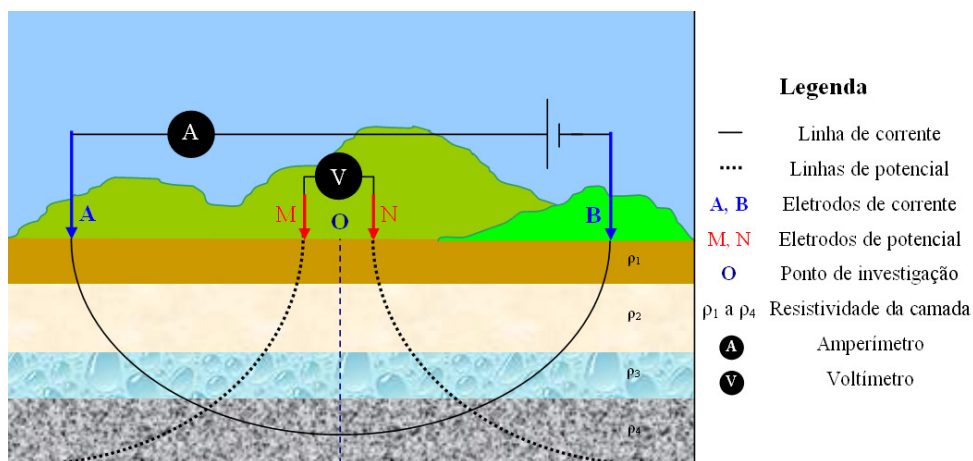
A técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV), consiste na investigação da variação de um ou mais parâmetros físicos – neste projeto, somente a resistividade elétrica – em profundidade (1D), a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno. É considerada a melhor técnica para se detectar camadas geoeletricas de diferentes resistividades dispostas horizontalmente ou levemente inclinadas (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990, p. 538).

Para a execução da técnica da SEV, optou-se pelo arranjo Schlumberger, bastante utilizado no Brasil e em alguns países da Europa e Ásia, como França e Rússia. Além de ser mais prático no campo (pois requer a mudança de apenas dois eletrodos no decorrer dos ensaios), as leituras estão menos sujeitas às interferências produzidas por ruídos indesejáveis (e. g. potenciais artificiais devidos a cabos e estações de alta tensão) (BRAGA, 1997, p.63).

Nesse arranjo (Figura 3.6), os eletrodos de potencial **M** e **N** são internos aos eletrodos de corrente **A** e **B**, e ambos os pares de eletrodos são simétricos em relação ao ponto de investigação **O**, conforme ilustrado anteriormente na Figura 3.3. Os eletrodos de potencial **M** e **N** permanecem fixos no centro do arranjo, enquanto os eletrodos de corrente **A** e **B**, nas extremidades, apresentam uma separação crescente em relação ao ponto de origem, de modo que a distância de separação **MN** tenda a zero em relação à distância de separação **AB**, minimizando os erros dos dados obtidos em campo.

A distância entre os eletrodos de corrente deve ser, no mínimo, 5 vezes maior ou igual à distância entre os eletrodos de potencial (Equação 3.14):

$$MN \leq \frac{AB}{5} \quad (\text{Equação 3.14})$$



**Figura 3.6:** Técnica da Sondagem Elétrica Vertical com arranjo Schlumberger.

O fator geométrico  $K_S$  para esse arranjo é dado pela Equação 3.15:

$$K_S = \pi \frac{(AM \cdot AN)}{MN} \quad (\text{Equação 3.15})$$

A profundidade teórica de investigação ( $Z$ ) é diretamente proporcional à distância de separação  $AB$  ( $\uparrow AB$ ,  $\uparrow Z$ ) e, normalmente, situa-se entre  $0,25AB$  e  $0,1AB$ , dependendo da resistividade das litologias subjacentes (GALLAS, 2000, p.65).

Os dados obtidos em campo são plotados em gráficos bi-logarítmicos em função da distância de separação  $AB/2$  correspondente.

### 3.3.2 Técnica do Imageamento Elétrico e o Arranjo Dipolo-Dipolo

Também conhecida por técnica do Caminhamento Elétrico (CE). Trata-se da obtenção de valores de um ou mais parâmetros físicos – no caso deste projeto, a resistividade elétrica e a cargabilidade –, a partir da superfície terrestre e ao longo de uma seção, e na interpretação da sua variação horizontal a uma ou mais profundidades determinadas (2D). É particularmente usada na exploração de minerais, onde a detecção de corpos com resistividade anômala é necessária (TELFORD, GELDART E SHERIFF, 1990, p. 538), isto é, onde existem contrastes de valores do parâmetro medido entre o meio encaixante e áreas potencialmente mineralizadas, contaminadas, ...

Gandolfo (2007, p.29) afirma que “o arranjo Dipolo-Dipolo é certamente o de uso mais difundido para a execução de Imageamentos Elétricos (IE) dentre os diversos arranjos

existentes, sendo largamente utilizado para diversos fins (mineração, prospecção de água subterrânea, estudos ambientais e geologia de engenharia)”. Comparativamente a outros arranjos, segundo o mesmo autor, a simetria dos eletrodos facilita o correto posicionamento de uma anomalia na interpretação qualitativa de uma pseudo-seção, além de apresentar facilidade operacional em campo, boa resolução lateral (horizontal) e bom desempenho no mapeamento de estruturas verticais.

Neste arranjo, os eletrodos de corrente **A** e **B**, e os eletrodos de potencial **M** e **N** são dispostos sobre uma mesma linha reta imaginária e o espaçamento entre os eletrodos obedece à relação  $x=AB=MN$  (Figura 3.7).

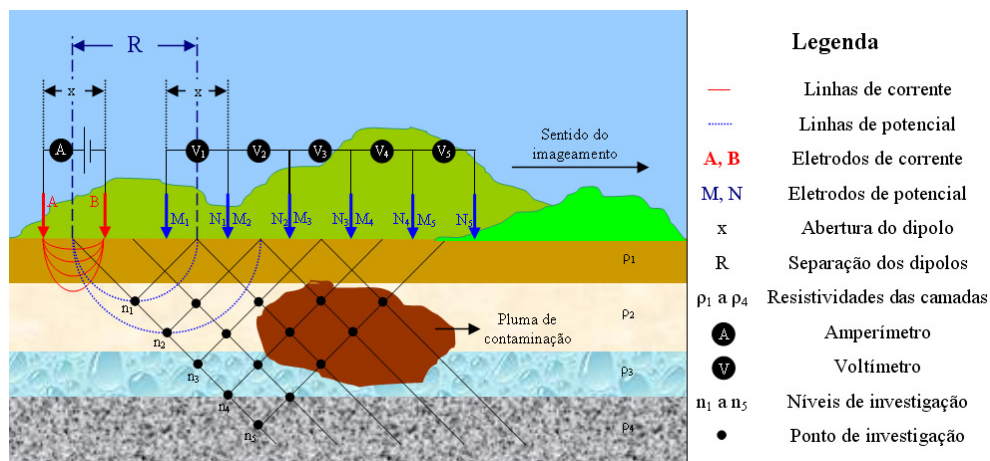
A profundidade teórica de investigação ( $Z$ ) aumenta conforme a distância de separação dos eletrodos de potencial e de corrente ( $R$ ), e é dada por  $Z=R/2$ . Os pontos de investigação são determinados pelo encontro de segmentos de reta, traçados a partir do centro geométrico de **AB** e **MN** e com inclinação de  $45^\circ$  em relação à superfície.

O fator geométrico ( $K$ ) para o arranjo Dipolo-Dipolo é dado pela Equação 3.16:

$$K_{DD} = 2\pi x \frac{1}{\left(\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}\right)} \quad (\text{Equação 3.16})$$

onde o coeficiente  $n$  representa o nível de investigação e pode assumir somente valores inteiros, isto é,  $n=1,2,3,\dots$

Os dados de campo são anotados em tabelas específicas, segundo a localização e a profundidade (nível) do ponto investigado.



**Figura 3.7:** Técnica do Imageamento Elétrico com arranjo Dipolo-Dipolo.



### 3.4 Aplicações

No início da década de 1960, Parasnis (1962, p.67) afirmou que o método ER era utilizado, principalmente, na busca de aquíferos, no estudo de correlações estratigráficas em campos de petróleo e na prospecção de corpos condutores. Entretanto, o campo de aplicação deste método mostrou-se abrangente no decorrer dos anos.

#### 3.4.1 Prospecção mineral

Parasnis (1967) apresenta um curioso artigo abordando o que ele próprio denomina “resultados negativos”, isto é, quando não se alcança o objetivo desejado em uma prospecção geofísica. Como exemplo, o autor relata o caso do lago Kikkejaure, na Suécia, onde levantamentos eletromagnéticos aéreos (*airborne electromagnetic* – AEM) forneceram fortes indícios da ocorrência de sulfetos abaixo d’água. Diversos ensaios geofísicos comprobatórios, utilizando-se o método ER, foram realizados sobre a superfície congelada do lago e os resultados sugeriram que a anomalia detectada por AEM era causada por sedimentos argilosos, posteriormente confirmada por meio de sondagens mecânicas.

Sengupta, Bose e Mitra (1969) utilizaram métodos geofísicos na investigação de extensões aluviais do cinturão de cobre de Khetri, no estado do Rajastão (Índia), buscando possíveis zonas de mineralização. O método ER foi utilizado para investigar a fundo as anomalias detectadas por meio de SP, as quais foram caracterizadas por reduzidos valores de resistividade elétrica. Assim, as anomalias correlacionadas indicaram a ocorrência de sulfetos na área.

Utilizando uma área teste dentro dos limites da mina de Laronde (Canadá), Poisson et al. (2009) utilizaram ER, além de GPR e EM, para investigar a estrutura de uma pilha de rejeitos de rochas. Os autores destacam a importância de entender o comportamento físico-químico destes rejeitos, já que são ricos em sulfetos e podem gerar ácidos na presença de água, comprometendo severamente o aquífero local. As seções de IE exibiram 3 camadas distintas: a) superficial, com 0,5m (ou menos) de espessura e condutiva, associada a rejeitos recentes e quimicamente alterados; b) intermediária, resistiva e com espessura entre 2 a 3,5m, interpretada como rejeitos não oxidados; c) profunda: espessura indefinida e condutiva, característica atribuída aos rejeitos mais antigos da pilha e fortemente oxidados por águas pluviais de infiltração.

Recentemente, Moreira e Ilha (2011) empregaram o método ER na investigação de uma ocorrência mineralizada em carbonatos de cobre localizada próximo a Caçapava do Sul

(RS). Concluíram que resistividades maiores que  $100\Omega.m$  sugerem áreas com silicificação, valores intermediários ( $30\Omega.m < \rho < 100\Omega.m$ ) correspondem a zonas com carbonatação e áreas de baixa resistividade ( $4\Omega.m < \rho < 30\Omega.m$ ), provavelmente, indicam concentrações de sulfetos disseminados.

### 3.4.2 Geotecnia e Geologia de Engenharia

Braga et al. (1999) tentaram correlacionar dados de ER e IP ao número de golpes do ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) em 5 áreas de testes no município de Rio Claro (SP). Dois contextos geológicos distintos foram explorados e os resultados indicaram correlação somente entre os dados de ER e de SPT, já que a resistividade está diretamente ligada à compacidade dos materiais do subsolo.

Malagutti Filho et al. (1999) empregaram os métodos ER e sísmico para zonar o perfil de alteração do sítio de construção de uma minibarragem para represamento de água superficiais, no município de Tambaú (SP). O local é caracterizado por uma zona de fraturas, motivo que levou ao rompimento da barragem anterior. Os dados de ER, obtidos pela técnica de IE, permitiu o dimensionamento e o posicionamento da zona de fraturas.

Ylmaz (2007) explorou o método ER para investigar uma área de deslizamento de terra no vilarejo de Gürbulak, no nordeste da Turquia. Uma camada constituída basicamente por sedimentos argilosos ( $\rho \approx 10\Omega.m$ ), identificada no topo das seções dos IE, foi associada ao material transportado, contrastando com o *background* de margas ( $\rho > 10\Omega.m$ ).

Jongmans et al. (2009) integraram os métodos ER e sísmico na investigação de um deslizamento ocorrido na área de Trièves, nos alpes franceses. Por meio de IE, os autores identificaram uma camada onde  $\rho > 60\Omega.m$ , associada a sedimentos coluvionares. Abaixo desta, encontra-se o lençol freático, que exibe resistividades entre 10 e  $40\Omega.m$ . A terceira camada identificada também apresenta  $\rho > 60\Omega.m$ , porém foi associada aos sedimentos argilosos encontrados em furos de sondagens. Os dados de ER não exibiram uma relação clara entre as variações laterais de resistividade elétrica e as zonas deformadas pelo deslizamento de terra.

Xavier (2010) valeu-se do método ER para investigar a estabilidade de taludes em uma área industrial no município de Joinville (SC). A escolha do método recai sobre o fato de não ser de natureza invasiva, evitando o agravamento de instabilidade pré-existente. Os resultados das SEV e dos IE sugerem que o substrato rochoso local tem forma ondulada, propiciando a formação de planos preferenciais para movimentos de massa, principalmente no contato solo-rocha.

### 3.4.3 Hidrogeologia

Xavier (2004) empregou SEV e IE, além de trabalhos hidrológicos prévios, para efetuar a locação de um poço tubular profundo no município de Araquari (SC). As anomalias condutivas contrastantes ao *background* de elevados valores resistividade, corroboradas por informações de fotolineamentos, indicaram a locação do novo poço, que apresentou vazão de 7600l/h, superior ao antigo poço, com vazão de 1200l/h, perfurado sem o auxílio de informações geofísicas.

Por meio de diversas SEV executadas na ilha de Creta, Soupios et al. (2007) puderam estimar diversos parâmetros hidráulicos do aquífero local a partir de correlação efetuada entre resultados geofísicos e de testes de bombeamento. Os mapas resultantes do trabalho de pesquisa possibilitaram novos estudos a respeito do comportamento das águas subterrâneas locais.

Também utilizando a técnica da SEV, Cutrim et al. (2007) puderam estimar a profundidade e a espessura das unidades hidrogeológicas no município de Lucas do Rio Verde (MT). Concluíram que o principal aquífero da área (Fm. Utiariti) possui 90m de espessura e profundidade ao topo média em torno de 13m e, assim, recomendaram que poços para explorar esse aquífero devem ter profundidade variando entre 50 e 110m.

Na região dos depósitos de carvão de Salento (Itália), tanques de piscicultura revelaram elevadas concentrações de sulfeto de hidrogênio (quando em solução aquosa: ácido sulfídrico). Assim, Margiotta e Negri (2008) usaram ER e IP, além de dados estratigráficos, para definir a estrutura, a profundidade e a geometria do aquífero local. Descobriram que o avanço da cunha salina, com águas ricas em sulfato, ao entrar em contato com substâncias orgânicas e os depósitos de lignitos (ricos em carbono), gera sulfeto de hidrogênio como resultado da redução dos sulfatos.

O método ER (SEV), combinado com o método VLF (*Very Low Frequency*), foi empregado por Sousa e Luiz (2012) na prospecção de água subterrânea no município de Piçarra (PA). A integração dos resultados de ambos os métodos indicou 5 locais dentro da área estudada onde a exploração do aquífero pode ser maximizada sem oferecer riscos de contaminação ao mesmo.

### 3.4.4 Estudos ambientais

Nos aterros controlados de Rio Claro (SP) e Piracicaba (SP), Moura e Malagutti Filho (2003, 2007) valeram-se dos métodos ER e IP para inferir a extensão da pluma de

contaminação em cada local. Zonas de baixa de resistividade elétrica forneceram indícios de contaminação das áreas por chorume, confirmada por meio de análises químicas de amostras de água coletadas em poços cacimba e de monitoramento.

Fachin et al. (2006) desenvolveram um trabalho semelhante, porém em uma área de disposição de resíduos industriais de um curtume, na cidade de Várzea Grande (MT) e empregando os métodos ER, eletromagnético (EM) e radar de penetração no solo (GPR). Especificamente no método ER, valores menores que  $30\Omega.m$  indicaram a presença de contaminantes em subsuperfície.

Em uma área industrial de Araras (SP), contaminada por benzeno, tolueno, xileno, 1,2 dicloroetano e sais inorgânicos, Moreira e Braga (2009) desenvolveram um trabalho de monitoramento temporal utilizando os métodos ER e IP. Os valores significativamente reduzidos de resistividade foram associados ao atual estágio de atenuação natural do local.

Por meio do método ER, Silva, Malagutti Filho e Moreira (2009) delimitaram áreas potencialmente impactadas por necrochorume no cemitério municipal de Vila Rezende, Piracicaba (SP). As anomalias condutivas (prováveis plumas de contaminação) puderam ser relacionadas à profundidade do nível freático e ao tempo de sepultamento dos cadáveres.

Menezes et al. (2011) investigaram a presença de combustíveis no solo e águas subterrâneas provenientes de um posto de combustíveis em Caçapava do Sul (RS) e associaram anomalias de baixa resistividade ( $< 114\Omega.m$ ) e zonas com combustível degradado proveniente de tanques enterrados inutilizados.

### 3.4.5 Arqueologia

Pattantyus-Abraham (1986) investigou dois sítios arqueológicos na Hungria utilizando métodos geofísicos. No primeiro, vestígios de construções romanas foram detectados por meio do método ER (em conjunto com o método magnetométrico) na região da Transdanubia (oeste do país). Valores de resistividade acima de  $120\Omega.m$ , contrastando com o *background* de  $80\Omega.m$ , indicaram a existência de antigas paredes de pedra. No segundo, uma mina de sílex nas imediações de Budapeste, datada de 50.000 anos, foi revelada por zonas de baixos valores de ER (associados ao material escavado), frente à elevada resistividade da dolomita.

Gaber et al. (1999) usaram o método ER em uma campanha de investigação na cidade de Chatby (Egito) para explorar a tumba de Alexandre, o grande, e a Royal Ptolemic Necropolis. Por meio de 22 SEV com arranjo Wenner, foi possível elaborar mapas de resistividade, nos quais as anomalias resistivas sugerem a presença de materiais arqueológicos enterrados.

Piro, Mauriello e Cammarano (2000), utilizando uma função matemática, integraram os resultados obtidos por meio dos métodos magnético, GPR e ER para investigar 3 sítios arqueológicos na Itália. No primeiro, a necrópole Colle del Forno, na cidade de Montelibretti, uma anomalia de elevada resistividade indicou a localização de uma antiga tumba. No segundo sítio, a Acrópole de Veio (próxima a Roma), anomalias resistivas e linearmente alinhadas ajudaram a identificar antigas paredes e trecho de uma estrada (confirmadas por meio de escavações). O último sítio é a vila romana de Passolombardo (Roma), na qual anomalias resistivas também indicaram a localização de antigas paredes, encontradas em posterior escavação.

O método ER também oferece a possibilidade de investigação totalmente não destrutiva de prédios e monumentos históricos. É o caso atribuído a Tsokas et al. (2008), que investigaram a igreja de Kapnikarea, construída no início do século XI, na cidade de Atenas. Utilizando eletrodos de base plana e por meio de IE, os autores identificaram zonas de elevada resistividade abaixo da igreja, atribuídas a “vazios” de antigos poços, já que a construção existente foi erguida sobre ruínas de uma antiga igreja do século V. Também existem indícios de que no mesmo local havia um templo ainda mais antigo dedicado a Atena ou Deméter.

Após o desabamento de uma casa no distrito de Jeniang, próxima ao rio Sungai Muda (Malásia), um artefato arqueológico foi encontrado parcialmente soterrado e Muztaza et al. (2012) executaram diversas linhas de IE no local à procura de novos objetos. Os resultados indicaram uma única anomalia condutiva ( $\rho < 15\Omega.m$ ) em meio ao subsolo resistivo ( $\rho > 130\Omega.m$ ) e os autores concluíram que somente um objeto encontrava-se soterrado no local.

## Capítulo 4 – O método da Polarização Induzida

### 4.1 Introdução

Até o ano de 1910, a resistividade elétrica de rochas e solos mostrava-se pouco interessante como método de prospecção mineral. Entretanto, a partir de 1911, Conrad Schlumberger iniciou uma série de pesquisas envolvendo este parâmetro, que julgou ser mais importante que a densidade ou propriedades magnéticas no que tange a exploração de depósitos metálicos (COLLET, 1990, p.6).

Schlumberger desenvolveu a técnica de injetar correntes elétricas no solo por meio de eletrodos, mas seus experimentos resumiam-se a tanques de prova em laboratório e as correntes empregadas eram alternadas e em frequência audível. Assim, em 1912, trocou o laboratório por uma investigação em campo em Val-Richer (Normandia) e, devidos a problema técnicos, passou a empregar correntes diretas em seus estudos.

No ano de 1913, enquanto investigava um corpo metálico altamente condutivo, Schlumberger percebeu que, mesmo após interromper a injeção de corrente no solo, era possível medir potenciais elétricos por um curto período de tempo. Recordou-se que, em Val-Richer, esse mesmo fenômeno ocorreu quando realizava medições sobre tubulações metálicas rasas (SEIGEL et al., 2007, p.312). Assim, por meio destas observações, propôs que objetos, rochas e minerais metálicos podem ser distinguidos do meio encaixante de acordo com a intensidade de polarização apresentada.

### 4.2 Fundamentação teórica

Ao se injetar uma corrente elétrica DC (*direct current*) num meio geológico, no momento da medição da resistividade elétrica (ER), a d.d.p. por ela ocasionada não se estabelece e nem se interrompe instantaneamente. No momento da injeção da corrente, o potencial elétrico demora algumas frações de segundo até atingir seu máximo valor. Do mesmo modo, cessando-se a injeção de corrente, o potencial elétrico diminui gradativamente, tendendo assintoticamente a zero. Pode-se afirmar que o solo apresenta um comportamento semelhante ao de um capacitor.

Entretanto, se a corrente elétrica injetada for do tipo AC (*alternating current*) de baixa frequência, a resistividade aparente medida torna-se menor quanto maior for a frequência empregada. Isto acontece pois a capacitância do solo inibe o fluxo de correntes DC, mas

permite a passagem de correntes AC, tornando-se mais eficiente à medida que a frequência aumenta (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002, p.199).

Ambos os casos são diferentes manifestações do efeito IP (*Induced Polarization* ou polarização induzida). No caso de correntes DC, a medição da variação da voltagem de descarga (do valor máximo ao zero) constitui o método IP – domínio do tempo. No caso de correntes AC, por meio da medição da resistividade aparente em diferentes frequências, têm-se o método IP – domínio da frequência.

### **4.3 Mecanismos de origem do efeito IP**

Durante o tempo do fluxo original de corrente, ocorre algum armazenamento de energia no material. Estudos indicam que essa energia se armazena prioritariamente na forma de energia química (SUMNER, 1976, p.4), como resultado de variações de mobilidade de íons fluindo através da estrutura da rocha e/ou de variações entre condutividade iônica e eletrônica, onde minerais metálicos estão presentes (HOHMANN; WARD, [1981], p.4).

#### **4.3.1 Polarização de membrana**

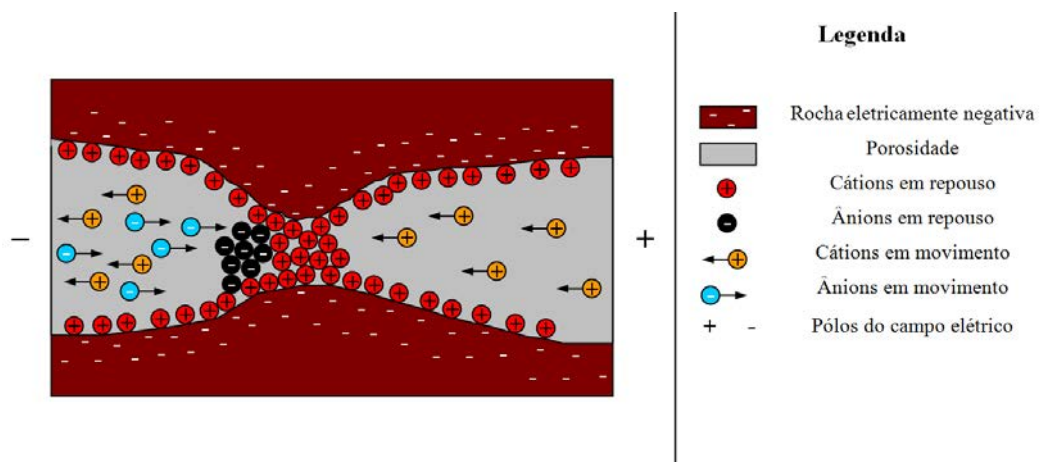
A injeção de uma corrente elétrica no solo ocasiona o deslocamento de íons ali presentes, de modo que cátions e ânions são atraídos, respectivamente, pelos eletrodos de polaridade negativa e positiva. Sabe-se que a passagem de corrente elétrica em um meio geológico ocorre majoritariamente por meio de eletrólitos existentes nos poros de rochas e solos (SUMNER, 1976, p.4). Além disso, grande parte dos minerais que formam as rochas possuem cargas elétricas negativas nas superfícies que estão em contato com os eletrólitos (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002, p.199).

Durante o fluxo de corrente, estes minerais tendem a atrair cargas positivas (cátions) que estão se deslocando e propiciam a formação de uma “nuvem catiônica” no interior dos poros (SUMNER, 1976, p.56) (Figura 4.1). Se o diâmetro interno dos poros possuir a mesma ordem de grandeza da espessura nuvem catiônica ( $\approx 100\mu m$ ), esta passa a agir como uma membrana, impedindo o movimento de íons do eletrólito (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990, p.579).

Ao cessar a injeção de corrente, os íons que foram deslocados retornam aos seus locais de origem em um curto intervalo de tempo, produzindo um decaimento gradual do potencial elétrico. Este efeito é conhecido como polarização de membrana ou polarização eletrolítica e

ocorre principalmente em rochas e solos com algum teor de argila, onde os poros possuem dimensões significativamente reduzidas (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002, p.199).

Entretanto, a intensidade do efeito IP não está diretamente relacionada ao teor de argila, mas atinge um pico máximo e decresce. Isto acontece pois existem poros de maior seção transversal e reduzida extensão (da ordem de  $10^{-3} \text{ cm}$ ) onde o acúmulo de íons não ocorre por tempo suficiente de modo a influenciar na magnitude do efeito. Caso contrário, o acúmulo de íons acarretaria na redução do fluxo de corrente e do próprio efeito IP (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990, p.579).



**Figura 4.1:** Polarização de membrana. Fonte: adaptado de Kearey, Brooks e Hill (2002, p.200).

#### 4.3.2 Polarização metálica

Além da forma iônica, a condução de correntes elétricas em solos e rochas pode ocorrer pela forma eletrônica, isto é, por meio de elétrons livres presentes no meio. Supondo a situação onde um grão mineral metálico obstrui um poro de uma rocha submetida a uma diferença de potencial (Figura 4.2), verifica-se a mudança de condução iônica (no eletrólito) para eletrônica (no grão metálico) na superfície limítrofe do corpo.

A velocidade com que os elétrons movimentam-se no interior do grão metálico é inferior à velocidade de troca de elétrons entre os íons e o grão (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990, p.580; KEAREY; BROOKS; HILL, 2002, p.200). Então, em duas superfícies opostas do corpo, verificam-se concentrações de íons (SUMNER, 1976, p.49) que não tomaram e nem cederam elétrons ao corpo.

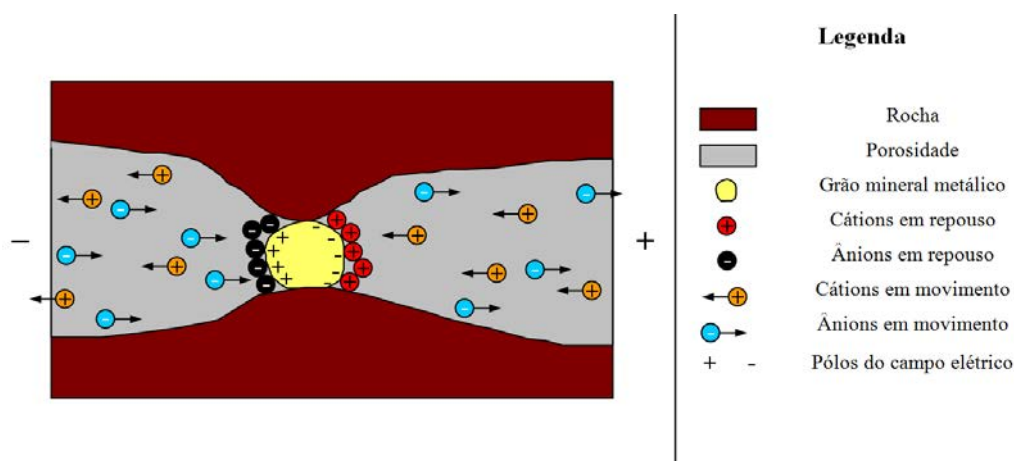
Retirando-se a diferença de potencial imposta, as concentrações se desfazem e os íons tendem a voltar ao seu estado inicial. Durante um breve intervalo de tempo é possível medir



um decaimento gradual do potencial elétrico. Este efeito é conhecido como polarização metálica, polarização eletrônica, polarização de eletrodo ou sobrevoltagem.

Quanto maior é o potencial elétrico imposto e menor a continuidade elétrica (distância entre dois grãos metálicos condutores em uma mineralização disseminada, por exemplo), maior é a magnitude da polarização. Por isso, um corpo maciço de grandes dimensões tende a apresentar menor magnitude do efeito IP comparativamente a corpos disseminados.

Além disso, a polarização metálica possui maior magnitude que a polarização de membrana; entretanto, não é possível distingui-las nas medições (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002, p.200). Aparentemente, o efeito IP independe da estrutura atômica ou molecular de rochas e minerais, sendo considerado um efeito total (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990, p.579).



**Figura 4.2:** Polarização metálica. Fonte: adaptado de Kearey, Brooks e Hill (2002, p.200).

#### 4.4 Domínios do efeito IP

As medições do efeito IP podem ser efetuadas de duas maneiras distintas: (1) injetando-se uma corrente elétrica DC no solo e medindo-se a variação da voltagem residual após a interrupção da corrente ou (2) injetando-se correntes elétricas AC com diferentes frequências no solo (geralmente, menores que  $10\text{Hz}$ ) e medindo-se a resistividade aparente do meio em cada frequência.

O caso (1) é chamado de domínio do tempo e, por ser o método escolhido para o desenvolvimento deste projeto, será apresentado no item 4.4.1. O caso (2) é chamado domínio da frequência e maiores informações a respeito podem ser obtidas em Telford, Geldart e Sheriff (1990, p.582) e Kearey, Brooks e Hill (2002, p.200).

#### 4.4.1 Domínio do tempo

No método IP – domínio do tempo, uma corrente elétrica é injetada no meio geológico durante um período de tempo  $T$  (tempo de injeção), interrompida por um tempo  $t$  (*cut-off*) e novamente injetada por um tempo  $T$ , porém com polaridade invertida. Este processo é repetido por diversas vezes. O parâmetro medido neste método é a cargabilidade ( $M$ ), normalmente expresso em  $ms$ , e pode ser obtido pela integração total ou parcial da curva de descarga durante o tempo de *cut-off* (SUMNER, 1976, p.64) (Figura 4.3 e Equação 4.1).

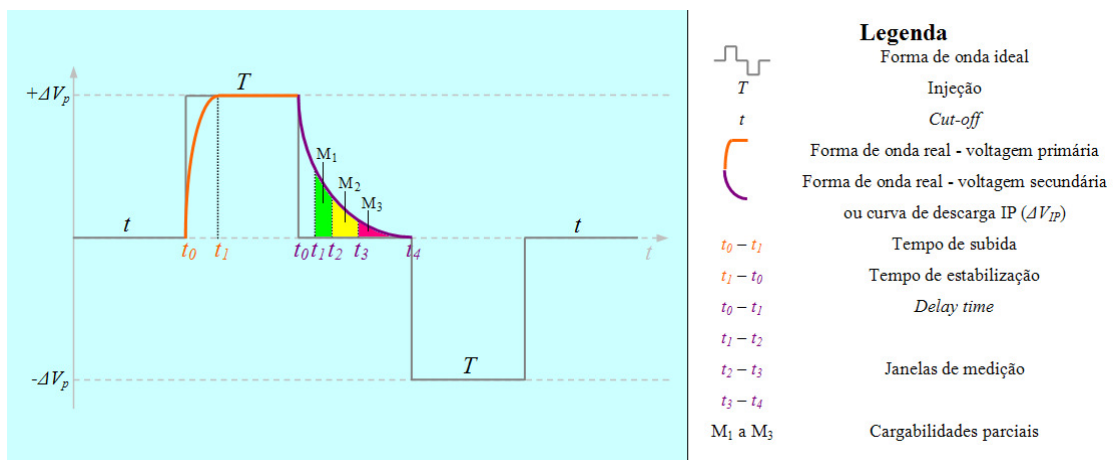


Figura 4.3: Polarização Induzida – Domínio do tempo.

$$M = \sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{\Delta V_p} \int_{t_1}^{t_2} \Delta V_{IP}(t) dt \right] \quad (\text{Equação 4.1})$$

onde:

- $M$  é o valor da cargabilidade total, expresso em  $s$ ;
- $n$  é o número de intervalos de tempo considerados (janelas);
- $M_i$  é o valor da cargabilidade parcial, medida numa determinada janela, também expresso em  $s$ ;
- $\Delta V_p$  é o valor da voltagem primária transmitida, em  $V$ ;
- $t_1$  e  $t_2$  são os instantes inicial e final da  $i$ -ésima janela considerada, expresso em  $s$ ;
- $\Delta V_{IP}(t)$  é o valor da voltagem secundária, ou curva de descarga IP, em função do tempo, expresso em  $V$ .

Tal qual no método da eletrorresistividade (Capítulo 3), a cargabilidade medida não pode ser dita absoluta, já que um meio geológico real apresenta inúmeras heterogeneidades.

Deste modo, a grandeza obtida nas medições em campo é chamada de cargabilidade aparente ( $M_a$ ), também expressa em *ms*.

#### **4.5 Medição da polarização induzida em um meio geológico**

As técnicas e os equipamentos utilizados para a medição do fenômeno IP em meios geológicos são as mesmas utilizadas para se medir a resistividade elétrica, detalhadas no Capítulo 3. Normalmente, a medição do parâmetro cargabilidade (IP – domínio do tempo) é realizada imediatamente após a medição da resistividade.

Entretanto, cabe uma ressalva quanto às características do resistivímetro: o módulo emissor deve ser capaz de injetar correntes alternadas e periódicas, onde os ciclos de injeção ( $T$ ) e *cut-off* ( $t$ ) sejam da ordem de 0,1 a 10s (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990, p.581), e o módulo receptor deve possuir um voltímetro que meça e integre a voltagem residual durante um intervalo de tempo (*cut-off* -  $t$ ) após um breve período da interrupção da corrente (*delay time*), preferencialmente ambos selecionados pelo operador do equipamento.

Assim como no método do potencial espontâneo (Capítulo 2), a utilização de eletrodos metálicos causa um efeito de polarização eletroquímica indesejável entre estes e o solo, induzindo a erros de leitura, principalmente quando se trata de valores significativamente baixos. Portanto, no caso específico do método IP – domínio do tempo, torna-se novamente necessária a utilização de eletrodos não polarizáveis (ver item 2.3).

#### **4.6 Aplicações**

A polarização induzida é mais um exemplo de método geofísico de investigação cuja finalidade inicial era a prospecção de jazidas minerais e que, no decorrer dos anos, foi amplamente difundido no mundo todo e ganhou novas aplicações.

##### **4.6.1 Prospecção mineral**

Depósitos de ouro associado a sulfetos foram estudados no Canadá por Hallof e Yamashita (1990) utilizando o método IP. Neste trabalho, os autores testaram diversos arranjos e aberturas de eletrodos, e os resultados obtidos permitiram efetuar uma correlação entre as anomalias de intenso efeito de polarização e os maiores teores de ouro.

Ainda no Canadá, Witherly e Vyselaar (1990) investigaram a área de Poplar Lake, próximo à Columbia Britânica. O local é um conhecido depósito de cobre e molibdênio e a caracterização geofísica da área contribuiu na prospecção de outras áreas similares. Os autores concluíram que a região onde ocorrem valores de cargabilidade entre 60 e 120ms indica a localização do depósito.

Na região sudeste dos Estados Unidos, Wynn, Grosz e Carlson-Fosch (1990) empregaram o método IP na detecção de jazidas de titânio. Concluíram que, na área de estudos, os maiores valores de cargabilidade são atribuídos à ilmenita, um óxido natural de ferro e titânio.

Na província de Hebei (China), Yang, Liu e Wang (2008) procederam investigações de IP, utilizando o arranjo gradiente, sobre um conhecido veio polimetálico. Valores de polarizabilidade aparente da ordem de 12% caracterizaram o veio, enquanto que o background da área registrou valores próximos a 2,5%.

Cutrim et al. (2010) combinaram os métodos ER, IP e magnético no mapeamento de possíveis estruturas e corpos hospedeiros de ouro, no município de Novo Mundo (MT). Concluíram que as zonas anômalas de ER coincidentes às de IP indicam a maior probabilidade de ocorrência de sulfetos e, conseqüentemente, de ouro associado.

#### **4.6.2 Geotecnia e Geologia de Engenharia**

Gallas et al. (2001) empregaram os métodos SP, ER e IP para delimitar a extensão da zona afetada por um colapso e desmoronamento do teto de um túnel em construção sob o Parque do Ibirapuera na cidade São Paulo (SP). No local do incidente foi constatado um aumento do padrão de cargabilidade.

Alabi et al. (2010) empregaram o método IP para determinar propriedades estruturais do solo em uma área de Obadore (Nigéria). Os autores identificaram duas camadas litologicamente distintas, onde a primeira é constituída por sedimentos argilosos e apresenta valores de M menores que 10ms; a segunda camada, caracterizada por elevados valores de cargabilidade (> 10ms), foi associada a sedimentos arenosos.

#### **4.6.3 Hidrogeologia**

Martinho, Almeida e Senos Matias (2004) delimitaram a intrusão da cunha salina em um aquífero costeiro na cidade de Aveiro (Portugal) por meio de imageamentos elétricos

empregando polarização induzida e eletrorresistividade. A análise das seções de resistividade e de cargabilidade permitiu diferenciar a cunha salina ( $\rho < 50\Omega.m$  e  $M > 14mV/V$ ).

Moreira et al. (2013) relacionaram parâmetros geoeletricos obtidos por meio de sondagens elétricas verticais (SEV) à vazão de um aquífero livre situado no município de Caçapava do Sul (RS). Especificamente para o método IP, concluíram que a correlação entre a cargabilidade e a vazão do aquífero pode ser expressa por um polinômio de 2° grau.

#### 4.6.4 Estudos ambientais

Visando estudos reais de contaminação de solos e águas subterrâneas, Braga e Cardinali (2005) realizaram um estudo controlado em escala reduzida, infiltrando gasolina em um tanque de fibra de vidro preenchido com sedimentos arenosos e areno-argilosos. Os dados de cargabilidade apresentaram-se significativamente reduzidos logo após a infiltração do contaminante, tendendo a retornar aos valores de *background* após 7 meses do evento.

Moreira e Braga (2008) também empregaram o método IP para determinar a área de percolação de material lixiviado proveniente do aterro controlado de Cordeirópolis (SP). Concluíram que em áreas ricas em matéria orgânica (portanto, passíveis de geração de chorume) e sob condições geoquimicamente favoráveis (ácidas e redutoras), predomina o fenômeno da polarização metálica com elevada magnitude. Por outro lado, em zonas de baixa disponibilidade de matéria orgânica, o efeito IP é reduzido e pode atingir valores de *background* local.

No ano seguinte, os mesmo autores (MOREIRA; BRAGA, 2009) desenvolveram um trabalho de investigação ambiental em uma área industrial no município de Araras (SP), contaminada por benzeno, tolueno, xileno, 1,2 dicloroetano e sais inorgânicos em processo de atenuação natural. Combinando os métodos ER e IP, concluíram que a coincidência de uma anomalia de elevada cargabilidade (observada em 2007) no intervalo da anomalia resistiva (observada em 2004) próximo ao poço de injeção de resíduos sugere a dissolução dos minerais do aquífero e neoformação mineral, resultantes de ambiente com maior oxigenação, devido a reduzidas concentrações de contaminantes.

Oliveira, Moreira e Menezes (2011) realizaram uma investigação geofísica com o método IP em uma área de disposição de resíduos sólidos em Caçapava do Sul (RS). Os autores associaram valores de cargabilidade menores que 20mV/V aos resíduos sólidos e propuseram uma relação inversamente proporcional entre a intensidade da polarização e o teor de umidade do solo. Também relacionaram anomalias de baixa cargabilidade e com orientação vertical a planos de fraturas preenchidos por chorume.

Gazoty et al. (2012) desenvolveram um estudo no aterro da cidade de Hørløkke (Dinamarca) para mapear as áreas de disposição dos resíduos e as unidades litológicas que exercem controle sobre a hidrologia regional. Os resultados indicaram que valores acima de 100mV/V estão relacionados à área de influência do aterro.

#### **4.6.5 Arqueologia**

No sítio arqueológico de Tindari (Itália), De Domenico et al. (2006) empregaram ER, IP, sísmica de refração e GPR na tentativa de localizar fragmentos de construções datadas do século IV ou V d.C. Tendo como referência uma coluna parcialmente soterrada, desenvolveram várias linhas de imageamento elétrico, cujos resultados sugerem que uma anomalia de 1,5mV/V, em profundidade superior a 1,7m, corresponda a algum artefato de interesse arqueológico.

Um estudo que integrou diversos métodos geofísicos de investigação foi desenvolvido por Brown et al. (2011) sobre a caverna Horseshoe Chimney, no estado do Texas (Estados Unidos). Os autores compararam os resultados de cada método e elencaram os mais eficientes na detecção de vazios em subsuperfície. Anomalias de reduzidas intensidades de IP foram associadas à dissolução de calcário.

## Capítulo 5 – O método Eletromagnético

### 5.1 Introdução

A história do método eletromagnético começa no ano de 1873, quando o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell unificou os conhecimentos sobre eletricidade e magnetismo em uma única teoria (LOWRIE, 2007, p.268). Entretanto, Maxwell faleceu antes de confirmar experimentalmente suas previsões. Oito anos após sua morte, o físico alemão Heinrich Hertz provou a existência de ondas eletromagnéticas, atribuindo notoriedade às relações matemáticas que passaram a ser conhecidas por “Equações de Maxwell”.

O método geofísico de prospecção, no entanto, foi desenvolvido somente na década de 1920, paralelamente na Escandinávia (Suécia, Noruega e Dinamarca), nos Estados Unidos e no Canadá (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990, p.343). Na Escandinávia, em especial, as propriedades elétricas dos minerais e das rochas encaixantes apresentam elevados contrastes e, por isso, são favoráveis ao emprego do método eletromagnético (ORELLANA, 1972, p.33), tornando esta região um dos palcos da geofísica na época. Assim, entre 1919 e 1932, Hans Lundberg e Karl Sundberg descobriram diversas mineralizações na Suécia e firmaram seus nomes na história da geofísica.

### 5.2 Fundamentação teórica

O método eletromagnético (EM) baseia-se no princípio de indução eletromagnética para medir a condutividade elétrica em subsuperfície. De acordo com a CETESB (1999), este método é fortemente indicado para a investigação de contaminação ambiental por resíduos metálicos e inorgânicos (inclusive quando presentes na água subterrânea) e, sob condições especiais, plumas e resíduos orgânicos.

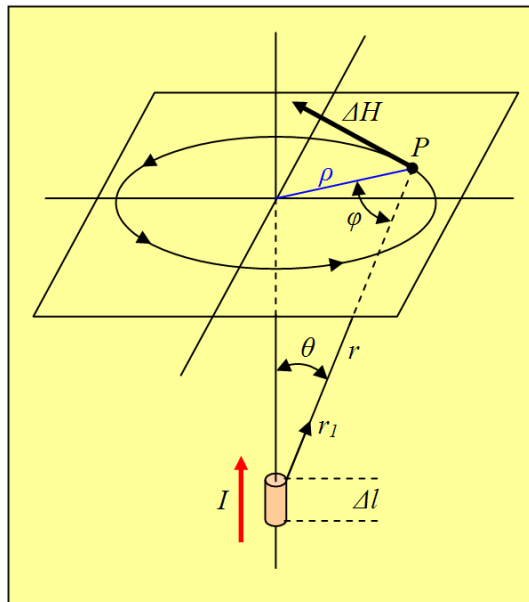
Num ambiente geológico, a propagação de ondas eletromagnéticas é regida por dois parâmetros principais: a condutividade elétrica ( $\sigma$ ), a permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) e a permeabilidade magnética ( $\mu$ ). A condutividade elétrica, em especial, depende de diversos fatores, tais como: tipo de solo ou rocha, porosidade, permeabilidade, grau de saturação e propriedades eletroquímicas dos fluidos de preenchimento dos poros (ORELLANA, 1972, p.36).

A condutividade elétrica ( $\sigma$ ) é um parâmetro físico que indica a facilidade que um determinado material possui para transmitir uma corrente elétrica. Fisicamente, é o inverso da resistividade elétrica ( $\rho$ ), e podem ser assim relacionadas:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\text{Equação 5.1})$$

sendo a unidade de medida da condutividade elétrica, no SI, o *Siemens/m (S/m)*.

Telford, Geldart e Sheriff (1990, p.63) afirmam que um campo magnético é consequência de um fluxo de corrente elétrica e, segundo a Lei de Ampère (também conhecida como Lei de Biot-Savart), quando uma corrente elétrica  $I$  (expressa em *ampères*) atravessa um condutor de comprimento  $\Delta l$  (dado em *m*) gera um campo magnético  $\Delta H$  no ponto  $P$ , como explicitado na Figura 5.1.



**Figura 5.1:** Esquema representativo da Lei de Ampère. Fonte: adaptado de Telford, Geldart e Sheriff (1990, p.63).

Então, o campo magnético  $\Delta H$  pode ser calculado segundo a Equação 5.2:

$$\Delta H = \frac{(I \cdot \Delta l) \times r_1}{4\pi r^2} \quad (\text{Equação 5.2})$$

onde  $\Delta H$  é o vetor campo magnético resultante, expresso em *ampère/metro* e cuja direção é dada pela “regra da mão direita”;  $\rho$  é a mínima distância de separação entre o ponto  $P$  e o condutor;  $r_1$  é o vetor unitário da distância de separação  $r$  entre o condutor e o ponto  $P$ .

Assumindo que  $\Delta l$  seja infinitesimalmente pequeno, pode-se empregar notação escalar (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990, p.344) e relações trigonométricas para reescrever a Equação 5.2 como:



$$\Delta H = \frac{I \cdot \cos \vartheta \cdot d\vartheta}{4\pi\rho} \quad (\text{Equação 5.3})$$

Integrando a Equação 5.3 sobre um fio retilíneo, obtém-se:

$$H = \frac{I \cdot \text{sen } \vartheta_2}{4\pi\rho} - \frac{I \cdot \text{sen } \vartheta_1}{4\pi\rho} = \frac{I}{4\pi\rho} (\text{sen } \vartheta_2 - \text{sen } \vartheta_1) \quad (\text{Equação 5.4})$$

Na situação em que o fio é extremamente longo e supondo que a propagação do campo magnético ocorre segundo uma superfície semi-esférica, a Equação 5.4 reduz-se a:

$$H = \frac{I}{2\pi\rho} \quad (\text{Equação 5.5})$$

Conclui-se, então, que a intensidade do campo magnético ( $H$ ) é inversamente proporcional à distância ( $\rho$ ) em que se encontra o alvo investigado.

### 5.3 Medição da condutividade elétrica de um meio geológico

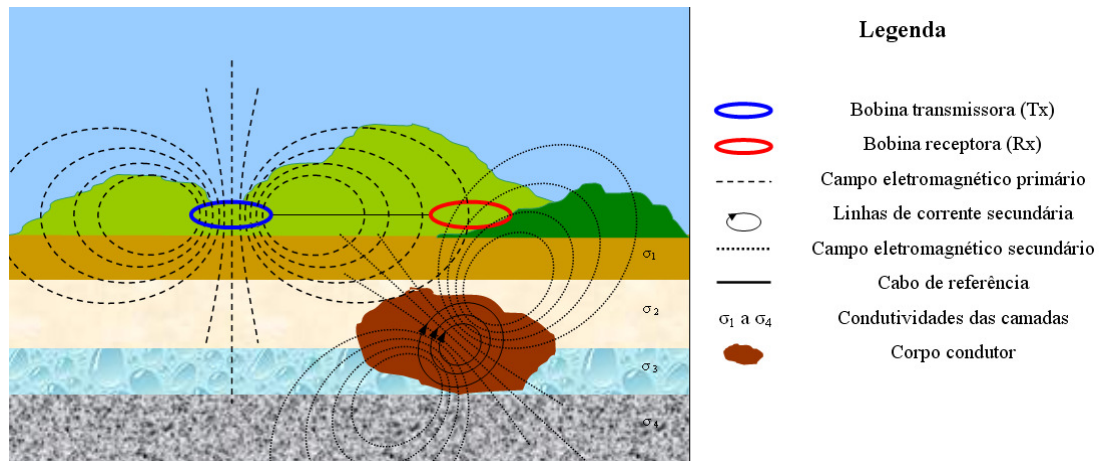
Existem, basicamente, três grupos de métodos eletromagnéticos, classificados segundo o parâmetro medido pelo equipamento: métodos que medem a inclinação do campo resultante, métodos que medem as componentes do campo e métodos que medem diretamente a condutividade elétrica.

No grupo de métodos que medem diretamente a condutividade elétrica, encontram-se dois métodos bastante difundidos dentro da geofísica: o eletromagnético domínio do tempo (*Time-domain Electromagnetic Method* – TEM ou TDEM) e o eletromagnético domínio da frequência (*Frequency-domain Electromagnetic Method* – FEM ou FDEM).

No método TEM, o campo primário é aplicado em pulsos, com duração média entre 20 a 40ms, e durante certo tempo; então, o campo primário é desligado e o campo secundário é medido. No método FEM (adotado neste trabalho), as medidas são efetuadas utilizando-se uma ou mais frequências, geradas por um transmissor que produz um campo primário constante e o campo secundário é medido simultaneamente.

Na prática de campo, faz-se circular uma corrente elétrica alternada por uma bobina transmissora (Tx) resultando em um campo eletromagnético primário ( $H_p$ ). A propagação deste campo no subsolo – meio condutor assumido como homogêneo – induz correntes elétricas

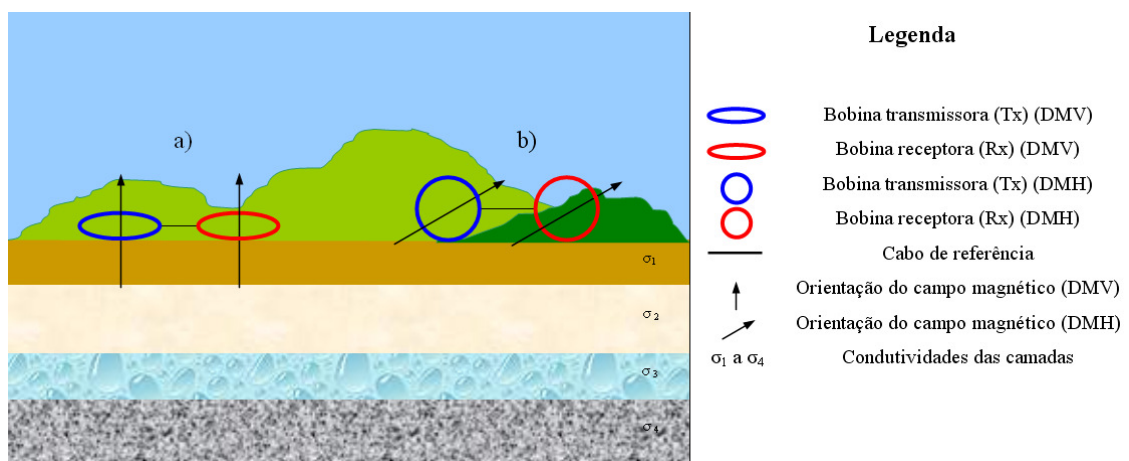
secundárias, que produzem um campo eletromagnético secundário ( $H_s$ ) proporcional à corrente induzida. Uma parte desse campo secundário induz correntes elétricas em uma bobina receptora (Rx), posicionada dentro da área de influência dos campos primário e secundário (Figura 5.2).



**Figura 5.2:** Princípio do método eletromagnético.

A diferença de potencial (d.d.p.) ocasionada pela passagem de correntes elétricas na bobina receptora é diretamente proporcional à condutividade elétrica do terreno. Conhecendo-se as diferenças de intensidade, direção e/ou fase entre os dois campos eletromagnéticos é possível saber se existem corpos condutores em subsuperfície.

O posicionamento das bobinas define a orientação dos campos eletromagnéticos  $H_p$  e  $H_s$  (Figura 5.3). Assim, as duas possíveis orientações são o Dipolo Magnético Vertical (DMV) e o Dipolo Magnético Horizontal (DMH).



**Figura 5.3:** a) Dipolo Magnético Vertical – DMV; b) Dipolo Magnético Horizontal – DMH.

Segundo McNeil (1980, p.14), a razão entre  $H_s$  e  $H_p$  para configuração das bobinas em dipolo vertical e horizontal, são dadas pelas Equações 5.6 e 5.7:

$$\left(\frac{H_s}{H_p}\right)_h = 2 \left\{ 1 - \frac{3}{(\gamma s)^2} + [3 + 3\gamma s + (\gamma s)^2] \frac{e^{-\gamma s}}{(\gamma s)^2} \right\} \quad (\text{Equação 5.6})$$

$$\left(\frac{H_s}{H_p}\right)_v = \frac{2}{(\gamma s)^2} \left\{ 9 - [9 + 9\gamma s + 4(\gamma s)^2 + (\gamma s)^3] e^{-\gamma s} \right\} \quad (\text{Equação 5.7})$$

O desenvolvimento matemático de uma expressão que resulte no valor da condutividade elétrica medida a partir do conhecimento dos campos magnéticos primário e secundário envolve um parâmetro conhecido por *skin depth* ( $\delta$ ) (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002, p. 206). Este parâmetro é definido como a profundidade abaixo da superfície do terreno investigado em que a intensidade do campo magnético se reduz a  $e^{-1}$  (ou cerca de 37%) relativamente ao campo gerado na superfície. Segundo a Equação 5.8, a *skin depth* é uma função da frequência ( $f$ ) da corrente elétrica que circula na bobina transmissora, da permeabilidade magnética no vácuo ( $\mu_0$ ) e da própria condutividade elétrica do solo ( $\sigma$ ):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(2\pi f)\mu_0\sigma}} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}} = \frac{\sqrt{2i}}{\gamma} \quad (\text{Equação 5.8})$$

onde  $\gamma = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma}$ .

Calculando-se a razão entre o espaçamento ( $s$ ) entre as bobinas e o *skin depth* ( $\delta$ ), obtêm-se um parâmetro adimensional chamado “número de indução” ( $B$ ) (Equação 5.9):

$$B = \frac{s}{\delta} = \frac{s}{\frac{\sqrt{2i}}{\gamma}} = \frac{\gamma s}{\sqrt{2i}} \quad (\text{Equação 5.9})$$

Na situação em que  $B \ll 1$ , a razão  $H_s/H_p$  torna-se diretamente proporcional à condutividade elétrica do terreno e as Equações 5.8 e 5.9 podem ser reduzidas a:

$$\frac{H_s}{H_p} \cong \frac{i(2\pi f)\mu_0\sigma s^2}{4} \cong \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4} \quad (\text{Equação 5.10})$$

Admitindo que a razão entre  $H_s$  e  $H_p$  seja linear, é possível efetuar leituras diretas da condutividade elétrica aparente dos materiais em subsuperfície, a partir da medição dos valores de ambos os campos, pela Equação 5.11:

$$\sigma_a = \frac{4}{(2\pi f)\mu_0 s^2} \left( \frac{H_s}{H_p} \right) = \frac{4}{\omega\mu_0 s^2} \left( \frac{H_s}{H_p} \right) \quad (\text{Equação 5.11})$$

onde:

- $\sigma_a$  é o valor da condutividade elétrica aparente, expressa em  $S/m$ ;
- $f$  é a frequência da corrente elétrica que circula a bobina (Tx), em *hertz* (Hz);
- $\omega$  é frequência angular, em *rad/s*;
- $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo, dada em  $H/m$ ;
- $s$  é o espaçamento entre as bobinas Tx e Rx, em  $m$ ;
- $H_s/H_p$  é a razão entre o campo magnético secundário ( $H_s$ ) e campo magnético primário ( $H_p$ ).

Para uma mesma frequência, a profundidade de investigação ( $Z$ ) é função da separação e da orientação das bobinas. No caso dos condutímetro de campo fabricados pela empresa canadense Geonics Limited, cujo modelo EM31-MK2 foi empregado neste trabalho, as profundidades de investigação típicas para cada modelo e orientação são apresentadas na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1:** Profundidades de investigação típicas dos condutímetro fabricados pelas Geonics Limited.

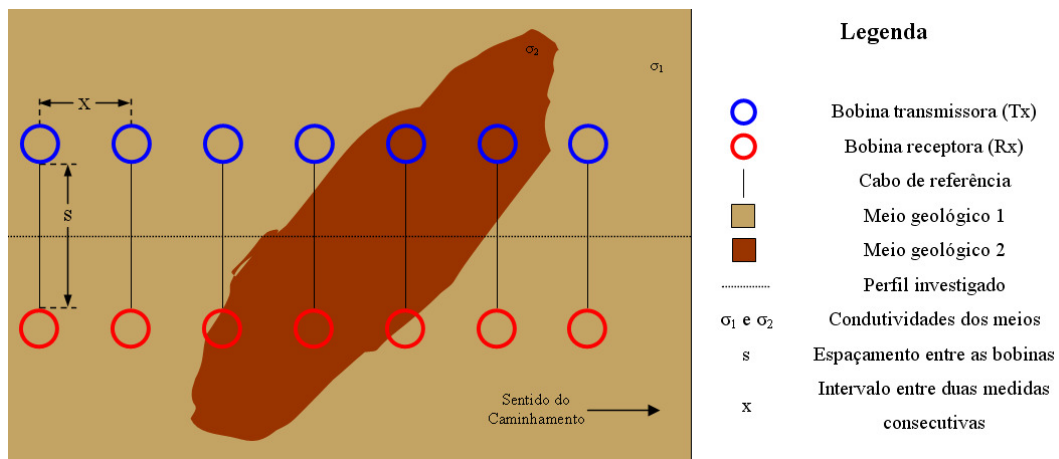
Sistema	Espaçamento das bobinas (s) (m)	Frequência de operação (kHz)	Profundidade de investigação (m)	
			Orientação DMH	Orientação DMV
EM31	3,66	9,8	3	6
EM34	10	6,4	7,5	15
	20	1,6	15	30
	40	0,4	30	60
EM38	0,5	14,5	0,375	0,75
	1		0,75	1,5

### 5.3.1 Técnica do Imageamento Eletromagnético

Tal qual a técnica do Imageamento Elétrico (IE) (item 3.3.2), o Imageamento Eletromagnético (IEM) constitui-se na obtenção de valores de um parâmetro físico – neste caso, a condutividade elétrica –, a partir da superfície terrestre e ao longo de uma seção, e na interpretação da sua variação horizontal a uma ou mais profundidades específicas. Conforme verificado na literatura específica, esta técnica é uma das mais empregadas na aplicação do

método eletromagnético, embora na maioria das vezes, os autores não adotem esta denominação.

Conforme ilustrado na Figura 5.4, as duas bobinas são constantemente separadas por um aparato rígido ou conectadas entre si por um cabo de referência de comprimento conhecido, de modo a se manter fixa a distância de separação entre elas. Este conjunto é movido ao longo do perfil a ser investigado em intervalos previamente determinados. O ponto de referência da medida é o centro entre as bobinas. As diferentes profundidades de investigação do perfil são obtidas por meio da variação do espaçamento entre as bobinas ( $s$ ), da orientação dos dipolos magnéticos e/ou da frequência ( $f$ ) de funcionamento do sistema.



**Figura 5.4:** Técnica do Imageamento Eletromagnético (vista superior).

## 5.4 Aplicações

Neste item, são apresentados alguns trabalhos de pesquisa desenvolvidos em vários países, de modo a ilustrar a versatilidade do método eletromagnético nas mais diversas aplicações.

### 5.4.1 Prospecção mineral

Aittoniemi et al. (1990) investigaram dois diques condutivos na Finlândia. O primeiro é um depósito de pirita e pirrotita no município de Kiuruvesi. O segundo, localizado no município de Kiihtelysvaara, é um depósito com teor superior a 40% de grafite amorfo. Em ambos os casos, anomalias de elevadas condutividades indicaram a posição dos corpos.

Bitencourt et al. (2013) estudaram uma ocorrência cuprífera localizada no escudo Sul-Rio-Grandense utilizando o método EM. Os resultados indicaram a ocorrência de cobre em

uma zona de fraturas, caracterizadas por elevados valores de condutividade (20mS/m) relativamente às zonas estéreis ( $\sigma < 12\text{mS/m}$ ).

#### **5.4.2 Geotecnia e Geologia de Engenharia**

Castro (2008) empregou o método EM na caracterização geológica do entorno do cemitério Bom Jardim, em Fortaleza (CE). A faixa de variação da condutividade, entre 7 e 130mS/m, foi associada pelo autor ao regolito argiloso originado do intemperismo de rochas granito-gnáissicas do embasamento cristalino local.

Na mina Red Devil, localizada próxima ao vilarejo homônimo (Alasca, Estados Unidos), Burton e Ball (2011) conduziram uma grande investigação geofísica empregando ER e EM. Um dos objetivos do trabalho era delimitar a pilha de rejeitos depositados no entorno da mina. Uma anomalia com condutividade variando entre 4 e 12mS/m no centro da área de estudos foi associada à pilha de rejeitos.

#### **5.4.3 Hidrogeologia**

Hazell, Cratchley e Preston (1988) integraram os métodos ER e EM para localizar aquíferos em rochas cristalinas e em sedimentos aluvionares na região norte da Nigéria. Os dados de resistividade indicaram zonas potenciais para exploração de água e a locação dos poços foi determinada a partir dos dados de condutividade.

Na região de Nebraska Sand Hills (Estados Unidos), Ong et al. (2010) investigaram 5 lagos salinos e por meio do método EM inferiram relações entre o teor de salinidade e a condutividade elétrica. Anomalias com valores de até 300mS/m indicaram as maiores concentrações de sais, coincidentes com a direção do fluxo subterrâneo regional.

#### **5.4.4 Estudos ambientais**

Santos (2005) integrou diversos métodos geofísicos na delimitação e na análise evolucionar da pluma de contaminação do lixão de Cuiabá (MS). As anomalias condutivas de até 125mS/m auxiliaram na delimitação da zona de influência dos resíduos.

Moreira, Aquino e Dourado (2007) desenvolveram um trabalho de monitoramento temporal em uma área industrial abandonada em Araras (SP), com o objetivo de se determinar o comportamento evolucionar da pluma de contaminantes, presentes no solo e na água

subterrânea. As anomalias condutivas de maior intensidade foram localizadas sobre os poços de injeção de substâncias químicas no solo.

Cunha e Shiraiwa (2011) investigaram a estrutura aquífera sob um depósito de resíduos de curtume localizado no distrito de Capão Grande, pertencente ao município de Várzea Grande (MT), utilizando o método EM. Os autores estabeleceram que valores menores 20mS/m indicam áreas não contaminadas, entre 20 e 50mS/m referem-se às áreas de transição e acima de 50mS/m refletem a contaminação do solo por cromo.

#### **5.4.5 Arqueologia**

Frohlich e Lancaster (1986) obtiveram significativos resultados empregando o método EM para estudar diversos sítios arqueológicos datados da Idade do Bronze: um cemitério de 5000 anos de idade na Jordânia; um templo na cidade de Barbar, inúmeras câmaras mortuárias e resquícios de um antigo povoado no Bahrein e câmaras mortuárias associadas a construções mais recentes no Kuwait.

Conyers et al. (2008) estudaram planícies de inundação dos rios Sacramento, Mississippi e Red, nos Estados Unidos, buscando indícios das antigas civilizações. Entretanto, o mapeamento das áreas com EM revelou estruturas de paleocanais e descartou as possibilidades de qualquer ocupação humana no local.

## Capítulo 6 – Detalhamento das áreas de estudo

### 6.1 Área 1: Sítio Altarugio

#### 6.1.1 Localização e descrição

A área de estudos está localizada dentro dos limites do Sítio Altarugio, propriedade rural situada no município de Rio Claro (SP) e que possui uma área de 9,5ha. O acesso ao local é feito por meio de estradas não pavimentadas. A Figura 6.1 exhibe a vista por satélite do local.



**Figura 6.1:** Vista por satélite do Sítio Altarugio. A localização da área de estudos está explicitada pelo círculo branco. Data da imagem: 05/10/2005. Fonte: Google (2012a).

Na referida propriedade, está instalado um alambique artesanal (Figura 6.2, à esquerda), em funcionamento no atual local desde o ano de 1997 e onde são produzidos entre 8.000 a 10.000 litros de aguardente de cana (cachaça) por ano. Entretanto, segundo o proprietário, a fabricação de cachaça nesta propriedade remonta o ano de 1925, quando o alambique encontrava-se instalado próximo ao salto do Rio Cabeça (Figura 6.2, à direita).





**Figura 6.2:** À esquerda: edificação atual onde se encontra o alambique. À direita: antiga edificação, próxima ao salto do Rio Cabeça, onde funcionava o alambique.

A produção é do tipo auto-suficiente, isto é, toda a cana-de-açúcar empregada na obtenção da aguardente é cultivada no próprio sítio. A vinhaça gerada na produção da cachaça é utilizada na irrigação, por gravidade, de parte de lavoura de cana e feita por meio de mangueiras (Figura 6.3). Entretanto, a área escolhida não apresenta histórico de qualquer tipo de infiltração de vinhaça.

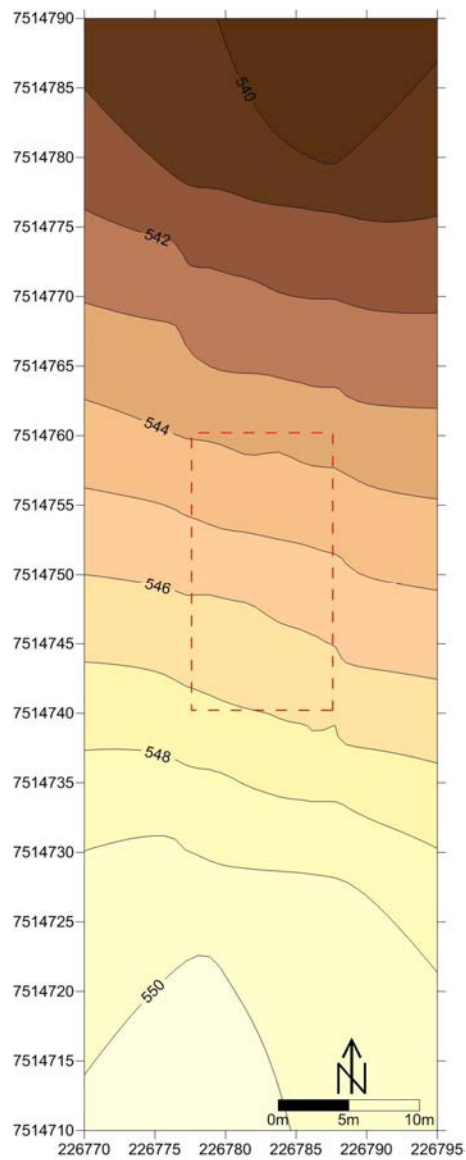


**Figura 3.3:** Irrigação de parte da lavoura com vinhaça.

A área selecionada possui 200m<sup>2</sup>, com seu lado maior medindo 20m e o menor 10m. O lado maior acompanha o declive do terreno que, de acordo com os dados obtidos por meio de DGPS (*Differential Global Positioning System*), é da ordem de 10° (Figura 6.4). A Figura 6.5 exhibe o mapa topográfico da área de estudos elaborado a partir dos dados de DGPS (ver item 7.2.4).



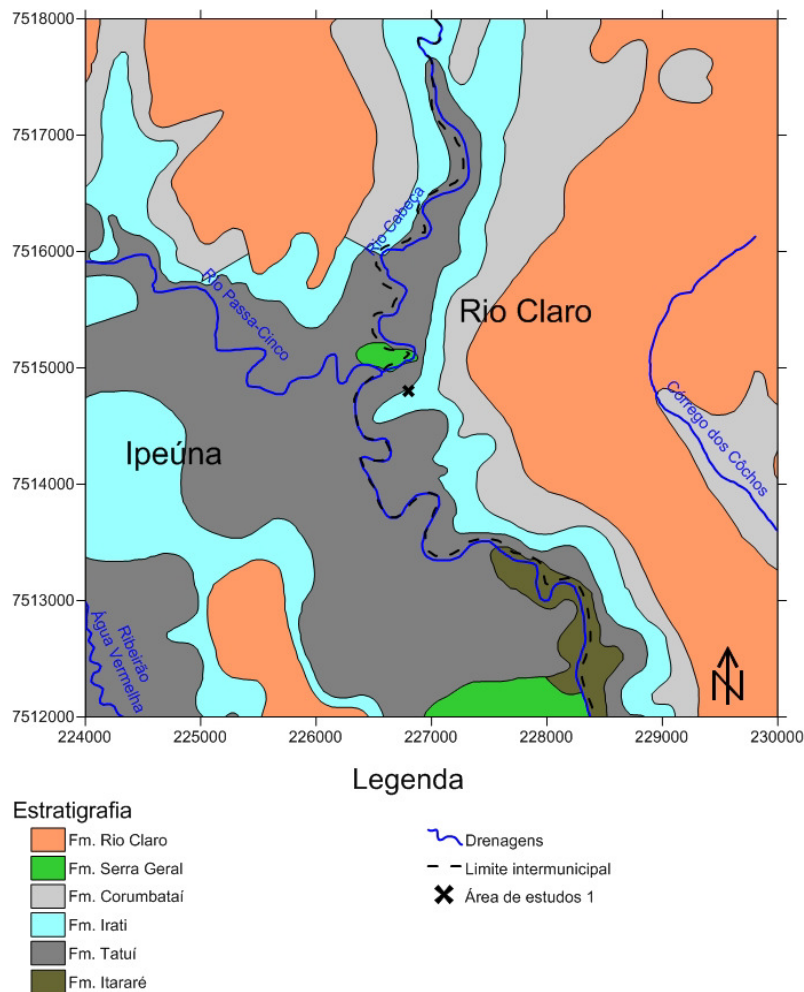
**Figura 6.4:** Vista geral da área de estudos. À esquerda: visão a partir da montante. À direita: visão a partir da jusante.



**Figura 6.5:** Mapa topográfico da área de estudos (tracejada em vermelho).

### 6.1.2 Contexto geológico

Com base no mapa geológico do Estado de São Paulo, elaborado pelo Instituto Geológico (1986), verificou-se que na região do Sítio Altarugio ocorrem, pelo menos, seis formações geológicas distintas (Figura 6.6). Entretanto, reconhecimentos de campo revelaram que a área de estudos encontra-se situada na Formação Corumbataí. Esta e outras formações geológicas de interesse são descritas a seguir.



**Figura 6.6:** Mapa geológico regional da área de estudos 1. Fonte: modificado de Instituto Geológico (1986).

#### 6.1.2.1 Formação Corumbataí

Uma das referências primordiais sobre a Formação Corumbataí pode ser encontrada em Andrada e Silva e Andrada (1827, apud LOPES, 2005, p.143) e Landim (1967, p.13) expõe que a primeira aparição do termo Corumbataí ocorreu em 1916, em um relatório da Comissão Geográfica e Geológica, atribuído à porção superior do Permiano, por geólogos paulistas.

Entretanto, esta formação foi devidamente designada por Pacheco (1927 apud SCHNEIDER et al, 1974, p.58) e corresponde à unidade superior do Grupo Passa Dois no Estado de São Paulo. Pacheco (1927 apud LANDIM, 1967, p.13) a descreveu como uma seqüência de camadas calcárias, arenosas e argilo-xistosas alternada com camadas de xistos betuminosos e calcários, ambos com nódulos de sílex.

De acordo com Lopes (2005, p.143), a área-tipo desta formação situa-se no vale do Rio Corumbataí, Estado de São Paulo e Landim (1967, p.16 e 43) relata que a Fm. Corumbataí assenta-se concordantemente sobre a Fm. Irati e apresenta, a partir da base, um pacote de siltitos maciços, com fraturas conchoidais e coloração variando do roxo acinzentado ao cinza claro. Em seguida, uma sucessão de camadas siltosas intercaladas com lâminas argilosas, silto-argilosas, areno-siltosas e de arenitos finos, com baixa continuidade vertical, significativa variação horizontal e com tonalidades arroxeadas, cinzentas e avermelhadas. Também são verificadas intercalações de calcários oolíticos e conglomerados intraformacionais. O topo, geralmente, é arenoso.

Oppenheim (1934 apud LANDIM, 1967, p.47), com base em testemunhos de sondagens obtidos de alguns poços da região, declara que a espessura da Fm. Corumbataí varia entre 83m e 195m. A Figura 6.7 exemplifica a ocorrência desta formação na região da área de estudos.

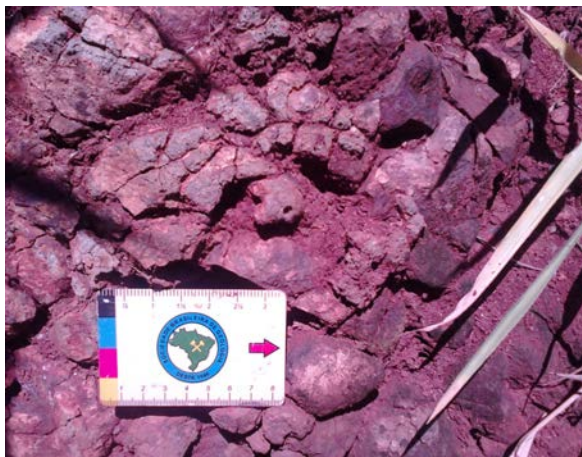


**Figura 6.7:** Afloramento de sedimentos alterados da Fm. Corumbataí. Local: entrada do Sítio Altarugio.

### 6.1.2.2 Formação Serra Geral

Sotoposta à Formação Corumbataí, ocorre localmente uma soleira de diabásio pertencente à Formação Serra Geral (Figura 6.8). A denominação desta formação foi primeiramente utilizada por White (1906 apud LOPES; SALVADOR, 2005, p.146; 1908 apud SCHNEIDER et al., 1974, p.61) para descrever os afloramentos ocorrentes na Serra

Geral do Planalto Meridional Brasileiro, ao longo da estrada que liga os municípios de Lauro Müller e São Joaquim, no Estado de Santa Catarina.



**Figura 6.8:** Afloramento de diabásios da Fm. Serra Geral. Local: barranco da estrada não pavimentada à jusante da área de estudos.

Segundo Lopes e Salvador (2005, p.146), a Formação Serra Geral é resultado de intenso magmatismo fissural ocorrido a cerca de entre 130Ma, gerando espessos depósitos de lavas ( $K1\beta$ sg) e intrusões ( $K1\delta$ sg), associados a uma extensa rede de diques múltiplos níveis de soleiras intrudidos na pilha sedimentar (SALVADOR, 2005, p.147). Segundo a mesma autora, as soleiras ocorrem intrudidas nos sedimentos paleozóicos, geralmente com espessuras que variam entre 2 e 200 metros, mas que podem atingir até 1.000m A espessura máxima desta formação, de acordo com Schneider et al. (1974, p.61), foi observada no município de Presidente Epitácio (SP), com 1529m.

A Formação Serra Geral apresenta ocorrência generalizada na Bacia do Paraná e é constituída por lavas basálticas, toleíticas, de textura afanítica, coloração cinza a negra, amigdaloidal no topo dos derrames e juntas verticais e horizontais. Arenitos médios, com estratificação cruzada tangencial, ocorrem principalmente na porção basal. Apresenta contato inferior discordante com a Formação Botucatu e superior discordante com as formações Caiuá, Bauru e Cachoeirinha (SCHNEIDER et al., 1974, p.61).

### 6.1.3 Clima

O município de Rio Claro (SP) situa-se entre as latitudes 22°14'S e 22°35'S; portanto, seu território está localizado na Zona Tropical. Assim, o clima local pode ser considerado tropical, alternadamente seco e úmido – duas estações bem definidas. As temperaturas médias

anuais, de acordo com o CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura [20--a], situam-se entre 15,1°C e 28,0°C (Tabela 6.1). Segundo a classificação proposta por Köppen (1918 apud AYOADE, 2004, p.232), o clima no município pode ser designado como Cwa, onde:

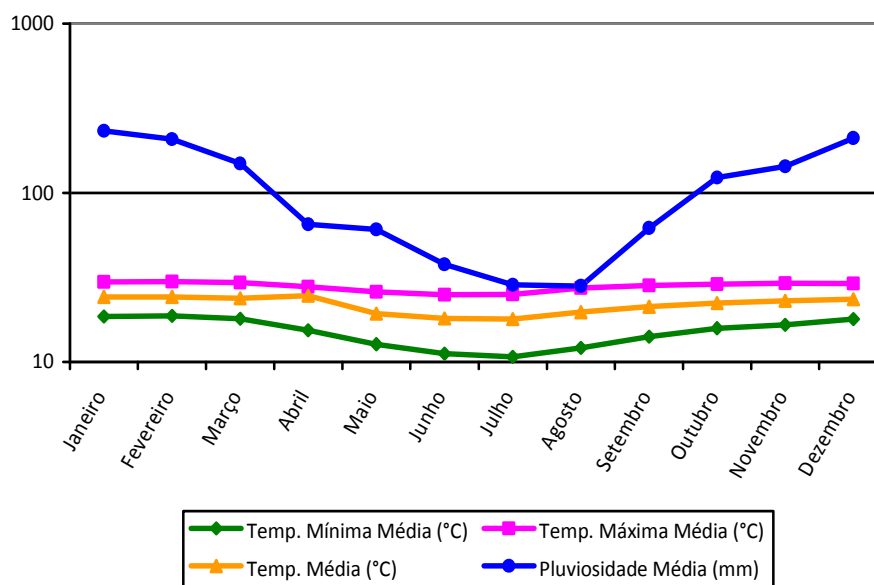
<b>C</b>	<b>w</b>	<b>a</b>
Clima temperado chuvoso e quente: o mês mais frio tem temperatura média até 18°C e o mês mais moderadamente quente tem temperatura média maior que 10°C.	Seca no inverno, chuva de verão.	Verão quente, com o mês mais quente apresentando temperatura média maior que 22°C.

Segundo os dados fornecidos pelo DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica (2011), exibidos na Tabela 6.1 e explicitados no gráfico da Figura 6.9, o período chuvoso no município de Rio Claro (SP) compreende os meses de outubro a março, com acumulado acima de 1000mm (cerca de 83% do total anual). O período de seca, que se estende de abril a setembro, apresenta acumulado próximo a 280mm. O máximo pluviométrico pode ocorrer nos meses de dezembro e janeiro, e o mínimo pluviométrico, nos meses de julho e agosto.

**Tabela 6.1:** Dados de temperatura<sup>1</sup> (1961-1990) e pluviosidade<sup>2</sup> (1936-2006) para o município de Rio Claro.

Mês	<sup>1</sup> Temperatura (°C)			<sup>2</sup> Pluviosidade média (mm)
	Mínima média	Máxima média	Média	
<b>Janeiro</b>	18,5	29,8	24,2	<b>232,5</b>
<b>Fevereiro</b>	<b>18,7</b>	<b>29,9</b>	<b>24,3</b>	207,7
<b>Março</b>	18,0	29,5	23,8	148,6
<b>Abril</b>	15,4	27,9	21,6	65,1
<b>Mai</b>	12,7	26,0	19,3	60,8
<b>Junho</b>	11,2	<b>24,9</b>	18,1	37,7
<b>Julho</b>	<b>10,7</b>	25,1	<b>17,9</b>	28,5
<b>Agosto</b>	12,1	27,3	19,7	<b>28,1</b>
<b>Setembro</b>	14,1	28,3	21,2	62,0
<b>Outubro</b>	15,8	28,8	22,3	123,1
<b>Novembro</b>	16,6	29,2	22,9	143,4
<b>Dezembro</b>	17,9	29,1	23,5	210,3
<b>Anual</b>	15,1	28,0	21,6	1282,2
<b>Mínima</b>	<b>10,7</b>	<b>24,9</b>	<b>17,9</b>	<b>28,1</b>
<b>Máxima</b>	<b>18,7</b>	<b>29,9</b>	<b>24,3</b>	<b>232,5</b>

Fonte: <sup>1</sup>CEPAGRI [20--a]; <sup>2</sup>DAEE (2011).



**Figura 6.9:** Ocorrências de temperatura<sup>1</sup> (1961-1990) e pluviosidade<sup>2</sup> (1936-2006) no município de Rio Claro. Fonte: <sup>1</sup>CEPAGRI [20--a]; <sup>2</sup>DAEE (2011).

#### 6.1.4 Hidrografia e hidrogeologia

Aproximadamente 98% da área do município de Rio Claro (SP) encontra-se inserida na Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí (SBHRC). Esta unidade faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba e juntamente das bacias dos rios Capivari e Jundiá constituem a UGRHI-5 (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos, criada em 18 de novembro de 1993, em atendimento à Lei Estadual nº 7.663/91) (CETEC, 2001, p.4). Segundo a IRRIGART (2005, p.32 e 35), a UGRHI-5 conta com área total de 15.303,67km<sup>2</sup>; desta, 1.679,19km<sup>2</sup> pertencem à SBHRC, a qual apresenta vazão média de 21,04m<sup>3</sup>/s.

O Rio Corumbataí possui três principais afluentes: os rios Passa Cinco e Cabeça, na margem direita, e o Ribeirão Claro, na margem esquerda. Com base em informações levantadas por meio do DAEE – Departamento Autônomo de Água e Esgoto de Rio Claro (SP) [20--], a captação de água para abastecimento público no município ocorre no Ribeirão Claro (40% na Estação de Tratamento de Água – ETA 1) e no Rio Corumbataí (60% na ETA 2).

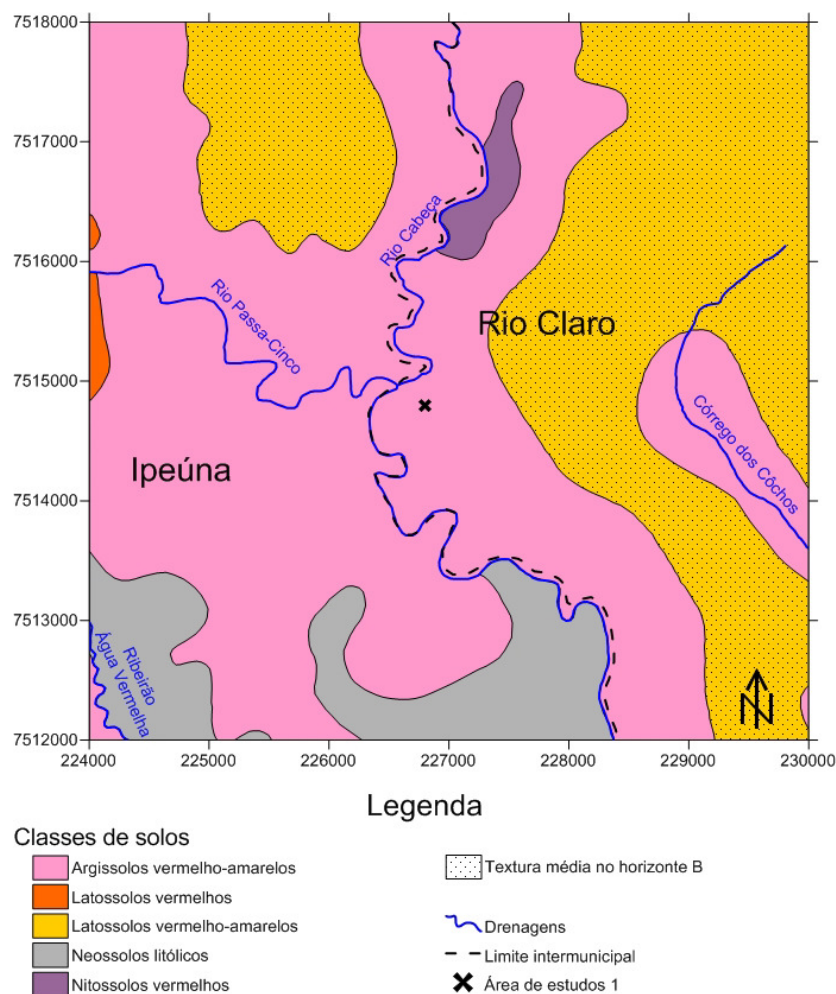
Observações efetuadas em campo revelaram a passagem do Rio Cabeça cerca de 200m ao norte e o encontro deste com o Rio Passa Cinco distante aproximadamente 300m a noroeste da área de estudo.

Em relação às águas subterrâneas, o município está assentado sobre o Aquicludo Passa Dois (DAEE, 2007), considerado uma unidade hidrogeológica sedimentar de extensão regional que separa os Aquíferos Tubarão e Guarani (IRITANI; EZAKI, 2008, p.40). Segundo as autoras, sua constituição por sedimentos predominantemente finos (folhelhos, siltitos, argilitos,

calcários e dolomitos) reduzem significativamente sua capacidade de fornecer água e inviabilizam o abastecimento de grandes comunidades.

### 6.1.5 Pedologia

Com base no mapa pedológico elaborado por Oliveira, Prado e Almeida (1981) (Figura 6.10), na área de estudos ocorre o argissolo vermelho-amarelo (antigo podzólico vermelho-amarelo). Segundo a EMBRAPA (2006b, p.76), este tipo de solo é caracterizado por apresentar horizonte B textural (Bt) de argila de atividade baixa, textura média a muito argilosa no horizonte Bt, incremento no teor de argila do horizonte superficial para o horizonte B, profundidade variável e acidez variável de forte a moderada, entre outras características. Os argissolos, de acordo com a PROAMB (2009, p.189), podem se desenvolver a partir de sedimentos argilosos da Fm. Corumbataí bem como sobre os arenitos da Fm. Pirambóia.



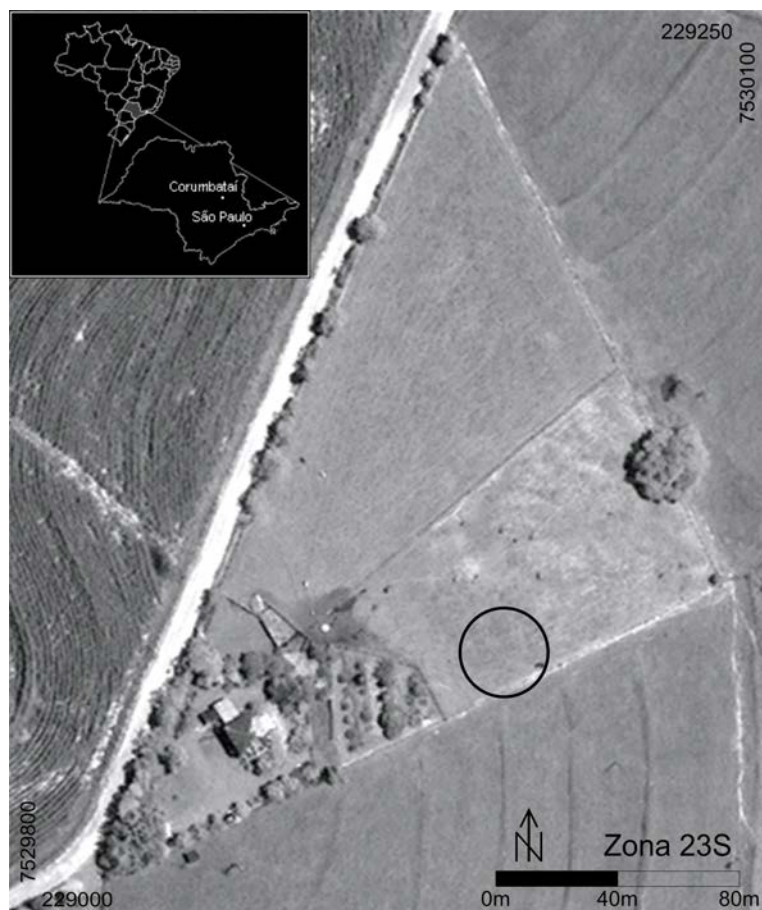
**Figura 6.10:** Mapa pedológico regional da área de estudos 1. Fonte: modificado de Oliveira, Prado e Almeida (1981).



## 6.2 Área 2: Chácara Santana

### 6.2.1 Localização e descrição

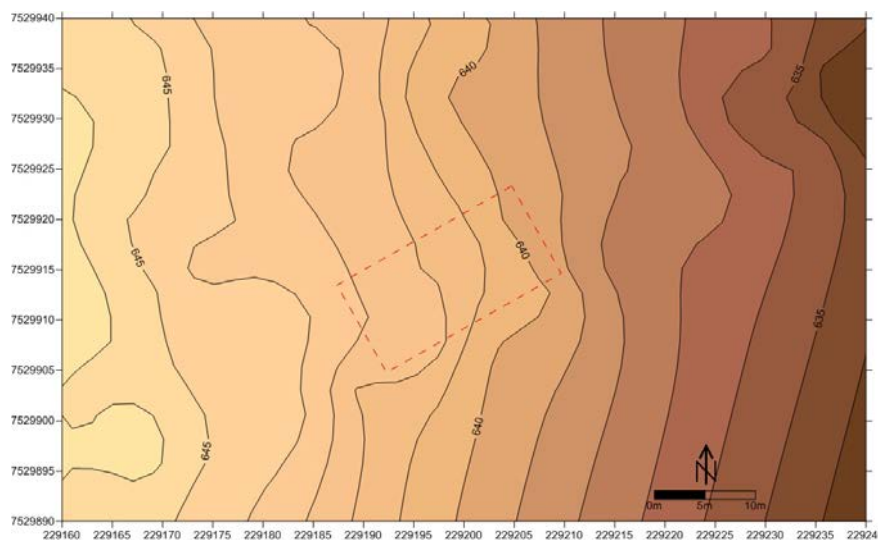
A segunda área de estudos deste projeto está localizada dentro dos limites da Chácara Santana, propriedade de, aproximadamente, 16.000m<sup>2</sup> situada na área rural do município de Corumbataí (SP) e que, outrora, foi destinada ao cultivo de cana-de-açúcar e, mais recentemente, à criação de pequeno rebanho de bovinos; atualmente, é utilizada somente para fins de recreação. O acesso ao local também é feito por meio de estradas não-pavimentadas. A Figura 6.11 exibe a vista por satélite do local.



**Figura 6.11:** Vista por satélite da Chácara Santana. A localização da área de estudos está explicitada pelo círculo preto. Data da imagem: 30/09/2009. Fonte: Google (2012b).

Assim como na Área 1, foi selecionado um espaço de 200m<sup>2</sup>, com seu lado maior medindo 20m e o menor 10m. O lado maior acompanha o declive do terreno que, de acordo com os dados obtidos por meio de DGPS (*Differential Global Positioning System*), é da

ordem de 9,2°. A Figura 6.12 exibe o mapa topográfico da área de estudos confeccionado a partir dos dados de DGPS (ver item 7.2.4).



**Figura 6.12:** Mapa topográfico da área de estudos (tracejada em vermelho).

## 6.2.2 Contexto geológico

De acordo com o mapa geológico do Estado de São Paulo, elaborado pelo Instituto Geológico (1986), duas formações geológicas principais ocorrem regionalmente: Formação Corumbataí e Formação Pirambóia (Figura 6.13). Observações realizadas no entorno da Chácara Santana revelaram que a área de estudos encontra-se assentada sobre a Formação Pirambóia.

### 6.2.2.1 Formação Pirambóia

A denominação Pirambóia foi empregada por Pacheco (1927 apud LOPES; MARCONATO, 2005, p.144) para designar os arenitos de origem fluvial que ocorrem concordantemente (segundo a maioria dos autores) na base da Formação Botucatu, na região do Distrito de Pirambóia, município de Anhembi (SP). O contato inferior, com as Formações Corumbataí e Rio do Rasto, é discordante.

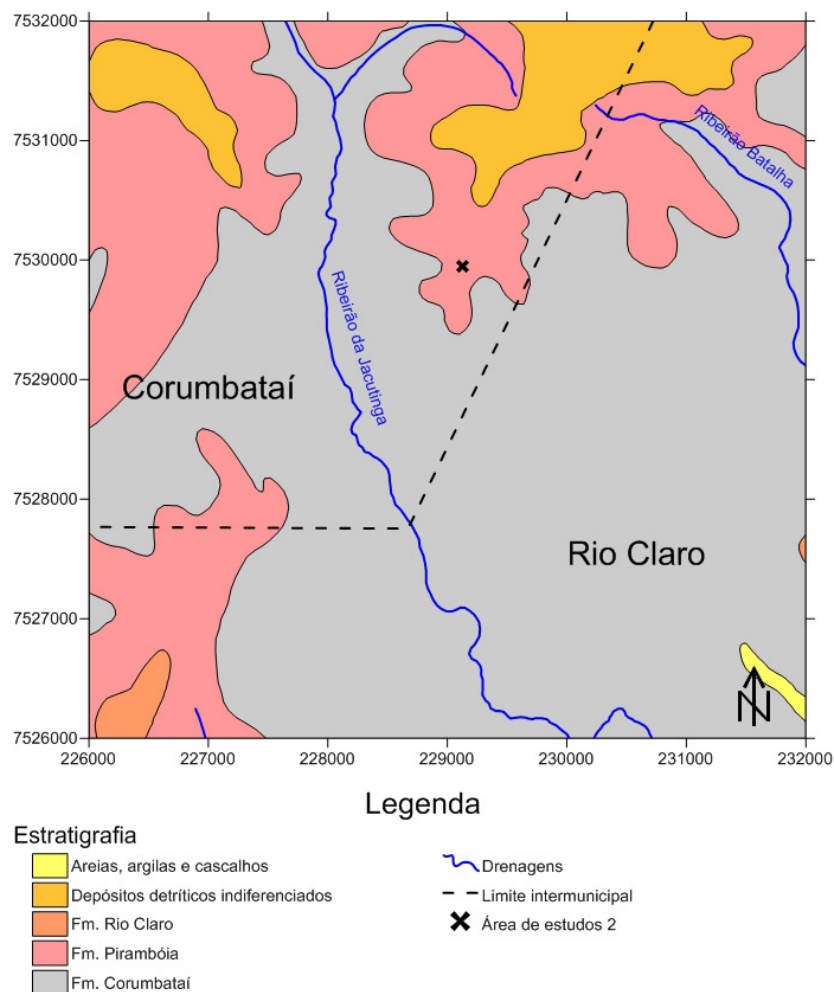
Schneider et al. (1974, p.59) propõem que a origem desta formação seja continental fluvial, com depósitos de rios meandantes e pequenas lagoas associadas, em condições climáticas oxidantes. Entretanto, Lopes e Marconato (2005, p.144) afirmam que, atualmente,

esta unidade seja a evolução de um extenso campo de dunas eólicas. A espessura máxima desta formação, medida em superfície, foi observada na região de Anhembi e São Pedro (SP): 270m.

Sua constituição essencial é de arenitos médios e finos, com grãos polidos, subangulares e subarredondados, e coloração que varia do branco ao vermelho. Podem ocorrer intercalações de finas camadas de argilitos e siltitos, arenitos conglomeráticos com seixos de argila e camada basal areno-argilosa com seixos angulares de sílex. As estruturas sedimentares mais comuns são estratificações cruzadas, planares e acanaladas de porte grande e muito grande, laminações cruzadas transladantes e estratificação plano-paralela nas porções silto-argilosas (SCHNEIDER et al., 1974, p.58 e 59; LOPES; MARCONATO, 2005, p.144).

### 6.2.2.2 Formação Corumbataí

A fim de não tornar o texto repetitivo, sugere-se a leitura do item “6.1.2.1 Formação Corumbataí” que descreve a mesma formação geológica em questão.



**Figura 6.13:** Mapa geológico regional da área de estudos 2. Fonte: modificado de Instituto Geológico (1986).

### 6.2.3 Clima

O município de Corumbataí (SP) situa-se entre as latitudes 22°09'S e 22°20'S; portanto, seu território está localizado na Zona Tropical. Assim, o clima local pode ser considerado tropical, alternadamente seco e úmido – duas estações bem definidas. As temperaturas médias anuais, de acordo com o CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura [20--b], situam-se entre 15,3°C e 28,2°C (Tabela 6.2). Segundo a classificação proposta por Köppen (1918 apud AYOADE, 2004, p.232), o clima no município pode ser designado como Aw, onde:

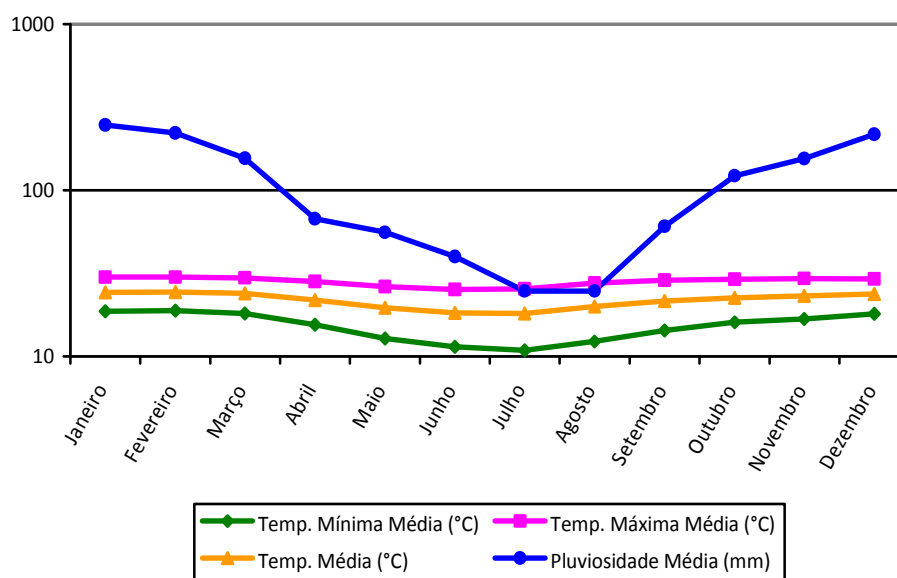
A	W
Clima tropical chuvoso: o mês mais frio tem temperatura média superior a 18°C e a precipitação pluvial anual é maior do que a evapotranspiração anual.	Seca no inverno, chuva de verão.

Segundo os dados fornecidos pelo DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica (2011), exibidos na Tabela 6.2 e explicitados no gráfico da Figura 6.14, o período chuvoso no município de Corumbataí (SP) compreende os meses de outubro a março, com acumulado acima de 1100mm (cerca de 83% do total anual). O período de seca, que se estende de abril a setembro, apresenta acumulado superior a 270mm. O máximo pluviométrico pode ocorrer nos meses de dezembro e janeiro, e o mínimo pluviométrico, nos meses de julho e agosto.

**Tabela 6.2:** Dados de temperatura<sup>1</sup> (1961-1990) e pluviosidade<sup>2</sup> (1939-2004) para o município de Corumbataí.

MÊS	<sup>1</sup> Temperatura (°C)			<sup>2</sup> Pluviosidade média (mm)
	Mínima média	Máxima média	Média	
<b>Janeiro</b>	18.7	29.9	24.3	247,1
<b>Fevereiro</b>	18.9	30.0	24.4	220,8
<b>Março</b>	18.1	29.7	23.9	156,1
<b>Abril</b>	15.5	28.2	21.8	67,1
<b>Mai</b>	12.8	26.3	19.6	55,7
<b>Junho</b>	11.4	25.2	18.3	39,8
<b>Julho</b>	10.9	25.4	18.1	24,7
<b>Agosto</b>	12.3	27.6	20.0	24,7
<b>Setembro</b>	14.3	28.7	21.5	60,7
<b>Outubro</b>	16.0	29.1	22.5	122,4
<b>Novembro</b>	16.8	29.4	23.1	154,9
<b>Dezembro</b>	18.0	29.3	23.7	217,6
<b>Anual</b>	15.3	28.2	21.8	1338,6
<b>Mínima</b>	10.9	25.2	18.1	24,7
<b>Máxima</b>	18.9	30.0	24.4	247,1

Fonte: <sup>1</sup>CEPAGRI [20--b]; <sup>2</sup>DAEE (2011).



**Figura 6.14:** Ocorrências de temperatura<sup>1</sup> (1961-1990) e pluviosidade<sup>2</sup> (1939-2004) no município de Corumbataí. Fonte: <sup>1</sup>CEPAGRI [20--b]; <sup>2</sup>DAEE (2011).

#### 6.2.4 Hidrografia e hidrogeologia

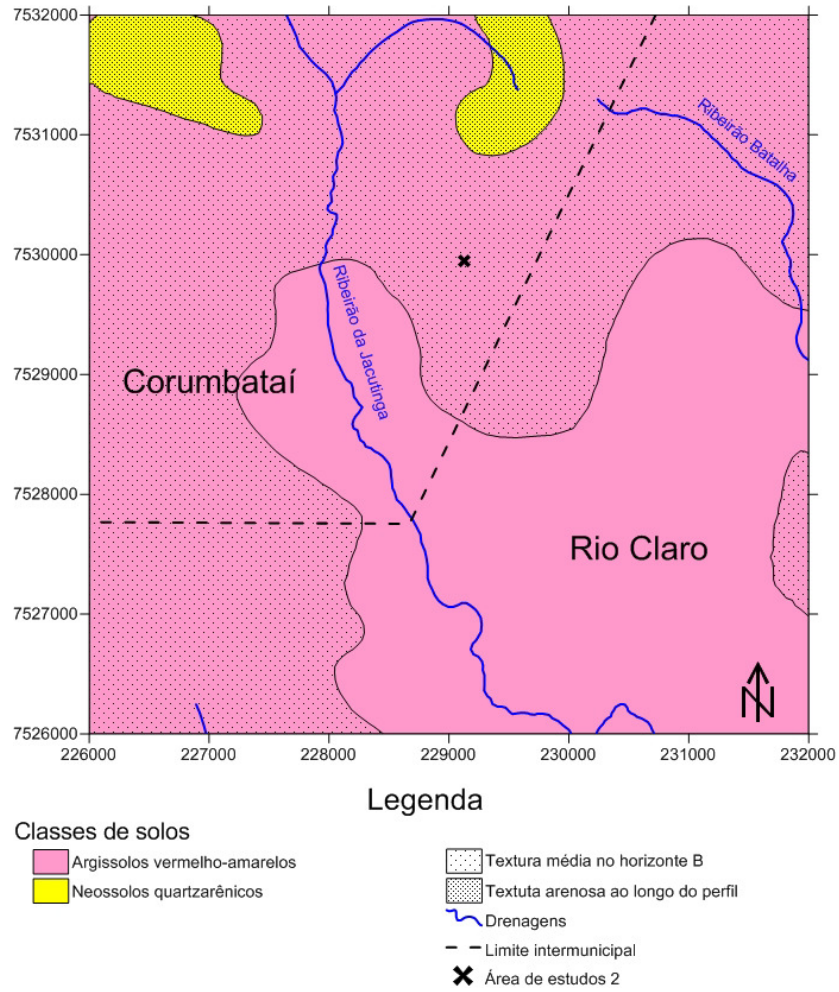
Pouco mais de 84% da área territorial do município de Corumbataí (SP) está inserida na Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí (SBHRC). Assim, como mencionado no item 6.1.4, a SBHRC faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba que, por sua vez, constitui a UGRHI-5 (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos) em conjunto com as bacias dos rios Capivari e Jundiá.

Os principais afluentes do Rio Corumbataí são os rios Passa Cinco e Cabeça (na margem direita) e o Ribeirão Claro (na margem esquerda). Entretanto, a captação de água para abastecimento público do município é feita no Ribeirão Monte Alegre, afluente da margem direita, e por meio de poços artesianos (CONSÓRCIO PCJ, 2007, p.9).

Observações efetuadas em campo revelaram a existência de um corpo d'água cerca de 140m à jusante da área de estudos. Segundo relatos do proprietário da Chácara Santana, esta drenagem apresenta fluxo de água somente no período de chuvas, chegando a secar durante a estiagem.

#### 6.2.5 Pedologia

A fim de não tornar o texto repetitivo, sugere-se a leitura do item “6.1.5 Pedologia” que descreve a mesma tipologia de solo em questão. A Figura 6.15 explicita, para a Área 2, a ocorrência regional dos diferentes tipos de solos.



**Figura 6.15:** Mapa pedológico regional da área de estudos 2. Fonte: modificado de Oliveira, Prado e Almeida (1981).

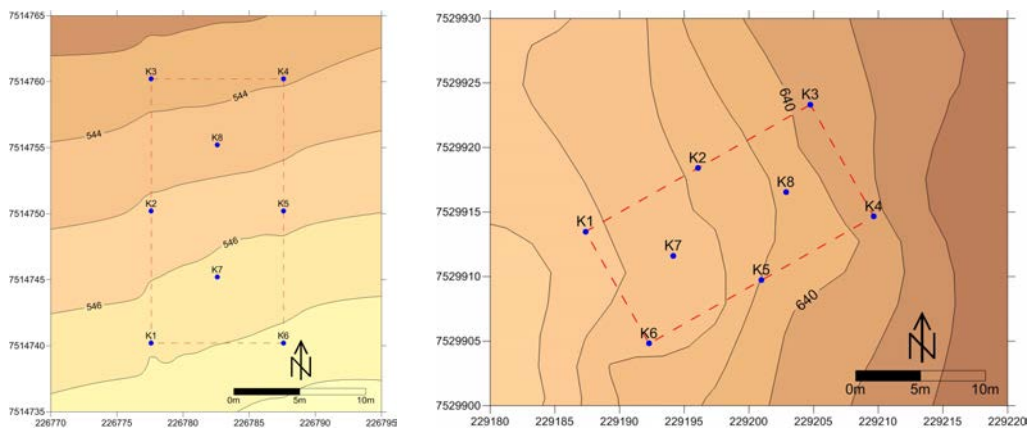
## Capítulo 7 – Materiais e Métodos

### 7.1 Aquisição dos dados

A aquisição dos dados foi executada de modo semelhante em ambas as áreas de estudo e, exceto quando necessário, não será feita distinção entre elas durante a descrição dos procedimentos.

#### 7.1.1 Ensaios de condutividade hidráulica da zona não saturada

Visando o conhecimento da condutividade hidráulica da zona não saturada, adotada como um dos critérios para o intervalo de repetição dos ensaios geofísicos da fase pós-infiltração (item 7.1.3), foram realizados 8 ensaios regularmente distribuídos em cada área (Figuras 7.1), a uma profundidade de 80cm, empregando-se um permeâmetro Guelph, modelo 2800K1 (Figura 7.2), fabricado pela empresa norte-americana Soil Moisture e capaz de efetuar leituras de condutividade hidráulica entre  $10^{-2}$  e  $10^{-5}$  cm/s.



**Figura 7.1:** Mapas de localização dos ensaios de condutividade hidráulica. À esquerda: Área 1. À Direita: Área 2.



**Figura 7.2:** Permeâmetro Guelph 2800K1. À esquerda: Área 1. À direita: Área 2.

### 7.1.2 Amostragem de solo e procedimentos laboratoriais

Na ocasião dos ensaios de condutividade hidráulica, foram coletadas 8 amostras deformadas com cerca de 500g de material do fundo dos furos abertos para a introdução do permeâmetro (Figura 7.3). As amostras foram devidamente acondicionadas em sacos plásticos e transportadas ao Laboratório Didático de Geotécnica (IGCE/Unesp – Rio Claro), onde foi efetuada a separação das frações cascalho+areia e argila+silte em cada uma delas. Os resultados dos ensaios de peneiramento contribuíram para a definição do intervalo de repetição dos ensaios geofísicos pós-infiltração.



**Figura 7.3:** Coleta de amostras de solo do fundo dos furos dos ensaios de condutividade hidráulica na Área 1.

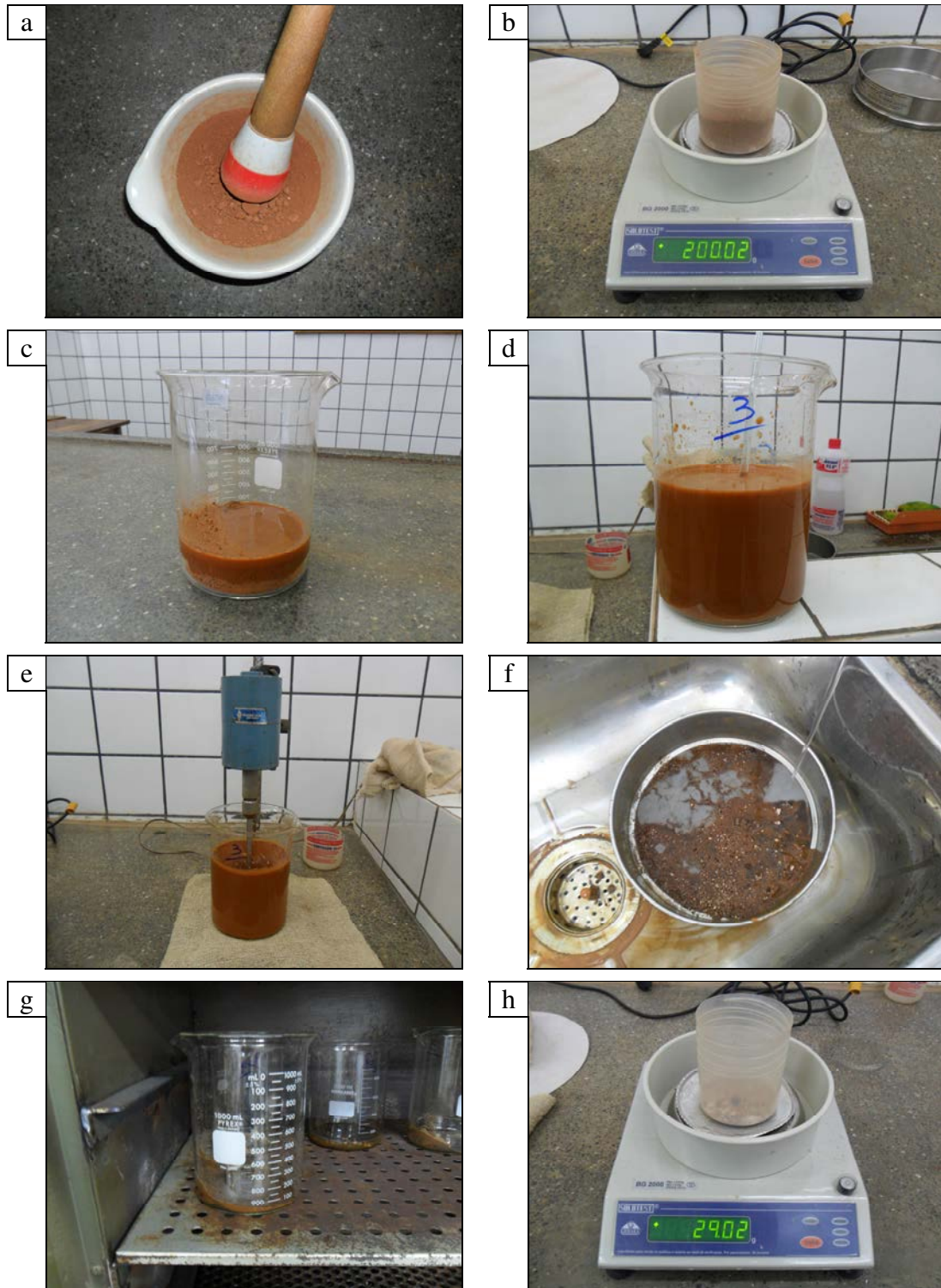
Os procedimentos laboratoriais adotados foram:

- Secagem da massa total da amostra ao sol;
- Destorroamento de uma fração da massa total, utilizando almofariz e pistilo (Figura 7.4a);
- Pesagem de 200g da amostra destorroada em balança de precisão (Figura 7.4b);
- Transferência dos 200g pesados para um béquer e acréscimo de 100ml de defloculante (45,7g de hexametáfosfato de sódio para 1l de água destilada) (Figura 7.4c);
- Acréscimo de água destilada e agitação da amostra até atingir consistência pastosa (Figura 7.4d);
- Descanso de 24h para ação do defloculante;
- Pré-agitação da amostra com uma bagueta e posterior agitação, por cerca de 5min, com agitador mecânico (acréscimo de água destilada até atingir consistência líquida) (Figura 7.4e);
- Lavagem, em água corrente, do conteúdo do béquer utilizando uma peneira nº 270 (ou 53 $\mu$ m) (Figura 7.4f);
- Transferência do material restante para um béquer e secagem em estufa, a 100°C (Figura 7.4g);



- Pesagem, em balança de precisão, do material restante (Figura 7.4h).

Ao final destes procedimentos, obteve-se a fração areia+cascalho dos 200g iniciais de cada amostra e, por simples cálculo matemático, foi possível determinar o teor de grãos finos (argila e silte).



**Figura 7.4:** Etapas do processo de separação das frações argila+silte e areia+cascalho. As fotos exibem materiais coletados na Área 1.

### 7.1.3 Ensaios geofísicos

Os ensaios geofísicos, com exceção das SEV, foram realizados em duas fases:

- **Pré-infiltração:** desenvolvida de modo a se conhecer valores característicos do ambiente natural isento de contaminação por vinhaça e testar os procedimentos de campo de modo a otimizar a coleta de dados na fase posterior;
- **Pós-infiltração:** repetição sistemática dos ensaios, objetivando estabelecer um monitoramento temporal da área de estudo após sua contaminação controlada por vinhaça.

#### 7.1.3.1 Sondagens Elétricas Verticais (SEV)

Foram executadas 6 SEV na Área 1 e 3 SEV na Área 2, conforme as Tabelas 7.1 e 7.2. Na primeira área, buscou-se estimar, principalmente, a profundidade do nível freático (ver item 8.2.1); na segunda, os resultados dos ensaios possibilitaram a locação da nova área de estudos de modo que a profundidade do nível freático fosse semelhante ao da Área 1 (ver item 9.2.1). As SEV foram realizadas somente na fase pré-infiltração.

**Tabela 7.1:** Dados gerais das SEV executadas na Área 1.

SEV	Arranjo	AB/2 máximo (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
1	Schlumberger	60	226.777,595	7.514.740,210
2			226.777,595	7.514.750,210
3			226.777,595	7.514.760,210
4			226.787,595	7.514.760,210
5			226.787,595	7.514.750,210
6			226.787,595	7.514.740,210

**Tabela 7.2:** Dados gerais das SEV executadas na Área 2.

SEV	Arranjo	AB/2 máximo (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
1	Schlumberger	100	229.117,696	7.529.955,616
2			229.167,083	7.529.895,592
3			229.225,214	7.529.962,765

Em todos os ensaios empregou-se o arranjo Schlumberger e o resistímetro de fabricação sueca ABEM TERRAMETER SAS4000 (Figura 7.5). Este possui, em uma mesma unidade, os circuitos do emissor de corrente e do receptor de potencial, e pode realizar medidas de resistividade elétrica, polarização induzida e potencial espontâneo em 4 canais simultaneamente. Este resistímetro pode injetar no solo correntes de até 1A e medir potenciais de até 400V. A potência máxima de saída é de 100W.

Este equipamento também conta com um microprocessador interno que realiza cálculos, fornecendo, entre outros parâmetros, o valor da resistência elétrica a partir dos valores de corrente injetada e potencial medido. Além disso, pode armazenar na memória dados dos ensaios geofísicos realizados, descarregando-os para um computador do tipo PC através de um cabo de dados.



**Figura 7.5:** Resistivímetro ABEM TERRAMETER SAS4000.

### 7.1.3.2 Imageamentos Elétricos (IE)

Desenvolvidos nas duas fases do projeto, os IE objetivaram a aquisição de dados de eletrorresistividade e de cargabilidade. Na fase pré-infiltração, foram executadas 6 linhas com 8 níveis de investigação utilizando o arranjo Dipolo-Dipolo (ver itens 8.2.2 e 9.2.2). Em 5 destas linhas empregou-se abertura de dipolo de 3m (Linhas 1 a 5) e somente na Linha 0 a abertura de dipolo foi de 5m (Tabelas 7.3 e 7.4). Na fase pós-infiltração, foram executadas 3 linhas com 8 níveis de investigação e abertura de dipolo de 2m, utilizando o arranjo Dipolo-Dipolo (ver itens 8.5.1 e 9.5.1). Destas, 2 linhas foram repetidas sistematicamente no decorrer da fase (Tabelas 7.5 e 7.6).

Os ensaios pré-infiltração consistiram em maior número, comparativamente à fase pós-infiltração, pois mostrou-se necessário o conhecimento prévio e detalhado do arcabouço geológico/geofísico das áreas de estudo, bem como as vantagens e as limitações da metodologia adotada especificamente nos ambientes geológicos selecionados, com vistas ainda à otimização dos trabalhos de campo na fase subsequente.

O posicionamento das linhas – paralelas ao lado maior e acompanhando o declive do terreno – foi planejado de forma que, no momento do processamento dos dados no *software*

Res2div, os limites da área de estudo estivessem completamente inseridos na porção central das seções e em todos os níveis de investigação (Figura 7.6).

Novamente, a aquisição dos dados foi realizada por meio do resistivímetro ABEM TERRAMETER SAS 4000, devidamente configurado para efetuar conjuntamente medidas de resistividade elétrica e de cargabilidade (Figura 7.7).

**Tabela 7.3:** Dados gerais dos IE pré-infiltração executados na Área 1.

Linha	Extensão (m)	Espaçamento de dipolos (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
			Inicial		Final	
0	70	5	226.782,595	7.514.715,210	226.782,595	7.514.785,210
1	54	3	226.777,595	7.514.724,210	226.777,595	7.514.778,210
2			226.780,095	7.514.724,210	226.780,095	7.514.778,210
3			226.782,595	7.514.724,210	226.782,595	7.514.778,210
4			226.785,095	7.514.724,210	226.785,095	7.514.778,210
5			226.787,595	7.514.724,210	226.787,595	7.514.778,210

**Tabela 7.4:** Dados gerais dos IE pré-infiltração executados na Área 2.

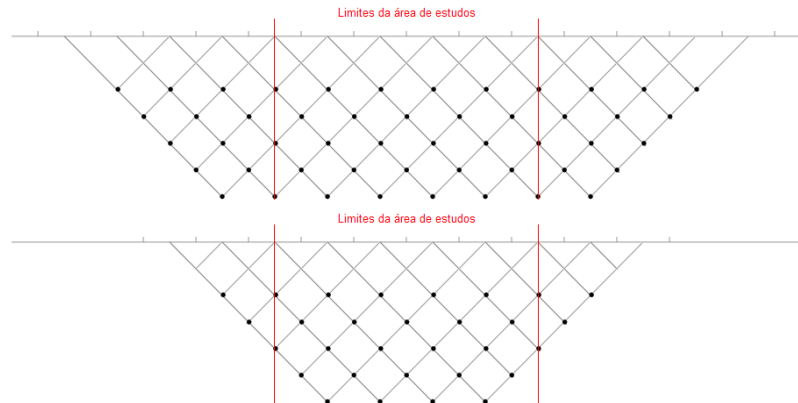
Linha	Extensão (m)	Espaçamento de dipolos (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
			Inicial		Final	
0	70	5	229.168,087	7.529.896,766	229.229,001	7.529.931,274
1	54	3	229.173,399	7.529.905,683	229.220,361	7.529.932,287
2			229.174,692	7.529.903,478	229.221,657	7.529.930,081
3			229.175,986	7.529.901,273	229.222,953	7.529.927,876
4			229.177,279	7.529.899,068	229.224,248	7.529.925,670
5			229.178,572	7.529.896,863	229.225,544	7.529.923,465

**Tabela 7.5:** Dados gerais dos IE pós-infiltração executados na Área 1.

Linha	Extensão (m)	Espaçamento de dipolos (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
			Inicial		Final	
A	34	2	226.778,595	7.514.728,210	226.778,595	7.514.762,210
B			226.782,595	7.514.728,210	226.782,595	7.514.762,210
Referência			226.786,595	7.514.728,210	226.786,595	7.514.762,210

**Tabela 7.6:** Dados gerais dos IE pós-infiltração executados na Área 2.

Linha	Extensão (m)	Espaçamento de dipolos (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
			Inicial		Final	
A	34	2	229.177,424	7.529.906,711	229.206,984	7.529.923,438
B			229.179,389	7.529.903,241	229.208,952	7.529.919,969
Referência			229.181,356	7.529.899,771	229.210,917	7.529.916,499



**Figura 7.6:** Acima: os limites da área de estudos estão inseridos totalmente na seção. Abaixo: os limites da mesma área não são completamente abrangidos no nível 5.



**Figura 7.7:** Detalhe da tela de configuração do modo IP do resistivímetro ABEM TERRAMETER SAS4000.

Os parâmetros utilizados para o método de IP, em ambas, as fases são apresentados na Tabela 7.7. Na fase pós-infiltração, com vistas à otimização da relação sinal/ruído, alguns parâmetros foram alterados.

**Tabela 7.7:** Parâmetros de configuração do modo IP do resistivímetro ABEM SAS 4000.

Parâmetro	Descrição	Fase	
		Pré	Pós
<i>Output</i>	Corrente de saída	10mA	200mA
<i>Time on (off)</i>	Duração de cada ciclo ligado/desligado	1,00s	2,00s
<i>Initial delay</i>	Intervalo de tempo antes de iniciar a medição	0,10s	0,10s
<i>Base interval</i>	Duração da janela de medida	100ms	200ms
<i>Increment</i>	Fator de incremento da duração das janelas de medida	1	1
<i>Nº of intervals</i>	Número de intervalos	1	2

Para a realização das medidas de cargabilidade, foram empregados eletrodos do tipo não polarizáveis, com eletrodo metálico de cobre (Cu) e solução saturada de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) (ver item 2.3).

### 7.1.3.3 Imageamentos Eletromagnéticos (IEM)

Os IEM foram executados em ambas as fases do projeto para a aquisição dos dados de condutividade elétrica. Na fase pré-infiltração (itens 8.2.3 e 9.2.3), foram executadas 5 linhas de imageamentos eletromagnéticos, coincidentes com as 5 linhas de imageamentos elétricos com abertura de dipolo de 3m (Tabelas 7.8 e 7.9). Na fase pós-infiltração (itens 8.5.2 e 9.5.2), aumentou-se para 6 o número de linhas executadas, cujas localizações passaram a coincidir com as linhas de SP (Tabela 7.10 e 7.11).

**Tabela 7.8:** Dados gerais dos IEM pré-infiltração executados na Área 1.

Linha	Extensão (m)	Intervalo entre 2 medidas consecutivas (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
			Inicial		Final	
1	20	2	226.777,595	7.514.740,210	226.777,595	7.514.760,210
2			226.780,095	7.514.740,210	226.780,095	7.514.760,210
3			226.782,595	7.514.740,210	226.782,595	7.514.760,210
4			226.785,095	7.514.740,210	226.785,095	7.514.760,210
5			226.787,595	7.514.740,210	226.787,595	7.514.760,210

**Tabela 7.9:** Dados gerais dos IEM pré-infiltração executados na Área 2.

Linha	Extensão (m)	Intervalo entre 2 medidas consecutivas (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
			Inicial		Final	
1	20	2	229.187,365	7.529.913,482	229.204,755	7.529.923,322
2			229.188,594	7.529.911,314	229.205,984	7.529.921,154
3			229.189,823	7.529.909,145	229.207,213	7.529.918,985
4			229.191,052	7.529.906,976	229.208,442	7.529.916,816
5			229.192,281	7.529.904,808	229.209,668	7.529.914,647

**Tabela 7.10:** Dados gerais dos IEM pós-infiltração executados na Área 1.

Linha	Extensão (m)	Intervalo entre 2 medidas consecutivas (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
			Inicial		Final	
1	10	1	226.777,595	7.514.740,210	226.777,595	7.514.750,210
2			226.779,595	7.514.740,210	226.779,595	7.514.750,210
3			226.781,595	7.514.740,210	226.781,595	7.514.750,210
4			226.783,595	7.514.740,210	226.783,595	7.514.750,210
5			226.785,595	7.514.740,210	226.785,595	7.514.750,210
6			226.787,595	7.514.740,210	226.787,595	7.514.750,210

Tabela 7. 11: Dados gerais dos IEM pós-infiltração executados na Área 2.

Linha	Extensão (m)	Intervalo entre 2 medidas consecutivas (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
			Inicial		Final	
1	10	1	229.187,365	7.529.913,482	229.196,060	7.529.918,402
2			229.188,349	7.529.911,747	229.2197,043	7.529.916,667
3			229.189,332	7.529.910,012	229.198,026	7.529.914,932
4			229.190,315	7.529.908,277	229.199,009	7.529.913,197
5			229.191,298	7.529.906,543	229.199,992	7.529.911,462
6			229.192,281	7.529.904,808	229.200,975	7.529.909,727

O condutímetro empregado em todas as ocasiões foi o GEONICS EM31-MK2, de fabricação canadense (Figura 7.8). Este equipamento efetua medidas de condutividade elétrica por meio de indução de campos eletromagnéticos no solo empregando a frequência fixa de 9,8kHz. Duas profundidades de investigação podem ser exploradas: até 3m usando a orientação DMH (Dipolo Magnético Horizontal) e até 6m usando a orientação DMV (Dipolo Magnético Vertical). Além disso, conta com um *data logger* capaz de armazenar até 6 milhões de leituras de duas componentes (condutividade e *inphase*) com informações de GPS ou até 8 milhões de leituras de duas componentes sem informações de GPS.



Figura 7.8: Condutímetro GEONICS EM31-MK2. À esquerda, acima: painel de controle. À esquerda, abaixo: em operação no campo. À direita: é possível visualizar o *data logger* na mão do operador.

#### 7.1.3.4 Levantamento de SP

Os dados de potencial espontâneo (SP) foram adquiridos utilizando-se a Técnica dos Potenciais. Esta técnica foi executada nas duas fases do projeto e contemplou 66 estações de

medidas distribuídas regularmente em ambas as áreas de estudos (ver itens 8.2.4, 8.5.3, 9.2.4 e 9.5.3) (Tabelas 7.12 a 7.15).

**Tabela 7.12:** Dados gerais dos ensaios de SP pré-infiltração executados na Área 1.

Linha	Extensão (m)	Intervalo entre 2 medidas consecutivas (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
			Inicial		Final	
1	10	1	226.777,595	7.514.740,210	226.777,595	7.514.760,210
2			226.779,595	7.514.740,210	226.779,595	7.514.760,210
3			226.781,595	7.514.740,210	226.781,595	7.514.760,210
4			226.783,595	7.514.740,210	226.783,595	7.514.760,210
5			226.785,595	7.514.740,210	226.785,595	7.514.760,210
6			226.787,595	7.514.740,210	226.787,595	7.514.760,210

**Tabela 7.13:** Dados gerais dos ensaios de SP pré-infiltração executados na Área 2.

Linha	Extensão (m)	Intervalo entre 2 medidas consecutivas (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
			Inicial		Final	
1	10	1	229.187,365	7.529.913,482	229.204,754	7.529.923,321
2			229.188,349	7.529.911,747	229.205,737	7.529.921,586
3			229.189,332	7.529.910,012	229.206,719	7.529.919,851
4			229.190,315	7.529.908,277	229.207,702	7.529.918,116
5			229.191,298	7.529.906,543	229.208,685	7.529.916,382
6			229.192,281	7.529.904,808	229.209,668	7.529.914,647

**Tabela 7.14:** Dados gerais dos ensaios de SP pós-infiltração executados na Área 1.

Linha	Extensão (m)	Intervalo entre 2 medidas consecutivas (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
			Inicial		Final	
1	10	1	226.777,595	7.514.740,210	226.777,595	7.514.750,210
2			226.779,595	7.514.740,210	226.779,595	7.514.750,210
3			226.781,595	7.514.740,210	226.781,595	7.514.750,210
4			226.783,595	7.514.740,210	226.783,595	7.514.750,210
5			226.785,595	7.514.740,210	226.785,595	7.514.750,210
6			226.787,595	7.514.740,210	226.787,595	7.514.750,210

**Tabela 7.15:** Dados gerais dos ensaios de SP pós-infiltração executados na Área 2.

Linha	Extensão (m)	Intervalo entre 2 medidas consecutivas (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)
			Inicial		Final	
1	10	1	229.187,365	7.529.913,482	229.196,060	7.529.918,402
2			229.188,349	7.529.911,747	229.2197,043	7.529.916,667
3			229.189,332	7.529.910,012	229.198,026	7.529.914,932
4			229.190,315	7.529.908,277	229.199,009	7.529.913,197
5			229.191,298	7.529.906,543	229.199,992	7.529.911,462
6			229.192,281	7.529.904,808	229.200,975	7.529.909,727



Devido à natureza do ensaio, foram utilizados eletrodos não-polarizáveis (item 2.3). A correção de polarização do par de eletrodos foi efetuada antes e depois da aquisição de dados da área completa. O procedimento consiste em manter-se um dos eletrodos fixo (eletrodo de referência) e medir a diferença de potencial entre este e o eletrodo móvel, posicionado a poucos centímetros do primeiro. O potencial médio calculado é, então, dividido igualmente entre todas as medidas do conjunto. O eletrodo de referência foi posicionado cerca de 20m a montante do fluxo d'água subterrânea e da área de estudos.

Na fase pré-infiltração, o equipamento utilizado foi o módulo de medição de potencial do resistivímetro BISON 2390 (Figura 7.9). Este aparelho, de fabricação norte-americana, é capaz de efetuar leituras de potenciais de até 1999mV, possui somente um canal de leitura e pode realizar medidas de resistividade elétrica e de potencial espontâneo.



Figura 7.9: Módulo de medição de potencial BISON 2390 – R.

#### 7.1.4 Georreferenciamento com DGPS

O georreferenciamento dos ensaios geofísicos e de condutividade hidráulica foi realizado com o auxílio de um GPS diferencial da marca Trimble, com antena integrada GPS/MSK beacon, receptor Navigation Pathfinder Pro XR 12 e coletor Recon (Figura 7.10).

Para as sondagens elétricas verticais, foram obtidas as coordenadas somente do centro geométrico de cada ensaio, enquanto que para os imageamentos elétricos e eletromagnéticos, e para a técnica dos potenciais, o georreferenciamento foi executado para cada eletrodo e estação de medida, respectivamente. Devido à natureza pontual, os ensaios de condutividade hidráulica foram referenciados de modo análogo às SEV.



**Figura 7.10:** DGPS Trimble. À esquerda: receptor Navigation Pathfinder Pro XR 12 (painel frontal – acima – e painel traseiro – abaixo) (TRIMBLE, 2001, p.40 e 42). Ao centro: em operação no campo. À direita, acima: antena integrada GPS/MSK beacon (TRIMBLE, 2001, p.11). À direita, abaixo: coletor Recon (<http://www.trimble.com>).

## 7.2 Processamento dos dados

### 7.2.1 Sondagens Elétricas Verticais

Os dados de resistividade obtidos nas SEV foram processados no *software* Interpex IX1D v. 2.18 (INTERPEX LIMITED, 2009). Entre outros recursos, a modelagem dos dados pode ser feita utilizando dois métodos: o direto e inverso.

No método direto admite-se um modelo e uma curva teórica iniciais, baseados em informações geológicas prévias da subsuperfície, os quais são gradativamente ajustados aos dados de campo pelo usuário, modificando os parâmetros resistividade e espessura das camadas, até que o modelo ajustado seja julgado satisfatório.

Esse método baseia-se na função transformada da resistividade (GANDOLFO, 2007, p.65), que pode ser descrita como uma transformação T, do tipo  $F=T(x)$ , onde “x” corresponde ao vetor que contém o conjunto de parâmetros do modelo da subsuperfície (resistividade e espessura) e “F” é a resposta deste modelo. A transformação “T”, que descreverá matematicamente o processo físico observado poderá ser linear ou não-linear. O modelo inicial necessário para as iterações subsequentes não precisa, necessariamente, ser fornecido pelo usuário.

No método inverso assume-se um modelo de subsuperfície unidimensional – 1D –, onde os valores dos parâmetros variam somente com a profundidade. Entendem-se como parâmetros do modelo a resistividade verdadeira e a espessura da camada. Por convenção, assume-se um meio planoestratificado – isto é, constituído por  $n$  camadas horizontais lateralmente infinitas, homogêneas e isotrópicas –, onde a resistividade elétrica varia apenas com a profundidade (GANDOLFO, 2007, p.66; LOWRIE, 1997, p.216).

O objetivo da inversão geofísica é a determinação dos parâmetros do modelo a partir de uma tentativa de ajuste da resposta do modelo aos dados observados, dentro de um limite de erro pré-estabelecido. Entretanto, deve-se sempre ter em mente que os dados geofísicos reais são sempre numericamente finitos e entre eles sempre estarão presentes componentes que não podem ser explicadas em termos geológicos.

Assim sendo, a resposta do processo de inversão – o modelo gerado – nunca será única, isto é, existirá mais de uma solução que satisfará os dados observados (GANDOLFO, 2007, p.64). Os modelos cujas resistividades calculadas se aproximem, em algum grau, dos valores medidos, para um mesmo conjunto de dados são chamados “modelos equivalentes”.

O *software* Interpex IX1D efetua a inversão dos dados pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), realizando um ajuste não-linear de parâmetros a partir do princípio de que o modelo direto é localmente linear. Assim, o problema é substituído por uma matriz operação:

$$o = c + Adp \quad \text{(Equação 7.1)}$$

onde  $o$  é o vetor conjunto de dados observados,  $c$  é o resultado do cálculo direto utilizando o modelo atual,  $A$  é a matriz Jacobiana das derivadas parciais das resistividades aparentes em relação aos parâmetros do modelo desconhecido e  $dp$  é um conjunto de parâmetros do modelo calculado (otimizações) que podem ajustar os dados observados a um caso ideal.

A matriz  $A$  é calculada alterando-se cada um dos parâmetros das camadas, por vez, e realizando um cálculo direto. Cada cálculo gera uma linha da matriz. Os parâmetros fixados não são afetados e as colunas referentes são zeradas (INTERPEX LIMITED, 2009).

O processo de inversão é iterativo, isto é, o processo é iniciado pelo cálculo da resposta teórica do modelo inicial – fornecido pelo usuário – que é comparada aos dados de campo, e o procedimento é repetido  $n$  vezes, até que o modelo gerado seja satisfatoriamente convergente com o conjunto de medidas (GANDOLFO, 2007, p.66). A inversão é realizada usando o método *Ridge Regression* (INMAN, 1975). Para cada iteração, uma correção do modelo é calculada usando o melhor fator de amortecimento disponível para essa iteração.

### 7.2.2 Imageamentos Elétricos

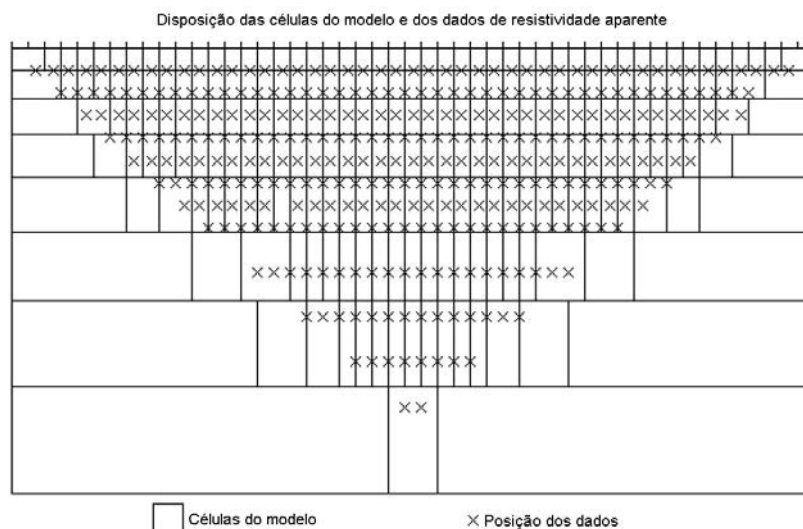
O *software* escolhido para o processamento dos dados dos IE foi o Res2Dinv v. 3.53 (GEOTOMO SOFTWARE, 2003), o qual foi concebido para efetuar a inversão de dados de resistividade e de cargabilidade.

Geralmente, as medidas de  $\rho$  e de  $\sigma$  obtidas com o método do IE são apresentadas e interpoladas sob a forma de pseudo-seções, as quais representam visualmente o comportamento destas grandezas em subsuperfície. Pseudo-seções são seções que representam a distribuição das resistividades no subsolo, onde a profundidade de cada ponto de investigação é meramente teórica, determinada por algoritmos com informações a respeito da geometria dos eletrodos.

Porém, as formas dos contornos dependem não somente dos valores medidos de  $\rho$  e de  $\sigma$ , mas também da geometria do arranjo utilizado. Assim, torna-se necessária a utilização de processos de inversão dos dados para que se obtenha uma seção de resistividade mais precisa e condizente com a realidade (GALLAS, 2000, p.53).

Essencialmente, todos os métodos de inversão buscam gerar um modelo cujas repostas representem, do modo mais fiel possível, os dados medidos em campo, tentando minimizar diferenças entre os valores calculados pelo programa e os valores medidos em campo. Também buscam modificar parâmetros que produzem características, desejadas ou não, no modelo resultante.

No método baseado em células, usado pelo Res2Dinv, os parâmetros são os valores de resistividade e de cargabilidade dos blocos do modelo, enquanto que os dados são os valores medidos de resistividade e de cargabilidade (Figura 7.11).



**Figura 7.11:** Modelo de células (ou blocos) utilizado pelo software Res2Dinv. Fonte: Geotomo Software (2003, p.2).

Este *software* baseia-se em um método iterativo que, partindo de um modelo inicial, procura encontrar um modelo sintético de subsuperfície que seja o mais fiel possível aos dados de  $\rho$  e de  $M$  obtidos em campo. O método iterativo de inversão utilizado pelo Res2Dinv é o *smoothness-constrained least-squares method*, ou método de mínimos quadrados com vínculo de suavidade, expresso pela relação matemática:

$$(J^t J + \mu F)d = J^t g + \mu F r \quad (\text{Equação 7.2})$$

onde  $F$  é a matriz de suavização,  $J$  é a matriz Jacobiana das derivadas parciais,  $r$  é o vetor contendo o logaritmo dos valores de resistividade/cargabilidade modelados,  $\mu$  é o fator de suavização,  $d$  é o vetor de perturbação do modelo e  $g$  é o vetor de discrepância.

O vetor de discrepância  $g$  expressa a diferença entre os valores calculados e os valores medidos em campo. Frequentemente, a magnitude do vetor discrepância é dada como um valor do erro médio quadrático – RMS (*root-mean-squared*). O método de inversão em questão tenta reduzir essa quantidade, buscando encontrar um modelo melhor após cada iteração.

O vetor de perturbação do modelo  $d$  indica a variação dos valores calculados do modelo usando a Equação 7.2. Essa equação tenta minimizar a combinação dos parâmetros: diferença entre os valores medidos e calculados, e irregularidade – ou rugosidade, isto é, a recíproca da suavização do modelo – dos valores medidos.

O fator de suavização  $\mu$  (*damping factor*) determina o peso atribuído à suavização do modelo durante o processo de inversão. Quanto maior o fator de suavização mais suavizado é o modelo. Porém, o erro médio quadrático (RMS) pode ser diretamente proporcional.

O método *smoothness-constrained least-squares* pode ser modificado de forma que forneça, em alguns casos, resultados melhores. Os elementos da matriz de suavização  $F$  podem ser modificados para que as variações verticais (ou horizontais) nos valores de resistividade modelados sejam ressaltadas no modelo resultante.

### 7.2.3 Imageamentos Eletromagnéticos e Técnica dos Potenciais

Os dados de condutividade elétrica (EM) e de potencial elétrico natural (SP) de ambas as áreas foram processados por meio do *software* Surfer v. 9.11 (GOLDEN SOFTWARE, 2010). Para o primeiro método, obteve-se, como produto final, mapas de condutividade elétrica para ambas as orientações das bobinas. No segundo método, os mapas resultantes retratam as distribuições de potenciais elétricos em subsuperfície. Dentre os diversos métodos de interpolação disponíveis no Surfer, optou-se pelo *Kriging* (ou Krigagem).

De acordo com Landim (2000, p.11), este método leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas. Para que seja possível estimar o valor da variável onde ele é desconhecido, é necessário que haja continuidade espacial entre os pontos com valores conhecidos. O algoritmo deste método de interpolação

utiliza distâncias ponderadas e estimação por médias móveis, onde os pesos adequados são obtidos por meio de um variograma.

O valor a ser estimado em um ponto qualquer do espaço –  $F(x,y)$  – é dado por:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (\text{Equação 7.3})$$

onde  $f_i$  é o valor obtido no ponto  $i$  e  $w_i$  é o peso designado ao ponto  $i$ .

No caso da krigagem normal (ou ordinária), emprega-se a média local dos pontos amostrados e, por isso, a média dos pesos atribuídos a cada ponto deve ser normalizada. Os valores dos pesos são calculados por meio de um conjunto de equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1 S(d_{11}) + w_2 S(d_{12}) + \dots + w_n S(d_{1n}) + \lambda = S(d_{1i}) \\ w_1 S(d_{21}) + w_2 S(d_{22}) + \dots + w_n S(d_{2n}) + \lambda = S(d_{2i}) \\ \vdots \\ w_1 S(d_{n1}) + w_2 S(d_{n2}) + \dots + w_n S(d_{nm}) + \lambda = S(d_{ni}) \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1 \end{array} \right\} \quad (\text{Equação 7.4})$$

onde  $S(d_{ij})$  é o valor da variância entre o ponto a ser estimado  $i$  e o ponto estimador  $j$ .

#### 7.2.4 Correção dos dados de DGPS

Os dados de DGPS armazenados na memória do coletor Recon foram descarregados para um computador tipo PC por meio de cabo USB, empregando-se o *software* GPS Pathfinder Office, versão 3.10, da Trimble Navigation Limited (TRIMBLE NAVIGATION LIMITED, 2005). Por meio deste *software* também foi executada a correção diferencial dos dados, utilizando-se os arquivos de correção obtidos pela antena da Santiago & Cintra da sede da empresa, localizada no Edifício Campo Belo Work Center, no município de São Paulo (SP). Após a correção, os dados apresentaram erros submétricos para todos os eixos.

Os dados de posicionamento e de elevação corrigidos foram utilizados na confecção dos mapas apresentados nesta obra e na correção topográfica dos *softwares* IX1D e Res2Dinv.

### 7.3 Aquisição de vinhaça

Inicialmente, o projeto previa a infiltração de vinhaça gerada no alambique do Sítio Altarugio. Devido a vários imprevistos ocorridos na produção da aguardente, percebeu-se que

o volume de vinhaça ali gerado não seria capaz de suprir a demanda necessária do projeto. Por isso, a vinhaça foi adquirida na Usina Granelli, localizada na zona rural do município de Charqueada (SP) (Figura 7.12).



**Figura 7.12:** Vista geral da Usina Granelli, no município de Charqueada (SP).

Além do maior volume de vinhaça disponível para retirada na usina (praticamente limitado somente pela capacidade de carga do veículo utilizado), também foi fornecida uma cópia dos resultados de análises físico-químicas executadas em uma amostra de vinhaça gerada no local. As análises foram feitas pelo laboratório Bioagri Ambiental, unidade de Piracicaba (SP). Um resumo dos resultados obtidos nesta análise é apresentado na Tabela 8.6. No Anexo II encontra-se uma cópia do material original fornecido pelo laboratório.

A vinhaça foi coletada por meio de baldes e galões plásticos a partir de um tubo condutor que despeja o resíduo em uma grande lagoa de resfriamento e armazenamento (Figura 7.13). Um sistema de bombas é responsável pelo enchimento de tanques transportados por caminhões até o local da fertirrigação (Figuras 7.14 a 7.16).



**Figura 7.13:** Coleta de vinhaça na Usina Granelli.



**Figura 7.14:** Vista da lagoa de armazenamento de vinhaça da Usina Granelli. É possível notar o tubo condutor por onde a vinhaça é trazida desde a usina e parte do revestimento impermeabilizante de PAD da lagoa.



**Figura 7.15:** Enchimento de uma carreta-tanque com vinhaça.



**Figura 7.16:** Aplicação de vinhaça na lavoura canieira por meio de canhão hidráulico.



#### 7.4 Valas de infiltração

Em ambas as áreas de estudo foram abertas duas valas, cada uma medindo aproximadamente 0,45m x 0,45m x 2,00m, resultando em um volume próximo a 405 litros (Figuras 7.17 e 7.18).



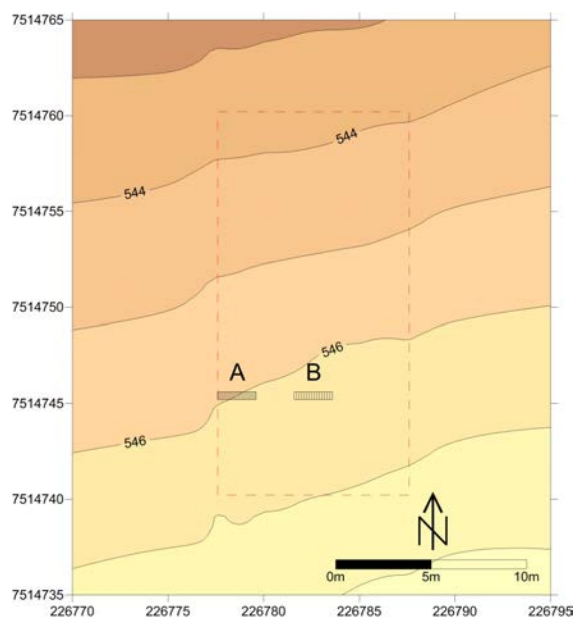
**Figura 7.17:** Abertura das valas de infiltração na Área 1.



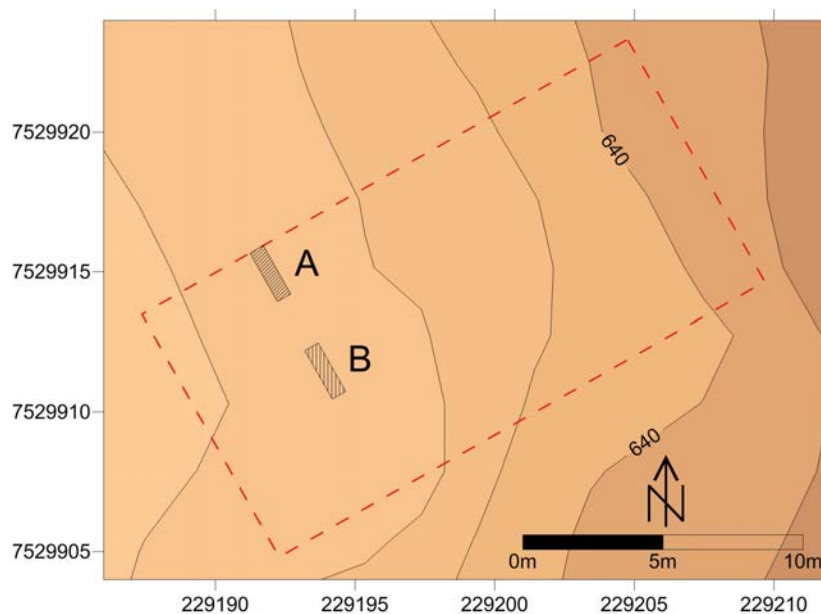
**Figura 7.18:** Abertura das valas de infiltração na Área 2.

A vala A foi posicionada no extremo esquerdo das áreas de estudos, enquanto que a vala B ocupou a porção central. A distância entre elas é de 2m e ambas localizam-se 5m à jusante do limite superior das áreas (Figura 7.19 e 7.20).

A localização das valas obedeceu às curvas de nível do terreno de modo que, no momento em que fosse depositada, a vinhaça fosse absorvida uniformemente pelo solo e não extravasasse pelas bordas, ocasionando fluxo superficial.



**Figura 7.19:** Mapa de localização das valas na Área 1.



**Figura 7.20:** Mapa de localização das valas na Área 2.

## Capítulo 8 – Área 1: Resultados e Discussões

### 8.1 Ensaios geotécnicos

#### 8.1.1 Condutividade hidráulica da zona não saturada

A Tabela 8.1 apresenta a localização e os valores de condutividade hidráulica da zona não saturada obtidos nos 8 ensaios executados na Área 1, conforme explicitado no item 7.1.1. Os valores encontrados são característicos de sedimentos siltosos/argilosos, tais como os ocorrentes na Formação Corumbataí.

Estes resultados também podem ser classificados segundo o grau de permeabilidade e o tipo de solo predominante, propostos por Terzaghi e Peck (1973, p.53) e Mello e Teixeira (1967, p.64). Portanto, de acordo com a Tabela 8.2, a condutividade hidráulica da zona não saturada da Área 1 é classificada como baixa.

**Tabela 8.1:** Localização dos ensaios e respectivos valores de condutividade hidráulica, para a Área 1.

Ensaio	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	K (cm/s)	K (m/dia)
K1	226.777,595	7.514.740,210	$2,56 \cdot 10^{-5}$	0,02
K2	226.777,595	7.514.750,210	$2,02 \cdot 10^{-4}$	0,17
K3	226.777,595	7.514.760,210	$1,76 \cdot 10^{-4}$	0,15
K4	226.787,595	7.514.760,210	$1,08 \cdot 10^{-5}$	0,01
K5	226.787,595	7.514.750,210	$7,65 \cdot 10^{-4}$	0,66
K6	226.787,595	7.514.740,210	$6,80 \cdot 10^{-4}$	0,59
K7	226.782,595	7.514.745,210	$3,52 \cdot 10^{-5}$	0,03
K8	226.782,595	7.514.755,210	$1,98 \cdot 10^{-4}$	0,17
<b>Média</b>			<b><math>2,62 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b>0,23</b>

**Tabela 8.2:** Classificação da condutividade hidráulica da zona não saturada.

K (cm/s)	Grau de permeabilidade*	Tipo de solo+
$10^9$ a 1	Alta	Pedregulhos
1 a $10^{-1}$		Areias
$10^{-1}$ a $10^{-3}$	Média	<b>Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos</b>
$10^{-3}$ a $10^{-5}$	<b>Baixa</b>	
$10^{-5}$ a $10^{-7}$	Muito baixa	
$> 10^{-7}$	Praticamente impermeável	Argilas

\*Terzaghi e Peck (1973, p.53); +Mello e Teixeira (1967, p.64).

#### 8.1.2 Ensaios de peneiramento

As amostras de solo coletadas no fundo dos furos abertos para os ensaios de condutividade hidráulica foram submetidas a ensaios de peneiramento e análise granulométrica, possibilitando a determinação da fração silte+argila – principais frações granulométricas da Formação Corumbataí – do solo da Área 1. Utilizou-se como parâmetro a

norma NBR 6502/95 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.3.

**Tabela 8.3:** Fração silte+argila obtida no ensaio de peneiramento para cada amostra coletada na Área 1.

Ensaio corresp.	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	Silte+argila (%)
K1	226.777,595	7.514.740,210	78,79
K2	226.777,595	7.514.750,210	77,03
K3	226.777,595	7.514.760,210	86,04
K4	226.787,595	7.514.760,210	87,14
K5	226.787,595	7.514.750,210	88,55
K6	226.787,595	7.514.740,210	85,49
K7	226.782,595	7.514.745,210	87,75
K8	226.782,595	7.514.755,210	87,31
<b>Média</b>			<b>84,76</b>

A condutividade hidráulica da zona não saturada é regida, entre outros fatores, pela fração granulométrica majoritária que constitui o solo em questão, além do material de preenchimento dos poros. Assim, os elevados teores de silte e argila das amostras (Tabela 8.3) podem justificar os reduzidos valores de condutividade hidráulica obtidos na Área 1 (Tabela 8.1).

## 8.2 Ensaios geofísicos pré-infiltração

Na fase pré-infiltração foram executados diversos ensaios geofísicos visando o conhecimento das propriedades geofísicas naturais locais (*background*), além da otimização da coleta de dados na fase posterior do projeto.

### 8.2.1 Sondagens Elétricas Verticais

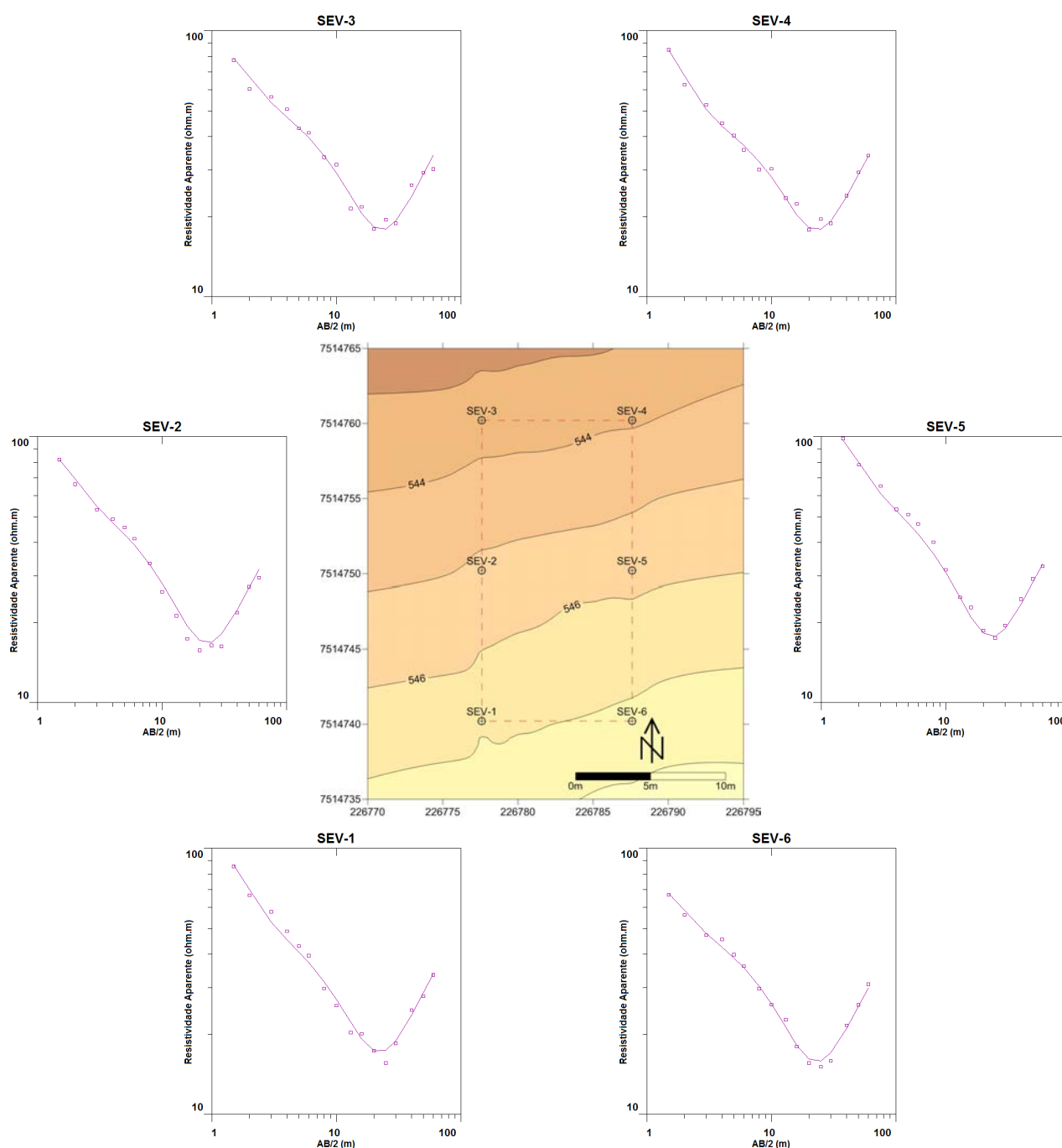
Foram executadas 6 Sondagens Elétricas Verticais (SEV), conforme ilustrado pela Figura 8.1 (ao centro). Os dados de resistividade elétrica obtidos em campo permitiram gerar, respectivamente, as 6 curvas mostradas na Figura 8.1, onde os caracteres (□) simbolizam os dados de campo e as linhas contínuas (—) representam as curvas de melhor ajuste, após o processamento.

O processamento dos dados e a interpretação dos resultados permitiram a elaboração de um modelo geoeletrico para a Área 1 composto por 5 camadas (Tabela 8.4), onde as 3 camadas superiores ( $23\Omega.m \leq \rho \leq 140\Omega.m$  – valores decrescentes com o aumento da profundidade) correspondem à zona não saturada e são constituídas por material alterado, predominantemente silto-argiloso, da Fm. Corumbataí. A redução de  $\rho$  com o aumento da profundidade é atribuída ao maior grau de saturação de água dos sedimentos devido à proximidade do nível freático.

Na camada 1,  $\rho > 90\Omega.m$  aparenta relação com o baixo teor de umidade do solo (zona de evapotranspiração) nos primeiros 30-40cm de profundidade.

A quarta camada ( $\rho_{m\acute{e}dia} \approx 4,75\Omega.m$ ) representa os sedimentos predominantemente silto-argilosos da Fm. Corumbataí saturados por água. O nível freático está situado a uma profundidade média de 8,6m e com fluxo na direção Norte.

A quinta camada ( $\rho_{m\acute{e}dia} \approx 230\Omega.m$ ) corresponde às rochas com pouco ou nenhum grau de alteração da Fm. Serra Geral.



**Figura 8.1:** Mapa de localização das SEV da Área 1 (ao centro) e suas respectivas curvas de campo (no entorno).

**Tabela 8.4:** Resumo do modelo geoeétrico proposto para a Área 1.

		SEV 1	SEV 2	SEV 3	SEV 4	SEV 5	SEV 6	Média	Interpretação	
Fm. Corumbataí	Camada 1	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	134,52	113,34	110,74	135,57	140,61	91,5	121,05	Solo de alteração da Fm. Corumbataí
		E (m)	0,69	0,74	0,7	0,68	0,73	0,71	0,71	
	Camada 2	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	44,55	46,34	46,65	42,32	51,05	42,12	45,5	Sedimentos predominantemente silto-argilosos úmidos (franja capilar)
		E (m)	2,79	2,95	2,81	2,81	2,9	2,9	2,86	
	Camada 3	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	25,56	24,97	27,84	28,47	28,42	23,81	26,51	Sedimentos predominantemente silto-argilosos insaturados
		E (m)	5,03	5,09	5,1	4,99	5,05	5,02	5,05	
	Camada 4	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	4,94	4,73	4,8	4,84	4,67	4,51	4,75	Sedimentos predominantemente silto-argilosos saturados (N.A)
		E (m)	6,41	6,45	6,25	6,27	6,19	6,53	6,35	
Fm. Serra Geral	Camada 5	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	251,19	209,7	258,8	229,09	225,2	196,03	228,33	Embasamento rochoso (basalto)
		E (m)	-	-	-	-	-	-	-	

Notas:  $\rho$  = resistividade elétrica; E = espessura.

### 8.2.2 Imageamentos Elétricos

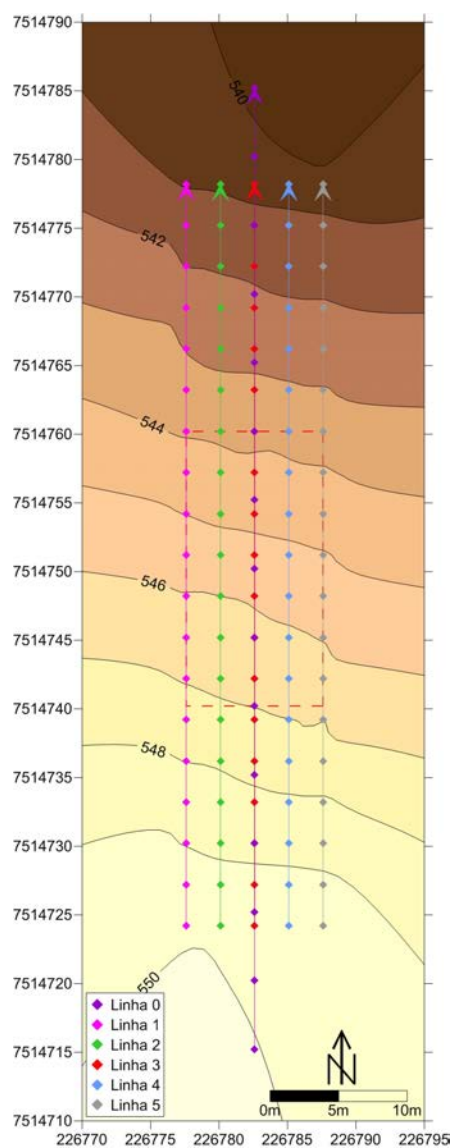
Foram executados 6 Imageamentos Elétricos (IE) empregando-se o arranjo Dipolo-Dipolo com 8 níveis de investigação para a coleta de dados de resistividade (ER) e de cargabilidade (IP), conforme a Figura 8.2.

As seções de resistividade das Linhas 1 a 5 (Figura 8.3) e da Linha 0 (Figura 8.5) apresentam um cenário semelhante ao modelo elaborado com os resultados das SEV. Na porção superior das seções ocorrem valores de resistividade da ordem de  $150\Omega.m$  e que tendem a decrescer com o aumento da profundidade, até o limiar de  $\rho \approx 20\Omega.m$ , interpretado, pelo contexto geológico local, como o nível freático. A faixa de valores onde  $\rho \leq 200\Omega.m$  foi associada aos sedimentos da Fm. Corumbataí; resistividades acima de  $200\Omega.m$ , que ocorrem majoritariamente na porção inferior das seções, foram associadas aos basaltos da Fm. Serra Geral.

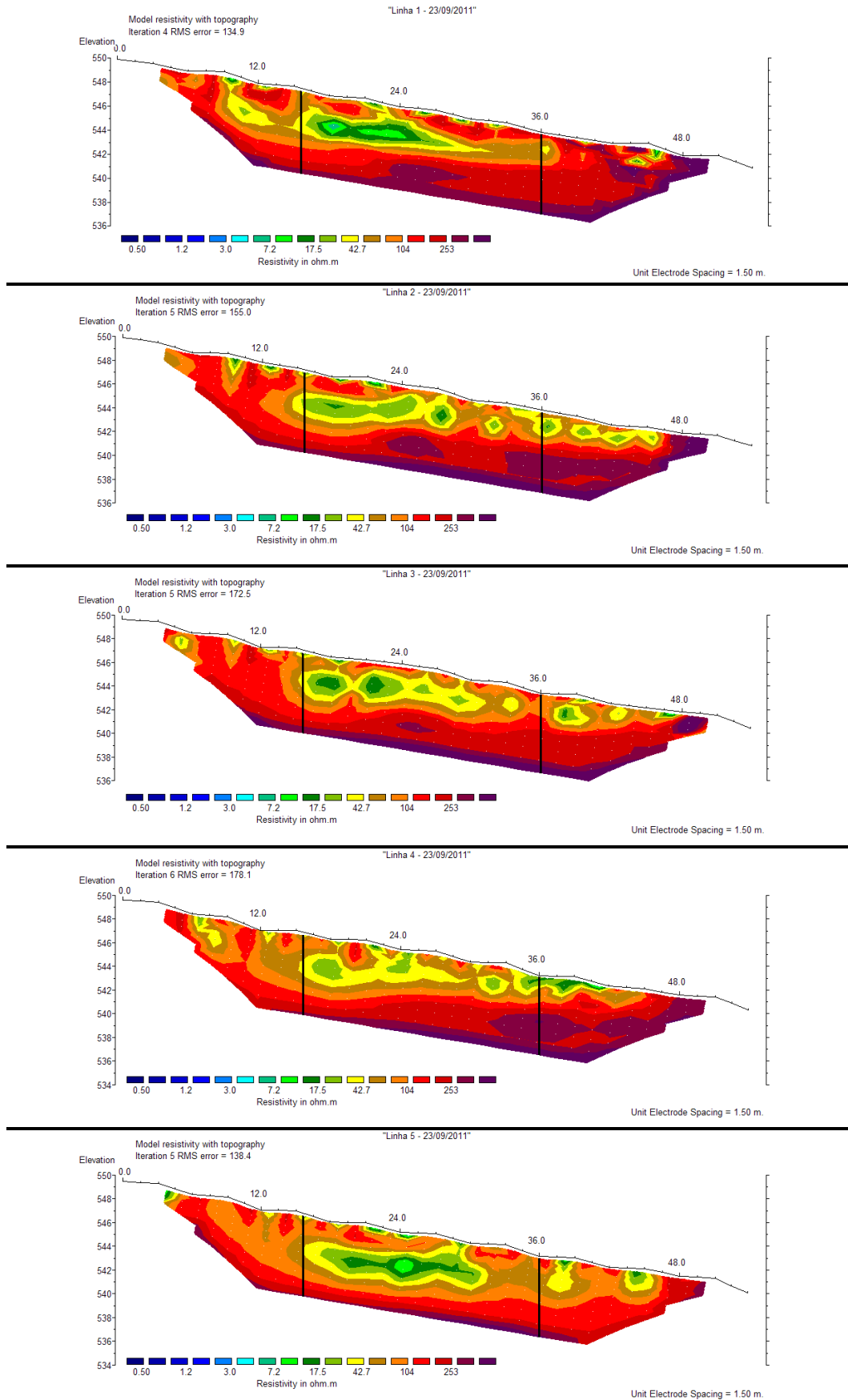
Em relação à cargabilidade (Figuras 8.4 e 8.6), foram definidos dois intervalos: (1)  $M \leq 45ms$  foram associados à Fm. Corumbataí; (2)  $M > 45ms$  correspondem à Fm. Serra Geral.

De modo geral, observa-se a elevação dos valores de cargabilidade à medida que a profundidade de investigação aumenta, possivelmente relacionada ao maior grau de saturação de água dos sedimentos.

Ambas as interpretações são amparadas por reconhecimentos de campo (ver item 6.1.2).

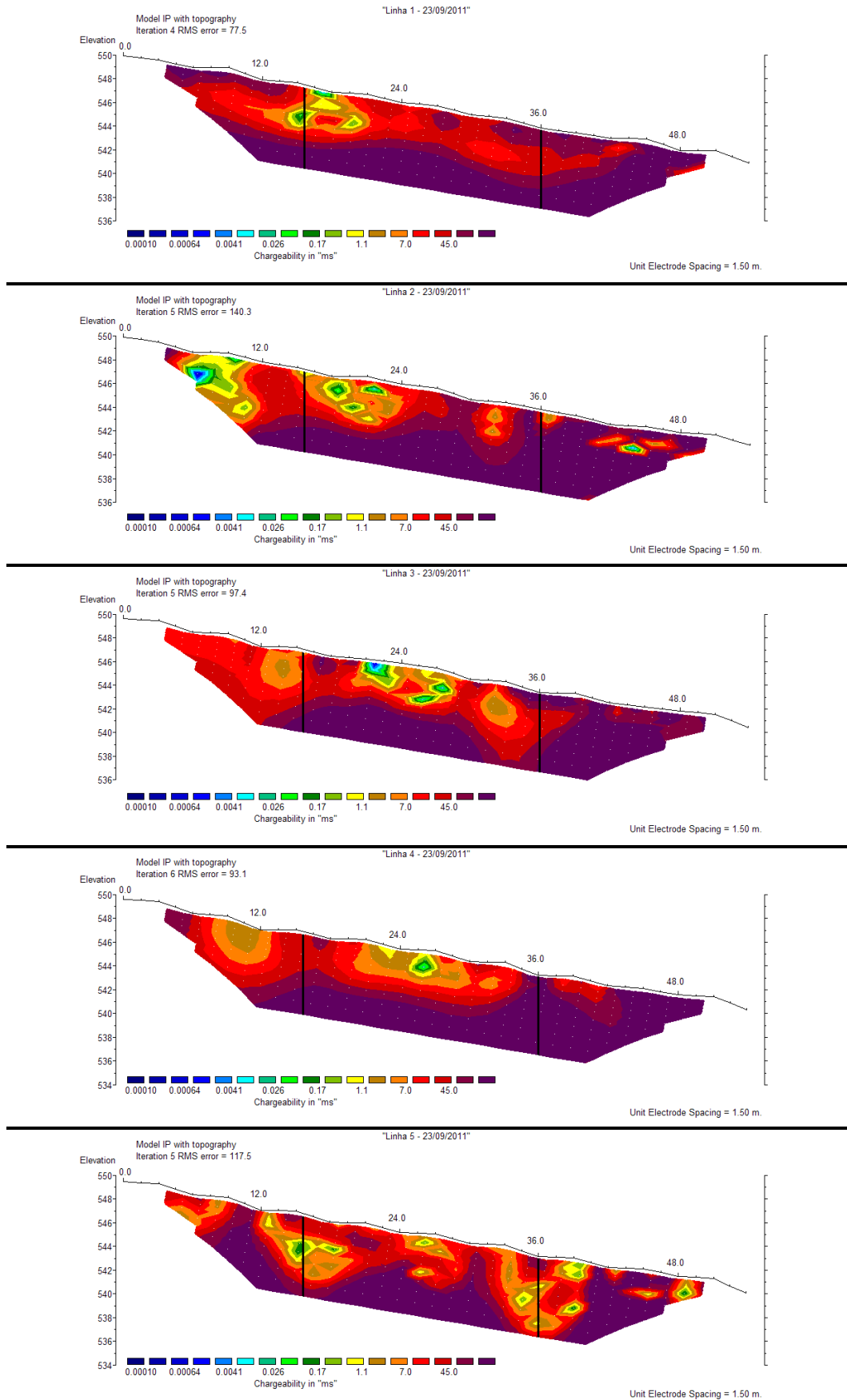


**Figura 8.2:** Mapa de localização dos IE pré-infiltração executados na Área 1.

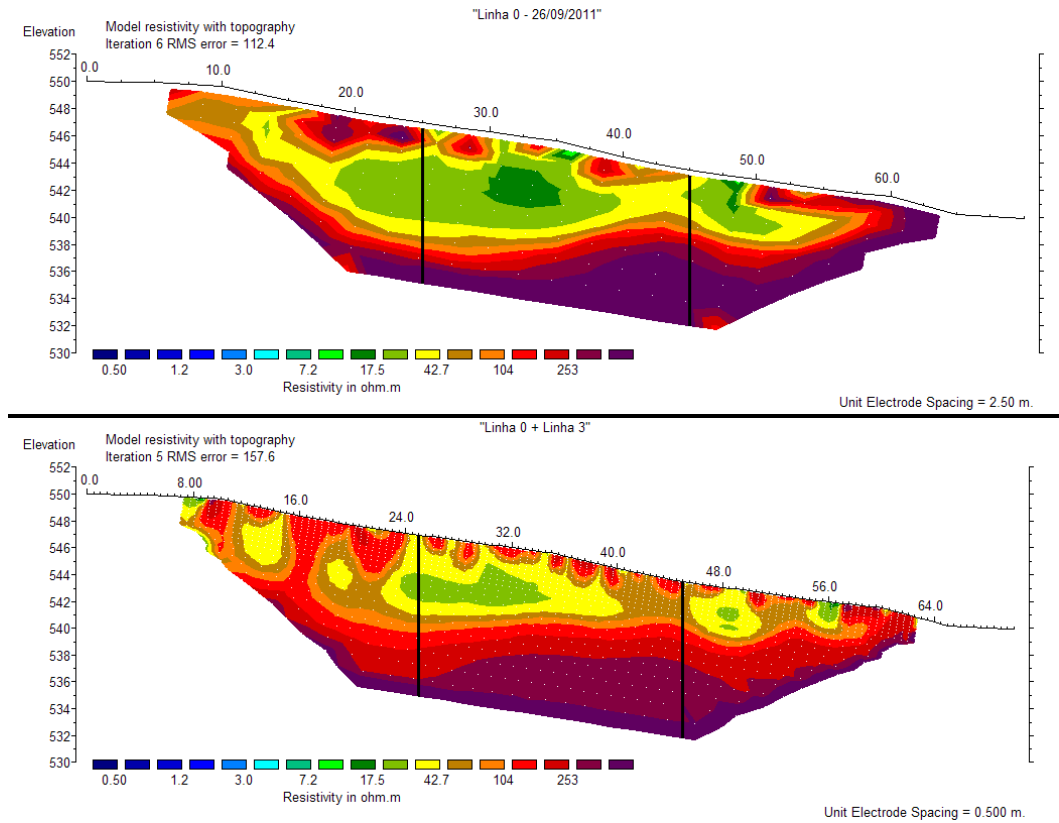


**Figura 8.3:** Seções de resistividade das Linhas 1 a 5 (pré-infiltração) da Área 1. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo. Abertura dos dipolos ( $x$ ) = 3m.

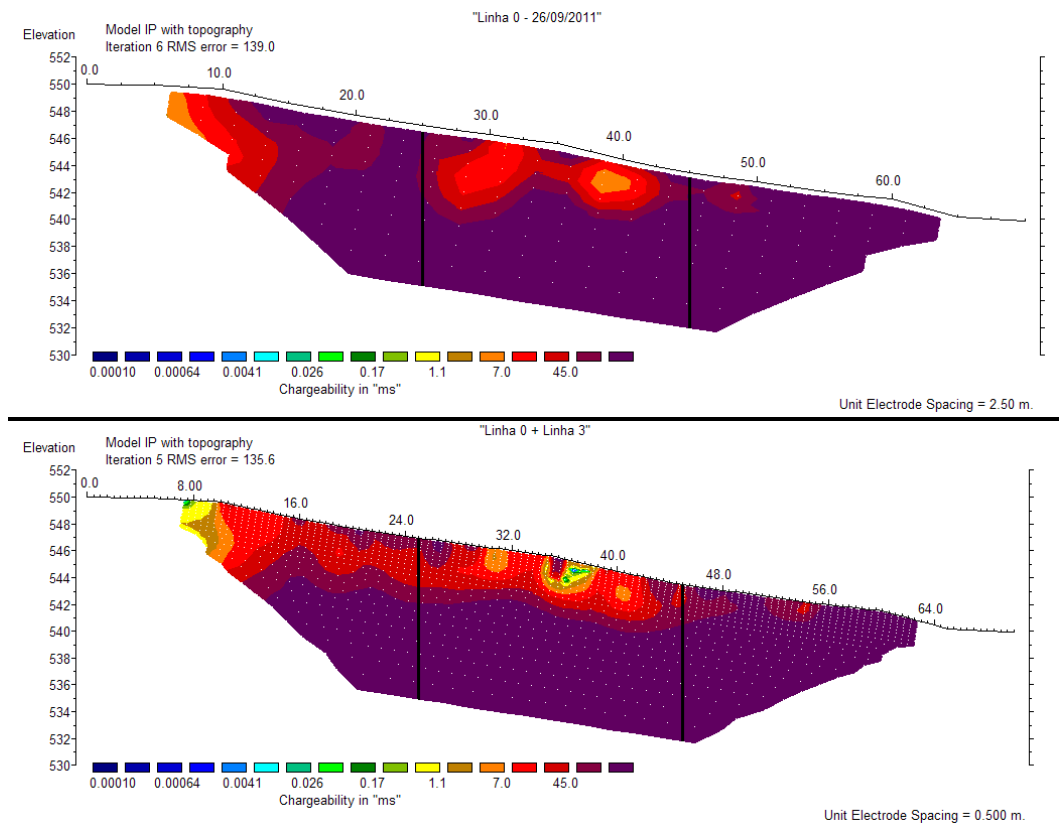




**Figura 8.4:** Seções de cargabilidade das Linhas 1 a 5 (pré-infiltração) da Área 1. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo. Abertura dos dipolos ( $x$ ) = 3m.



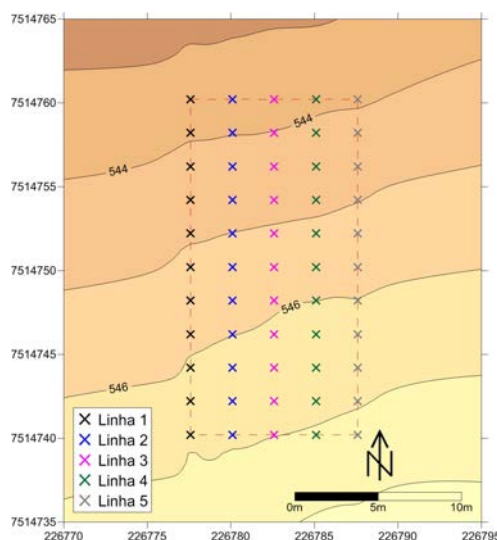
**Figura 8.5:** Acima: seção de resistividade da Linha 0. Abertura dos dipolos ( $x$ ) = 5m. Abaixo: seção de resistividade combinada pelas Linhas 0 e 3. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.



**Figura 8.6:** Acima: seção de cargabilidade da Linha 0. Abertura dos dipolos ( $x$ ) = 5m. Abaixo: seção de cargabilidade combinada pelas Linhas 0 e 3. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

### 8.2.3 Imageamentos Eletromagnéticos

A aquisição dos dados de condutividade elétrica ( $\sigma$ ) foi feita por meio de 5 linhas de imageamentos eletromagnéticos (IEM), conforme a Figura 8.7. As respectivas curvas de condutividade elétrica são apresentadas no Apêndice A.

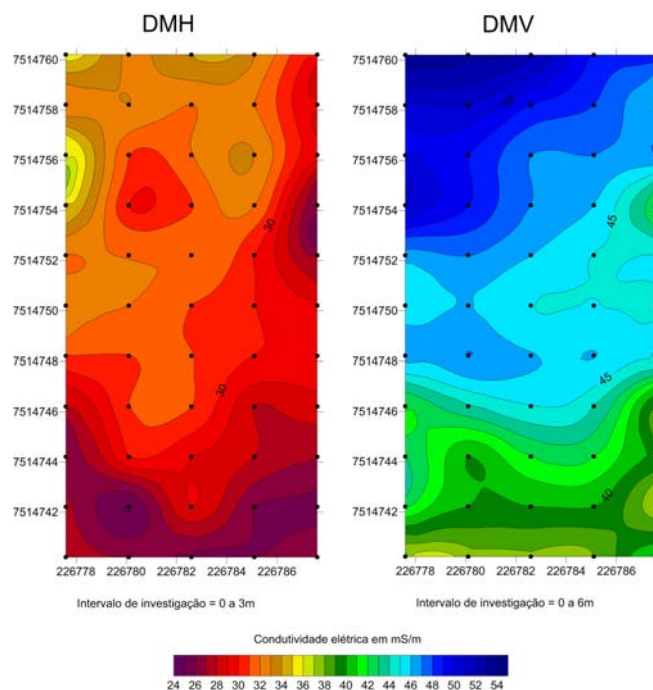


**Figura 8.7:** Mapa de localização dos IEM pré-infiltração executados na Área 1.

Foram empregadas as duas orientações das bobinas – Dipolo Magnético Horizontal (DMH) e Dipolo Magnético Vertical (DMV), resultando em duas profundidades teóricas de investigação: 0 a 3m e 0 a 6m, respectivamente.

Na Figura 8.8 é possível observar que os valores de condutividade elétrica no intervalo de 0-3m de profundidade são relativamente menores aos observados no intervalo 0-6m. Esse comportamento pode estar relacionado ao grau de umidade no solo em cada profundidade de investigação e/ou à maior proximidade do nível freático (em torno de 8,6m). Assim, a água subterrânea favorece o fluxo de corrente elétrica (gerada por indução pelo condutivímetro) e eleva os valores de condutividade elétrica. Estes resultados corroboram os obtidos por meio das SEV (item 8.21) e por meio dos IE (item 8.2.2).

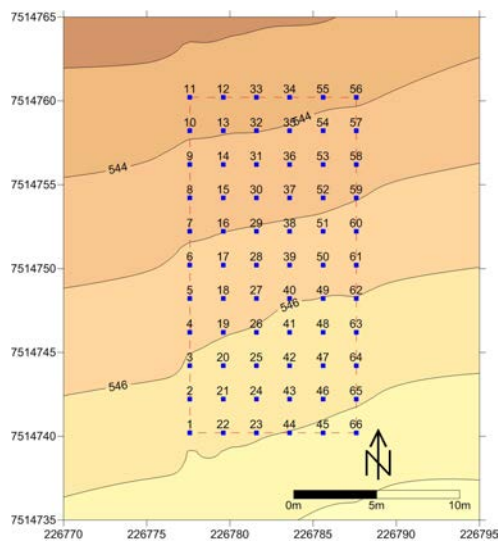
Outro ponto a ser destacado é a ocorrência de valores de  $\sigma$  menores no extremo esquerdo em relação ao extremo direito das curvas da Figura A.1 (Apêndice A). Este fato também pode ser atribuído à profundidade do nível freático da área: a ocorrência de diferentes volumes de água intersticial ao longo das linhas ocasiona a flutuação da condutividade elétrica medida. Por isso, os valores registrados no início de cada linha (extremo esquerdo), onde o N.A. encontra-se mais profundo, são menores do que aqueles registrados ao final de cada uma delas (extremo direito), com o N.A. mais próximo à superfície do terreno.



**Figura 8.8:** Mapas de condutividade elétrica (pré-infiltração) para a Área 1.

#### 8.2.4 Potencial Elétrico Natural

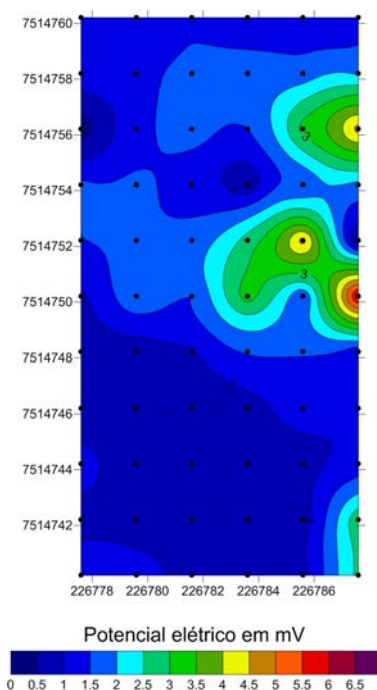
Os dados de potencial espontâneo (SP) foram obtidos por meio da Técnica dos Potenciais (ou de Base Fixa), perfazendo um total de 66 estações de medida espaçadas a cada 2m em ambos os eixos (x e y) (Figura 8.9).



**Figura 8.9:** Mapa de localização das estações de SP da Área 1.

Os dados coletados foram empregados na confecção de um mapa de potencial elétrico natural (Figura 8.10). Este mapa exhibe um cenário com baixa variação de valores, ocorrendo

majoritariamente potenciais de até 2mV. Atribui-se as anomalias com potenciais acima de 2mV a elevações regionalizadas da resistência de contato entre solo e eletrodo, possivelmente relacionadas à menor umidade do solo.



**Figura 8.10:** Mapa de potencial espontâneo (pré-infiltração) da Área 1.

### 8.3 Análises físico-químicas

Logo após a conclusão da fase pré-infiltração dos ensaios geofísicos, procedeu-se a análise físico-química de amostras de solo e da vinhaça a ser infiltrada na Área 1, visando a determinação do volume de contaminante a ser infiltrado de acordo com o estabelecido pela norma P4.231 (CETESB, 2006).

#### 8.3.1 Amostras de solo

Foram coletadas 20 amostras em pontos aleatoriamente escolhidos dentro da área de estudos. A profundidade de amostragem contemplou os primeiros 20cm de solo. As amostras foram homogêneas dentro um recipiente limpo e deste total retirou-se uma fração de 1kg, a qual foi enviada ao Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” em Piracicaba (SP). Solicitou-se a análise tipo “SQ5.1”, específica para a norma P4.321. Os resultados obtidos nestas análises são apresentados na Tabela 8.5. No Anexo I encontra-se uma cópia do material original fornecido pelo laboratório.

**Tabela 8.5:** Resultados das análises físico-químicas executadas em amostras de solo da Área 1.

<b>Item</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
pH	6	-
Matéria orgânica (M.O.)	52	-
Fósforo (P)	47	mg/dm <sup>3</sup>
Enxofre (S)	9	mg/dm <sup>3</sup>
Sódio (Na)	0,3	mmol/dm <sup>3</sup>
Potássio (K)	3,3	mmol/dm <sup>3</sup>
Cálcio (Ca)	36	mmol/dm <sup>3</sup>
Magnésio (Mg)	16	mmol/dm <sup>3</sup>
Alumínio (Al)	<1	mmol/dm <sup>3</sup>
Acidez potencial (H+Al)	25	mmol/dm <sup>3</sup>
Soma de bases trocáveis (SB)	54,8	mmol/dm <sup>3</sup>
Capacidade de troca catiônica (CTC)	79,8	mmol/dm <sup>3</sup>
Saturação da CTC por bases (V)	69	%
Saturação (m)	0	%
Ponto de saturação total (PST)	0	%

### 8.3.2 Amostra de vinhaça

Na ocasião da coleta de vinhaça, a diretoria da Usina Granelli forneceu uma cópia dos resultados de análises físico-químicas executadas em uma amostra de vinhaça gerada no local. As análises foram feitas pelo laboratório Bioagri Ambiental, unidade de Piracicaba (SP). Um resumo dos resultados obtidos nesta análise é apresentado na Tabela 8.6. No Anexo II encontra-se uma cópia do material original fornecido pelo laboratório.

**Tabela 8.6:** Resultados das análises físico-químicas executadas em amostras de vinhaça da Usina Granelli.

<b>Item</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
pH	3,37	-
Sólidos suspensos totais	3960	mg/L
Dureza calculada	1148	mg/L
Condutividade	1769	µS/cm
Nitrato (como N)	<10	mg/L
Nitrito (como N)	<2	mg/L
Nitrogênio amoniacal	2,1	mg/L
Nitrogênio Total Kjeldahl	144	mg/L
Sódio	14,5	mg/L
Cálcio	287	mg/L
Potássio	739	mg/L
Magnésio	105	mg/L
Sulfato	188	mg/L
Fósforo total	164022	µg/L
DBO	22436	mg/L
DQO	64310	mg/L

## 8.4 Infiltração da vinhaça

### 8.4.1 Cálculo do volume a ser infiltrado

O volume de vinhaça infiltrado na Área 1 foi calculado por meio da Equação 1.1, proposta na norma P4.231 da CETESB. A expressão matemática proposta possui três variáveis, as quais foram determinadas por meio das análises apresentadas no item 8.3, a saber:

- CTC = Capacidade de Troca Catiônica do solo =  $79,8\text{mmol}_c/\text{dm}^3 = 7,98\text{cmol}_c/\text{dm}^3$
- $k_s$  = concentração de potássio no solo =  $3,3\text{mmol}_c/\text{dm}^3 = 0,33\text{cmol}_c/\text{dm}^3$
- $k_{vi}$  = concentração de potássio na vinhaça =  $739\text{mg/L} = 0,739\text{ kg/m}^3$

Fazendo-se as devidas substituições na Equação 1.1, obteve-se o valor limite de  $60\text{L/m}^2$ , ou seja, 60 litros de vinhaça podem ser aplicados em cada metro quadrado da Área 1 sem que isto venha a causar a contaminação do solo.

### 8.4.2 Infiltração

A infiltração da vinhaça nas valas (Figura 8.11) ocorreu em duas etapas:

- **Etapa 1:** foram depositados 60L na vala A e 300L na vala B. O primeiro valor corresponde ao limite calculado no item 8.4.1; o segundo valor é 5 vezes superior ao limite calculado, volume suficiente para gerar uma região de contraste acentuado em termos de propriedades físicas.
- **Etapa 2:** somente na vala B foram depositados mais 900L visando a obtenção de uma pluma de contaminação plenamente detectável pelos métodos geofísicos empregados no projeto. Esta etapa mostrou-se necessária, pois não foi possível detectar a presença da vinhaça no solo após a primeira infiltração.

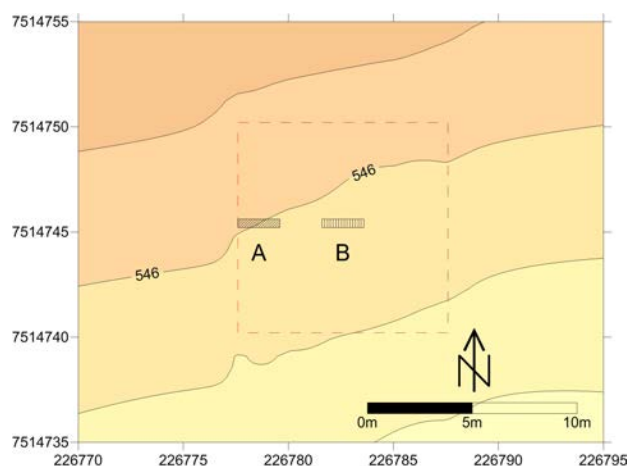


**Figura 8.11:** Infiltração de vinhaça na Área 1.

## 8.5 Ensaios geofísicos pós-infiltração

No dia imediatamente posterior à infiltração de 60L de vinhaça na vala A e de 300L na vala B foi iniciada a fase pós-infiltração de execução de ensaios geofísicos. Relativamente à fase pré-infiltração, algumas mudanças foram adotadas quanto às dimensões da área, às características e ao número de ensaios, aos equipamentos empregados e ao processamento dos dados. Estas mudanças propiciaram, principalmente, um maior detalhamento dos ensaios e a otimização dos trabalhos de campo.

Durante as três primeiras semanas do monitoramento, os ensaios geofísicos estenderam-se ao longo dos 20m do eixo maior da área. Entretanto, após os dados mostrarem contrastes restritos ao entorno das valas, o comprimento da área de estudos foi reduzido para os primeiros 10m do mesmo eixo (Figura 8.12). A largura da área não sofreu alterações.



**Figura 8.12:** Redução dos limites da área de estudos.

O intervalo de repetição dos ensaios adotado para a Área 1 foi de 1 semana, valor determinado a partir da condutividade hidráulica média local:  $2,62 \cdot 10^{-4}$  cm/s ou 0,23m/dia (item 8.1.1). Em teoria, determinado volume de líquido se infiltrado na área de estudos formaria uma pluma que se deslocaria à velocidade de 23cm por dia; em 7 dias, este volume teria se deslocado 1,61m, distância suficiente para que fosse possível detectá-la com os métodos escolhidos.

### 8.5.1 Imageamentos Elétricos

Nesta fase do projeto foram executadas 3 linhas de Imageamentos Elétricos (Figura 8.13). Duas delas foram executadas de modo a interceptar as valas A e B, recebendo as nomenclaturas respectivas de Linha A e Linha B. A terceira linha, denominada Linha de Referência, foi executada na porção Leste da área, em local isento de contaminação por

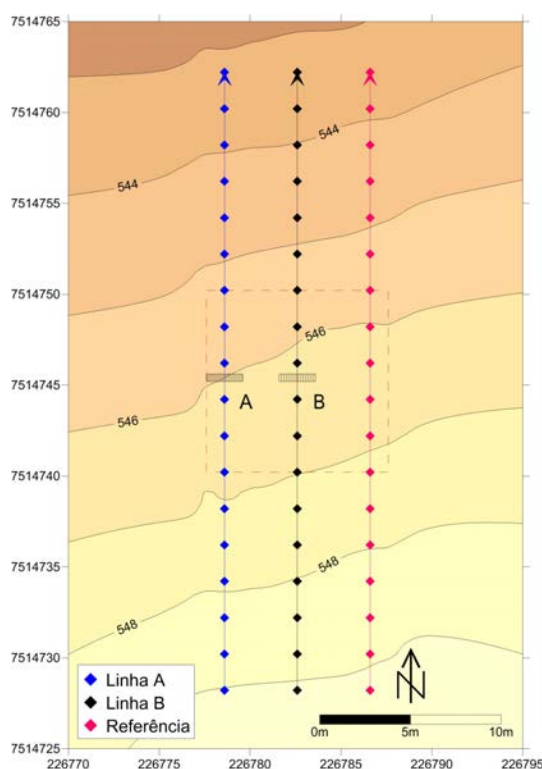


vinhaça. Esta última foi executada somente uma vez, enquanto que as outras foram repetidas sistematicamente durante oito semanas.

Assim como na fase pré-infiltração, as linhas de IE foram posicionadas de modo que os limites da área de estudo estivessem completamente inseridos na porção central das seções e em todos os níveis de investigação.

O arranjo Dipolo-Dipolo com 8 níveis de investigação foi novamente empregado, mas o espaçamento dos dipolos foi reduzido para 2m na intenção de se obter maior resolução lateral, de acordo com o nível de detalhes pretendido.

Os dados das linhas A e B coletados oito dias após a primeira infiltração foram desprezados em função da baixa confiabilidade dos mesmos.



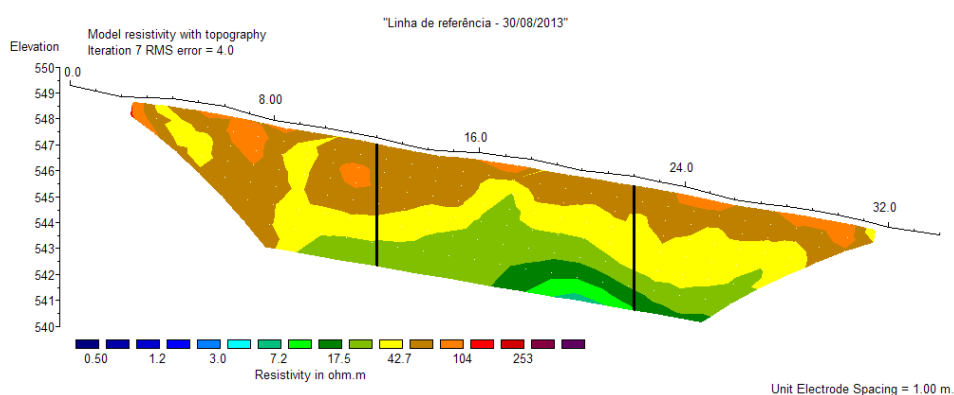
**Figura 8.13:** Mapa de localização dos IE pós-infiltração executados na Área 1.

### 8.5.1.1 Linha de referência

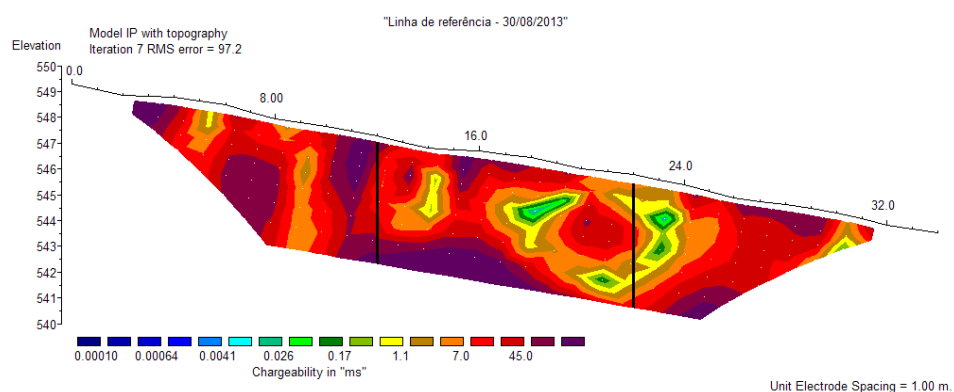
A seção de resistividade da linha de referência é apresentada na Figura 8.14. Próximo à superfície do terreno, predominam valores onde  $\rho \leq 100\Omega.m$ ; com o aumento da profundidade, estes tendem a decrescer até o limiar  $\rho \approx 7\Omega.m$ . Os maiores valores de resistividade na porção superficial podem ser reflexos do menor teor de água intersticial dos sedimentos devido à evapotranspiração. Quanto à base da sessão, os menores valores sugerem maior umidade dos sedimentos devido à proximidade do nível freático.

Comparando-se a Figura 8.14 às seções pré-infiltração das Figuras 8.3 e 8.5, percebe-se que são equivalentes. A diferença de amplitude de valores entre a fase anterior ( $7,2\Omega.m \leq \rho \leq 253\Omega.m$ ) e a fase atual ( $7,2\Omega.m \leq \rho \leq 104\Omega.m$ ) deve-se, possivelmente, ao pacote sedimentar investigado (menor profundidade de investigação na fase pós-infiltração) e aos distintos teores de umidade do solo na ocasião de cada aquisição dos dados.

Na Figura 8.15, observa-se que o parâmetro cargabilidade (M) apresenta comportamento semelhante ao da fase pré-infiltração (item 8.2.2), ocorrendo elevação dos valores à medida que a profundidade de investigação aumenta, provavelmente relacionada ao maior grau de saturação de água dos sedimentos.



**Figura 8.14:** Seção de resistividade da Linha de referência da fase pós-infiltração da Área 1. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

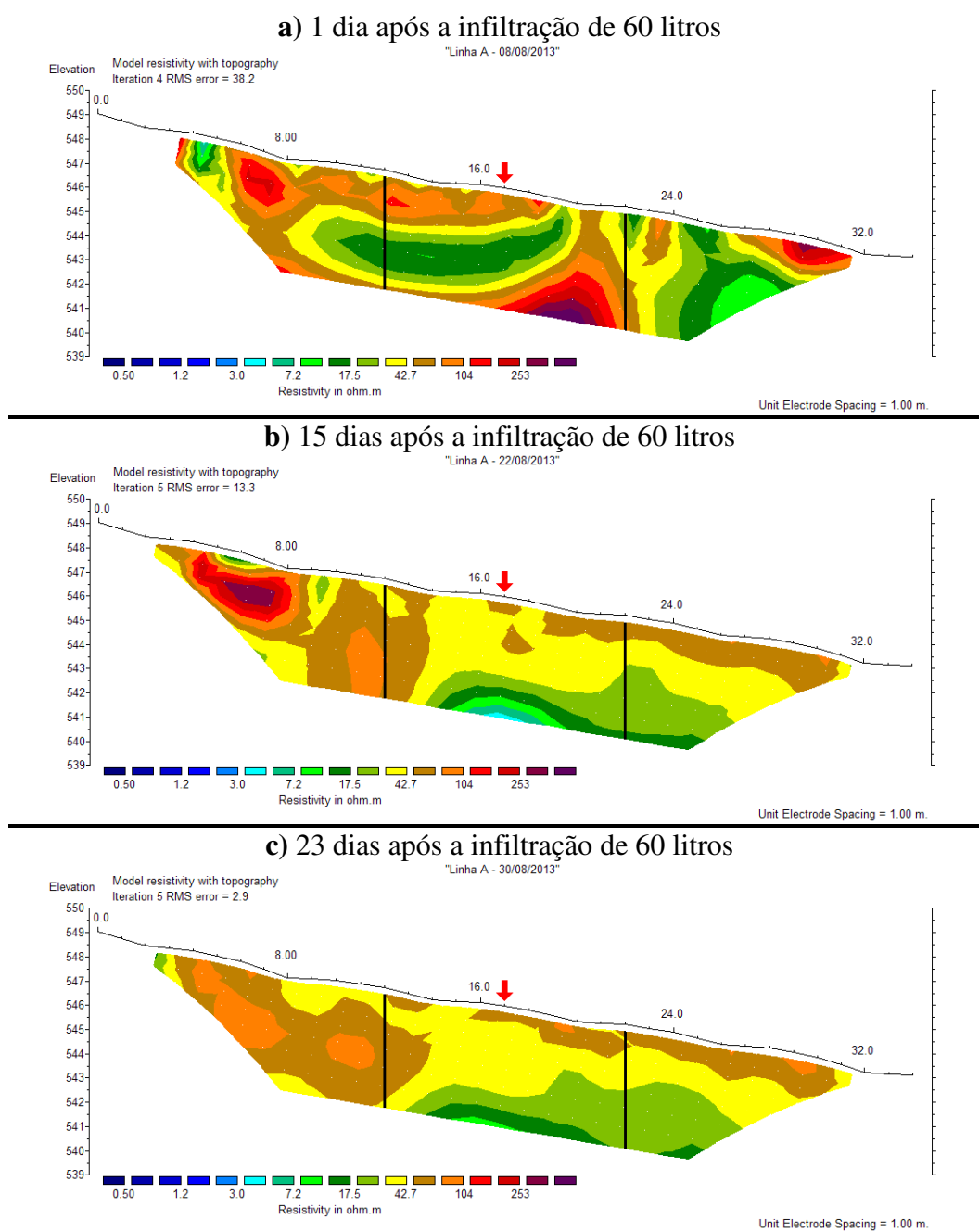


**Figura 8.15:** Seção de cargabilidade da Linha de referência da fase pós-infiltração da Área 1. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

### 8.5.1.2 Monitoramento: Linha A

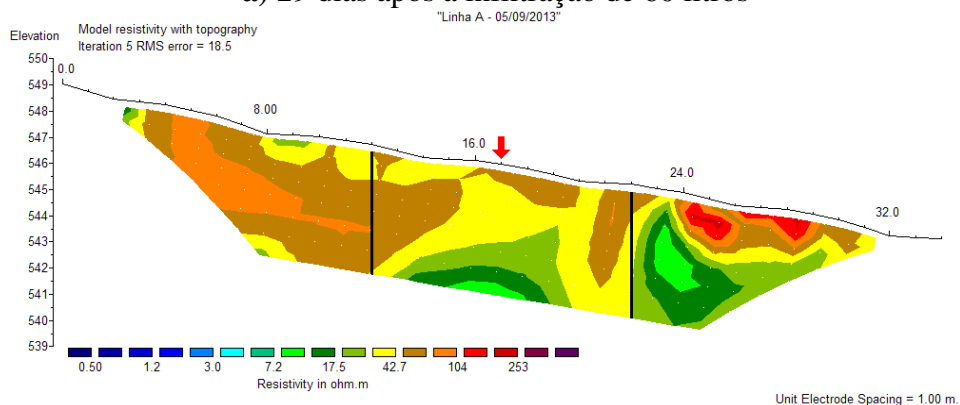
Os ensaios geofísicos executados sobre a vala A permitiram investigar se o volume limite de vinhaça para a Área 1, calculado por meio da Equação 1.1 (ver item 8.4.1), poderia resultar em contraste de propriedades físicas.

Analisando as seções das Figuras 8.16 e 8.17, percebe-se que estas são similares à seção da linha de referência (Figura 8.14). Aparentemente, a infiltração de 60 litros de vinhaça não ocasionou alterações significativas nos valores de resistividade elétrica na região da vala (marcada em vermelho logo abaixo da superfície topográfica). A flutuação dos valores de  $\rho$  observada nas seções pode ser atribuída, principalmente, à ocorrência de chuvas no período de coleta dos dados.

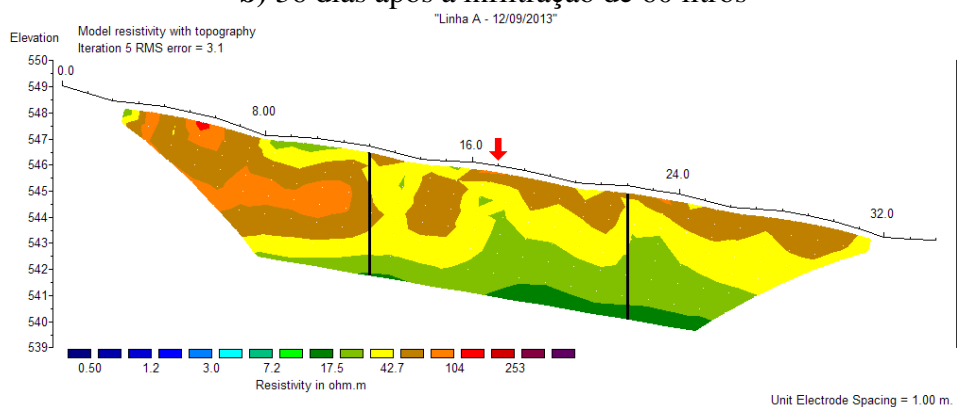


**Figura 8.16:** Seções de resistividade da Linha A executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

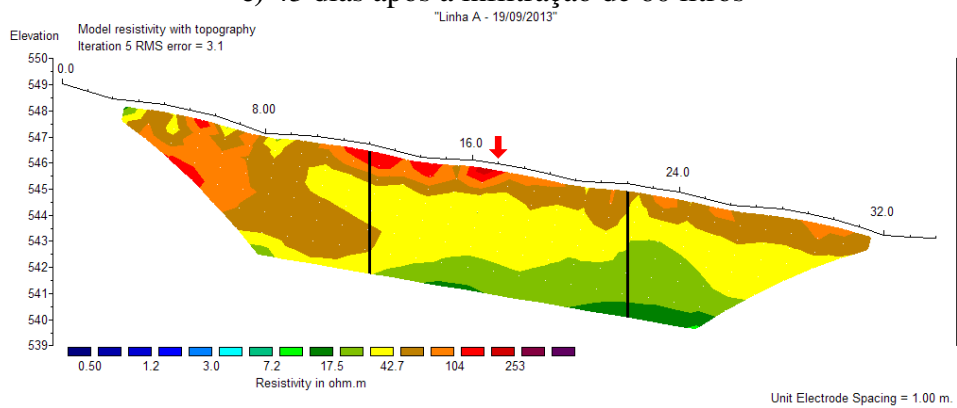
a) 29 dias após a infiltração de 60 litros



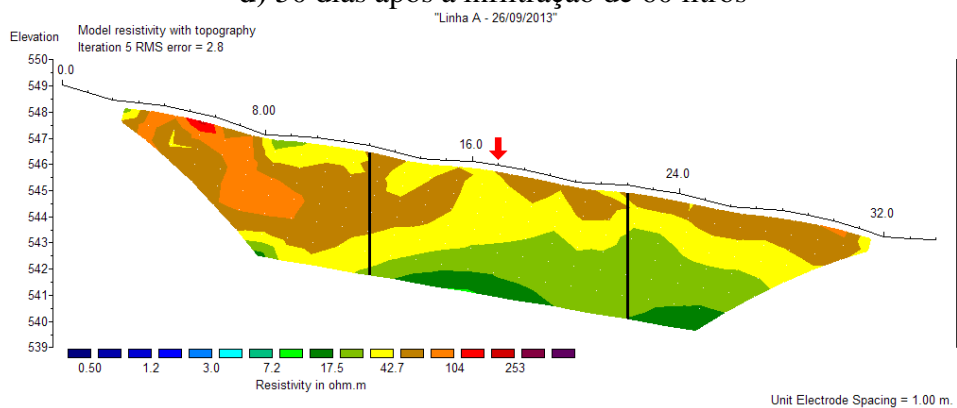
b) 36 dias após a infiltração de 60 litros



c) 43 dias após a infiltração de 60 litros

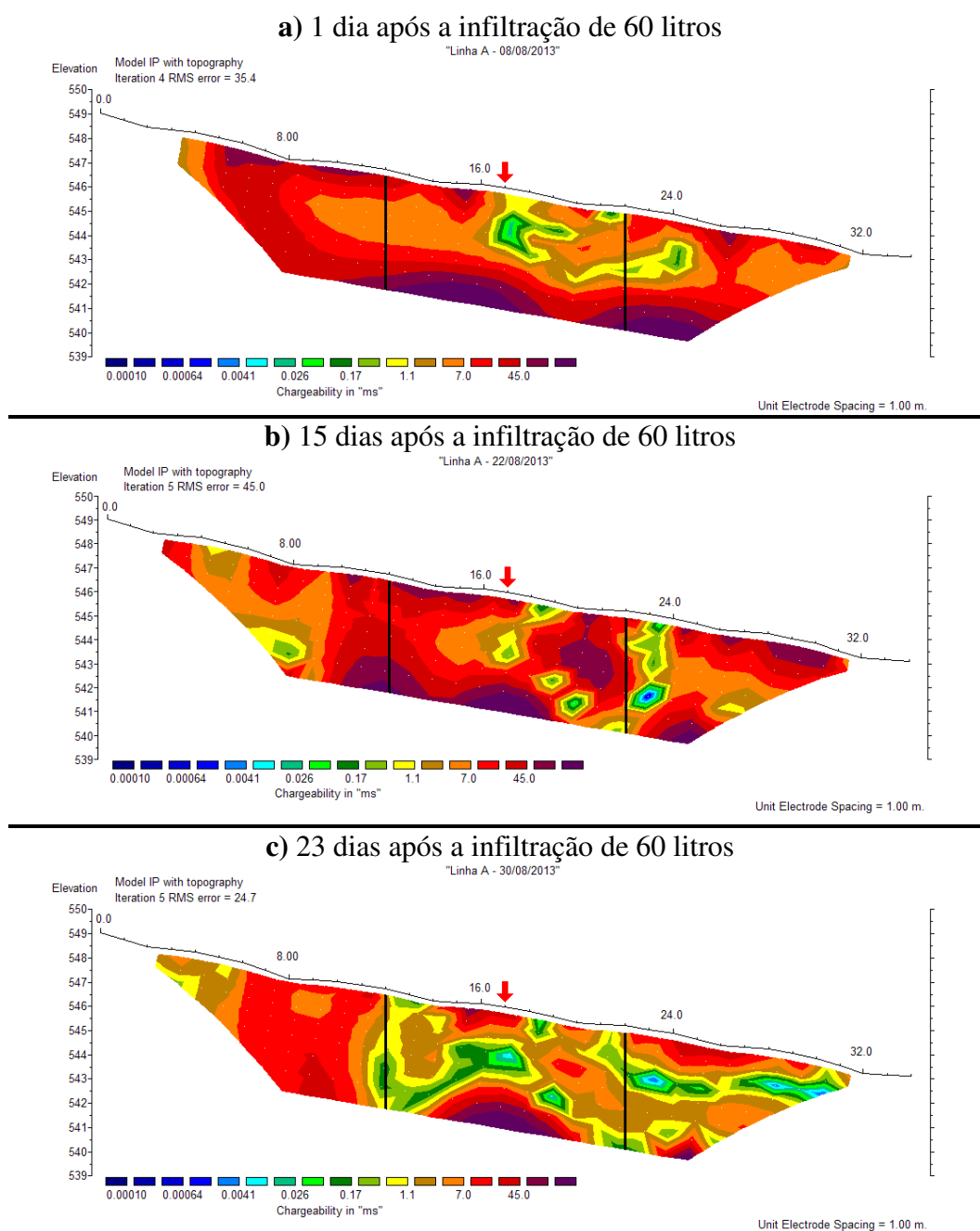


d) 50 dias após a infiltração de 60 litros



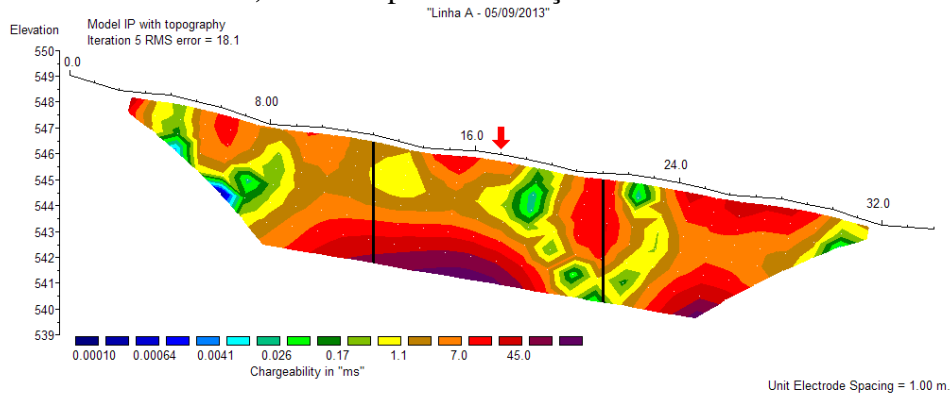
**Figura 8.17:** Seções de resistividade da Linha A executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

Tal como as seções de resistividade, as seções de cargabilidade da Linha A (Figuras 8.18 e 8.19) também não sugerem qualquer anomalia significativa na região da vala que possa ser relacionada à infiltração controlada de vinhaça. A distribuição dos valores de M nas seções das figuras em questão é semelhante à da seção de cargabilidade da Figura 8.15.

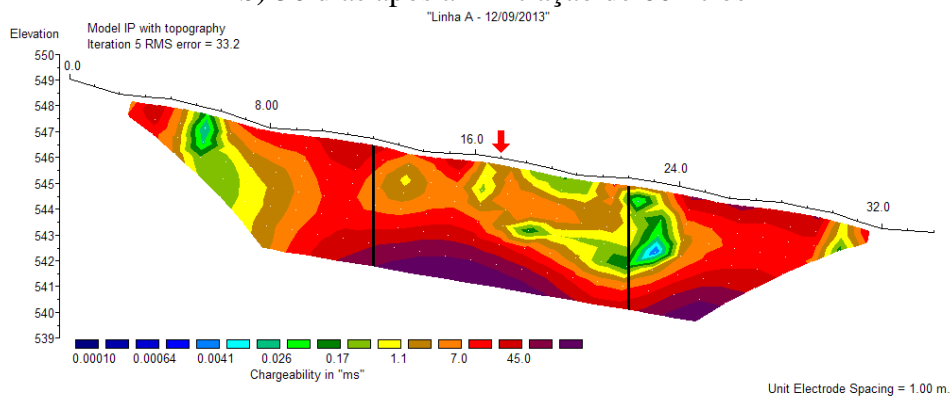


**Figura 8.18:** Seções de cargabilidade da Linha A executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

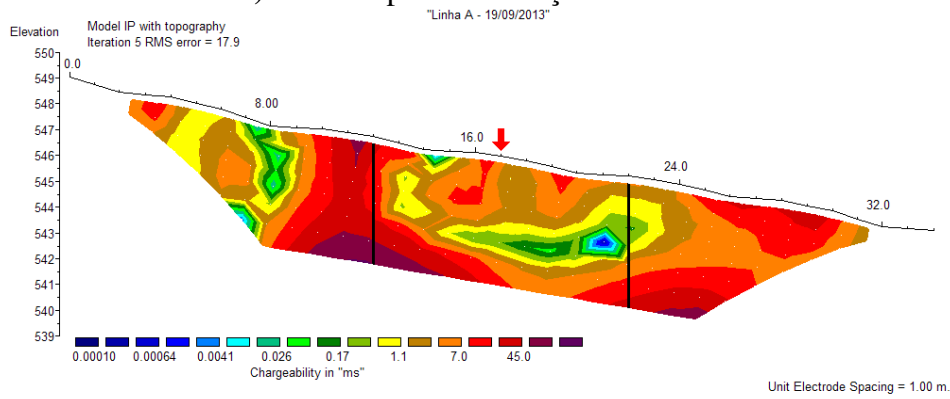
a) 29 dias após a infiltração de 60 litros



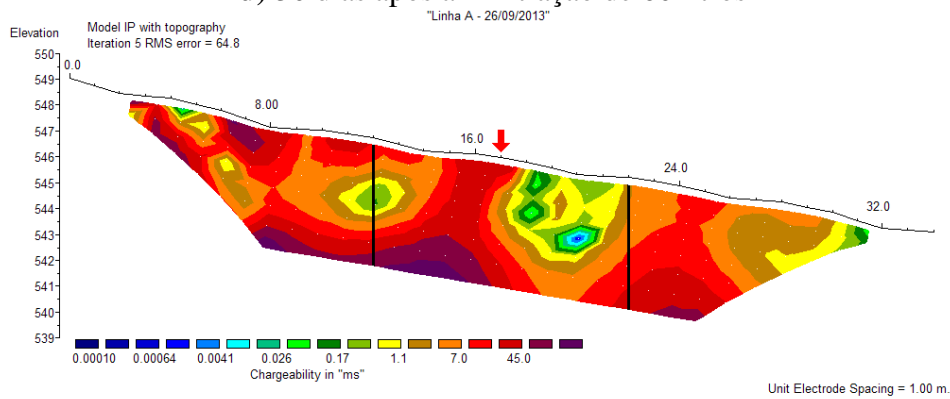
b) 36 dias após a infiltração de 60 litros



c) 43 dias após a infiltração de 60 litros



d) 50 dias após a infiltração de 60 litros



**Figura 8.19:** Seções de cargabilidade da Linha A executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

A *priori*, a análise global das Figuras 8.16 a 8.19 sugere que, dadas as características de resistividade elétrica e de cargabilidade do solo da Área 1, a infiltração de 60 litros de vinhaça na vala A não foi suficiente para gerar contrastes de propriedades físicas detectável pelo método da eletrorresistividade e/ou pelo método da polarização induzida. Os resultados indicam que o volume de vinhaça infiltrada, sendo o limite para a área, foi totalmente absorvido pelo solo e evitou a ocorrência de poluição.

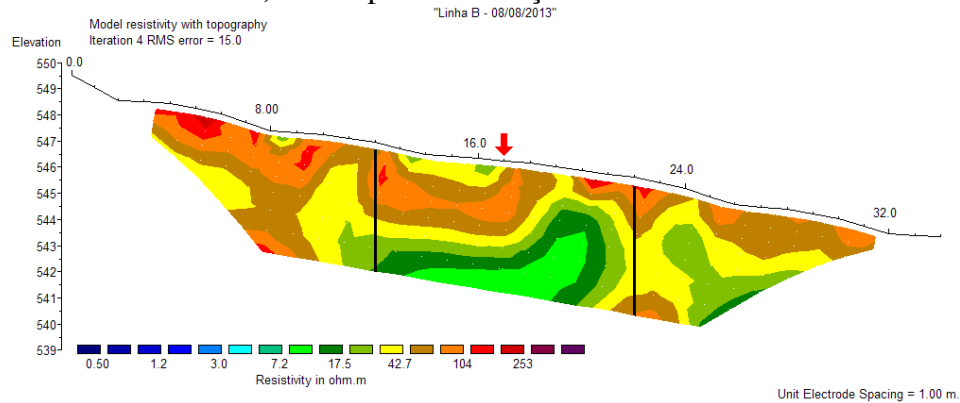
### 8.5.1.3 Monitoramento: Linha B

Inicialmente, foram infiltrados 300 litros de vinhaça na vala B, volume suficiente para gerar um contraste de propriedades físicas passível de detecção pelos métodos geofísicos empregados neste projeto. A infiltração deste volume inicial foi acompanhada durante quatro semanas.

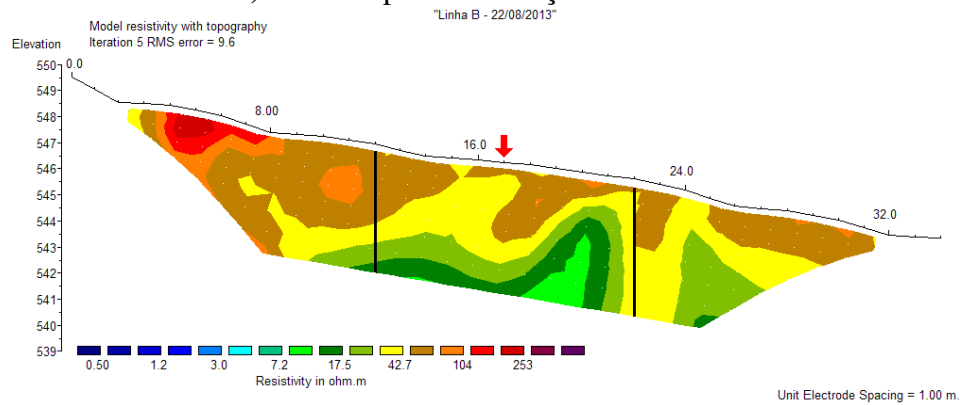
Percebe-se que, no dia imediatamente posterior à infiltração (Figura 8.20a), a resistividade elétrica da região circunvizinha à vala apresentou o mínimo valor do período ( $\rho \approx 27\Omega.m$ ). Decorridos quinze dias após a infiltração (Figura 8.20b), houve a elevação destes valores ao patamar de  $65\Omega.m$ . Vinte e três dias após, a região da vala B atinge o valor de *background* da área ( $\rho \approx 104\Omega.m$ ), tal como na seção da linha de referência (Figura 8.14). Apesar de não serem explícitos, estes resultados parecem indicar algum grau de impacto da vinhaça sobre o ambiente geológico.

Ainda em relação à primeira infiltração, a análise da Figura 8.21 revela a ausência de regiões significativamente anômalas nas seções de cargabilidade. Durante as quatro primeiras semanas de monitoramento da vala B, a distribuição dos valores de M, em cada seção, permaneceu idêntica à seção da linha de referência (Figura 8.15).

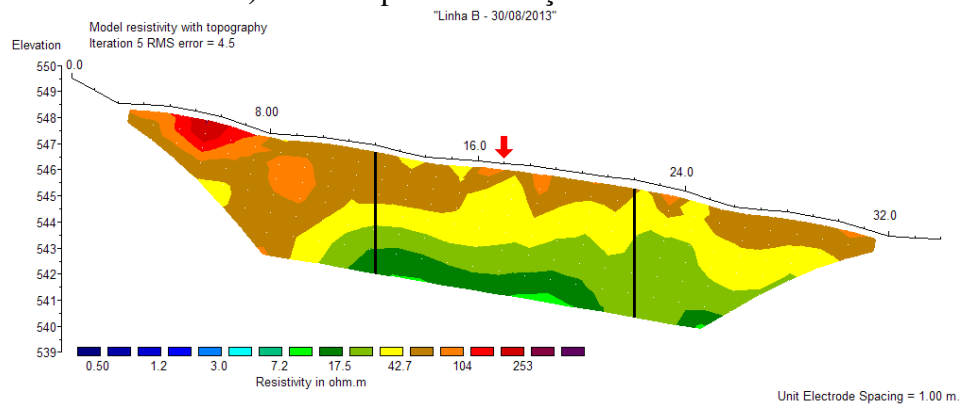
**a) 1 dia após a infiltração de 300 litros**



**b) 15 dias após a infiltração de 300 litros**

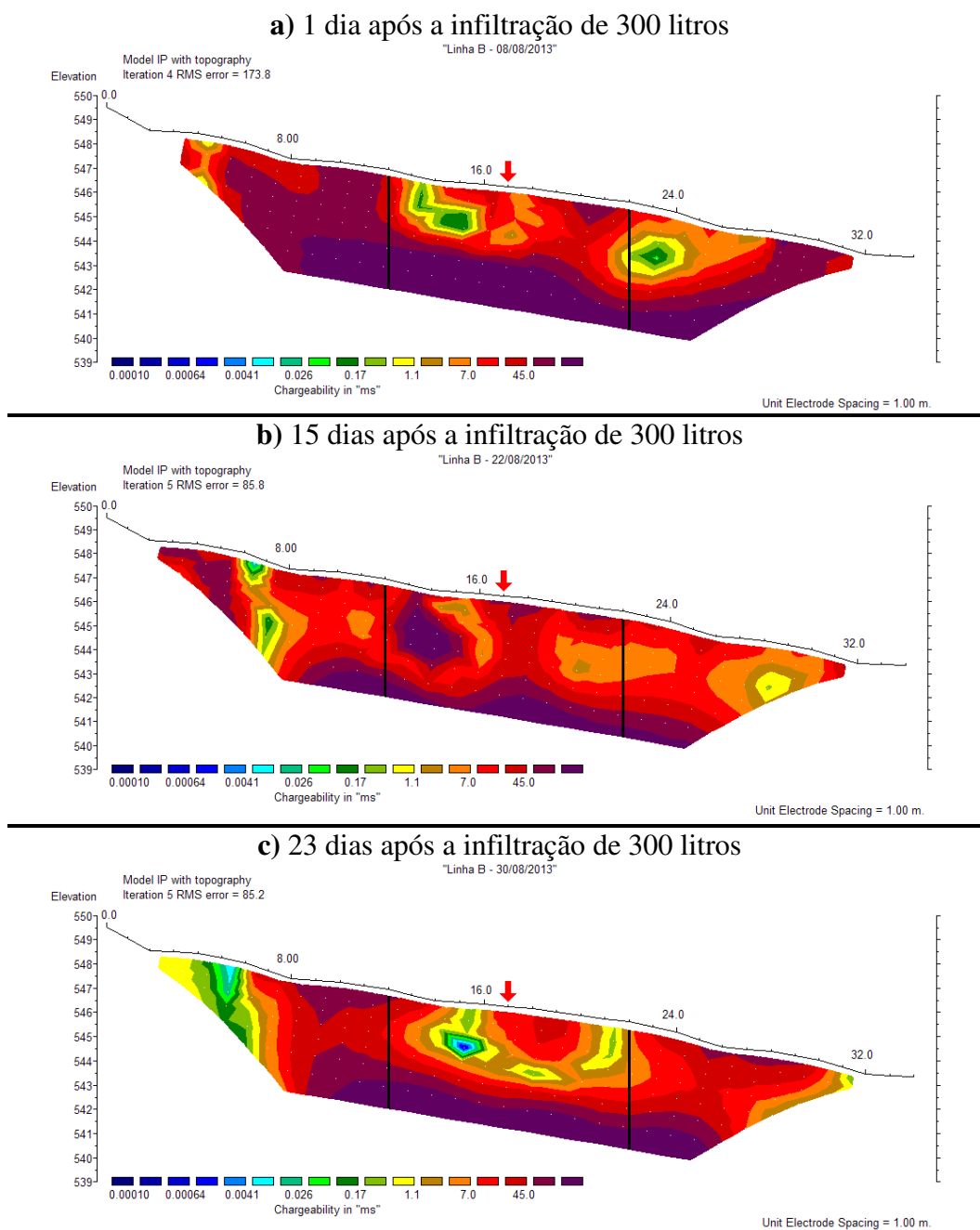


**c) 23 dias após a infiltração de 300 litros**



**Figura 8.20:** Seções de resistividade da Linha B executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.





**Figura 8.21:** Seções de cargabilidade da Linha B executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

Entretanto, assim como no caso da resistividade, estes resultados não permitiram conclusões precisas, dado o reduzido contraste de valores entre o meio natural e as regiões possivelmente impactadas. Por isso, na tentativa de se obter anomalias bem definidas, foi efetuada uma nova infiltração, agora com volume de 900 litros de vinhaça somente na vala B, e continuou-se o monitoramento seguindo o mesmo procedimento anterior. As seções resultantes desta etapa são apresentadas nas Figuras 8.22 e 8.23.

No caso da resistividade, logo nas primeiras 24 horas após a infiltração (Figura 8.22a), observa-se o aparecimento de uma região abaixo da vala onde  $\rho \approx 43\Omega.m$ . Passados 8 dias da

nova infiltração (Figura 8.22b), observa-se claramente uma anomalia de reduzidas dimensões (extensão lateral  $\approx$  1m; profundidade máxima  $\approx$  1m) no entorno da vala B, com a resistividade atingindo o mínimo de  $11\Omega.m$ .

Após 15 dias da nova infiltração (Figura 8.22c), verifica-se elevação da resistividade elétrica (em relação à semana anterior) nas adjacências da vala B. Neste caso, é possível observar que o entorno da vala apresenta valores de  $\rho$  idênticos aos da linha de referência ( $\approx 104\Omega.m$ ).

Finalmente, decorridos 22 dias a partir da nova infiltração (Figura 8.22d), a resistividade elétrica na região da vala B apresenta ligeira redução de valores, mas que, devido ao contexto da aquisição deste conjunto de dados, não pode ser relacionada à influência da vinhaça no solo.

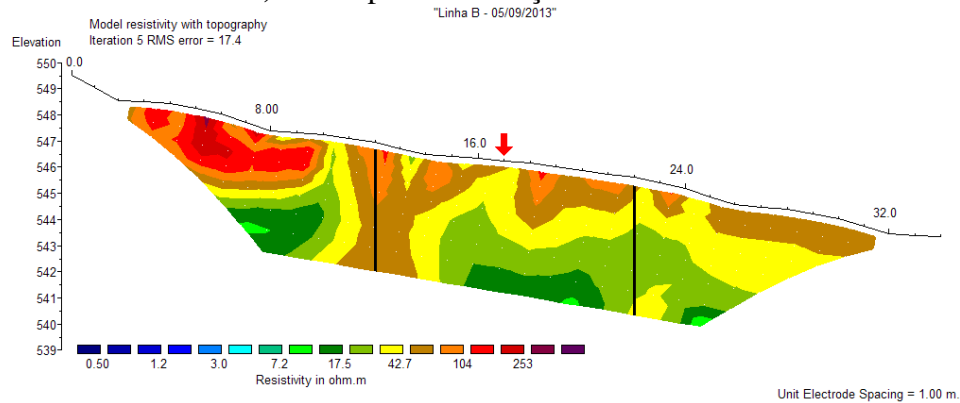
No caso da cargabilidade, no dia seguinte à infiltração de 900 litros (Figura 8.23a), nota-se uma anomalia de reduzidas dimensões (extensão lateral  $\approx$  profundidade máxima  $\approx$  1m) logo abaixo da vala B, cujos valores mínimos são da ordem de 0,07ms. Esta pode ser diretamente relacionada à presença de vinhaça no solo.

Nas seções subseqüentes (Figuras 8.23b a 8.23d), não é possível observar a anomalia anteriormente descrita. A cargabilidade no entorno da vala B apresenta elevação de valores, os quais variam sob influência da pluviometria registrada no período da coleta dos dados.

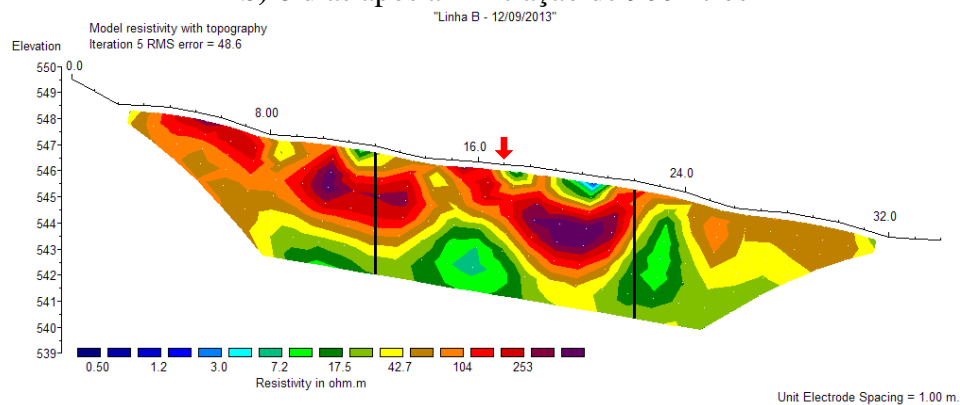
Estes comportamentos podem ser explicados, em parte, à luz da troca catiônica entre os argilominerais da Formação Corumbataí e a vinhaça. Sabe-se que a capacidade de troca catiônica (CTC) (capacidade de partículas sólidas trocarem cátions ou moléculas polarizadas com uma solução presente no solo) é significativamente pronunciada em siltes e argilas. Segundo Ibrahim (2008, p.125), a ilita é o argilomineral predominante na porção basal da Formação Corumbataí (situação da Área 1) e o valor da CTC obtido nas análises químicas das amostras de solo foi  $79,8\text{mmol}_c/\text{dm}^3$  (Tabela 8.5), revelando consistência com a literatura (RONQUIM, 2010, p.8) e dando respaldo à interpretação.

Devido, entre outros fatores, ao caráter eletronegativo e à reduzida porosidade, sedimentos com predominância de argila e silte tendem a reter eletrólitos (água) em seus poros, reduzindo drasticamente sua resistividade elétrica. Ao se infiltrar a vinhaça no solo, a ilita (e talvez outros argilominerais presentes no solo da Área 1) tende a adsorver a água e os macrocomponentes do contaminante –  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ , nesta ordem, segundo afinidade de adsorção – resultando no incremento do número de partículas eletricamente condutoras e, conseqüentemente, na redução da resistividade elétrica da porção sob influência da vinhaça.

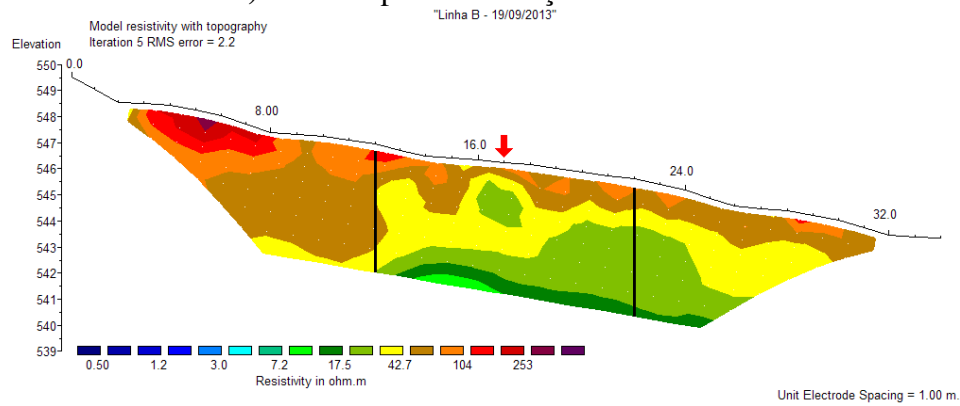
### a) 1 dia após a infiltração de 900 litros



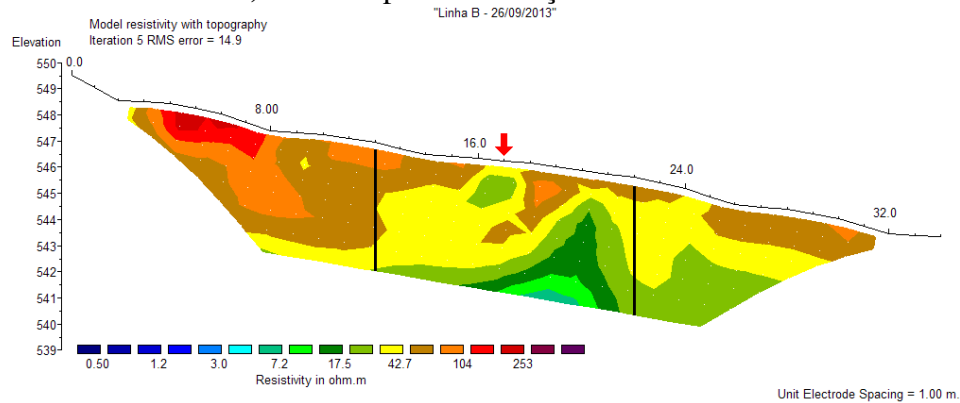
### b) 8 dias após a infiltração de 900 litros



### c) 15 dias após a infiltração de 900 litros

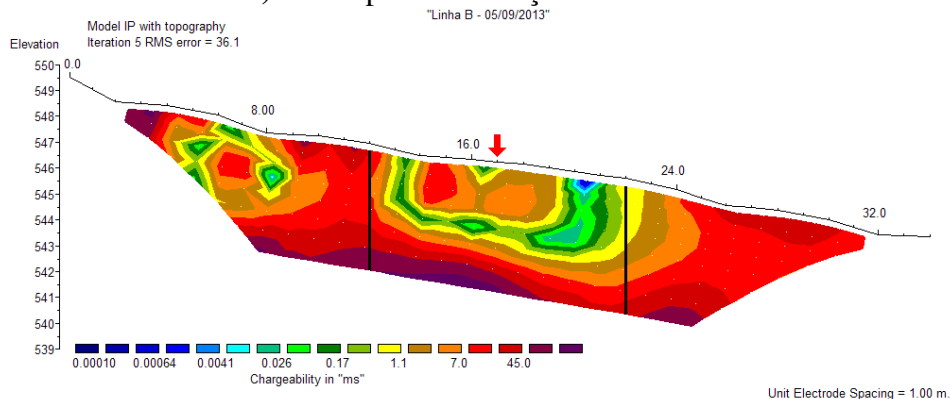


### d) 22 dias após a infiltração de 900 litros

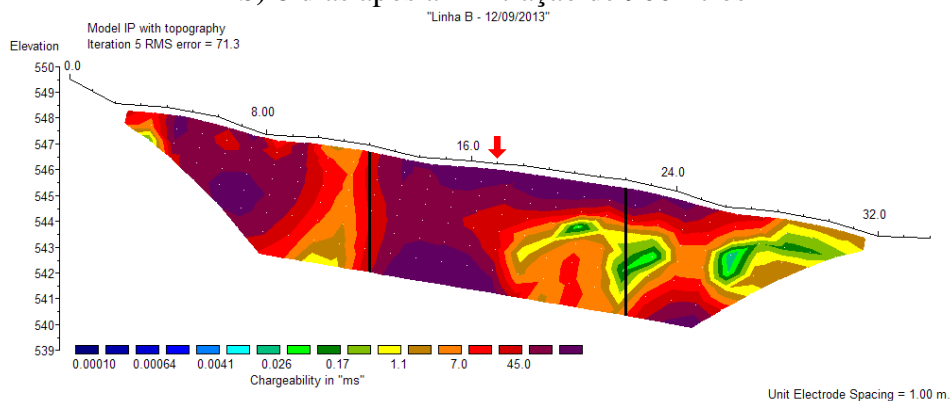


**Figura 8.22:** Seções de resistividade da Linha B executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

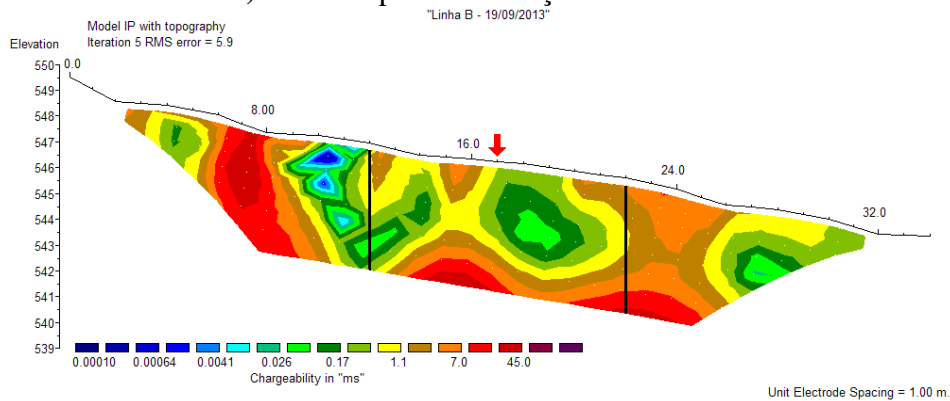
### a) 1 dia após a infiltração de 900 litros



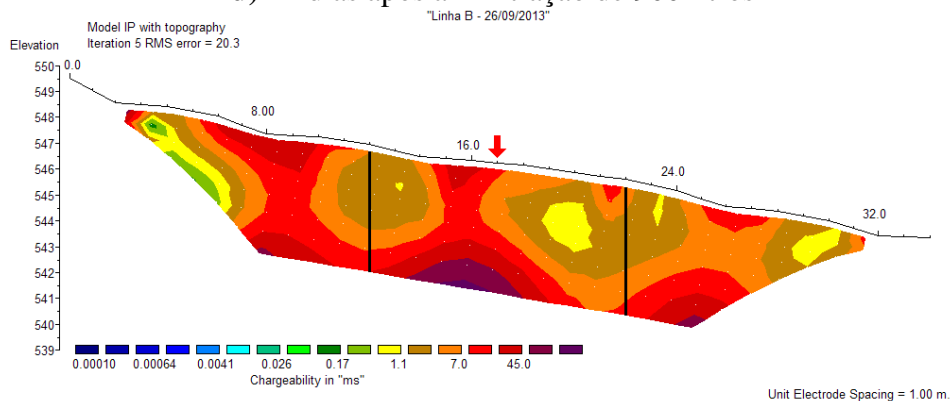
### b) 8 dias após a infiltração de 900 litros



### c) 15 dias após a infiltração de 900 litros



### d) 22 dias após a infiltração de 900 litros



**Figura 8.23:** Seções de cargabilidade da Linha B executada na Área 1. A seta vermelha indica a localização da vala e as linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

Hassuda, Rebouças e Cunha (1990, p.10) também observaram redução da condutividade elétrica no primeiro metro de solo da área estudada. Entretanto, atribuíram o resultado ao intenso processo de lixiviação da zona não-saturada pelas águas pluviais.

A observação de anomalias de baixa resistividade em solos silto-argilosos é dificultada pelo reduzido (ou inexistente, em alguns casos) contraste de valores entre o meio natural e o meio impactado. Por isso, o surgimento de uma zona de contraste acentuado de  $\rho$  somente foi possível com a infiltração de um elevado volume de vinhaça.

A interpretação dos resultados de cargabilidade pode ser feita com base no que propõe Moreira e Braga (2008, p.223). Os elevados valores de pH, DBO e DQO da vinhaça propiciam condições ácidas e redutoras (após o consumo do oxigênio disponível) à porção de solo impactada. Assim, quantidades significativas de elementos metálicos e de argilominerais são solubilizadas. Este cenário de argilominerais eletronegativos em solução rica em cátions, como a vinhaça, possibilita a formação de dupla camada eletrônica na interface dos argilominerais.

Segundo Gallas, Taioli e Malagutti Filho (2011, p.255), áreas contaminadas tendem a apresentar elevada concentração de íons e, por isso, a distância de separação entre eles é reduzida. Assim, o fluxo de correntes elétricas é facilitado e o efeito de polarização induzida apresenta baixa magnitude, tal qual a anomalia observada.

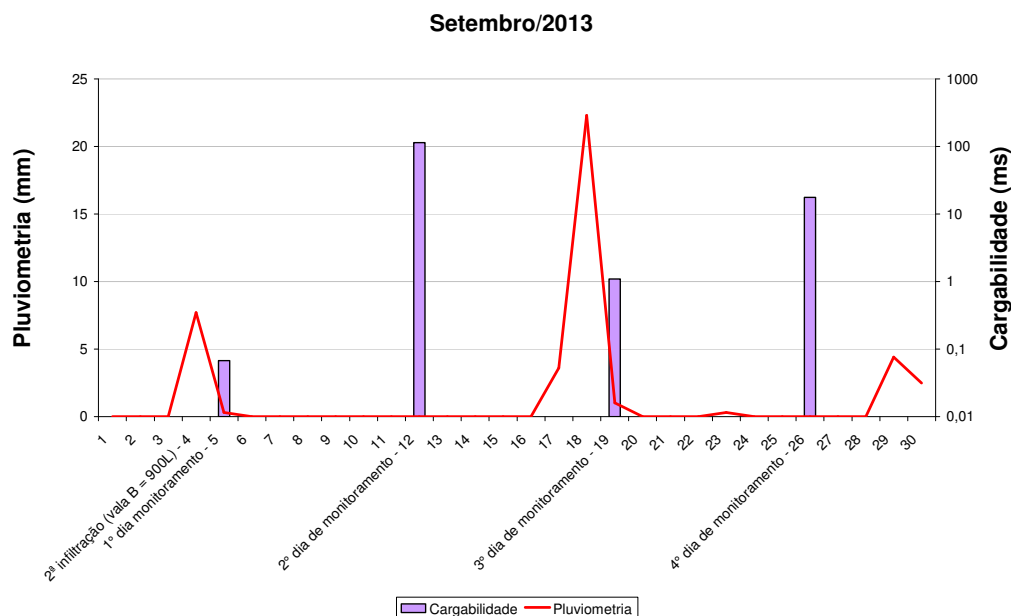
Hassuda, Rebouças e Cunha (1990, p.10) propõe que a influência do pH da vinhaça sobre o solo ocorre, principalmente, nos primeiros 20cm de profundidade. Nesta porção, ocorre a elevação dos valores de pH à medida que os íons hidrogênio ( $H^+$ ) e alumínio ( $Al^{3+}$ ) – responsáveis pela acidez do solo – são deslocados pelos macrocomponentes da vinhaça ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  e  $Na^+$ ). Águas pluviais e oriundas da própria vinhaça encarregam-se de carrear o hidrogênio e o alumínio para cotas mais profundas.

O significativo volume de chuvas (22,3mm) registrado 14 dias após a infiltração dos 900 litros (Figura 8.24) contribuiu para a lixiviação da porção superficial da área de estudos, carreando os cátions outrora adsorvidos por argilominerais. Além deste fator, quanto maior o tempo de permanência da vinhaça no solo, mais intensos são os processos de degradação bioquímica sobre o contaminante.

Assim, o número de partículas eletricamente condutoras foi reduzido, ocasionando a elevação da resistividade da região da anomalia. No caso do fenômeno IP, a diminuição da concentração iônica foi a responsável pelo aumento dos valores de cargabilidade.

As seções das Figuras 8.23b e 8.24b ainda estão de acordo com trabalhos anteriores realizados em áreas de cultura canavieira, onde as maiores alterações dos teores de elementos

químicos, principalmente potássio e nitrogênio, ocorrem entre os primeiros 50 e 120cm de profundidade (CUNHA et al., 1986 apud SEPE, 1990, p.135).



**Figura 8.24:** Correlação entre a pluviosidade diária do mês de setembro de 2013 e as flutuações da carga elétrica no entorno da vala B.

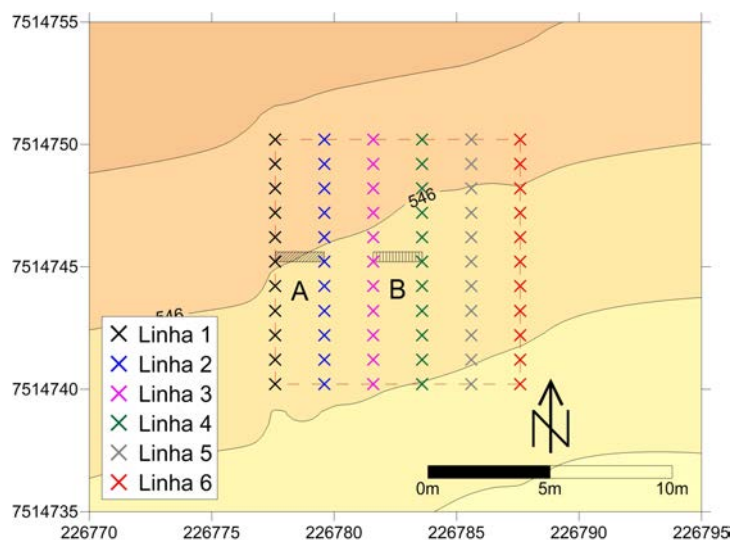
## 8.5.2 Imageamentos Eletromagnéticos

Em comparação à fase anterior (item 8.2.3), os imageamentos eletromagnéticos (IEM) executados na fase pós-infiltração exibiram uma malha de *datum points* mais densa, em decorrência da diminuição das distâncias (1) de separação entre as linhas (2,5m anteriores contra 2,0m atuais) e (2) entre as estações de medidas (2,0m anteriores contra 1,0m atual). Além disso, a redução do comprimento da área de estudos (item 8.5) acarretou no menor comprimento das linhas de IEM relativamente à fase pré-infiltração. Todas estas alterações foram feitas com base nos resultados da fase anterior, visando maior detalhamento da área de estudos e a otimização dos trabalhos de campo. A Figura 8.25 exibe a localização dos IEM executados na Área 1.

Novamente, foram empregadas as duas possíveis orientações das bobinas: Dipolo Magnético Horizontal (DMH), com profundidade teórica de investigação entre 0 e 3m, e Dipolo Magnético Vertical (DMV), com profundidade teórica de investigação entre 0 e 6m.

Com base nos resultados dos imageamentos elétricos (item 8.5.1) e segundo a Figura 8.25, pressupõe-se que as linhas 1 e 2 deveriam detectar anomalias referentes à vala A; do mesmo modo, as linhas 3 e 4 deveriam detectar as anomalias oriundas da vala B. As linhas 5 e

6, devido à maior distância em relação às valas, não deveriam detectar qualquer influência da vinhaça infiltrada, ambas servindo de referência nestes ensaios. As respectivas curvas de condutividade elétrica são apresentadas no Apêndice B.

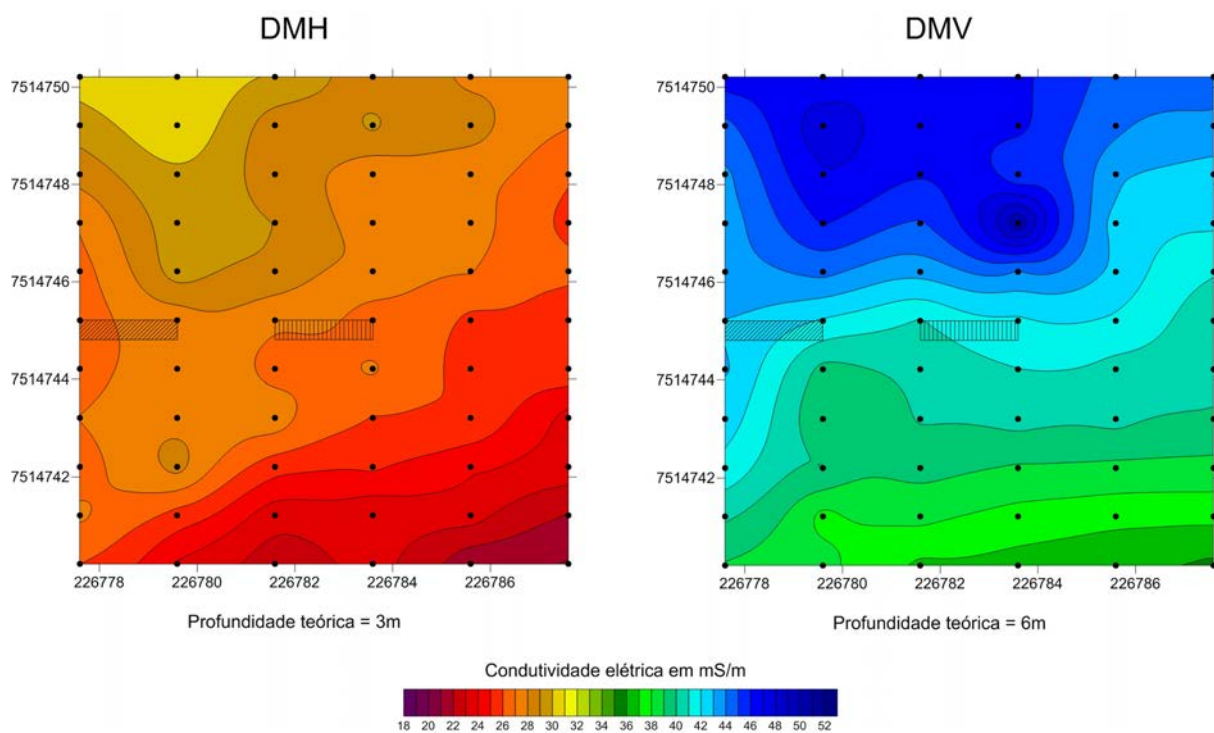


**Figura 8.25:** Mapa de localização dos IEM pós-infiltração executados na Área 1.

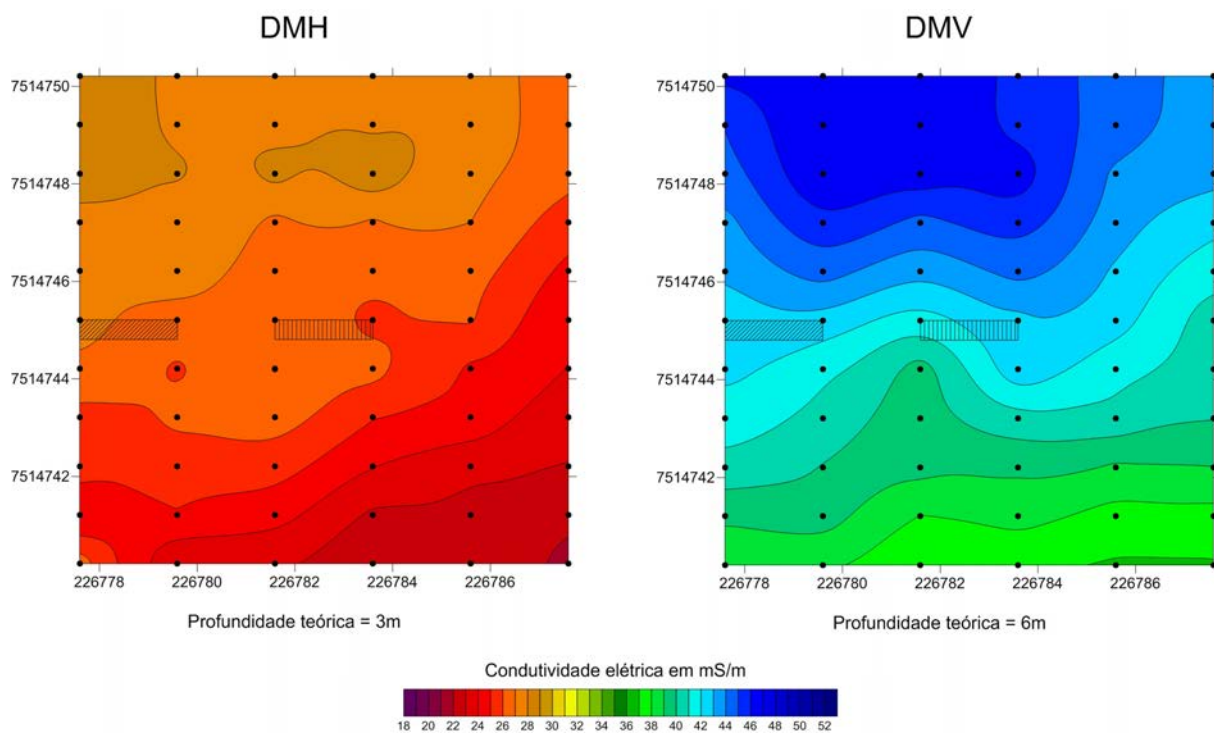
As Figuras 8.26 a 8.29 apresentam os mapas de condutividade elétrica confeccionados com os dados coletados após a primeira infiltração de vinhaça – 60 litros na vala A e 300 litros na vala B. Entretanto, estes não revelaram a ocorrência de anomalias significativas, como esperado, mas somente um comportamento geral, similar ao verificado na fase pré-infiltração (item 8.2.3). As poucas variações observadas ocorrem distantes das valas e estão relacionadas ao teor de água no solo

Algumas discretas reduções de  $\sigma$  podem ser observadas na região da estação de medida n.º 5 das curvas do DMH (ver Apêndice B), tais como nas linhas 2 e 4 da Figura B.1, nas linhas 3 e 4 da Figura B.2, nas linhas 2, 3 e 4 da Figura B.3 e nas linhas 1, 2, 3 e 4 da Figura B.4. Considerando as aproximações de profundidades de investigação discutidas ao final o item 8.5.1.3, conclui-se que somente a orientação DMH apresentou sensibilidade para detectar as alterações em questão.

A princípio, este comportamento poderia ser explicado pela mesma hipótese levantada no item 8.5.1.3: redução da umidade do solo na porção impactada devido à adsorção de cátions da vinhaça pelos argilominerais do solo, aliada ao efeito acentuado de evapotranspiração (devido às condições climáticas), resultando na diminuição da condutividade elétrica logo abaixo da vala.

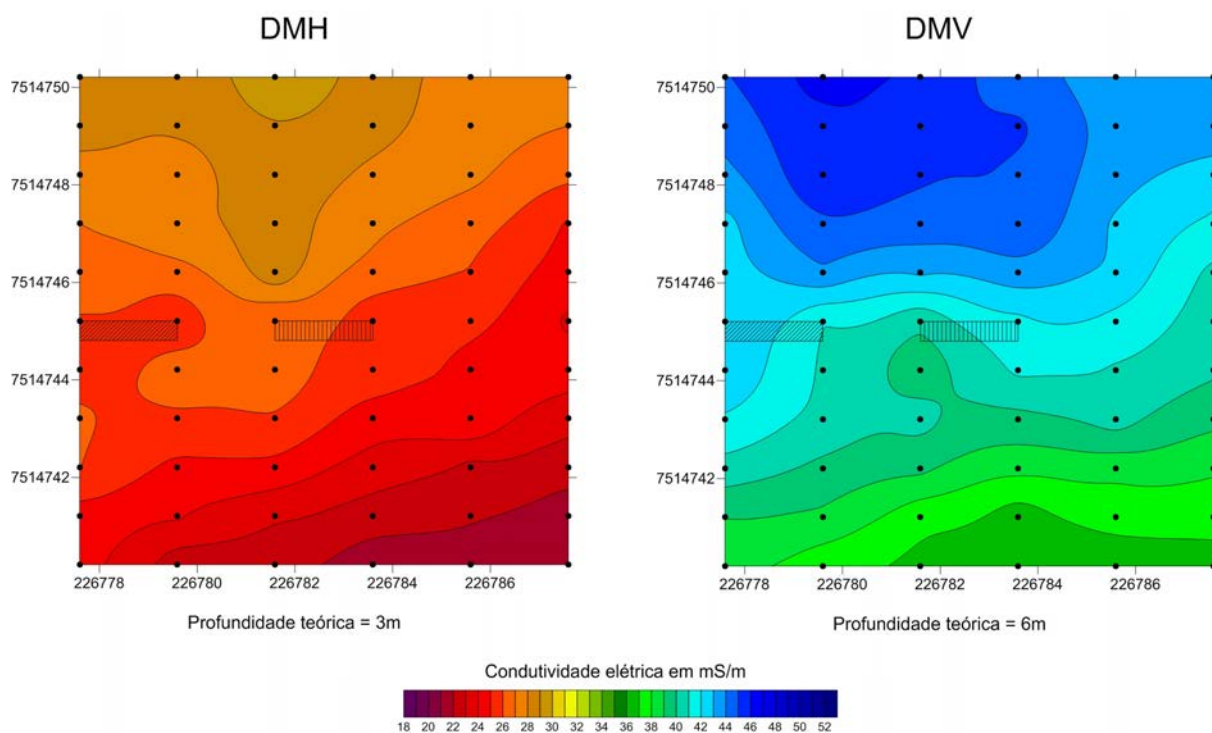


**Figura 8.26:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 1 dia após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).

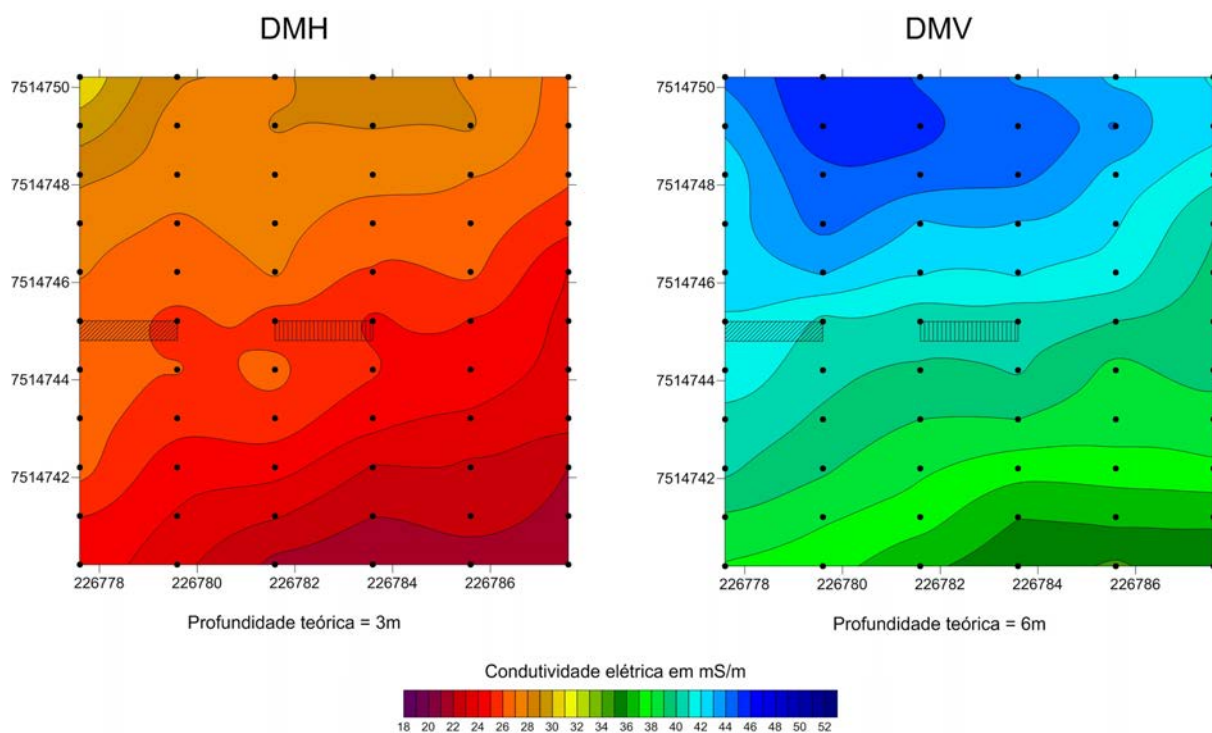


**Figura 8.27:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 8 dias após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).





**Figura 8.28:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 15 dias após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).



**Figura 8.29:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 22 dias após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).

Visto que não foi possível correlacionar com precisão as possíveis – porém discretas – anomalias registradas nas Figuras B.1 a B.4 ao volume inicial de vinhaça infiltrado, realizou-se uma segunda infiltração de vinhaça na vala B, conforme o item 8.4.2. Observando a Figura 8.25, supõe-se que somente as linhas 3 e 4 deveriam detectar possíveis anomalias inerentes à vinhaça nesta nova infiltração. O comportamento das novas curvas de condutividade elétrica deveria, supostamente, ser semelhante ao das curvas anteriores, porém com anomalias mais intensas.

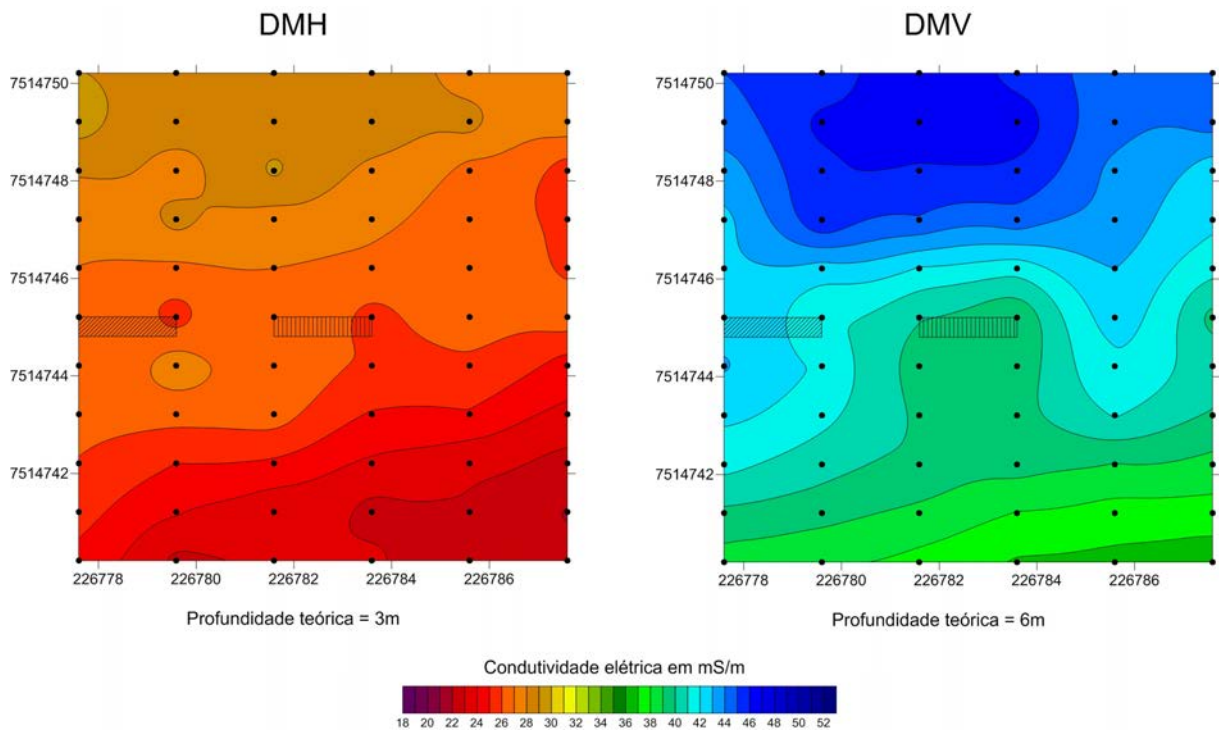
Apesar de a vala A não receber mais nenhum volume de contaminante neste momento, continuou-se a execução das linhas 1 e 2 de modo que toda a área de estudos fosse plenamente coberta a cada dia de monitoramento.

Somente a orientação horizontal das bobinas (DMH) foi analisada, já que as anomalias detectadas pelos métodos ER e IP situam-se próximas à superfície do terreno. Os dados do DMV, devido à profundidade de investigação, refletem um ambiente isento de contaminação pela vinhaça, tal como na Figura 8.8.

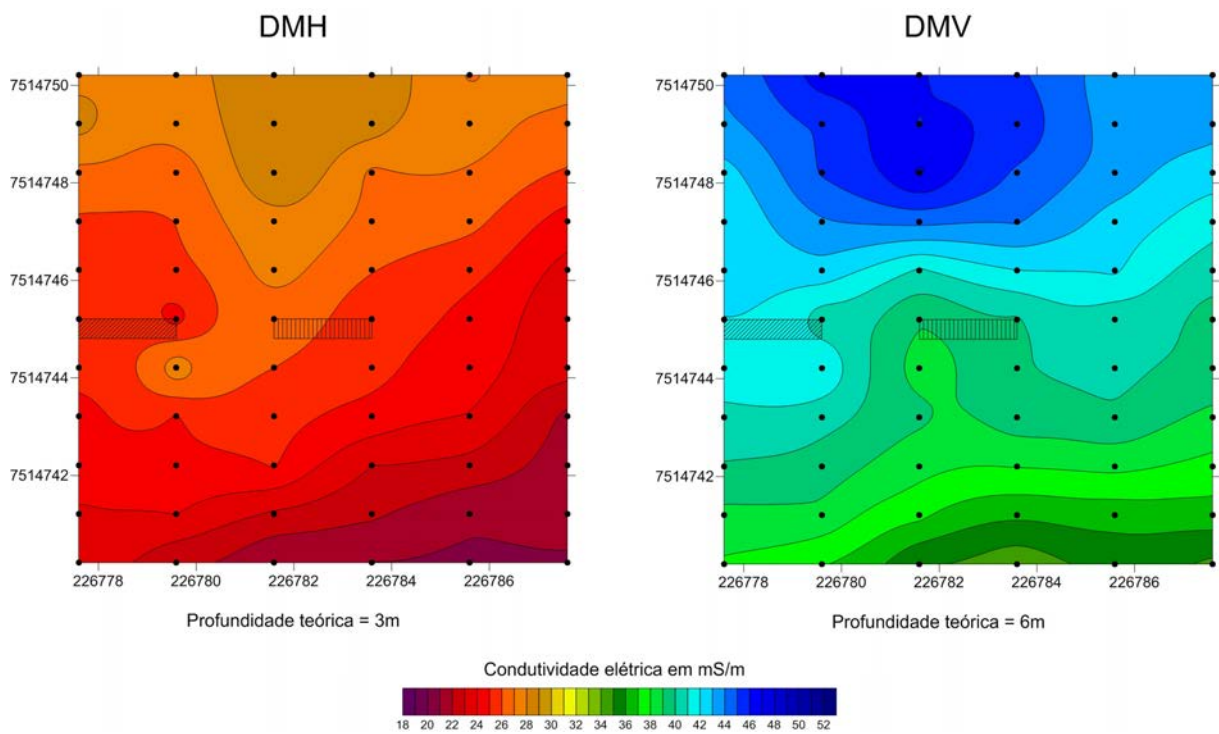
Os mapas de isovalores gerados com estes dados são apresentados nas Figuras 8.30 a 8.33. Não se observa nenhum tipo de anomalia próximo às valas. Somente uma redução gradual dos valores de  $\sigma$  pode ser notada em caráter geral, mas que pode ser associada ao regime de chuvas do mês de setembro de 2013 (Figura 8.24), quando os ensaios foram executados.

Nas curvas de condutividade elétrica (Apêndice B, Figuras B.5 a B.8), principalmente nas referentes ao DMH das linhas 3 e 4, verifica-se baixíssima flutuação de valores na região das valas. Discretas reduções de  $\sigma$  podem ser verificadas na estação de medida n.º 5 das linhas 3 e 4 da Figura B.5, na linha 4 da Figura B.6 e, novamente, nas linhas 3 e 4 da Figura B.8. Somente as linhas 3 e 4, executadas 15 dias após a nova infiltração (Figura B.7), apresentaram elevação da condutividade elétrica na estação de medida n.º 5, mas, ainda assim, a variação registrada é de reduzida amplitude, tal como nas situações anteriormente mencionadas.

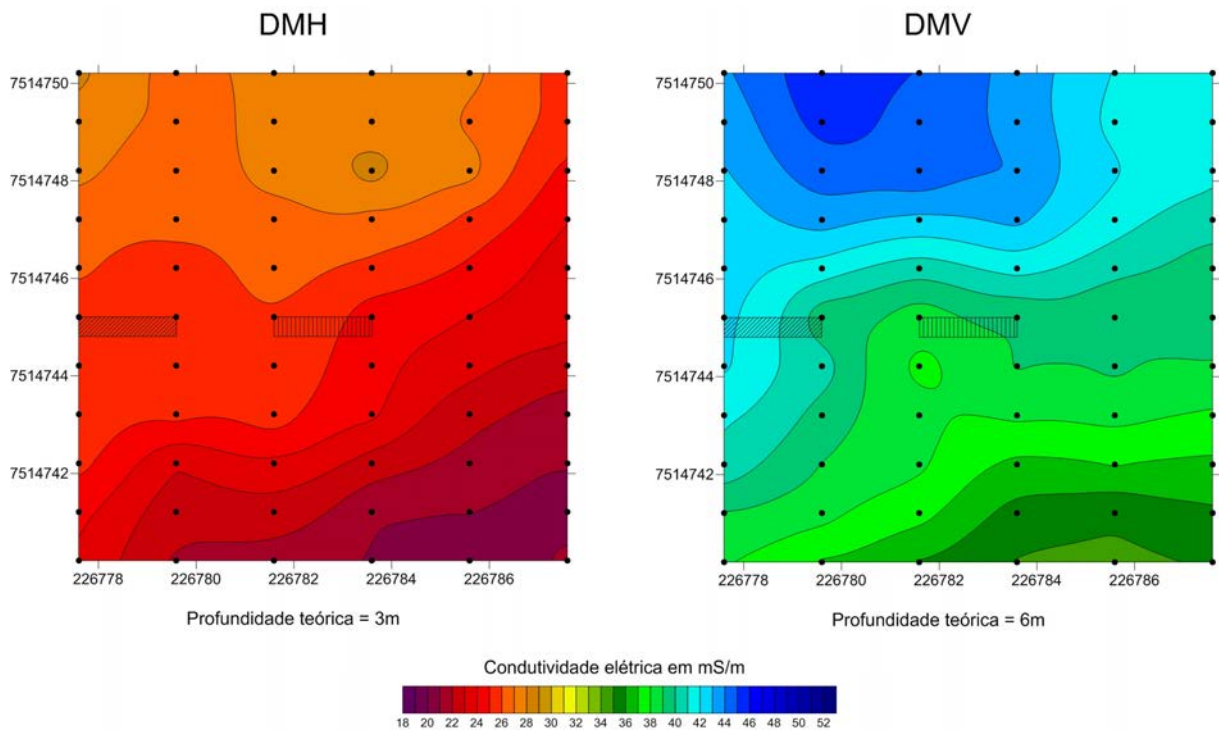
Por fim, consideradas as características de condutividade elétrica do solo da Área 1 e da vinhaça nele infiltrada, após uma análise conjunta de todos os dados obtidos de condutividade elétrica e efetuadas todas as considerações pertinentes, é plausível afirmar que, nas condições em que o experimento foi desenvolvido, o método eletromagnético não foi capaz de detectar a presença do contaminante em subsuperfície em virtude, principalmente, da ausência de contraste entre a região sob influência da vinhaça e o meio natural.



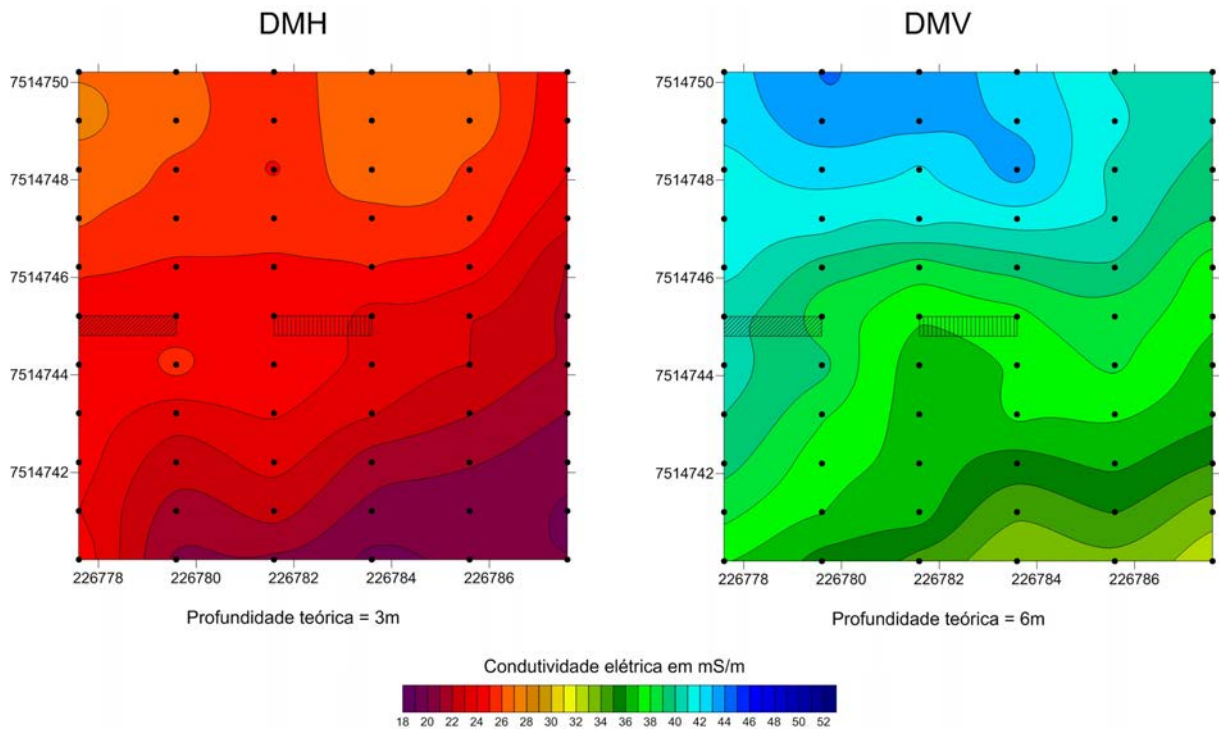
**Figura 8.30:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 1 dia após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).



**Figura 8.31:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 8 dias após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).



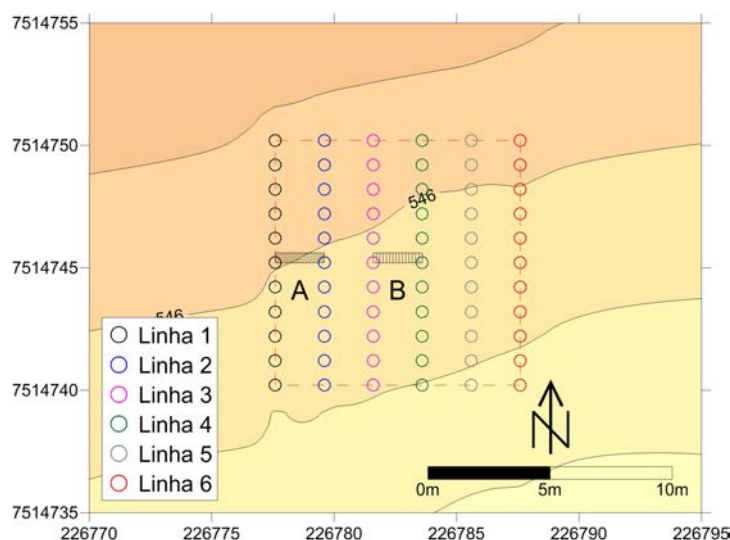
**Figura 8.32:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 15 dias após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).



**Figura 8.33:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 22 dias após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).

### 8.5.3 Potencial Elétrico Natural

Duas mudanças principais foram adotadas neste momento do projeto: (I) substituiu-se o resistivímetro BISON 2390 pelo ABEM TERRAMETER SAS 4000 buscando maior precisão nas leituras de SP; (II) reduziu-se a distância entre duas estações de medidas consecutivas (2m anteriores contra 1m atual) visando maior adensamento da malha de *datum points* (Figura 8.34).



**Figura 8.34:** Mapa de localização dos ensaios de SP pós-infiltração executados na Área 1.

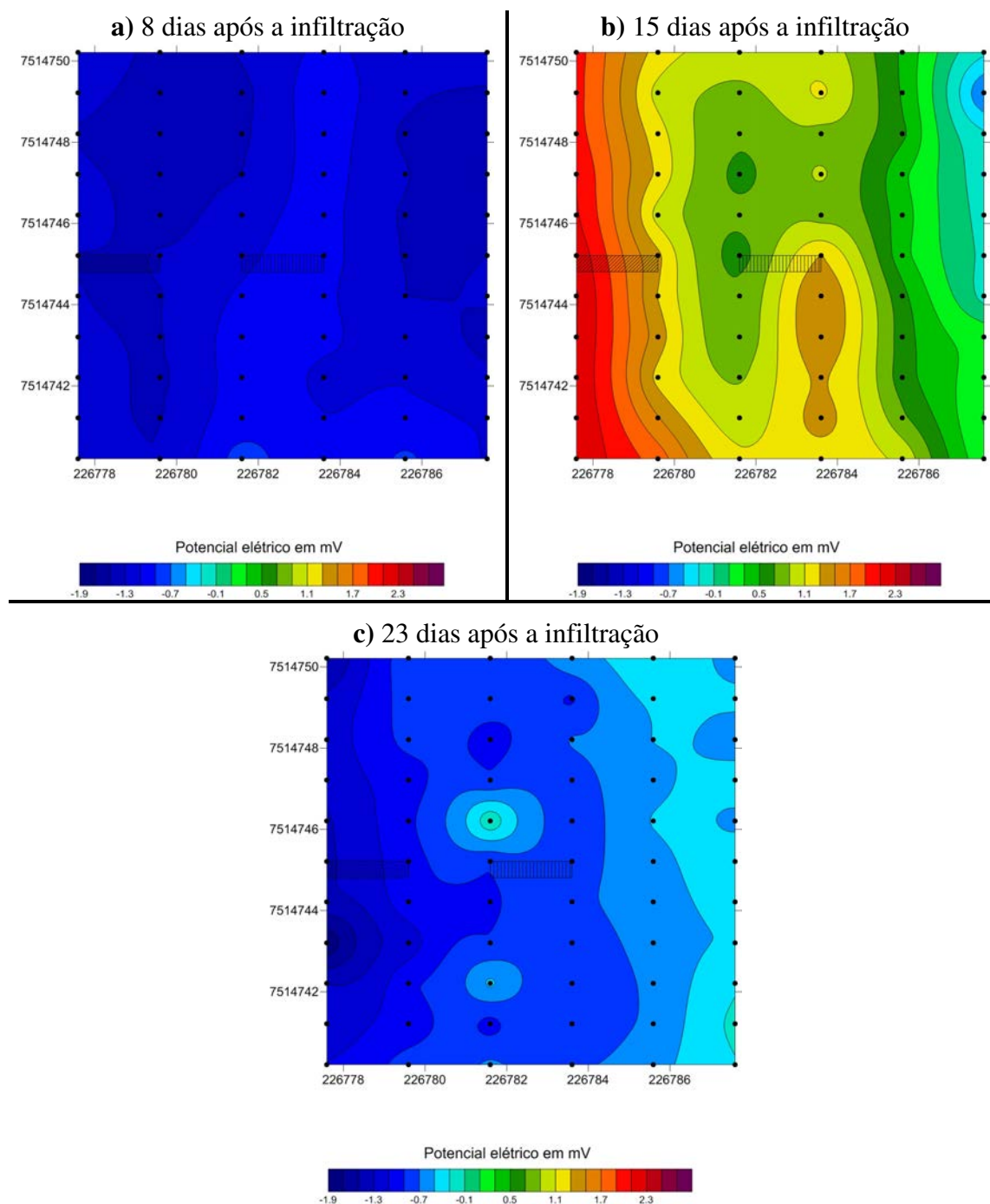
Entretanto, permaneceram as seis linhas de investigação, regularmente distribuídas por toda a área de estudos e espaçadas entre si a cada 2m, de modo que a localização de cada estação de medida dos métodos EM e SP passou a ser coincidente. Todas estas alterações permitiram maior detalhamento do local e a otimização dos trabalhos de campo.

Como a malha de pontos é a mesma para os métodos EM e SP, as valas de infiltração de vinhaça estão localizadas na mesma posição das linhas de investigação para ambos os métodos.

A Figura 8.35 exibe os mapas de potencial elétrico confeccionados com os dados coletados no período entre 8 e 23 dias após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B. No Apêndice B são apresentadas as respectivas curvas de potencial elétrico natural. Os dados de SP coletados no dia seguinte à infiltração foram desprezados em função da baixa confiabilidade dos mesmos.

Os mapas apresentaram significativa variação durante o período analisado. Na Figura 8.35a, todas as leituras efetuadas indicaram potencial elétrico entre -1,39 e -0,80mV ( $\Delta V =$

0,59mV). Decorridos 15 dias após a infiltração (Figura 9.35b), a fração majoritária das novas medidas exibiram potenciais entre 0,08 e 2,3mV. Somente 7 do total de 66 leituras realizadas correspondem a valores negativos de potencial elétrico ( $-0,73\text{mV} \leq \text{d.d.p.} \leq -0,14\text{mV}$ ), todas obtidas na linha 6. A amplitude total neste dia foi de  $\Delta V = 3,03\text{mV}$ . No 23º dia após a infiltração (Figuras 8.35c), todas as leituras efetuadas situaram-se na faixa entre  $-1,89$  a  $0,11\text{mV}$  ( $\Delta V = 1,78\text{mV}$ ).

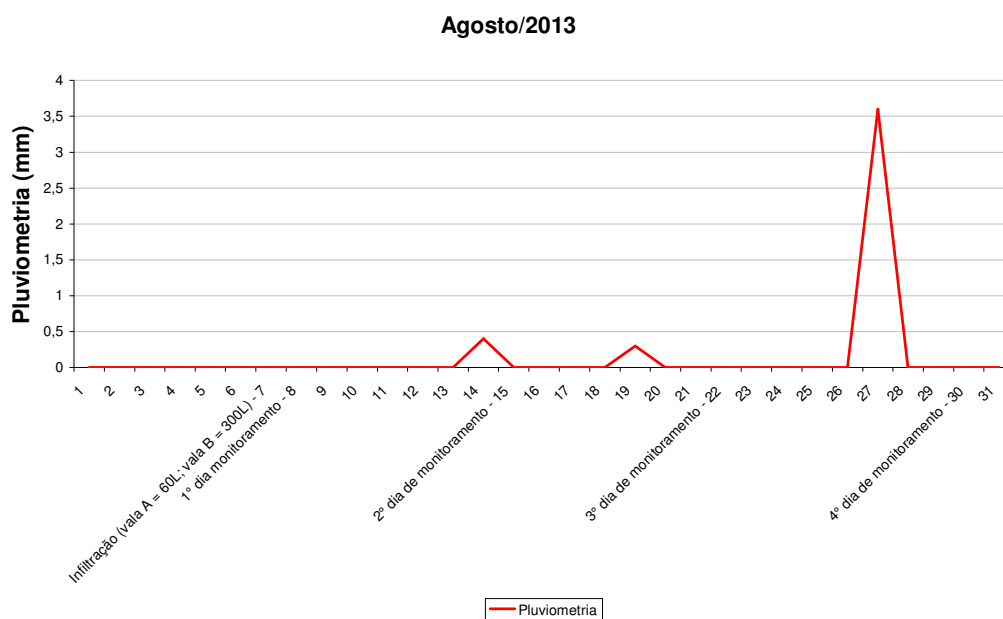


**Figura 8.35:** Mapas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).

Contudo, estes resultados não puderam ser relacionados à presença de vinhaça no solo da área de estudos, pois não se verificou nenhuma anomalia significativa nas adjacências das valas (estação de medida n.º 5 das linhas 1 a 4 na Figura B.9 – Apêndice). Aparentemente, as alterações de potencial elétrico verificadas neste conjunto de dados não possuem relação com qualquer reação química oriunda da interação entre o solo e a vinhaça.

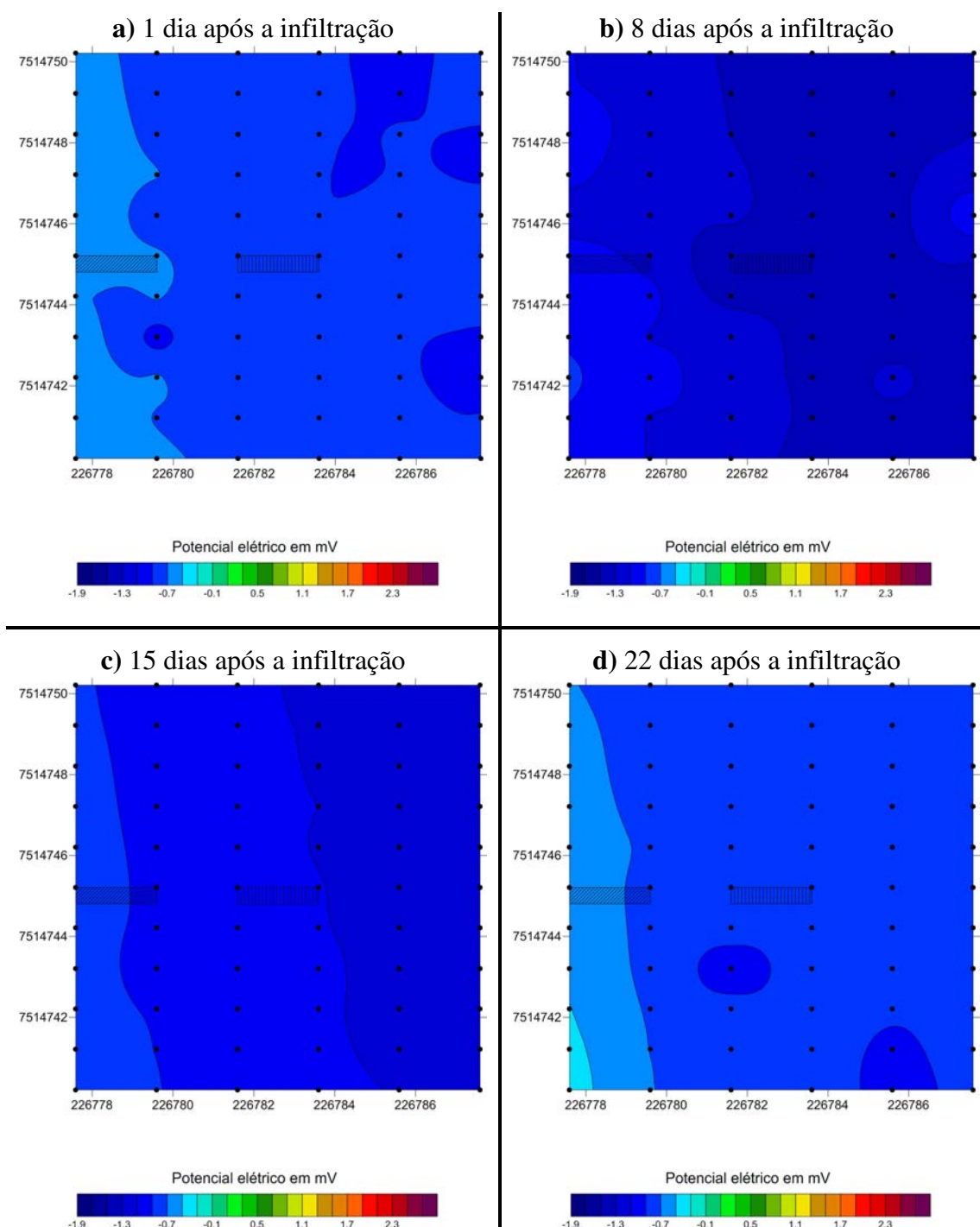
A flutuação de valores registrada sugere apenas a variação do teor de água intersticial no solo, influenciada por condições climáticas favoráveis. No período entre 1 e 26 de agosto de 2013 registrou-se precipitação de apenas 0,7mm (Figura 8.36) e elevação de temperatura. Assim, o contexto climático contribuiu para a diminuição da umidade do solo e o conseqüente aumento do potencial elétrico natural (Figura 8.35b). A precipitação de 3,6mm ocorrida em 27 de agosto (Figura 8.36) propiciou um ambiente novamente favorável à gênese de potenciais elétricos negativos, registrados no 4º dia de monitoramento (Figura 8.35c).

A existência de potenciais mais negativos no extremo direito das curvas, coincide com a jusante da área e sugere o Norte como a direção de fluxo das águas subterrâneas, corroborando a interpretação das SEV (item 8.2.1).



**Figura 8.36:** Pluviometria diária do mês de agosto de 2013.

Na tentativa de se obter contrastes de valores das propriedades físicas do solo plenamente detectáveis e correlacionáveis à contaminação, procedeu-se a infiltração de 900 litros de vinhaça somente na vala B, assim como mencionado anteriormente. Os resultados desta nova etapa de infiltração e monitoramento da área são exibidos na forma de mapas na Figura 8.37. No Apêndice B são exibidas as respectivas curvas de potencial natural (Figura B.10)



**Figura 8.37:** Mapas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).

Comparativamente à etapa anterior, verifica-se maior uniformidade dos dados. Não foram registrados valores positivos de d.d.p. em nenhum momento desta etapa. No dia posterior à nova infiltração (Figuras 8.37a), o potencial espontâneo medido oscilou entre -1,01 e -0,50mV ( $\Delta V = 0,51\text{mV}$ ). Oito dias após a infiltração (Figuras 8.37b), o intervalo observado é de  $-1,51\text{mV} \leq \text{d.d.p.} \leq -0,87\text{mV}$  ( $\Delta V = 0,64\text{mV}$ ). Na Figura 8.37c,



correspondente ao período de 15 dias após a infiltração, verifica-se  $-1,17\text{mV} \leq \text{d.d.p.} \leq -0,70\text{mV}$  ( $\Delta V = 0,47\text{mV}$ ). Por fim, 22 dias após a segunda infiltração, (Figura 8.37d), o potencial natural medido situou-se entre  $-1,09$  e  $-0,42\text{mV}$  ( $\Delta V = 0,67\text{mV}$ ).

Os resultados aqui observados podem ser facilmente correlacionados ao regime de chuvas do mês de setembro de 2013 (Figura 8.24). Devido ao maior volume de chuvas em relação ao mês anterior (42,1mm) e à precipitação distribuída em 8 dias do mês, os teores de umidade do solo mantiveram-se praticamente estáveis durante o período de coleta dos dados. Esta estabilidade é refletida na reduzida amplitude do potencial espontâneo medido.

Não se observou nenhum tipo de anomalia no entorno das valas, principalmente da vala B neste caso específico. Portanto, não foi possível correlacionar a infiltração de vinhaça no solo a qualquer anomalia de potencial natural medido. Dadas as condições em que o experimento foi realizado, considerando as condicionantes naturais e antrópicas envolvidas e, principalmente, a ausência de contraste de valores entre regiões “anômalas” e o meio natural, pode-se concluir que o método do potencial espontâneo não foi capaz de detectar a presença de vinhaça no solo da área de estudos.

## Capítulo 9 – Área 2: Resultados e Discussões

### 9.1 Ensaios geotécnicos

#### 9.1.1 Condutividade hidráulica da zona não saturada

Foram executados 8 ensaios de condutividade hidráulica da zona não saturada, conforme explicitado no item 7.1.1. A Tabela 9.1 apresenta informações resumidas destes ensaios. Os valores determinados são típicos de sedimentos arenosos, assim como os da Formação Pirambóia.

Adotando os critérios propostos por Terzaghi e Peck (1973, p.53) e Mello e Teixeira (1967, p.64), que consideram o grau de permeabilidade e o tipo de solo predominante, a condutividade hidráulica da zona não saturada da Área 2 pode ser classificada como média (Tabela 9.2).

**Tabela 9.1:** Localização dos ensaios e respectivos valores de condutividade hidráulica, para a Área 2.

Ensaio	E-W (UTM) (m)	N-S (UTM) (m)	K (cm/s)	K (m/dia)
K1	229.187,365	7.529.913,482	2,95E-04	0,25
K2	229.196,060	7.529.918,402	1,24E-03	1,07
K3	229.204,754	7.529.923,321	2,58E-03	2,23
K4	229.209,668	7.529.914,647	1,17E-03	1,01
K5	229.200,975	7.529.909,727	3,20E-04	0,28
<b>K6</b>	<b>229.192,281</b>	<b>7.529.904,808</b>	<b>9,02E-02</b>	<b>77,93</b>
K7	229.194,170	7.529.911,605	8,62E-04	0,74
K8	229.202,864	7.529.916,524	2,64E-03	2,28
<b>Média</b>			<b>1,30.10<sup>-3</sup></b>	<b>1,12</b>

Nota: o valor de K6, destacado em vermelho, não foi considerado no cálculo da média por apresentar elevada discrepância.

**Tabela 9.2:** Classificação da condutividade hidráulica da zona não saturada.

K (cm/s)	Grau de permeabilidade*	Tipo de solo+
10 <sup>9</sup> a 1	Alta	Pedregulhos
1 a 10 <sup>-1</sup>		<b>Areias</b>
10 <sup>-1</sup> a 10 <sup>-3</sup>	Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos	
10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-5</sup>		
10 <sup>-5</sup> a 10 <sup>-7</sup>	Muito baixa	
> 10 <sup>-7</sup>	Praticamente impermeável	Argilas

\*Terzaghi e Peck (1973, p.53); +Mello e Teixeira (1967, p.64).

#### 9.1.2 Ensaios de peneiramento

As amostras de solo coletadas no fundo dos furos abertos para os ensaios de condutividade hidráulica foram submetidas a ensaios de peneiramento e análise granulométrica, possibilitando a determinação da fração areia+pedregulho – principais frações

granulométricas da Formação Pirambóia – do solo da Área 2. Utilizou-se como parâmetro a norma NBR 6502/95 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 9.3.

**Tabela 9.3:** Fração areia+pedregulho obtida no ensaio de peneiramento para cada amostra coletada na Área 2.

<b>Ensaio corresp.</b>	<b>E-W (UTM) (m)</b>	<b>N-S (UTM) (m)</b>	<b>Areia+pedregulho (%)</b>
K1	229.187,365	7.529.913,482	72,60
K2	229.196,060	7.529.918,402	71,70
K3	229.204,754	7.529.923,321	72,19
K4	229.209,668	7.529.914,647	70,49
K5	229.200,975	7.529.909,727	72,61
K6	229.192,281	7.529.904,808	69,45
K7	229.193,301	7.529.911,113	72,05
K8	229.203,735	7.529.917,017	72,52
<b>Média</b>			<b>71,70</b>

As significativas porcentagens de areia e pedregulho determinadas nas amostras colhidas na área de estudos (Tabela 9.3) justificam a elevada condutividade hidráulica da zona não saturada do local (Tabela 9.1).

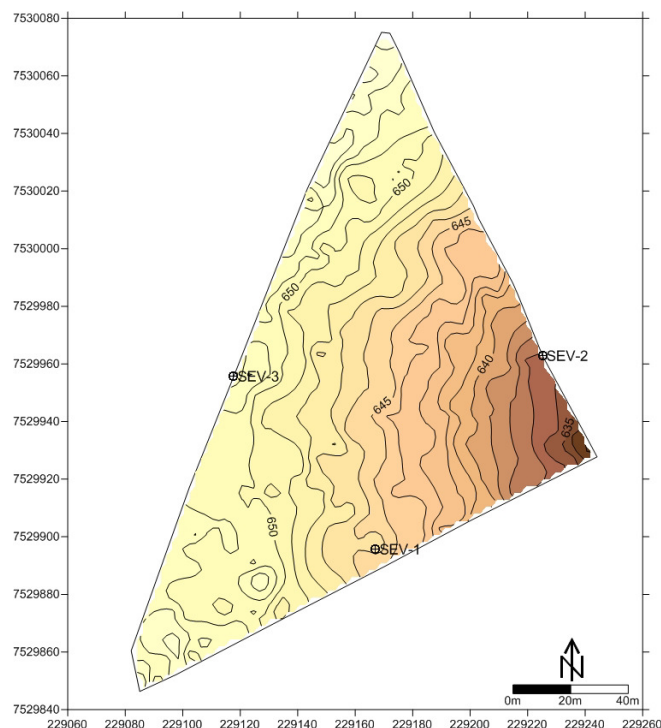
## 9.2 Ensaios geofísicos pré-infiltração

Assim como na Área 1, foram executados diversos ensaios geofísicos precedentes à infiltração de vinhaça e distribuídos regularmente por toda a Área 2, buscando o conhecimento das propriedades geofísicas naturais locais (*background*) e a otimização da coleta de dados na fase pós-infiltração.

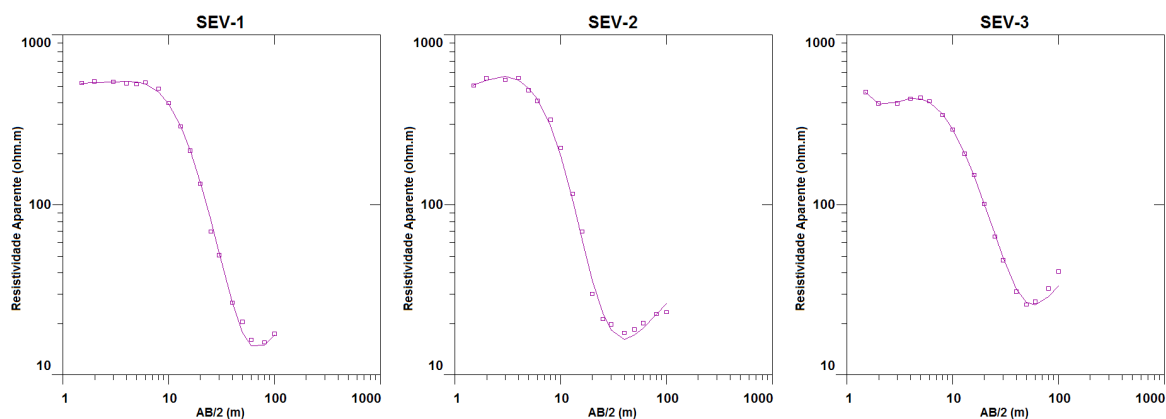
### 9.2.1 Sondagens Elétricas Verticais

Foram executadas 3 Sondagens Elétricas Verticais (SEV), distribuídas por toda a Chácara Santana, conforme ilustrado pela Figura 9.1. Na Área 2, as SEV foram distribuídas de modo distinto da Área 1, pois, neste caso, a intenção foi utilizar os resultados dos ensaios como ferramenta na escolha do local da nova área de estudos. Assim, locou-se a Área 2 especificamente em uma região onde o nível freático inferido situa-se a, aproximadamente, 8,6m de profundidade, tal como no Sítio Altarugio.

Com os dados de eletrorresistividade das 3 SEV foram geradas as 3 curvas mostradas na Figura 9.2, onde os caracteres (□) simbolizam os dados de campo e as linhas contínuas (–) representam as curvas de melhor ajuste, após o processamento.



**Figura 9.1:** Mapa topográfico da Chácara Santana indicando a localização das SEV.



**Figura 9.2:** Curvas de campo das SEV da Área 2.

O modelo geoeétrico de melhor ajuste para os dados da Área 2 (Tabela 9.4) é composto de 7 camadas, sendo que as 5 primeiras foram interpretadas como uma seqüência de sedimentos predominantemente arenosos da Formação Pirambóia (Figura 9.3, à esquerda). A camada 1 ocorre somente na SEV-3 (executada externamente aos limites da Chácara Santana, em uma estrada não pavimentada) e o elevado valor de  $\rho$  desta camada foi atribuído à compactação dos sedimentos pelo tráfego de automóveis, caminhões e, eventualmente, tratores que circulam neste local. As camadas 2, 3 e 4 foram respectivamente associadas às 3 subdivisões da zona não saturada: evapotranspiração, retenção e capilar, onde a resistividade elétrica varia principalmente em função da umidade do solo.

A quinta camada marca o início da zona saturada, onde  $25\Omega.m \leq \rho \leq 35\Omega.m$  sugerem a ocorrência de sedimentos silto-arenosos em uma zona de transição entre a Fm. Pirambóia e a

Fm. Corumbataí. O nível freático situa-se entre 11 e 6m de profundidade, respectivamente à montante e à jusante, com direção de fluxo aproximada para Nordeste.

As camadas 6 e 7 foram associadas aos sedimentos predominantemente silto-argilosos da Formação Corumbataí (Figura 9.3, à direita).

**Tabela 9.4:** Resumo do modelo geoeletrico proposto para a Área 2.

			SEV 1	SEV 2	SEV 3	Média	Interpretação
Fm. Pirambóia	Camada 1	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	-	-	1149,6	1149,6	Sedimentos predominantemente arenosos secos e compactados (estrada)
		E (m)	-	-	0,51	0,51	
	Camada 2	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	518,77	451,37	151,24	373,79	Sedimentos predominantemente arenosos sob influência da vegetação (evapotranspiração)
		E (m)	2,93	1,1	0,6	1,54	
	Camada 3	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	1384,4	1256,6	1207,8	1282,93	Sedimentos predominantemente arenosos secos (retenção)
		E (m)	1,28	1,2	1,34	1,27	
	Camada 4	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	105,71	120,84	134,71	120,42	Sedimentos predominantemente arenosos úmidos (franja capilar)
		E (m)	6,74	3,53	6,98	5,75	
	Camada 5	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	34,72	25,17	33,58	31,66	Sedimentos predominantemente silto-arenosos saturados (N.A)
		E (m)	11,01	8,49	12,36	11,12	
Fm. Corumbataí	Camada 6	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	4,16	7,77	7,96	6,8	Sedimentos predominantemente silto-argilosos saturados
		E (m)	16,78	16,08	13,31	16,69	
	Camada 7	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	58,18	60,05	89,69	292,64	Embasamento rochoso (seco?) (siltito)
		E (m)	-	-	-	-	

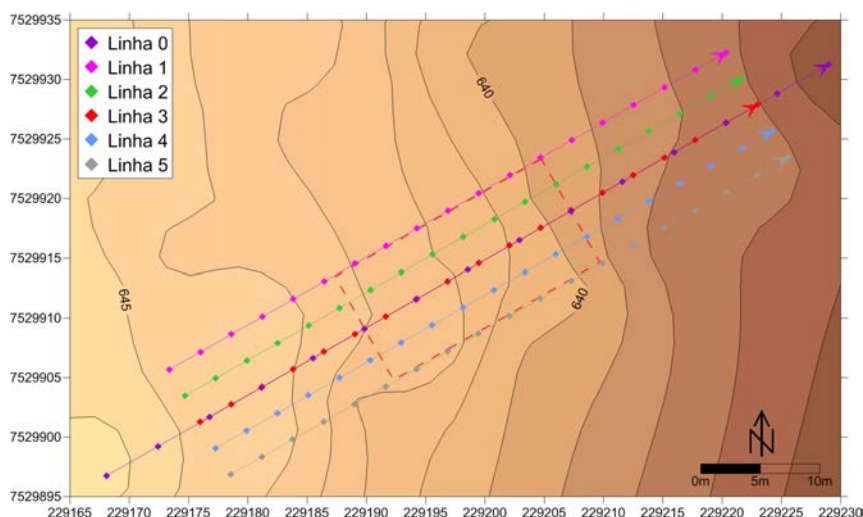
Notas:  $\rho$  = resistividade elétrica; E = espessura.



**Figura 9.3:** Afloramentos observados próximos à Área 2. À esquerda: sedimentos arenosos da Fm. Pirambóia. À direita: sedimentos silto-argilosos da Fm. Corumbataí.

## 9.2.2 Imageamentos Elétricos

Foram executados 6 Imageamentos Elétricos (IE) na Área 2, empregando-se o arranjo Dipolo-Dipolo com 8 níveis de investigação, para a coleta de dados de resistividade (ER) e de cargabilidade (IP), conforme a Figura 9.4.



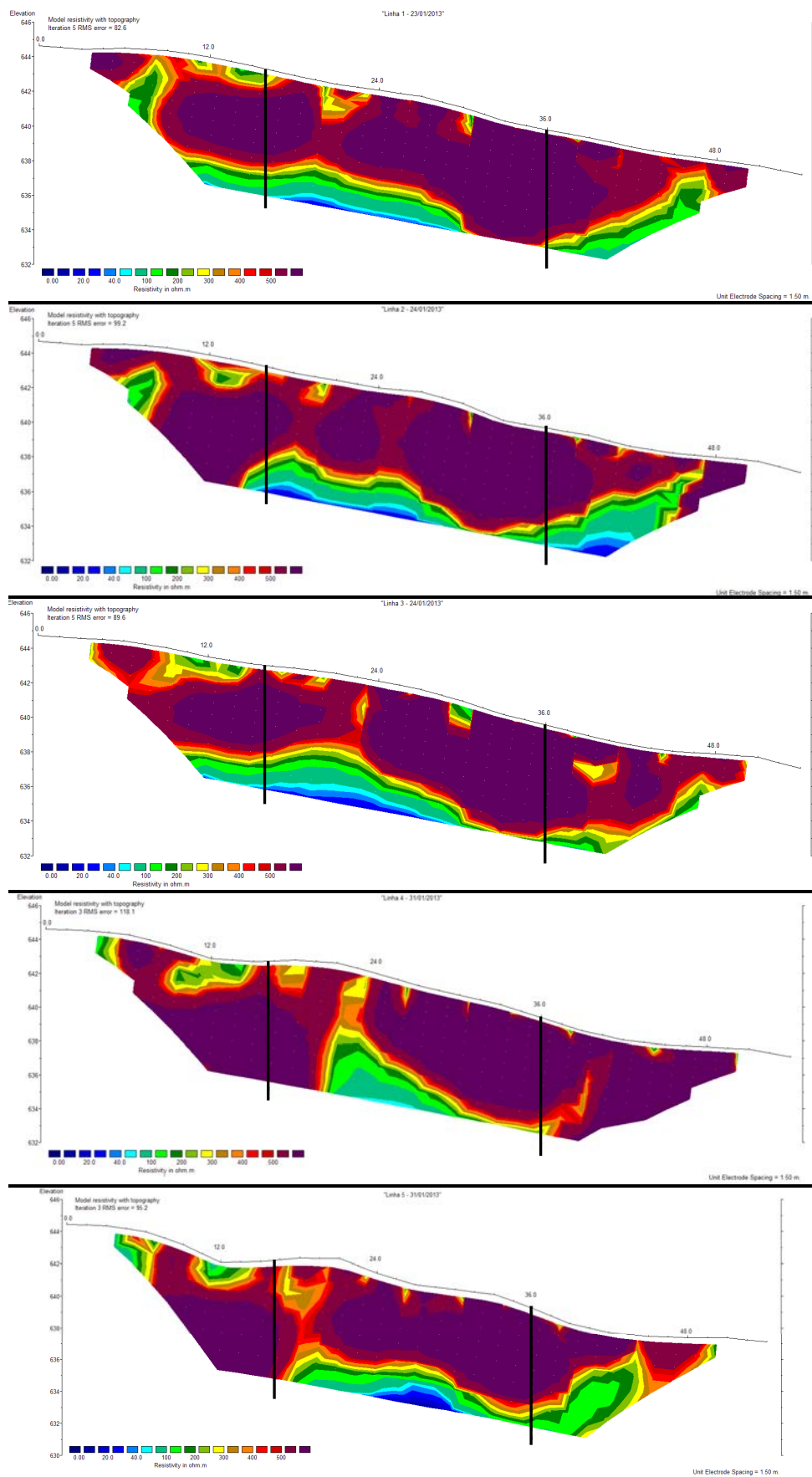
**Figura 9.4:** Mapa de localização dos IE da Área 2.

As seções de resistividade das Linhas 1 a 5 (Figura 9.5) e da Linha 0 (Figura 9.7) sugerem um cenário concordante com o modelo geoeletrico elaborado com os resultados das SEV. Globalmente, verifica-se a predominância de resistividades superiores a  $500\Omega.m$  desde a superfície até a profundidade aproximada de 6m. Todo este pacote sedimentar apresenta valores típicos de sedimentos predominantemente arenosos, como os da Fm. Pirambóia.

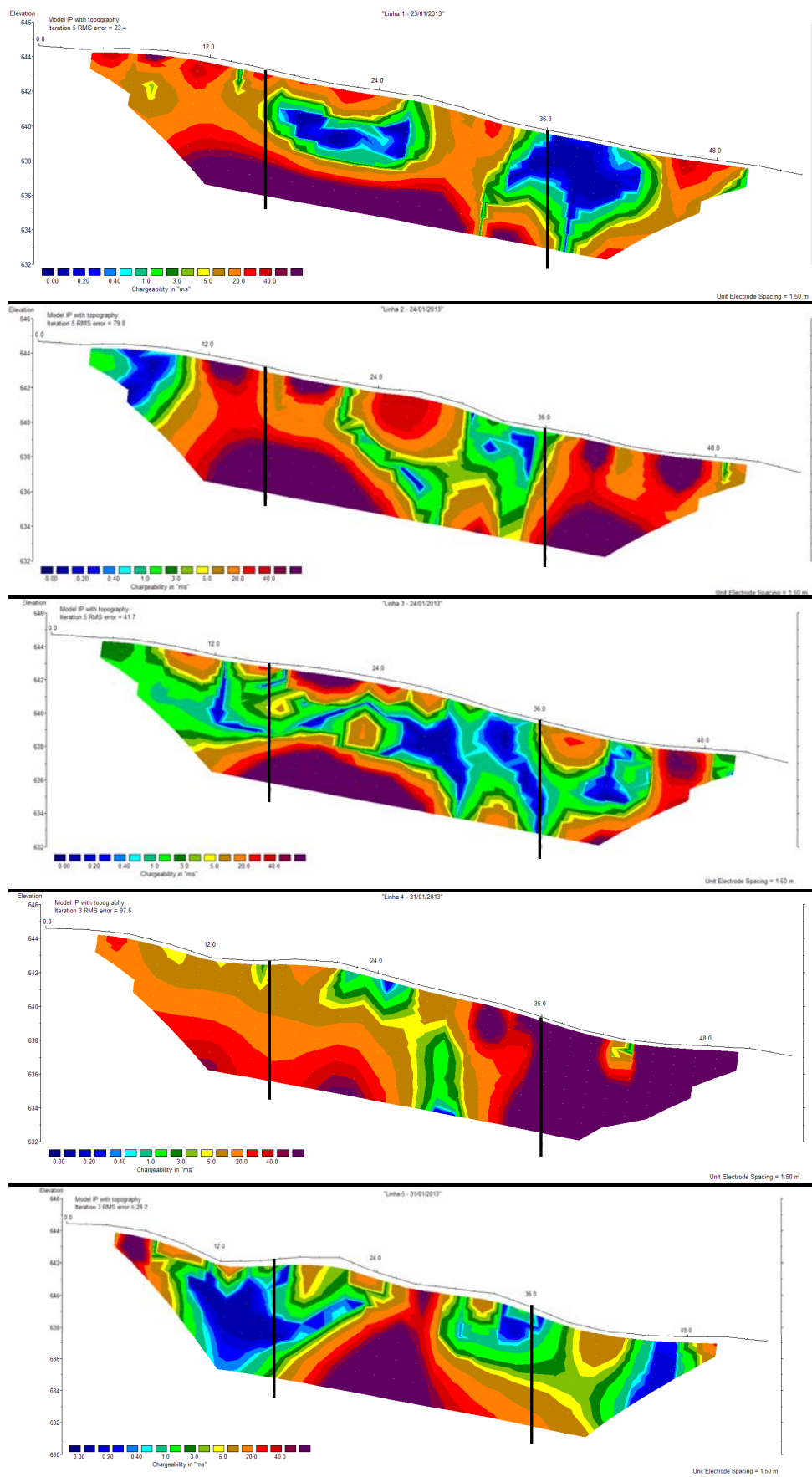
A partir deste ponto, os valores tendem a decrescer e, na porção inferior da seção, atingem a faixa onde  $\rho \leq 100\Omega.m$ . Pelo contexto hidrogeológico local, estes valores podem indicar a franja capilar ou até mesmo o início da zona saturada.

A respeito da cargabilidade (Figuras 9.6 e 9.8), observa-se a predominância de valores acima de 20ms, com a intercalação de zonas de menor cargabilidade relativa ( $M < 5ms$ ). Este comportamento pode ser associado à heterogeneidade natural do meio, onde as regiões de maior intensidade do efeito IP refletem os maiores teores de argila e/ou de umidade.

Devido à profundidade teórica de investigação, é provável que se tenha investigado majoritariamente a Fm. Pirambóia, hipótese sustentada pela faixa de valores de  $\rho$  e de  $M$ , tipicamente de sedimentos predominantemente arenosos. Os baixos valores de resistividade e os elevados valores de cargabilidade verificados na porção basal de cada seção foram interpretados como uma região de transição entre as Formações Pirambóia e Corumbataí.

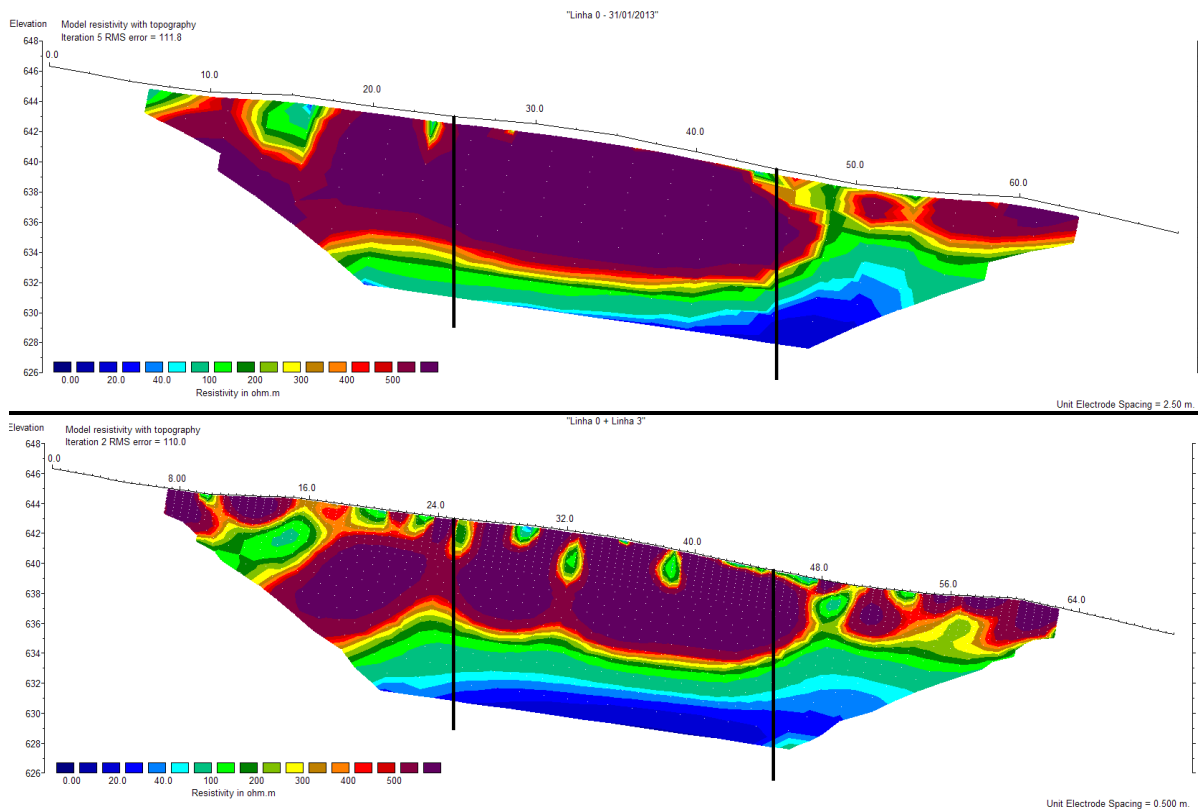


**Figura 9.5:** Seções de resistividade das Linhas 1 a 5 (pré-infiltração) da Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo. Abertura dos dipolos ( $x$ ) = 3m.

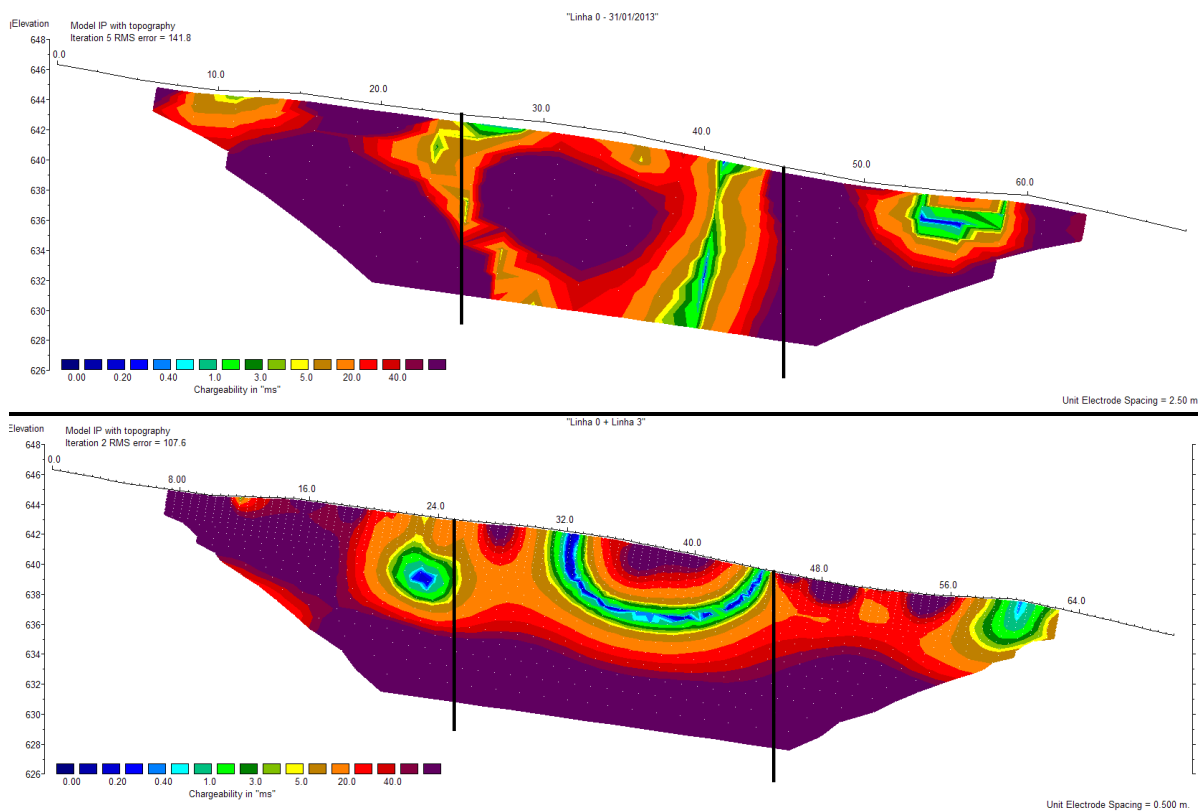


**Figura 9.6:** Seções de cargabilidade das Linhas 1 a 5 (pré-infiltração) da Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo. Abertura dos dipolos ( $x$ ) = 3m.





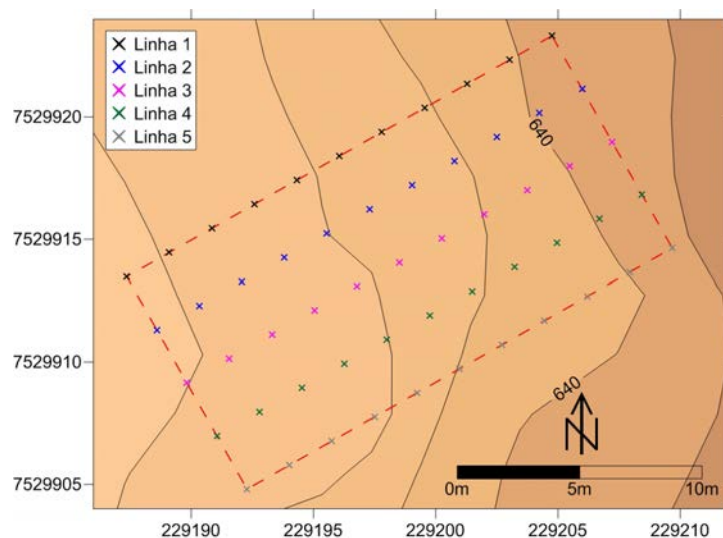
**Figura 9.7:** Acima: seção de resistividade da Linha 0. Abertura dos dipolos ( $x$ ) = 5m. Abaixo: seção de resistividade combinada pelas Linhas 0 e 3. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.



**Figura 9.8:** Acima: seção de cargabilidade da Linha 0. Abertura dos dipolos ( $x$ ) = 5m. Abaixo: seção de cargabilidade combinada pelas Linhas 0 e 3. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

### 9.2.3 Imageamentos Eletromagnéticos

A aquisição dos dados de condutividade elétrica ( $\sigma$ ) foi feita por meio de 5 linhas de imageamentos eletromagnéticos (IEM), conforme a Figura 9.9. As respectivas curvas de condutividade elétrica são apresentadas no Apêndice C.



**Figura 9.9:** Mapa de localização dos IEM da Área 2.

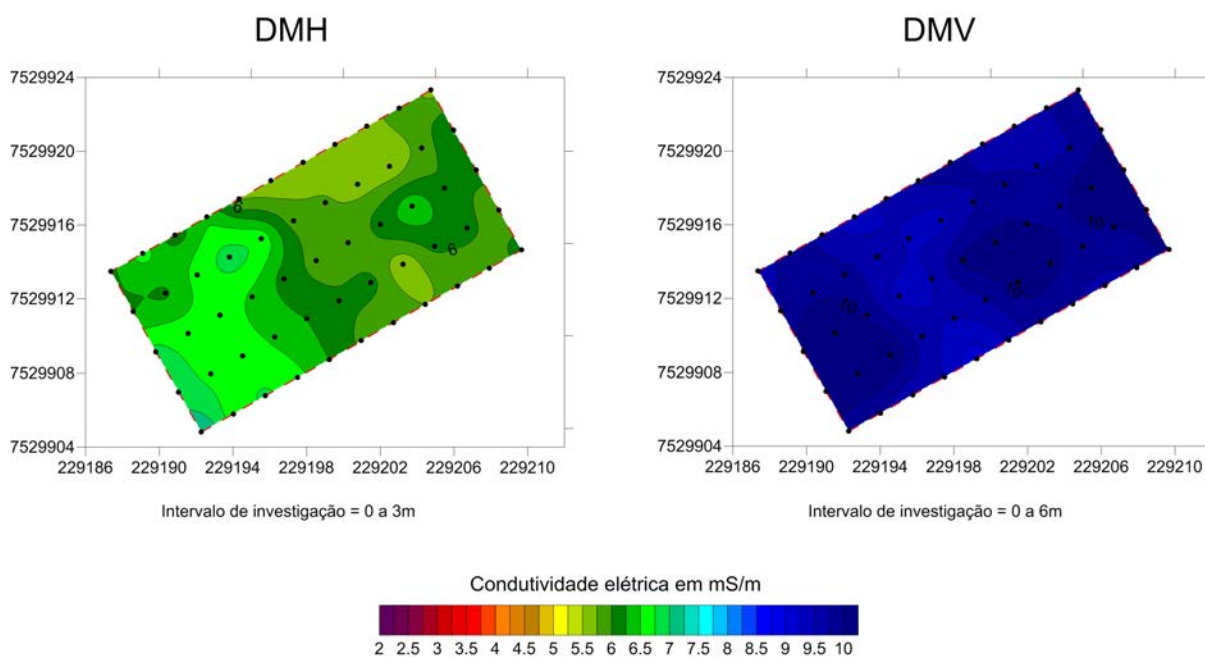
Foram empregadas as duas orientações das bobinas – Dipolo Magnético Horizontal (DMH) e Dipolo Magnético Vertical (DMV), resultando em duas profundidades teóricas de investigação: de 0 a 3m e de 0 a 6m, respectivamente.

Na Figura 9.10, constata-se que os valores de condutividade elétrica à profundidade de 3m são relativamente menores aos observados a 6m. Atribui-se este comportamento à maior quantidade de eletrólitos existentes em profundidade próximas ao nível freático. Assim, o maior número de partículas eletricamente condutoras facilita o fluxo de correntes elétricas (no caso do método EM, gerada por indução pelo condutímetro).

Relativamente à Área 1, a faixa de variação de  $\sigma$  da Área 2 é menor e pode ser relacionada ao arcabouço geológico local. A condutividade elétrica (ou seu inverso, a resistividade elétrica) de um meio geológico é regida por diversos fatores, dentre eles a porosidade, a resistividade da água contida nos poros e o grau de saturação do meio (fração do volume ocupada pela água em relação ao volume total dos poros) – Lei de Archie (ARCHIE, 1942 *apud* ORELLANA, 1972, p.63).

Assumindo que a resistividade da água intraporo e o grau de saturação dos sedimentos sejam os mesmos para dois meios geológicos distintos, então as condutividades (ou

resistividades) de ambos dependerão exclusivamente da porosidade. Sendo a porosidade de um meio siltoso/argiloso (como a Fm. Corumbataí – Área 1) significativamente menor que a de um meio arenoso (tal como na Fm. Pirambóia – Área 2), então se espera que a condutividade elétrica para a Fm. Corumbataí seja maior relativamente à Fm. Pirambóia.



**Figura 9.10:** Mapas de condutividade elétrica (pré-infiltração) para a Área 2.

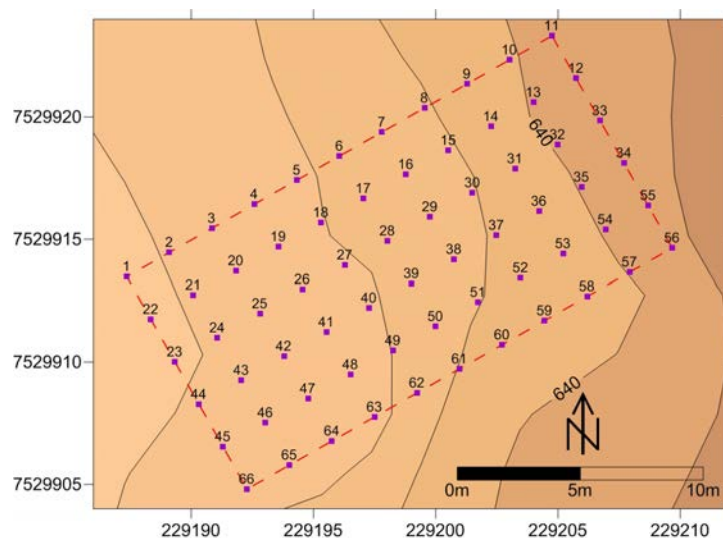
#### 9.2.4 Potencial Elétrico Natural

As leituras de potencial espontâneo (SP) foram efetuadas em 66 estações de medida na Área 2, conforme a Figura 9.11, empregando-se a Técnica dos Potenciais (ou Técnica de Base Fixa). Cada estação dista 2m da estação consecutiva em ambos os eixos.

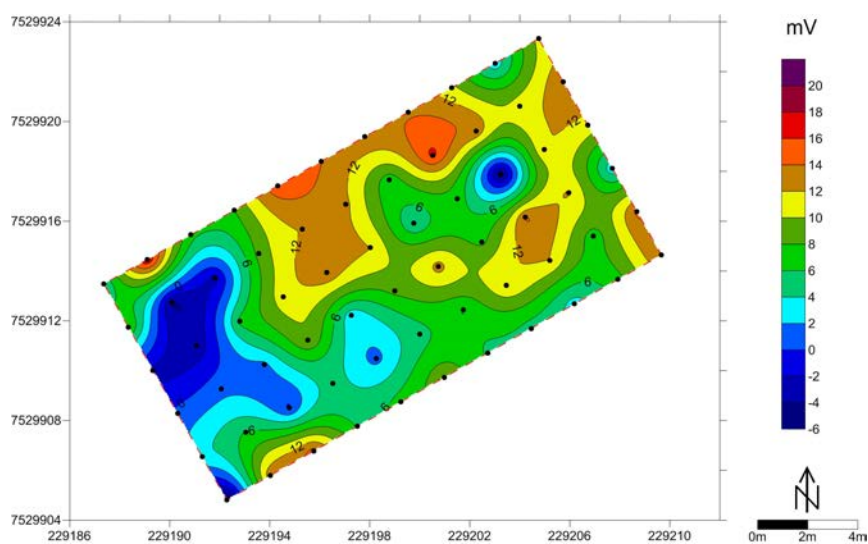
Os dados coletados foram empregados na confecção de um mapa de potencial natural, exibido na Figura 9.12. Os valores medidos oscilaram entre -6,2 e 18,2mV, resultando em amplitude de 24,4mV.

A ocorrência de valores negativos à montante da área está possivelmente associada à atividade geoquímica decorrente da decomposição de fezes de animais, já que o local da anomalia é próximo ao comedouro instalado para o gado e onde se verifica a maior concentração de excrementos de toda a propriedade.

A predominância de valores positivos no restante da área de estudos – e com maior intensidade à jusante – pode ser um reflexo do menor grau de saturação por água dos sedimentos.



**Figura 9.11:** Mapa de localização das estações de SP da Área 2.



**Figura 9.12:** Mapa de potencial espontâneo (pré-infiltração) da Área 2.

### 9.3 Análises físico-químicas

Logo após a conclusão da fase pré-infiltração dos ensaios geofísicos, procedeu-se a análise físico-química de amostras de solo e da vinhaça a ser infiltrada na Área 2, visando a determinação do volume de contaminante a ser infiltrado de acordo com o estabelecido pela norma P4.231 (CETESB, 2006).

#### 9.3.1 Amostras de solo

Foram coletadas 20 amostras em pontos aleatoriamente escolhidos dentro da área de estudos, contemplando os primeiros 20cm de solo, e homogeneizadas dentro um recipiente

limpo. Deste total, retirou-se uma fração de 1kg, a qual foi enviada ao Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” em Piracicaba (SP) e solicitada a análise tipo “SQ5.1”, específica para a norma P4.321. Os resultados obtidos nestas análises são apresentados na Tabela 9.5. No Anexo I encontra-se uma cópia do material original fornecido pelo laboratório.

**Tabela 9.5:** Resultados das análises físico-químicas executadas em amostras de solo da Área 2.

Item	Valor	Unidade
pH	4,8	-
Matéria orgânica (M.O.)	16	-
Fósforo (P)	3	mg/dm <sup>3</sup>
Enxofre (S)	<4	mg/dm <sup>3</sup>
Sódio (Na)	<0,2	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>
Potássio (K)	2,2	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>
Cálcio (Ca)	4	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>
Magnésio (Mg)	3	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>
Alumínio (Al)	<1	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>
Acidez potencial (H+Al)	22	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>
Soma de bases trocáveis (SB)	9,5	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>
Capacidade de troca catiônica (CTC)	32	mmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>
Saturação da CTC por bases (V)	30	%
Saturação (m)	9	%
Ponto de saturação total (PST)	1	%

Em comparação aos resultados da Área 1 (Tabela 8.5), percebem-se características distintas, tal como pH inferior (mais ácido) e menor quantidade de matéria orgânica. Esta última, em especial, exerce influência direta sobre a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, pois, segundo Ronquim (2010, p.8):

As argilas minerais, as substâncias húmicas e os óxidos de ferro e alumínio possuem determinada superfície de troca e são os principais colóides responsáveis pela capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos sob condições tropicais.. Em razão do maior número de cargas negativas do que positivas desses colóides, a adsorção é principalmente de cátions.

Segundo o mesmo autor, entendem-se que substâncias húmicas são aquelas com caráter coloidal que agregam o solo e produzidas pela decomposição da palha, em condições aeróbias, por bactérias e fungos. Portanto, o menor teor de argila e a menor quantidade de matéria orgânica foram dois fatores importantes para a menor CTC do solo da Área 2 relativamente à Área 1.

### 9.3.2 Amostra de vinhaça

A vinhaça infiltrada na Área 2 é oriunda da Usina Granelli, assim como na Área 1. Durante os contatos iniciais, o proprietário da usina gentilmente forneceu uma cópia dos resultados de análises físico-químicas executadas em uma amostra de vinhaça gerada no local. As análises foram feitas pelo laboratório Bioagri Ambiental, unidade de Piracicaba (SP).

A fim de evitar a repetição de informações, sugere-se consultar a Tabela 8.6 para visualizar um resumo dos resultados obtidos nesta análise. No Anexo II encontra-se uma cópia do material original fornecido pelo laboratório.

## 9.4 Infiltração da vinhaça

### 9.4.1 Cálculo do volume a ser infiltrado

O volume de vinhaça infiltrado na Área 2 foi calculado por meio da Equação 1.1, proposta na norma P4.231 da CETESB. A expressão matemática proposta possui três variáveis, as quais foram determinadas por meio das análises apresentadas no item 9.3, a saber:

- CTC = Capacidade de Troca Catiônica do solo =  $32,0 \text{ mmol}_c/\text{dm}^3 = 3,20 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
- $k_s$  = concentração de potássio no solo =  $2,2 \text{ mmol}_c/\text{dm}^3 = 0,22 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$
- $k_{vi}$  = concentração de potássio na vinhaça =  $739 \text{ mg/L} = 0,739 \text{ kg/m}^3$

Efetuando-se os cálculos, obteve-se o valor limite de  $-5,36 \text{ L/m}^2$ . O resultado negativo ocorre, pois existe uma limitação para a aplicação da norma P4.231: “a concentração máxima de potássio no solo não poderá exceder 5% da CTC” (CETESB, 2006, p.7). Do contrário, “a aplicação de vinhaça ficará restrita à reposição desse nutriente em função da extração média pela cultura, que é de  $185 \text{ kg}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  por hectare por corte” (CETESB, op. cit). Portanto, para a aplicação da norma na Área 2, a concentração de potássio no solo deveria ser no máximo de  $1,6 \text{ mmol}_c/\text{dm}^3$ . Mas, para manter a similaridade das condições de realização do experimento, adotou-se como parâmetro a maior dose calculada entre ambas as áreas:  $60 \text{ litros/m}^2$ .

### 9.4.2 Infiltração

Seguindo os mesmos procedimentos adotados para a Área 1, a infiltração da vinhaça nas valas (Figura 9.13) novamente ocorreu em duas etapas:

- **Etapa 1:** foram depositados 60L na vala A e 300L na vala B. O primeiro valor corresponde ao limite calculado no item 8.4.1; o segundo valor é 5 vezes superior ao limite calculado, volume suficiente para gerar uma região de contraste acentuado em termos de propriedades físicas.
- **Etapa 2:** somente na vala B foram depositados mais 900L. No caso da Área 2, esta infiltração foi feita somente para manter o padrão adotado para a Área 1.



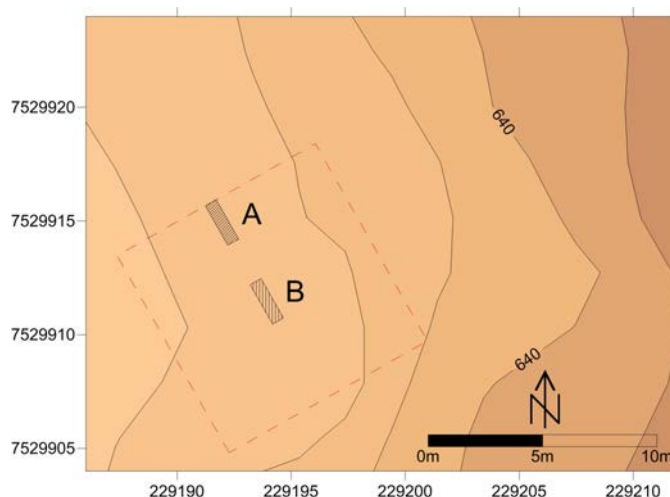
**Figura 9.13:** Infiltração de vinhaça na Área 2.

### 9.5 Ensaios geofísicos pós-infiltração

Iniciou-se a fase pós-infiltração dos ensaios geofísicos no dia imediatamente posterior à infiltração de 60L de vinhaça na vala A e de 300L na vala B. Em busca de maior detalhamento dos ensaios e da otimização dos trabalhos de campo, algumas mudanças foram adotadas, em relação à fase anterior, quanto às dimensões da área, às características e ao número de ensaios e aos equipamentos empregados.

Durante as três primeiras semanas do monitoramento, os ensaios geofísicos estenderam-se ao longo dos 20m do eixo maior da área. Após este período, o comprimento da área de estudos foi reduzido para os primeiros 10m do mesmo eixo, pois os dados mostraram contrastes restritos ao entorno das valas (Figura 9.14). A largura da área não sofreu alterações.

Com base na condutividade hidráulica média da área –  $1,30 \cdot 10^{-3}$  cm/s ou 1,12m/dia (item 9.1.1) – determinou-se que a repetição dos ensaios geofísicos deveria ocorrer 2 vezes a cada semana. Teoricamente, determinado volume de líquido, se infiltrado na área de estudos, formaria uma pluma que se deslocaria à velocidade de 1,12m por dia. A cada 3 dias, este volume teria se deslocado por 3,36m, distância mais que suficiente para que fosse possível detectá-la com os métodos escolhidos.

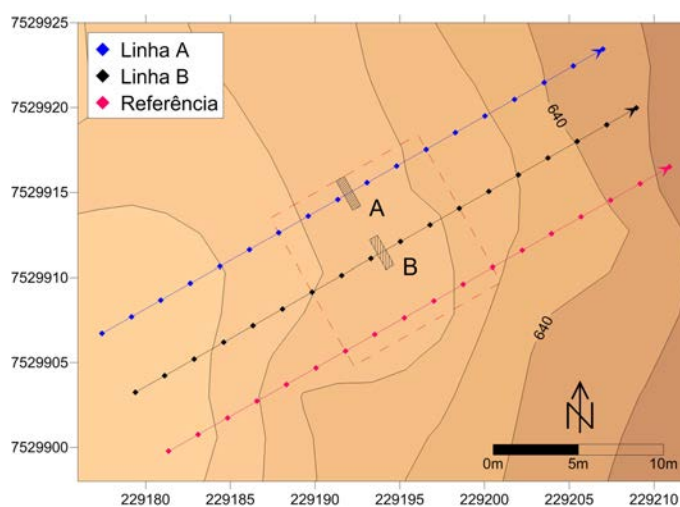


**Figura 9.14:** Redução dos limites da área de estudos.

### 9.5.1 Imageamentos Elétricos

Nesta fase do projeto foram executadas 3 linhas de Imageamentos Elétricos. Duas delas foram executadas de modo a interceptar as valas A e B, recebendo a nomenclatura respectiva de Linha A e Linha B. A terceira linha, denominada Linha de Referência, foi executada na porção Sudeste da área, em local isento de contaminação por vinhaça. Esta última foi executada somente uma vez, enquanto que as outras foram repetidas sistematicamente duas vezes por semana durante quatro semanas.

Empregou-se, novamente, o arranjo Dipolo-Dipolo com 8 níveis de investigação. Porém, o espaçamento dos dipolos foi reduzido para 2m na intenção de se obter maior resolução lateral, de acordo com o nível de detalhes pretendido. A Figura 9.15 apresenta uma visão geral dos IE executados na fase pós-infiltração na Área 2.



**Figura 9.15:** Mapa de localização dos IE pós-infiltração executados na Área 2.

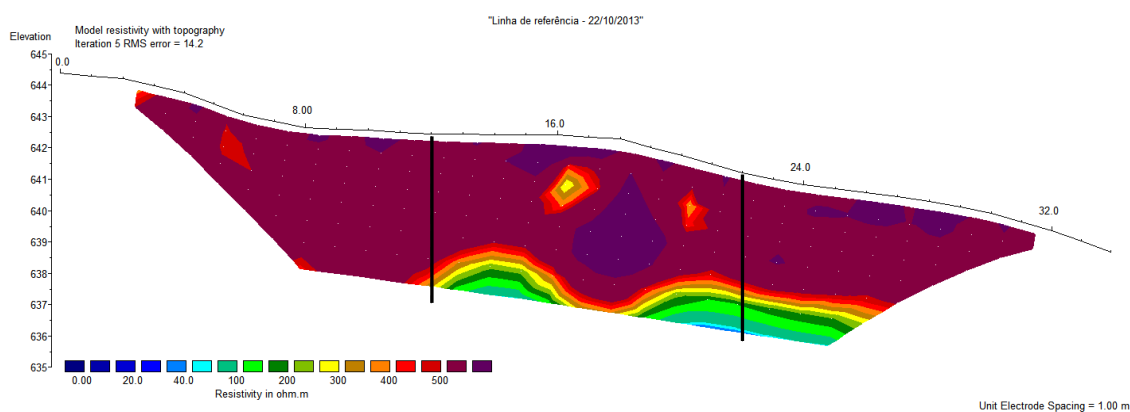


Assim como na fase pré-infiltração, as linhas de IE foram posicionadas de modo que os limites da área de estudo estivessem completamente inseridos na porção central das seções e em todos os níveis de investigação.

### 9.5.1.1 Linha de referência

Em relação às seções de resistividade da fase pré-infiltração (Figuras 9.5 e 9.7), a seção da linha de referência da fase atual (Figura 9.16) mostra-se mais uniforme, com a predominância de valores de  $\rho$  maiores ou iguais a  $500\Omega.m$ , associados aos sedimentos predominantemente arenosos da Fm. Pirambóia.

Na porção basal da seção, ocorre uma faixa de resistividades iguais ou menores a  $100\Omega.m$  que, no contexto da área, corresponde ao início da zona saturada.

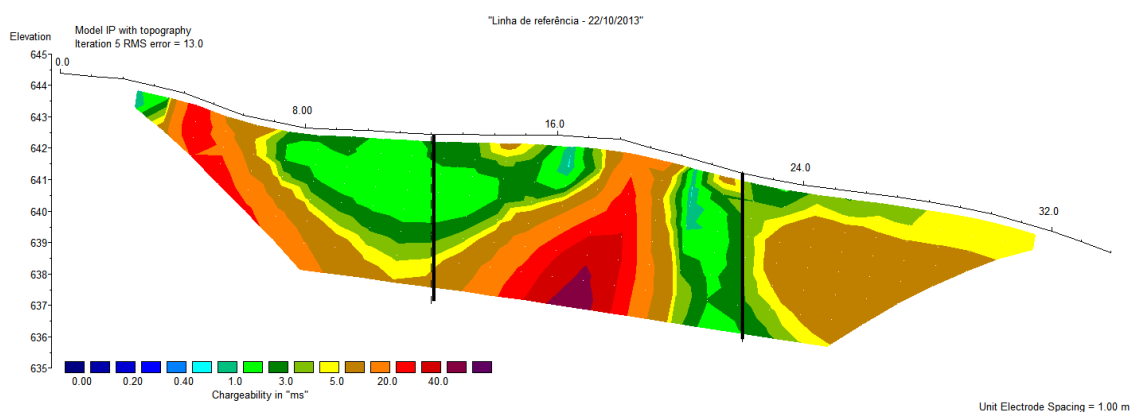


**Figura 9.16:** Seção de resistividade da Linha de referência da fase pós-infiltração da Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

Quanto à cargabilidade, a seção da Figura 9.17 apresenta algumas semelhanças com as seções da Figura 9.6 e 9.8. É possível observar zonas distintas de cargabilidade, onde regiões de  $M < 5,0ms$  ocorrem intercaladas à porção majoritária de  $M > 5,0ms$ . Este comportamento sugere relação com as heterogeneidades naturais do meio, onde as regiões com os maiores teores de argila e/ou de umidade exibem proporcionalmente os maiores valores do efeito IP.

Por outro lado, a menor amplitude dos valores de  $M$ , observada na Figura 9.17 ( $1ms \leq M \leq 40ms$ ) em relação às Figuras 9.6 e 9.8 ( $0,1ms \leq M \leq 50ms$ ), é devida ao aumento dos valores mínimos de cargabilidade. Este pode ser associado a um incremento da quantidade de água intersticial, ocasionado pelo regime de chuvas do período.

Considerando o espaçamento de dipolos utilizados e à sua respectiva profundidade de investigação, além da faixa de valores típicos de resistividade e de cargabilidade, pode-se deduzir que somente a Formação Pirambóia foi investigada nestes ensaios.



**Figura 9.17:** Seção de cargabilidade da Linha de referência da fase pós-infiltração da Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo.

### 9.5.1.2 Monitoramento: Linha A

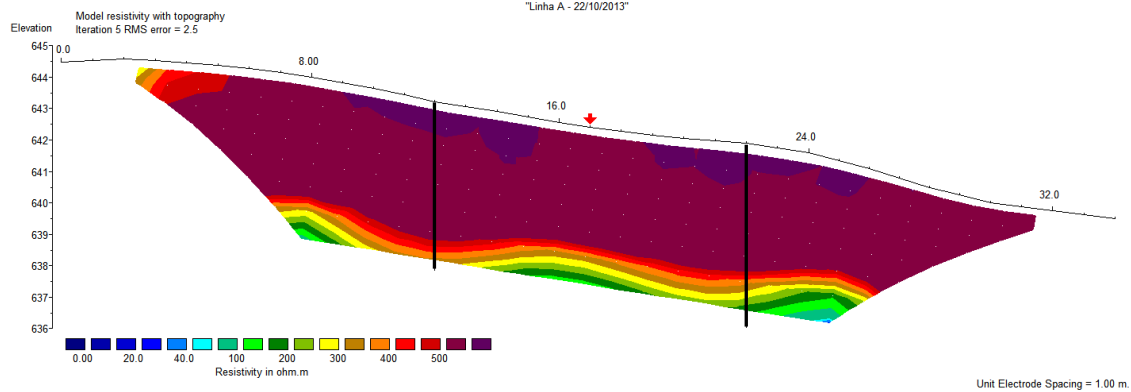
Os ensaios geofísicos executados sobre a vala A permitiram investigar se a infiltração de 60 litros de vinhaça (limite calculado para a Área 1 e adotado também para a Área 2 – item 9.4.1) poderia ser detectada geoeletricamente em subsuperfície. As seções de resistividade referentes a esta etapa são apresentadas nas Figuras 9.18 e 9.19.

Observando-se a Figura 9.18 é possível notar que, durante os 4 primeiros dias de monitoramento (isto é, entre 1 e 10 dias após a infiltração), os valores de resistividade das adjacências da vala A mantiveram-se sempre acima de  $500\Omega.m$ , tal como na seção da linha de referência (Figura 9.16), executada em ambiente isento de contaminação. Aparentemente, os 60 litros de vinhaça não impactaram o meio natural a ponto de gerar uma região de contrastes detectável pelo método ER, mesmo sendo um volume significativamente superior ao calculado para a Área 2.

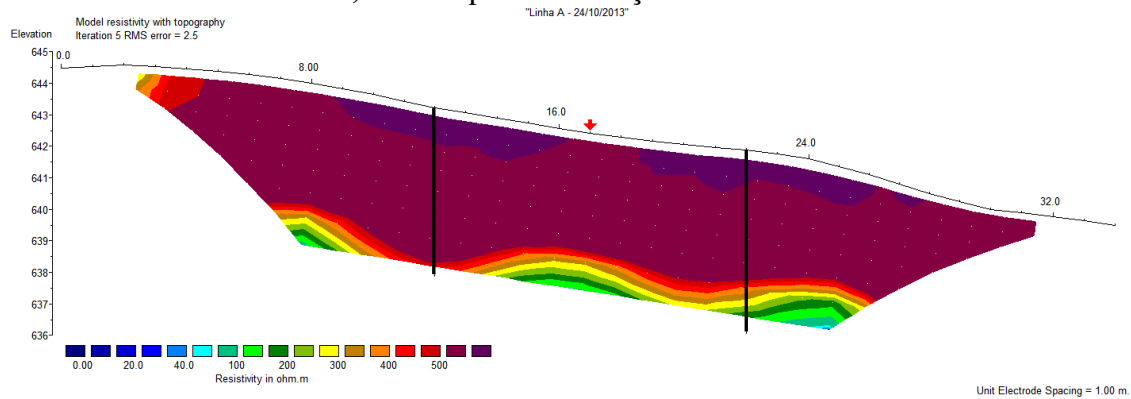
Decorridos 15 dias da primeira infiltração (60 litros na vala A e 300 litros na vala B), procedeu-se a segunda infiltração, agora com 900 litros de vinhaça somente na vala B (Figura 9.19). As anomalias observadas logo abaixo da vala, nestas seções, são atribuídas a um possível fluxo subterrâneo de contaminante, que migrou da vala B em direção à vala A.

Relativamente ao *background* da área, as regiões anômalas exibem menor resistividade, atingindo o mínimo de  $100\Omega.m$  (na Figura 9.19c). Resultados semelhantes obtiveram Cruz et al. (2008, p.490), que caracterizaram a influência da vinhaça no solo por reduzidos valores de resistividade. Segundo os autores, os baixos valores de resistividade são atribuídos à influência dos sais e à retenção de água pela matéria orgânica, ambos presentes em elevadas quantidades na vinhaça.

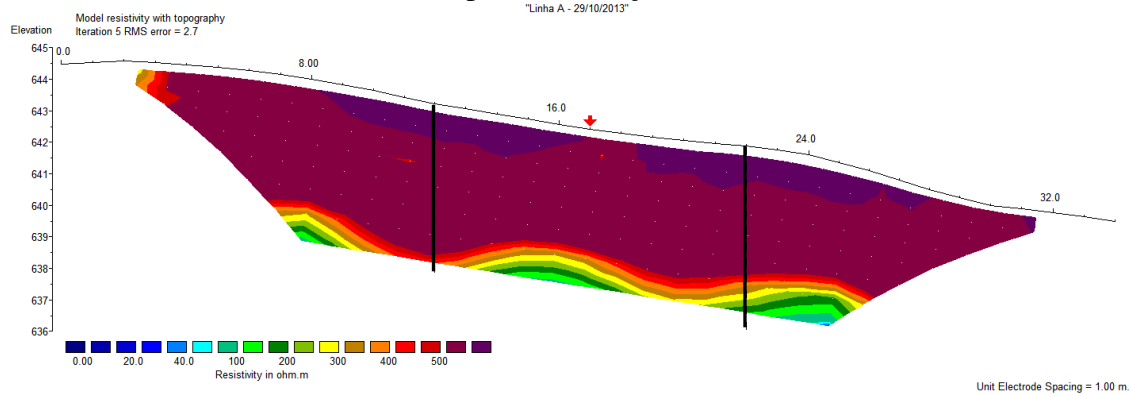
a) 1 dia após a infiltração de 60 litros



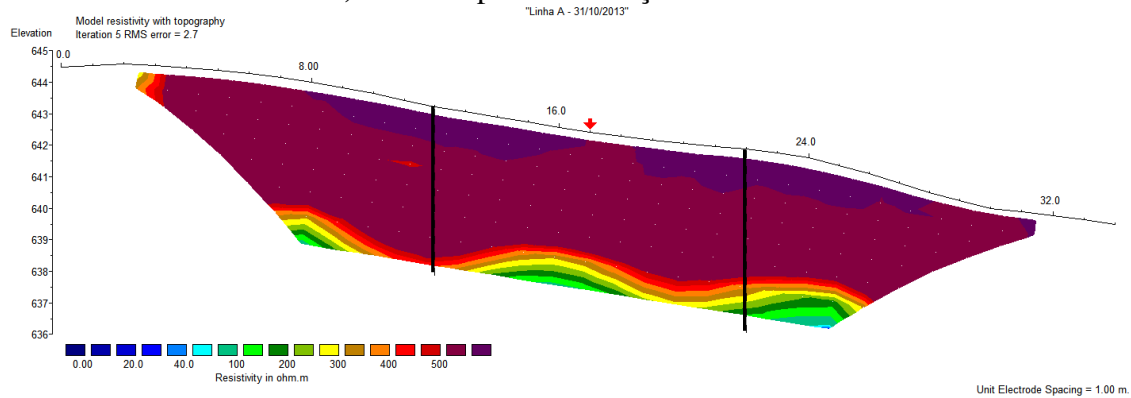
b) 3 dias após a infiltração de 60 litros



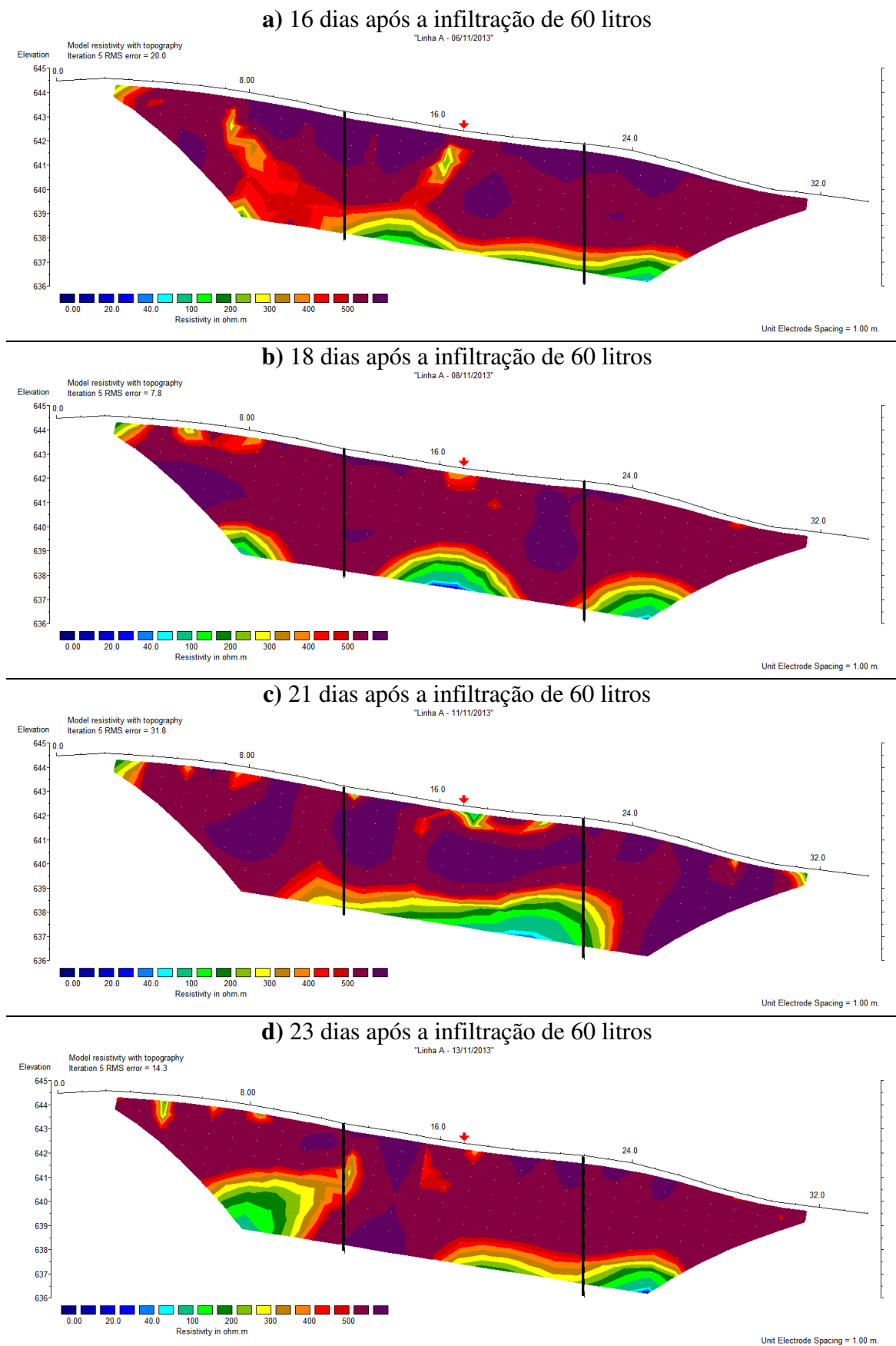
c) 8 dias após a infiltração de 60 litros



d) 10 dias após a infiltração de 60 litros



**Figura 9.18:** Seções de resistividade da Linha A executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala A.



**Figura 9.19:** Seções de resistividade da Linha A executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala A.

No caso de sedimentos arenosos, como na Área 2, a adsorção dos cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  é significativamente reduzida devido à proporcionalmente baixa capacidade de troca catiônica (CTC). Deste modo, a propagação de correntes elétricas injetadas é facilitada pela presença de partículas eletricamente condutoras.

A variação gradativa da resistividade sugere relação entre a intensidade da anomalia, o volume e o tempo de permanência do contaminante no solo. Conforme o volume de vinhaça que atinge a região da vala A aumenta, verifica-se proporcional redução da resistividade no local (Figuras 9.19a a 9.19c). Em paralelo, quanto maior o tempo de permanência da vinhaça no solo, mais intensos são os processos de degradação bioquímica sobre o contaminante, causando a elevação da resistividade da porção de solo impactada (Figura 9.19d).

O parâmetro cargabilidade exhibe comportamento mais complexo que o da resistividade (Figuras 9.20 e 9.21). Aparentemente, a cargabilidade é fortemente influenciada pela variação de umidade do solo decorrente das chuvas registradas no período.

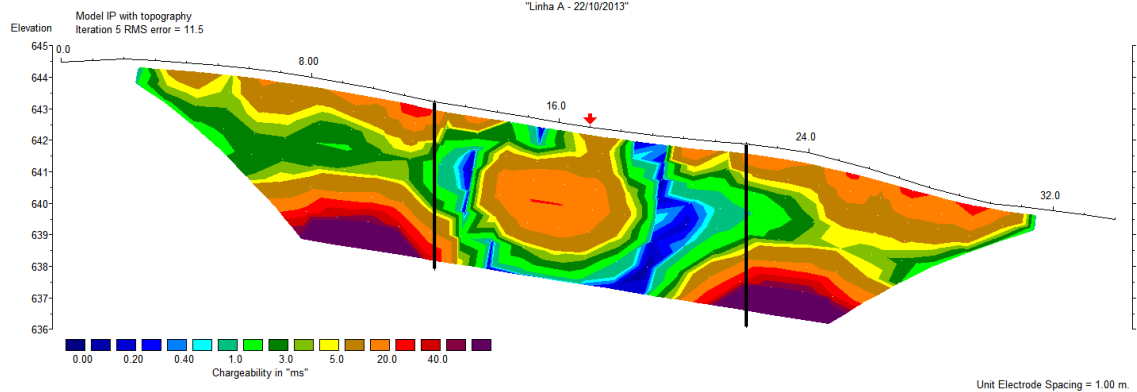
Devido à elevada porosidade dos sedimentos da Fm. Pirambóia, os valores da permeabilidade hidráulica (K) – fator determinante quanto à velocidade de infiltração de líquidos em ambientes sedimentares – são tipicamente elevados, como pode ser observado na Tabela 9.1. Aliado à baixa capacidade de troca catiônica (CTC), solos arenosos não conseguem reter íons e/ou moléculas eletricamente carregadas tão fortemente quanto um solo argiloso, resultando em reduzidos valores de M.

Quando a umidade do solo é menor, ocasionada pela ausência de chuvas e pelo fluxo vertical acelerado das águas infiltradas (K elevada), observa-se o decréscimo da cargabilidade, pois há escassez de substâncias polarizáveis. Quando ocorrem significativos volumes de precipitação, as águas pluviais são rapidamente infiltradas no solo e, durante sua breve permanência, verifica-se o incremento da cargabilidade. Assim, o que se deduz das Figuras 9.20 e 9.21 é que as zonas de baixa cargabilidade correspondem às regiões onde os sedimentos arenosos são majoritários e, por isso, estas zonas são mais suscetíveis à rápida flutuação de valores.

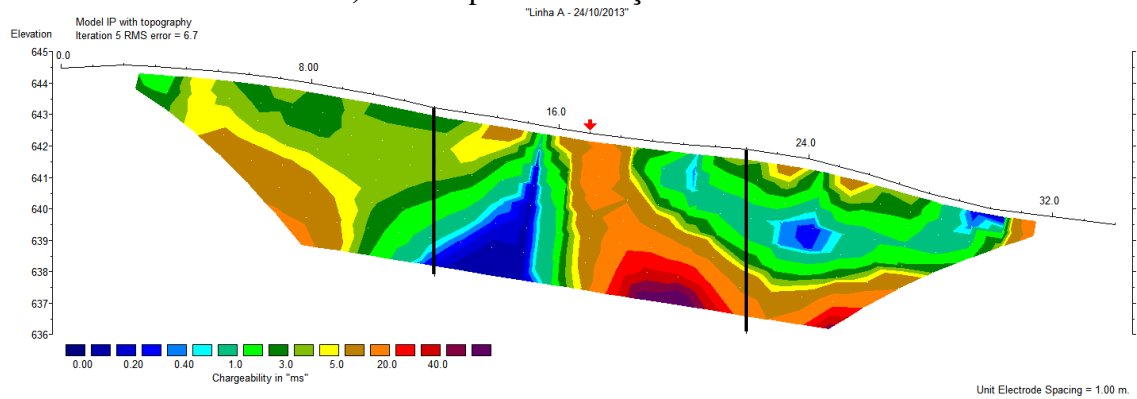
Com base nesta argumentação, é possível correlacionar explicitamente a amplitude dos valores de M (aqui designada por  $\Delta M$ ) de cada seção com a precipitação registrada nos meses de outubro e novembro de 2013, quando foram executados estes ensaios (Figuras 9.22 e 9.23).

A correlação observada é de proporcionalidade inversa: quanto maior é o volume de chuvas no período, menor é a amplitude da cargabilidade em cada sessão (tal como nas Figuras 9.20c, 9.20d e 9.21a). Numericamente, esta redução da amplitude deve-se à diminuição dos valores máximos e à elevação dos valores mínimos de cargabilidade.

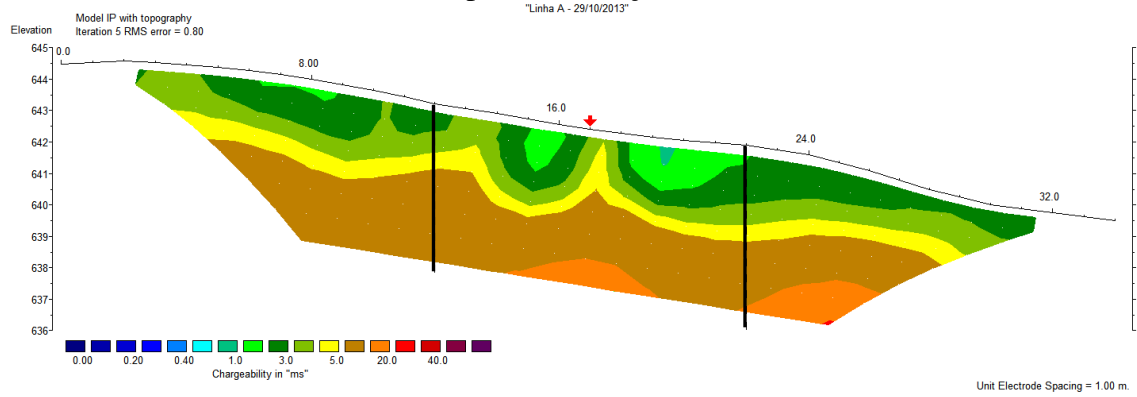
a) 1 dia após a infiltração de 60 litros



b) 3 dias após a infiltração de 60 litros



c) 8 dias após a infiltração de 60 litros



d) 10 dias após a infiltração de 60 litros

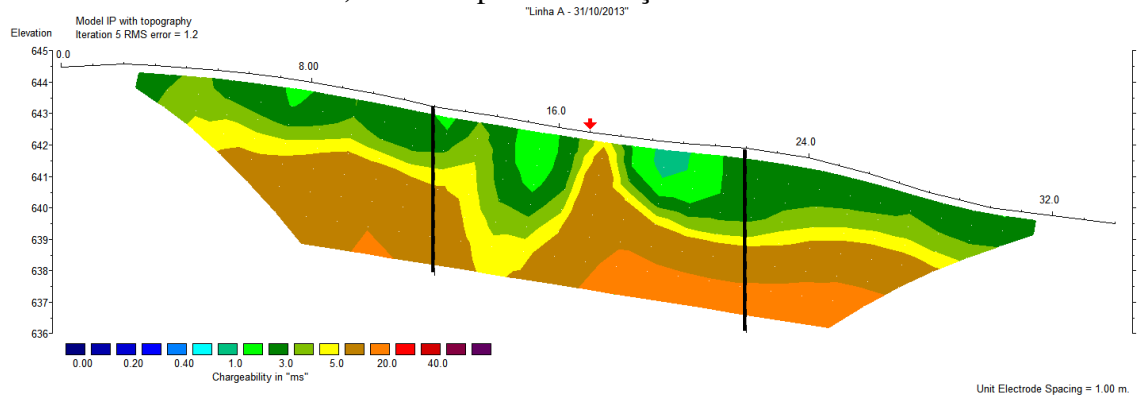
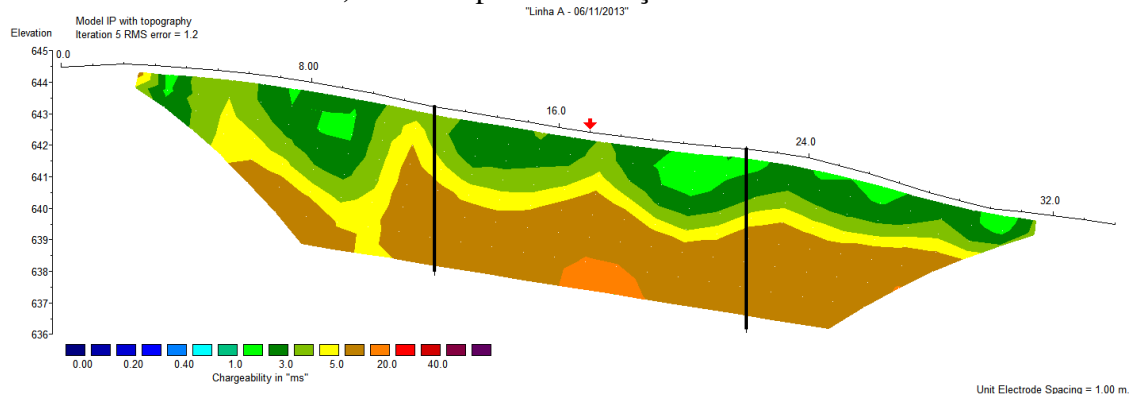
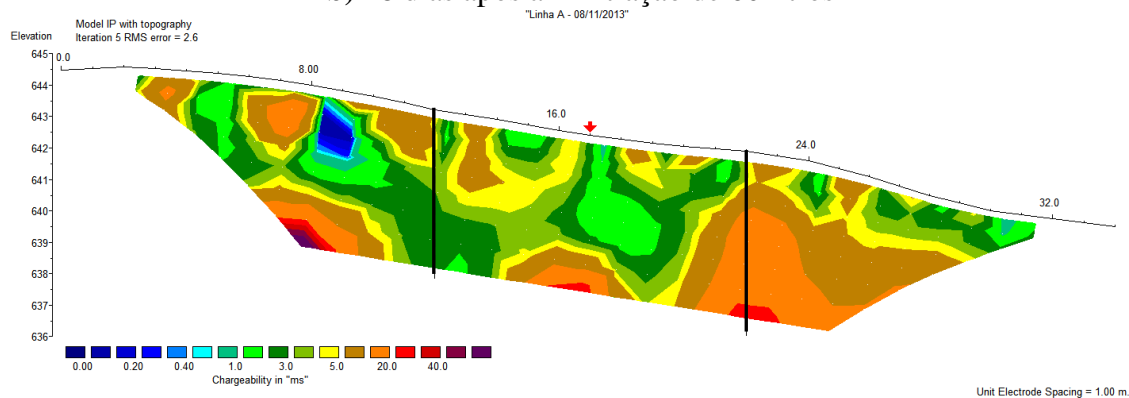


Figura 9.20: Seções de cargabilidade da Linha A executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala A.

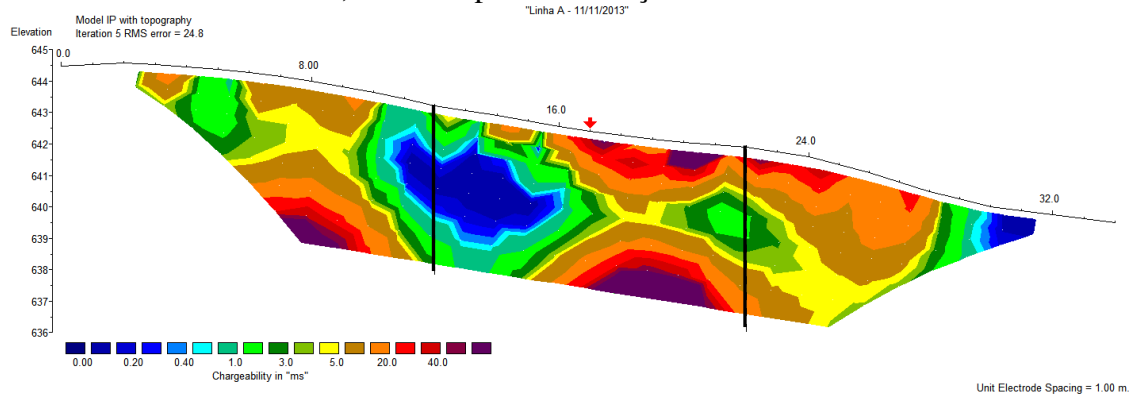
a) 16 dias após a infiltração de 60 litros



b) 18 dias após a infiltração de 60 litros



c) 21 dias após a infiltração de 60 litros



d) 23 dias após a infiltração de 60 litros

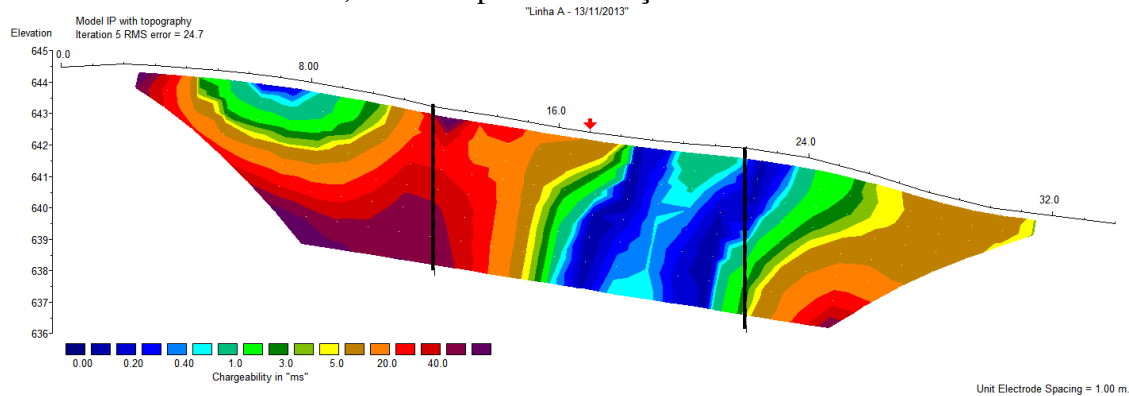
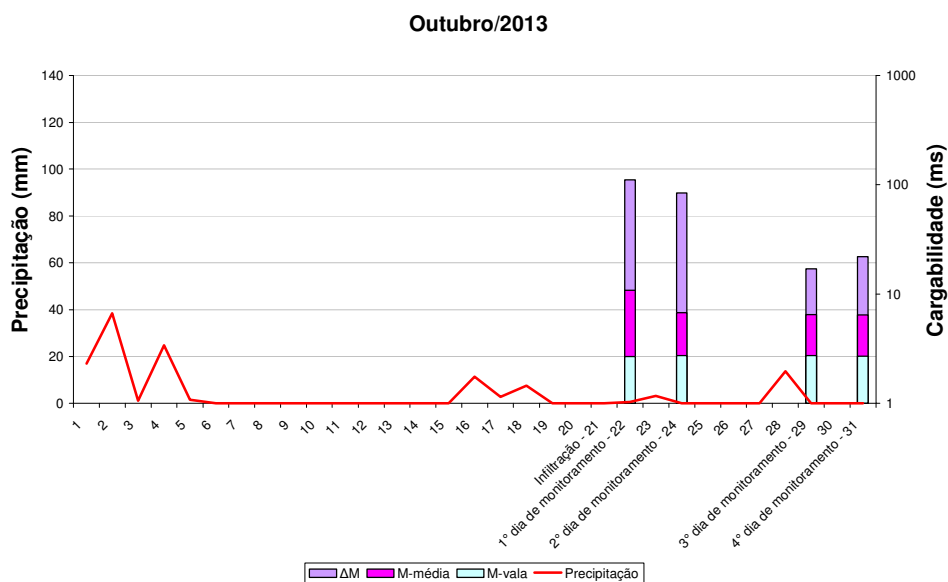
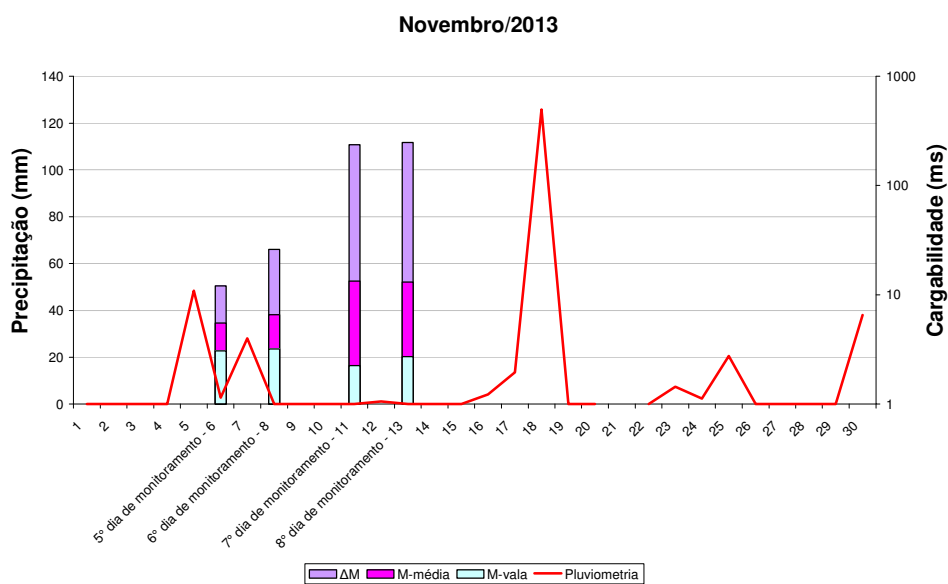


Figura 9.21: Seções de cargabilidade da Linha A executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala A.

A cargabilidade média das sessões também apresenta correlação, mas não se mostra tão significativa quanto à amplitude.



**Figura 9.22:** Correlação entre a pluviometria diária do mês de outubro de 2013 e as flutuações da cargabilidade nas seções referentes à vala A.



**Figura 9.23:** Correlação entre a pluviometria diária do mês de novembro de 2013 e as flutuações da cargabilidade nas seções referentes à vala A.

A região abaixo da vala A que, inicialmente exibe valores de cargabilidade da ordem de 10ms (Figuras 9.20a e 9.20b), *a priori*, pode indicar a influência da vinhaça. Contudo, não se verifica um padrão que se repita e/ou que evolua lógica e gradualmente nas outras sessões.



Assim, como não é possível correlacionar com precisão as anomalias observadas à infiltração da vinhaça, é plausível afirmar que, nas condições em que o experimento foi desenvolvido, o método da polarização induzida mostrou-se inconclusivo.

### 9.5.1.3 Monitoramento: Linha B

O monitoramento da vala B ocorreu em duas etapas (ver item 9.4.3). Na primeira etapa, 300 litros de vinhaça foram infiltrados no solo a partir da vala B. A repetição dos imageamentos elétricos ocorreu por 4 vezes dentro de um período total de 10 dias e os dados de resistividade elétrica coletados nestas ocasiões originaram as sessões da Figura 9.24.

Nestas sessões, é possível distinguir uma anomalia posicionada logo abaixo da vala B e caracterizada por uma diminuição gradual de  $\rho$  no decorrer dos dias, contrastando com o *background* em torno de  $500\Omega.m$ . Decorridas 24 horas da infiltração de 300 litros, nota-se o valor mínimo de  $200\Omega.m$  (Figura 9.24a); 3 dias após a infiltração (Figura 9.24b), ocorre a redução deste mínimo para  $150\Omega.m$ , valor que se mantém até o 8º dia pós-infiltração (Figura 9.24c). No 10º dia, observa-se a elevação do mínimo para  $200\Omega.m$  (Figura 9.24d).

Esta oscilação dos valores mínimos de resistividade da anomalia aparenta relação com o tempo de permanência do contaminante no solo. Logo após a infiltração, a vinhaça conserva muitas de suas características originais e os elevados teores de água, sais minerais e matéria orgânica são responsáveis pela diminuição da resistividade no entorno da vala (Figura 9.24a).

Um relativo aumento da umidade do solo, ocasionado pelas chuvas ocorridas no período (3,2mm, Figura 9.22), pode ter propiciado a dispersão de partículas eletricamente condutoras (sais) advindas da vinhaça, resultando na redução da resistividade observada nas adjacências da vala (Figuras 9.24b e 9.24c).

A ação microbiana sobre a parte orgânica do contaminante acarretou na escassez de substâncias capazes de adsorver a água do solo e o carreamento da fração mineral da vinhaça pela infiltração das águas pluviais ocasionou a redução do número de partículas eletricamente condutoras no solo. Esta combinação de fatores resultou no incremento dos valores de resistividade verificados na Figura 9.24d.

Outra característica observável diz respeito às dimensões da anomalia. No dia imediatamente posterior à infiltração (Figura 9.24a), a zona de baixa resistividade atinge cerca de 1,4m de profundidade (2º nível de investigação) e, aproximadamente, 2,5m de extensão lateral. Nas sessões subseqüentes, a pluma de contaminação mostra-se ligeiramente mais

profunda, sem contanto atingir o 3º nível de investigação – neste caso, em torno de 1,9m de profundidade. Lateralmente, a anomalia se estende por até 3m (Figura 9.24d).

Apesar do deslocamento da pluma exibir velocidade significativamente elevada, esta é inferior ao valor de K calculado no item 9.1.1. A diferença de velocidades pode residir na distinção dos líquidos infiltrados (água nos ensaios de condutividade hidráulica *versus* vinhaça na infiltração), mas, principalmente, em heterogeneidades naturais do solo (intercalações com diferentes teores de silte/argila, grau de compactação dos sedimentos, vazios causados por insetos e raízes,...).

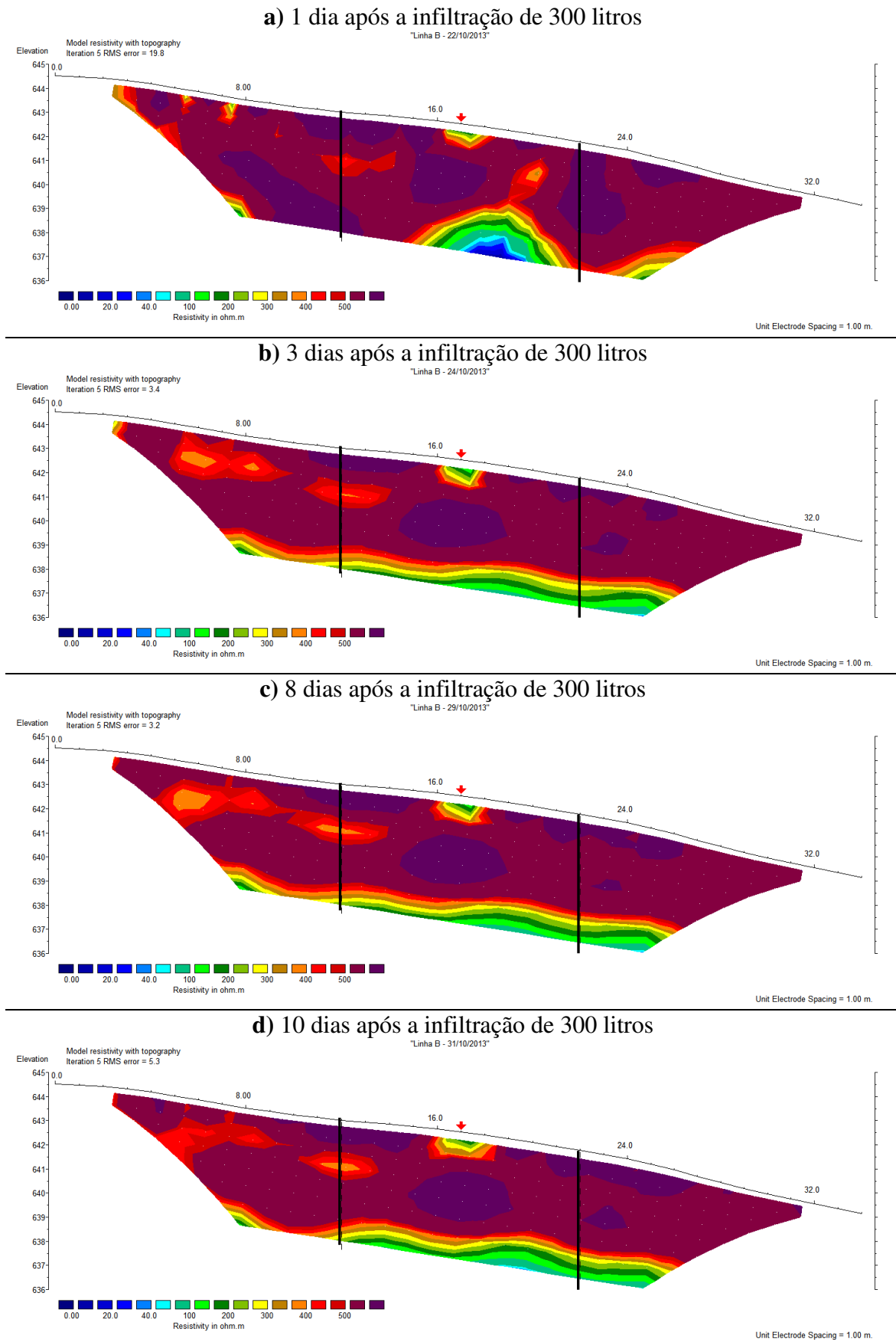
Após a finalização destes ensaios, iniciou-se a segunda etapa do monitoramento, com a infiltração de 900 litros de vinhaça no solo por meio da vala B. Num intervalo de 8 dias imediatamente após a infiltração, repetiram-se os imageamentos elétricos por 4 vezes. A Figura 9.25 apresenta as sessões de resistividade elétrica geradas com os dados coletados nesta etapa.

A anomalia observada anteriormente na Figura 9.24 foi novamente detectada na Figura 9.25. Semelhantemente à etapa anterior, ocorreu a diminuição gradual de  $\rho$  no decorrer dos dias, registrando, desta vez, o valor mínimo de 50 $\Omega$ .m em pequenas porções próximas à superfície. Relativamente à primeira etapa, a maior redução da resistividade pode ser atribuída ao maior volume de vinhaça infiltrada e, conseqüentemente, à maior quantidade de substâncias eletricamente condutoras.

Devido à baixa CTC dos sedimentos arenosos, somente uma pequena parcela dos cátions da vinhaça é adsorvida pelo solo. O restante mantém-se em dissolução na água da vinhaça (elemento que representa cerca de 93% de sua composição), favorecendo o fluxo de correntes elétricas na região impactada.

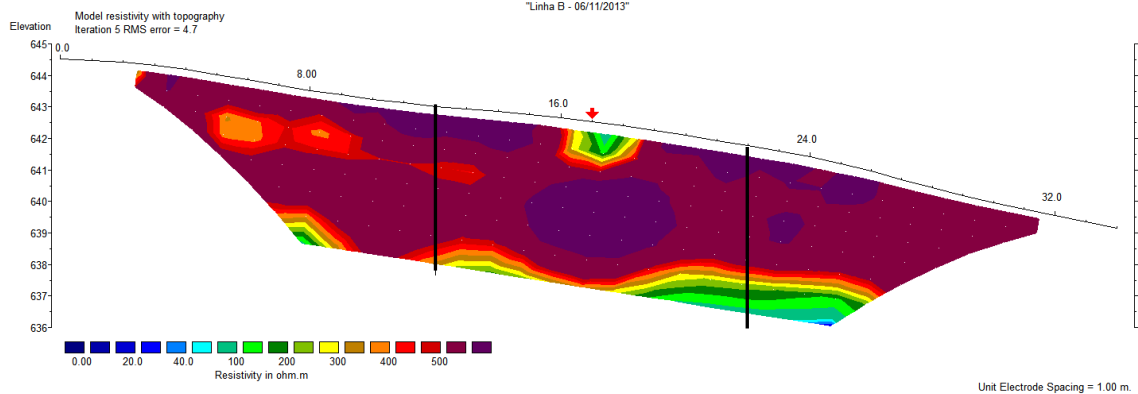
Na área de estudos, o deslocamento da pluma do contaminante é basicamente condicionado à condutividade hidráulica do solo e, à medida que este se dirige para cotas inferiores em subsuperfície, é responsável pelo carreamento dos cátions. Na ocorrência de chuvas, este processo é acelerado, devido ao maior volume de água disponível. Assim, a menor disponibilidade de substâncias eletricamente condutoras eleva a resistividade do solo.

No que diz respeito às dimensões da anomalia, houve um incremento na profundidade e na extensão lateral, atingindo, respectivamente, cerca de 1,9m (3º nível de investigação) e 5,0m. Nota-se, na Figura 9.24 e mais explicitamente na Figura 9.25, a migração da pluma do contaminante em direção à montante da área, certamente por efeito de capilaridade.

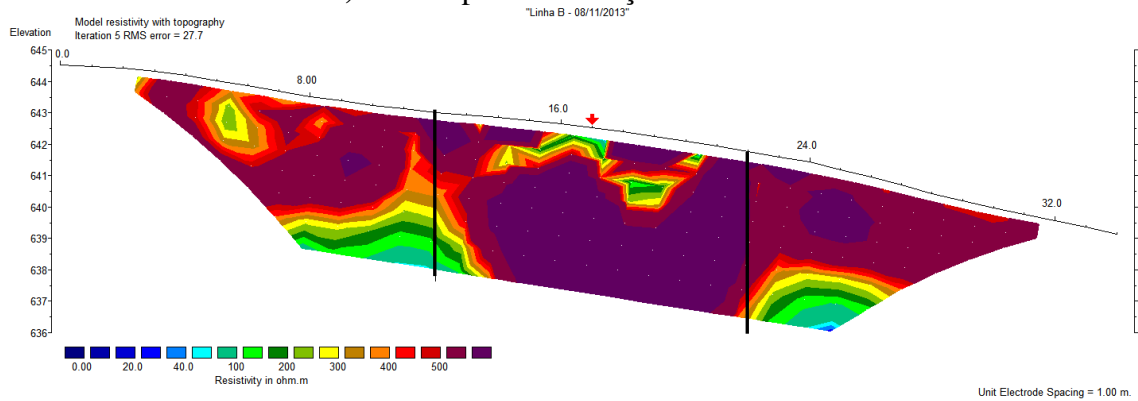


**Figura 9.24:** Seções de resistividade da Linha B executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala B.

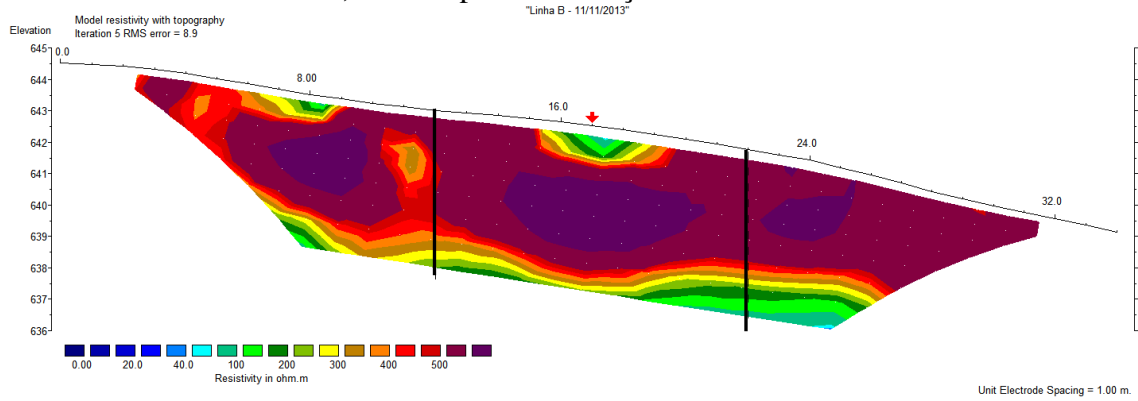
a) 1 dia após a infiltração de 900 litros



b) 3 dias após a infiltração de 900 litros



c) 6 dias após a infiltração de 900 litros



d) 8 dias após a infiltração de 900 litros

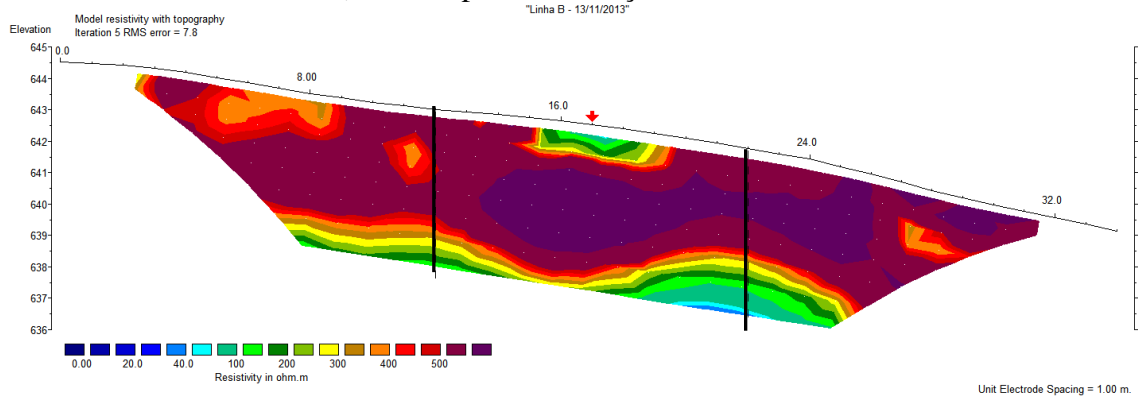


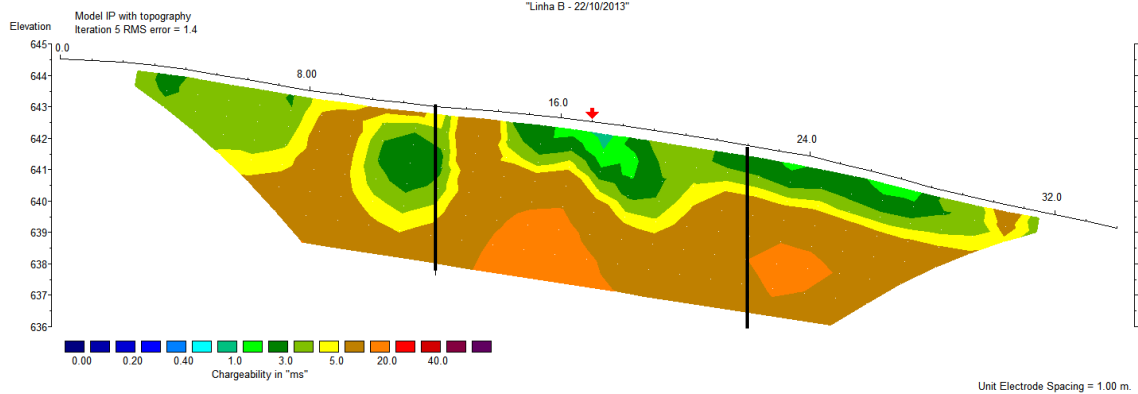
Figura 9.25: Seções de resistividade da Linha B executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala B.

Tal como discutido no monitoramento da linha A (item 9.5.1.2), o comportamento da cargabilidade na área de estudo apresenta elevada complexidade. As variações deste parâmetro, observadas nas sessões das Figuras 9.26 e 9.27, sugerem correlações (1) com heterogeneidades naturais, onde intercalações com os maiores teores de argila, verificados localmente, refletem maior intensidade do efeito IP, e (2) com o teor de umidade do solo, influenciado diretamente pelo regime de chuvas do período.

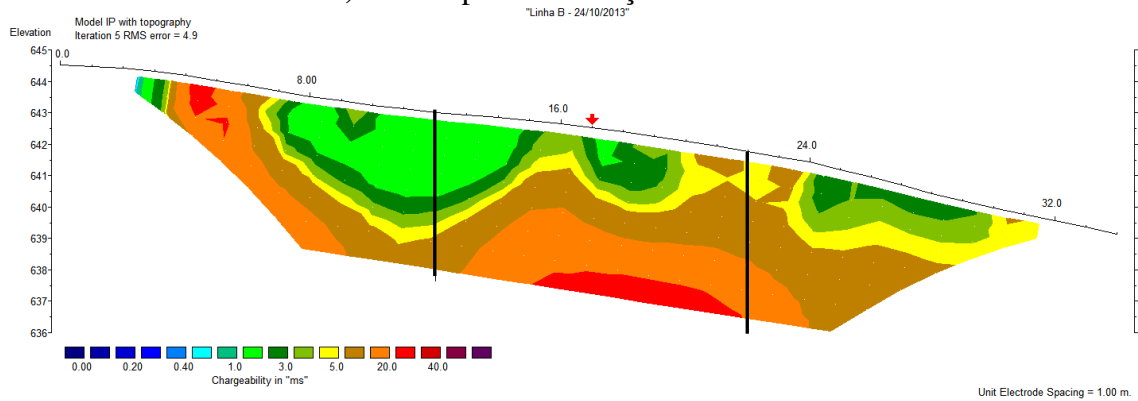
A ausência de anomalias claramente correlacionáveis à infiltração da vinhaça no solo e à sua degradação bio e/ou geoquímica, dificulta a interpretação geofísica das sessões de cargabilidade. Nota-se que, ao contrário do parâmetro resistividade, não existe uma região bem definida e localizada logo abaixo da vala B, onde o contraste de valores entre o meio natural e o meio impactado seja plenamente distinguível.

Portanto, considerando as características geológicas e geofísicas da Área 2, as características físico-químicas da vinhaça e toda a argumentação anterior a respeito do método, é plausível afirmar que, nas condições em que o experimento foi desenvolvido, o método da polarização induzida mostrou-se inconclusivo.

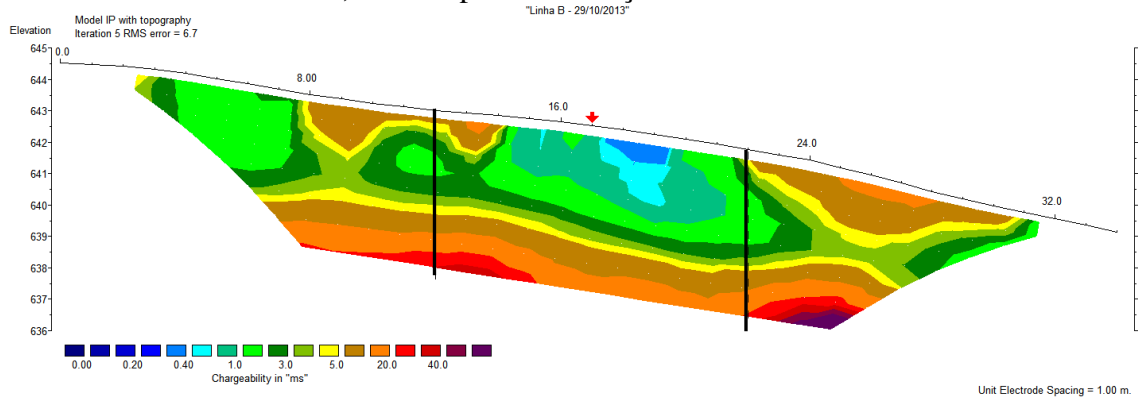
a) 1 dia após a infiltração de 300 litros



b) 3 dias após a infiltração de 300 litros



c) 8 dias após a infiltração de 300 litros



d) 10 dias após a infiltração de 300 litros

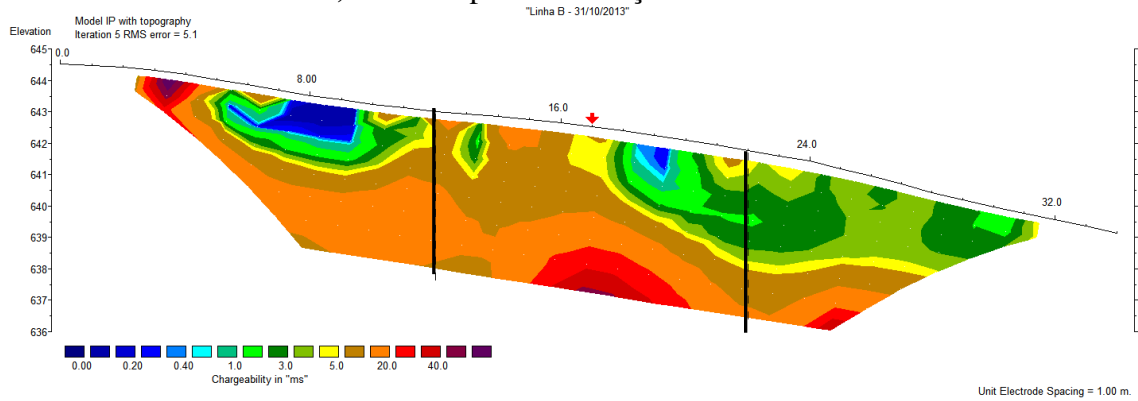
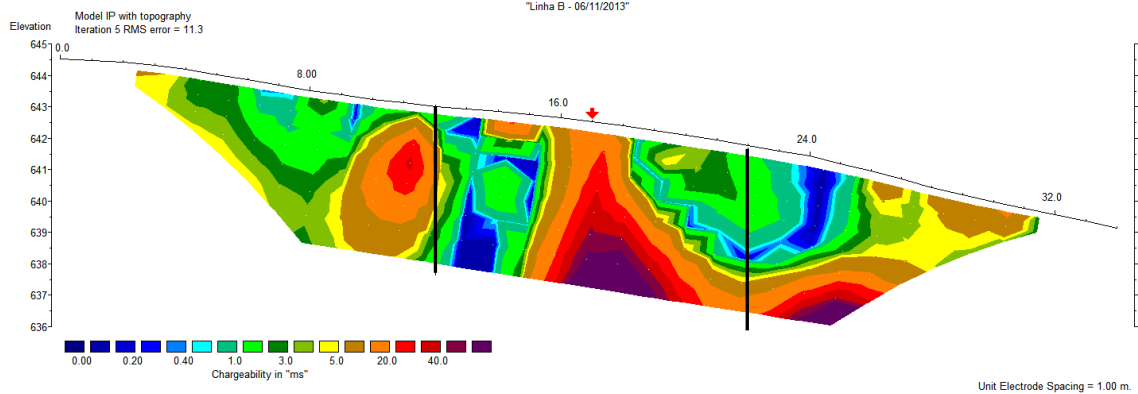
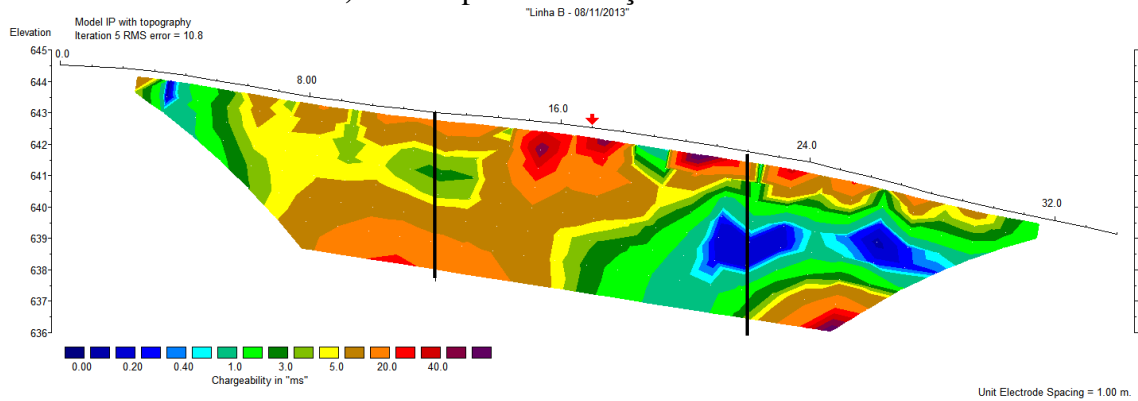


Figura 9.26: Seções de cargabilidade da Linha B executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala B.

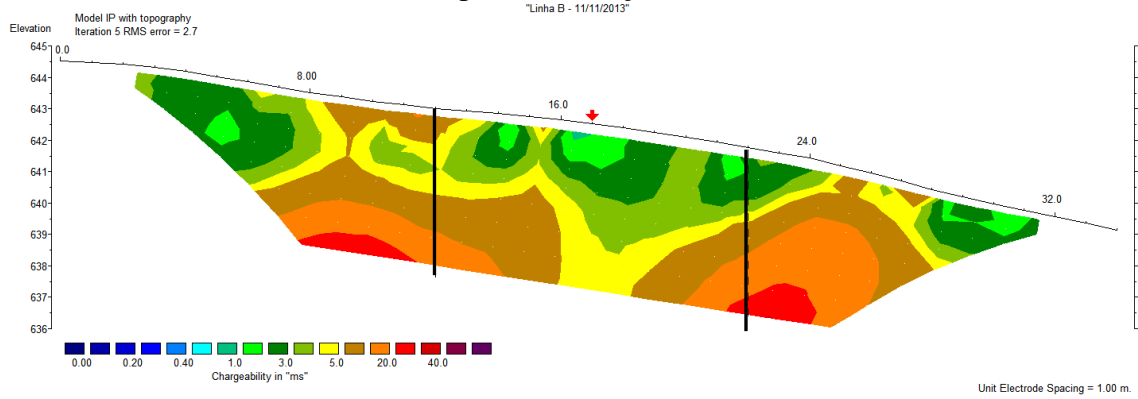
a) 1 dia após a infiltração de 900 litros



b) 3 dias após a infiltração de 900 litros



c) 6 dias após a infiltração de 900 litros



d) 8 dias após a infiltração de 900 litros

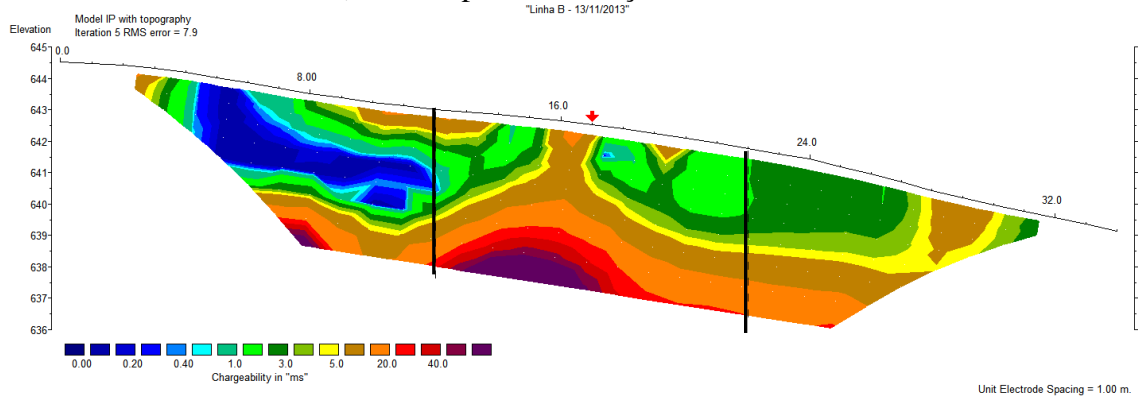


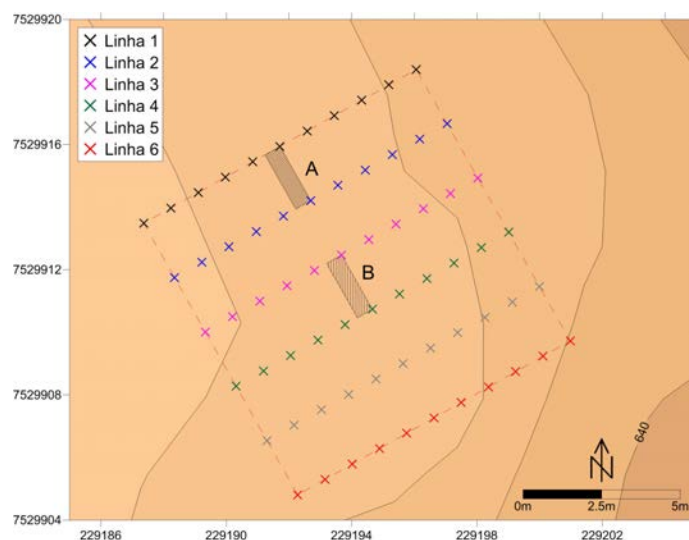
Figura 9.27: Seções de cargabilidade da Linha B executada na Área 2. As linhas pretas verticais indicam os limites da área de estudo e a seta vermelha indica a posição da vala B.

### 9.5.2 Imageamentos Eletromagnéticos

Algumas diferenças operacionais foram adotadas na execução dos imageamentos eletromagnéticos da fase pós-infiltração do projeto, em comparação à fase anterior (item 9.2.3):

- O número de linhas de investigação foi aumentado de 5 para 6
- A separação entre as linhas foi reduzida de 2,5m para 2,0m
- Em cada linha, a distância entre cada estação de medida consecutiva foi alterada de 2,0m para 1,0m

Aliado à diminuição do eixo maior (conforme o item 9.5), conseguiu-se o adensamento da malha de *datum points*, um maior nível de detalhes da área de estudos e a otimização dos trabalhos de campo. A Figura 9.28 exibe a localização dos IEM executados na Área 2.



**Figura 9.28:** Mapa de localização dos IEM pós-infiltração executados na Área 2.

Os dados de condutividade elétrica referem-se às duas profundidades de investigação: 0 a 3m na orientação DMH (Dipolo Magnético Horizontal) e 0 a 6m na orientação DMV (Dipolo Magnético Vertical).

Os dados coletados foram utilizados na confecção de mapas de condutividade elétrica (Figuras 9.29 a 9.36). Estes, de um modo geral, exibem semelhanças com os da fase pré-infiltração (item 9.2.3). Os menores valores de  $\sigma$  ocorrem à profundidade de investigação de 3m, devido à maior distância do nível freático e, portanto, menor umidade do solo. As maiores condutividades registradas aos 6m de profundidade indicam maior grau de saturação dos sedimentos devido à proximidade do nível freático.



As Figuras 9.29 a 9.32 apresentam os mapas de condutividade elétrica confeccionados com os dados coletados após a primeira infiltração de vinhaça – 60 litros na vala A e 300 litros na vala B. As respectivas curvas de condutividade elétrica são exibidas no Apêndice D e, em alguns casos, facilitam a visualização e o entendimento das anomalias.

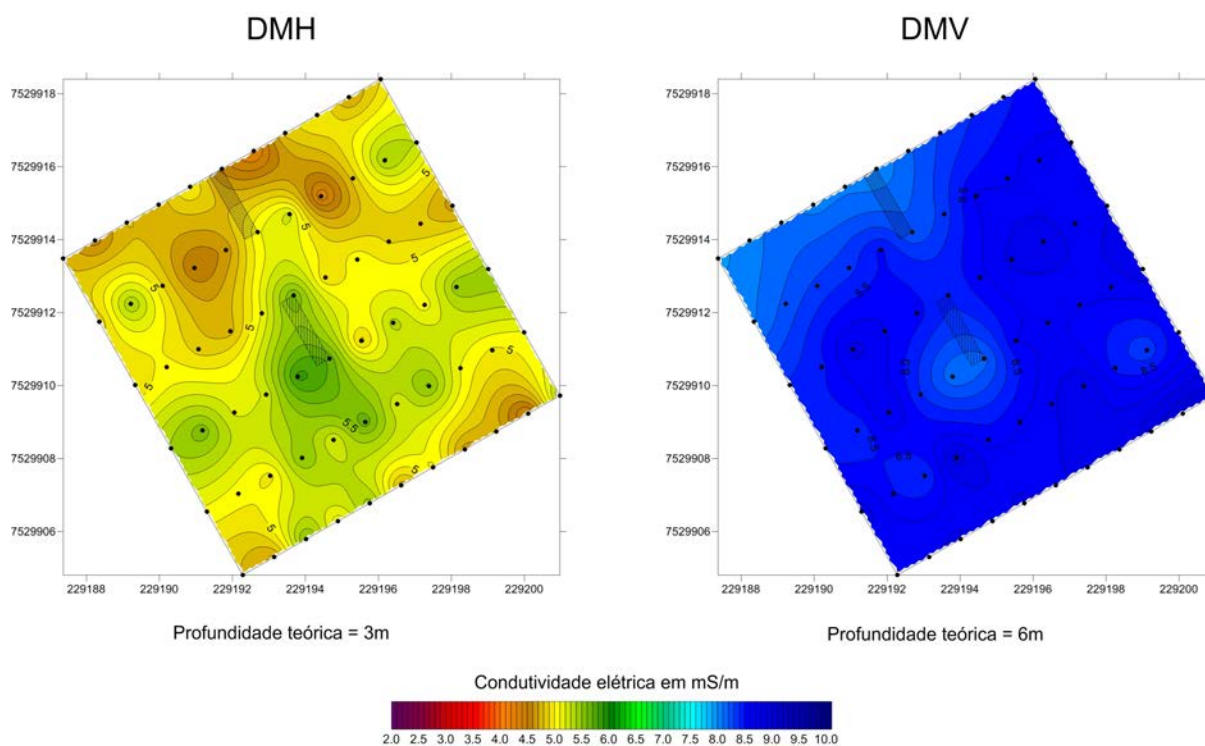
No dia posterior à primeira infiltração (Figuras 9.29 e D.1), na região da vala A, à profundidade de investigação de 3m (DMH), é possível notar uma discreta elevação da condutividade elétrica na estação de medida n.º 4 da Linha 1 (5,02mS/m) e outra, mais pronunciada, que abrange as estações n.º 5 e 6 da Linha 2, com valores respectivos de 5,08mS/m e 5,24mS/m. Aos 6m de profundidade (DMV), nota-se um discreto pico de redução de  $\sigma$  na estação n.º 5 da Linha 1 (8,01mS/m) e outro, mais intenso, na mesma estação, porém da Linha 2 (8,20mS/m).

Ainda no dia seguinte à primeira infiltração, notam-se algumas anomalias, em ambas as profundidades de investigação, na região da vala B. A estação de medida n.º 5 registra as mais intensas anomalias da Linha 3: 5,61mS/m (DMH) e 8,40mS/m (DMV). Na Linha 4, a anomalia engloba as estações n.º 4 – 5,84mS/m (DMH) e 8,13mS/m (DMV) – e n.º 5 – 5,68mS/m (DMH) e 8,16mS/m (DMV).

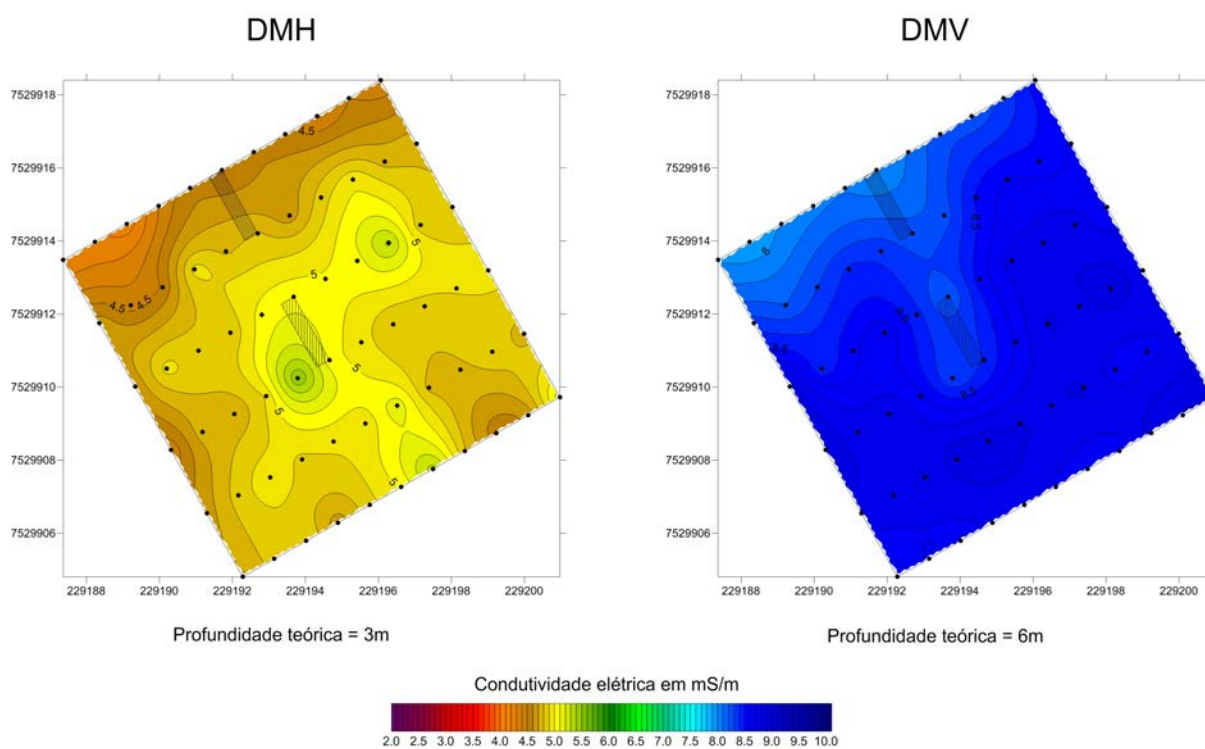
Justificadas pelos valores apresentados e pela localização, todas estas anomalias mencionadas podem ser associadas à influência da vinhaça no solo.

Decorridos 3 dias após a primeira infiltração (60L na vala A e 300L na vala B) (Figuras 9.30 e D.2), as anomalias anteriormente observadas ainda persistem, mas reduzidas em número e em intensidade quando comparadas ao conjunto de dados anterior. Destacam-se as alterações registradas no entorno da vala B: 8,19mS/m (DMV) na estação n.º 5 da Linha 3, 5,51mS/m (DMH) e 8,30mS/m (DMV) na estação n.º 4 da Linha 4.

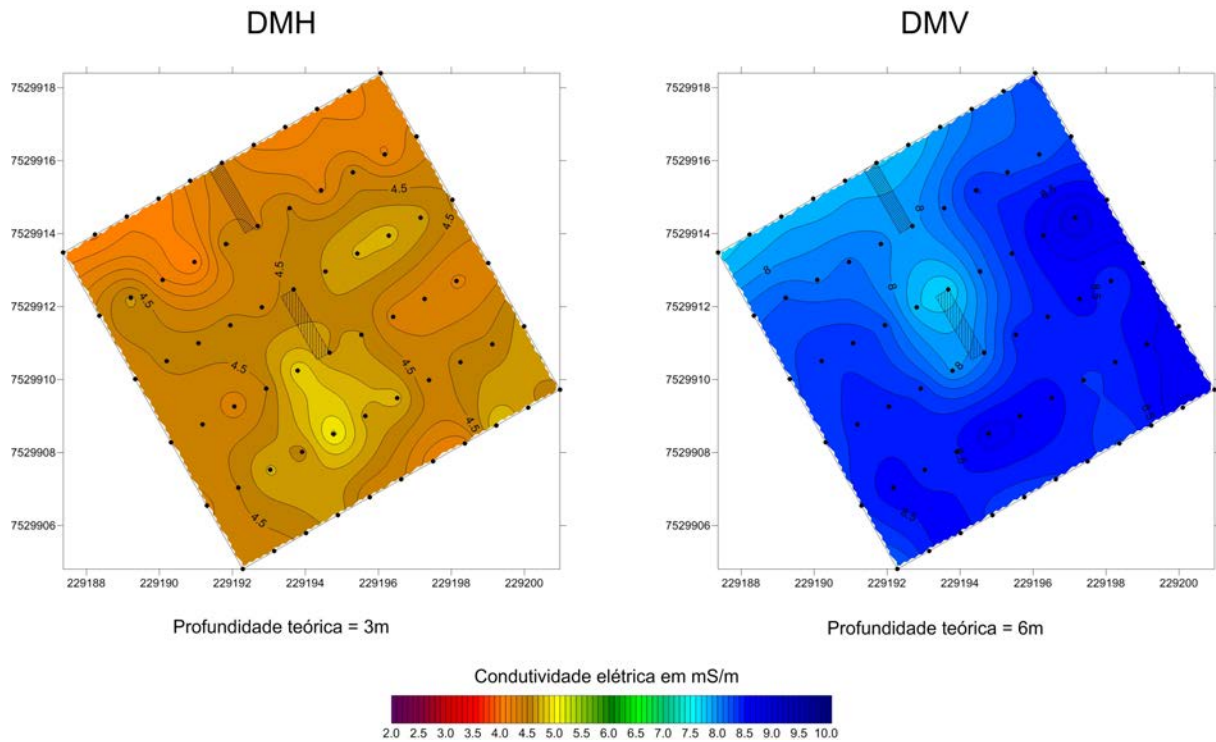
Os mapas e curvas referentes a 8 e 10 dias após a infiltração (Figuras 9.31, 9.32, D.3 e D.4) também exibem algumas alterações nos valores de  $\sigma$  próximas às valas. No caso da vala A, devido à infiltração de somente 60 litros de vinhaça, atribui-se as regiões anômalas à elevação da umidade do solo ocasionada por chuvas registradas no período. Contudo, na região da vala B, as anomalias ainda são relacionadas ao maior volume infiltrado do contaminante.



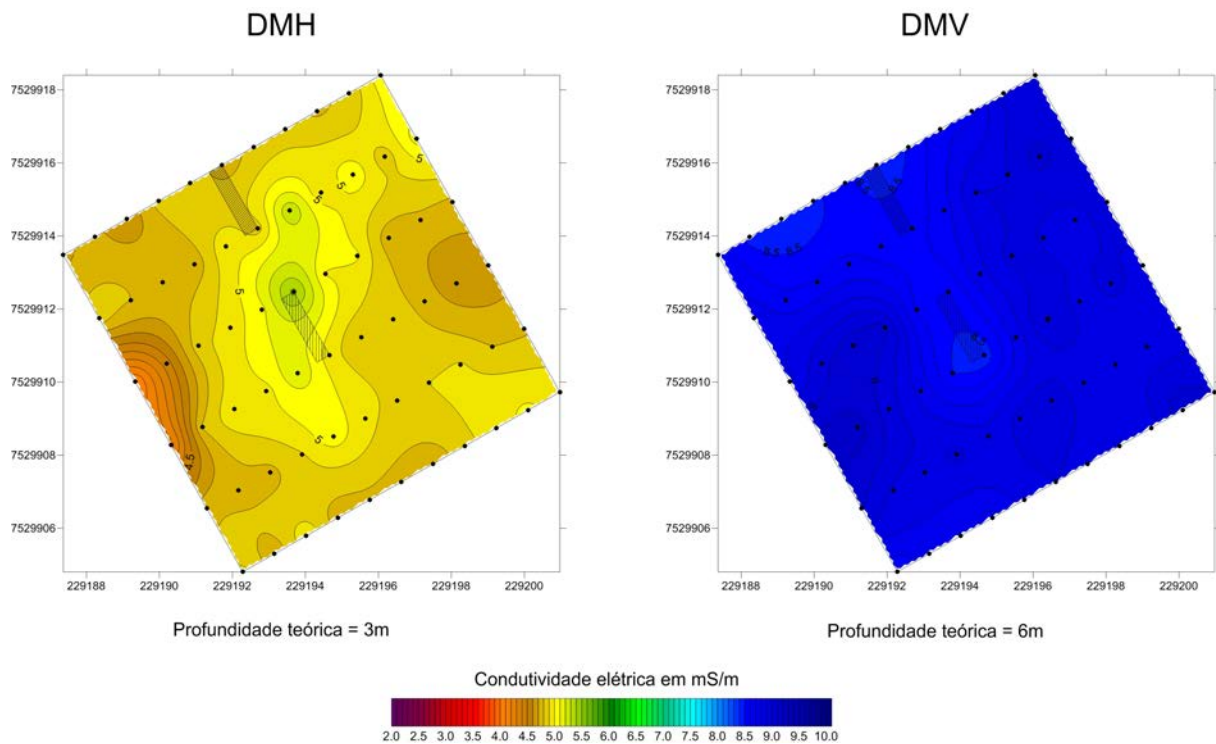
**Figura 9.29:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 1 dia após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).



**Figura 9.30:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 3 dias após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).



**Figura 9.31:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 8 dias após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).



**Figura 9.32:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 10 dias após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).

Seguindo a mesma metodologia adotada para a Área 1, logo após o término da etapa de monitoramento da primeira infiltração, procedeu-se a segunda infiltração de vinhaça também na Área 2, contando com um volume de 900 litros do contaminante depositado somente na vala B (ver item 9.4.2). Apesar de a vala A não receber mais nenhum volume de contaminante neste momento, continuou-se a execução das linhas 1 e 2 de modo que toda a área de estudos fosse plenamente coberta a cada dia de monitoramento.

Observa-se, nas Figuras 9.33 a 9.36 (ver também Anexo D, Figuras D.5 a D.8), que as anomalias de maior intensidade ocorreram nas Linhas 3 e 4, próximas à vala B.

No dia imediatamente posterior à segunda infiltração (Figuras 9.33 e D.5), foi detectada uma anomalia na estação de medida n.º 5 da Linha 3, observável em ambas as profundidades de investigação. Na orientação DMH, a anomalia comporta-se como condutiva, exibindo valor de 4,73mS/m. Na orientação DMV, a anomalia comporta-se como resistiva, e a condutividade medida é de 7,38mS/m. Neste mesmo dia, aos 3m de profundidade, não se registrou anomalia correlacionável à vinhaça, mas aos 6m, na estação de medida n.º 4 da Linha 4, registrou-se um pico de 7,28mS/m.

Nos dias seguintes do monitoramento, a anomalia foi novamente detectada na mesma região e sempre com o pico ocorrendo na estação de medida n.º 5, localizada na borda jusante da vala B. Quanto à Linha 4, todos os picos foram registrados na altura da estação de medida n.º 4, localizada aproximadamente 50cm a montante da vala (ver Figura 9.28). Este deslocamento da anomalia pode ser atribuído à diferença de cotas no fundo da vala, que gerou um fluxo de contaminante em direção à estação de medida n.º 4, e/ou ao efeito de capilaridade dos sedimentos da área de estudos.

Decorridos 3 dias após a segunda infiltração (Figuras 9.34 e D.6), na Linha 3, a anomalia detectada a 3m de profundidade exhibe seu máximo valor: 6,13mS/m. Aos 6m, o valor medido não sofre grandes alterações: 7,34mS/m. Na Linha 4, o máximo valor da orientação DMH atinge 5,74mS/m, enquanto que na orientação DMV, observa-se elevação da condutividade elétrica em relação aos dados anteriores: 7,56mS/m.

Seis dias após a nova infiltração (Figuras 9.35 a D.7), na Linha 3, o pico observado com a orientação DMH registra queda de condutividade e atinge o valor de 5,63mS/m, enquanto que, à profundidade de 6m, a anomalia registra o seu menor valor do período: 6,96mS/m. Também, na Linha 4, registram-se os menores valores do período: 5,28mS/m a 3m de profundidade e 7,11mS/m aos 6m.

No oitavo dia pós-infiltração dos 900 litros de vinhaça (Figuras 9.36 e D.8), aos 3m de profundidade da Linha 3, a anomalia mantém, aproximadamente, o mesmo valor observado

no 6º dia (5,68mS/m) e o pico registrado com a orientação DMV exibe elevação de condutividade, registrando 7,20mS/m. Na Linha 4, os respectivos valores para 3m e 6m de profundidade são 5,65mS/m e 7,38mS/m.

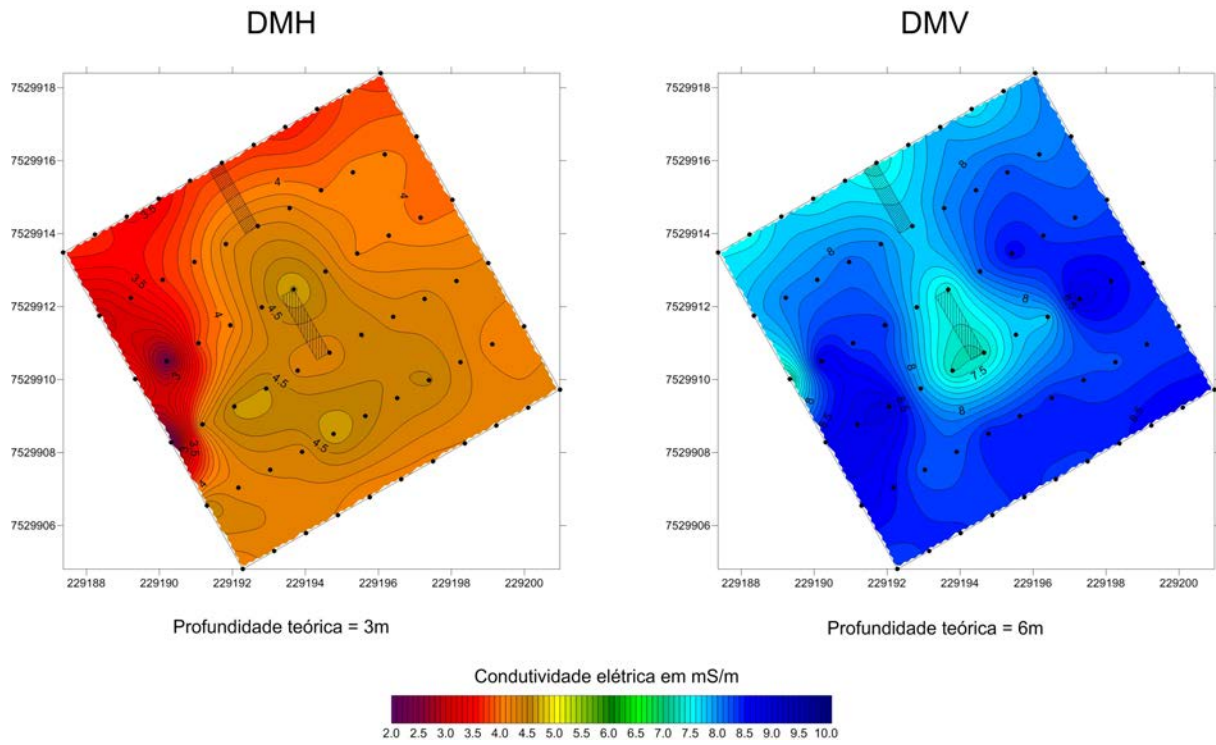
As ocorrências dos máximos e mínimos de condutividade elétrica apresentam um padrão: cronologicamente, ocorre o máximo valor de  $\sigma$  à profundidade de 3m e, posteriormente, o mínimo à profundidade de 6m. Entende-se que este padrão ocorre em função do tempo que a pluma do contaminante leva para atingir cada profundidade de investigação e influenciar a condutividade do meio natural.

Nota-se, também, nas regiões de anomalias intensas, o surgimento de picos alinhados em cada profundidade de investigação (Figuras D.5 a D.8). Em função da infiltração da vinhaça, ocorreu o aumento da umidade do solo e do número de partículas eletricamente condutoras na região das valas, o que alterou o valor de  $\sigma$  desta porção do solo. Com base nas sessões de resistividade referentes à segunda etapa de infiltração (Figura 9.25), a profundidade ( $Z$ ) máxima alcançada pela pluma do contaminante é de, aproximadamente, 1,9m (cerca de  $2/3$  de  $Z_{DMH}$  e  $1/3$  de  $Z_{DMV}$ ).

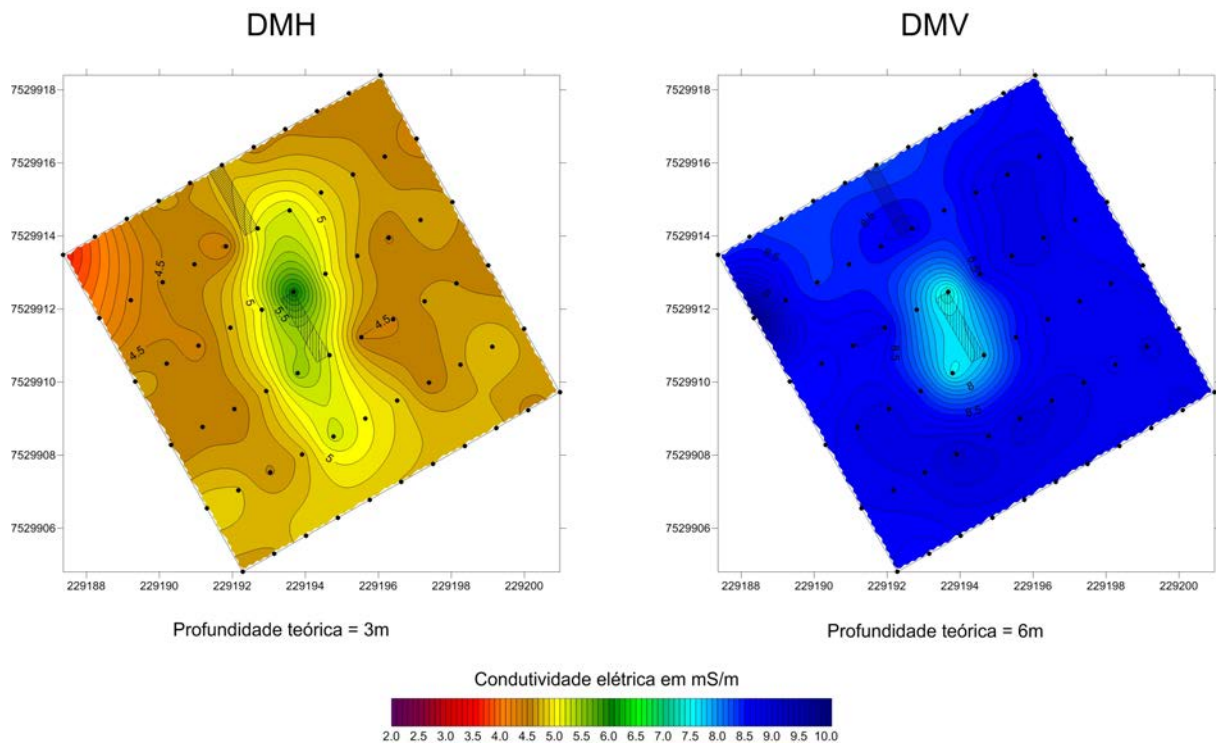
Amparado por estes dados, conclui-se (1) que a profundidade máxima que a pluma atingiu permite sua detecção em ambas as orientações das bobinas e (2) que a condutividade elétrica resultante possui valor intermediário: maior que os valores de *background* observados a 3m e menor que os registrados a 6m de profundidade; por isso, a anomalia comporta-se como condutiva para o DMH e como resistiva para o DMV.

Por fim, a redução gradual da condutividade no entorno das valas é um indicativo da diminuição do número de partículas eletricamente condutoras provenientes da vinhaça e que estavam concentradas na região da vala B.

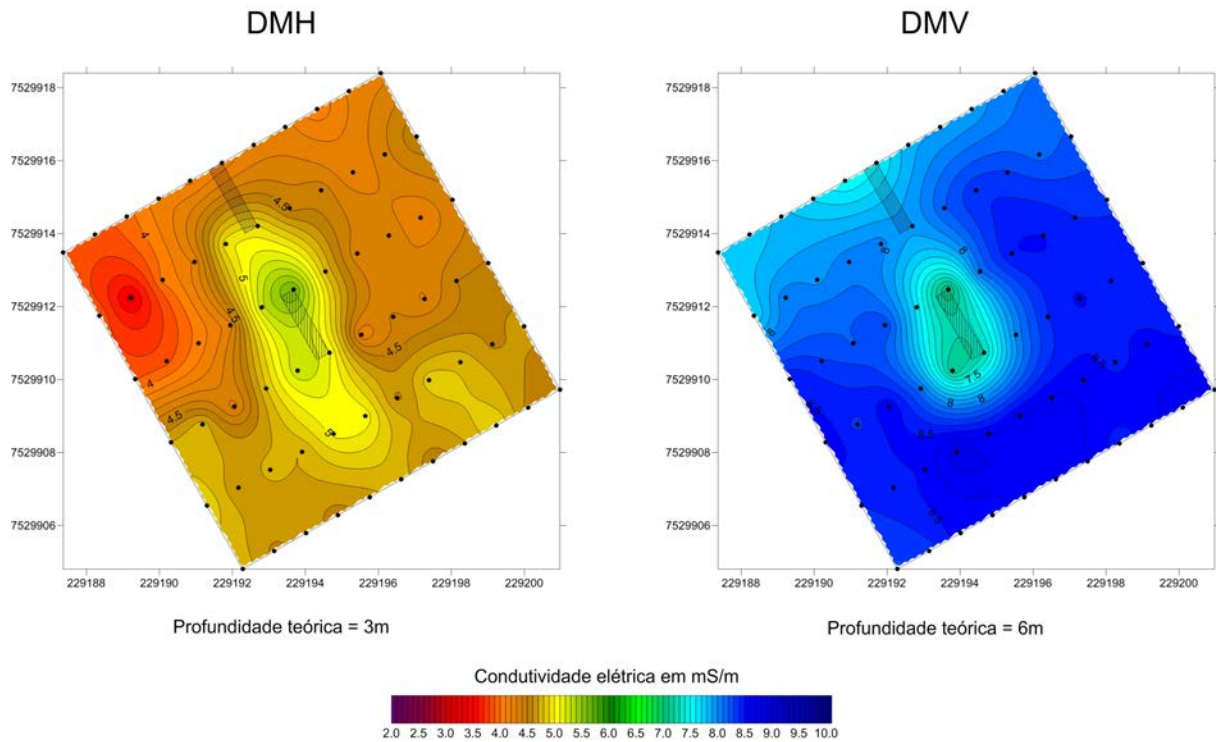
Assim como proposto no item 9.5.1.3, o decréscimo da quantidade de substâncias eletricamente condutoras da região da vala B pode ser atribuído a duas causas principais: (1) a ação microbiana sobre a parte orgânica do contaminante, acarretando na escassez de substâncias capazes de adsorver a água do solo e (2) o carreamento da fração mineral da vinhaça pela infiltração das águas pluviais, que ocasionou a redução do número de partículas eletricamente condutoras no solo. Entretanto, a confirmação destas hipóteses somente é possível com a realização de análises físico-químicas em amostras de solo impactado pela vinhaça.



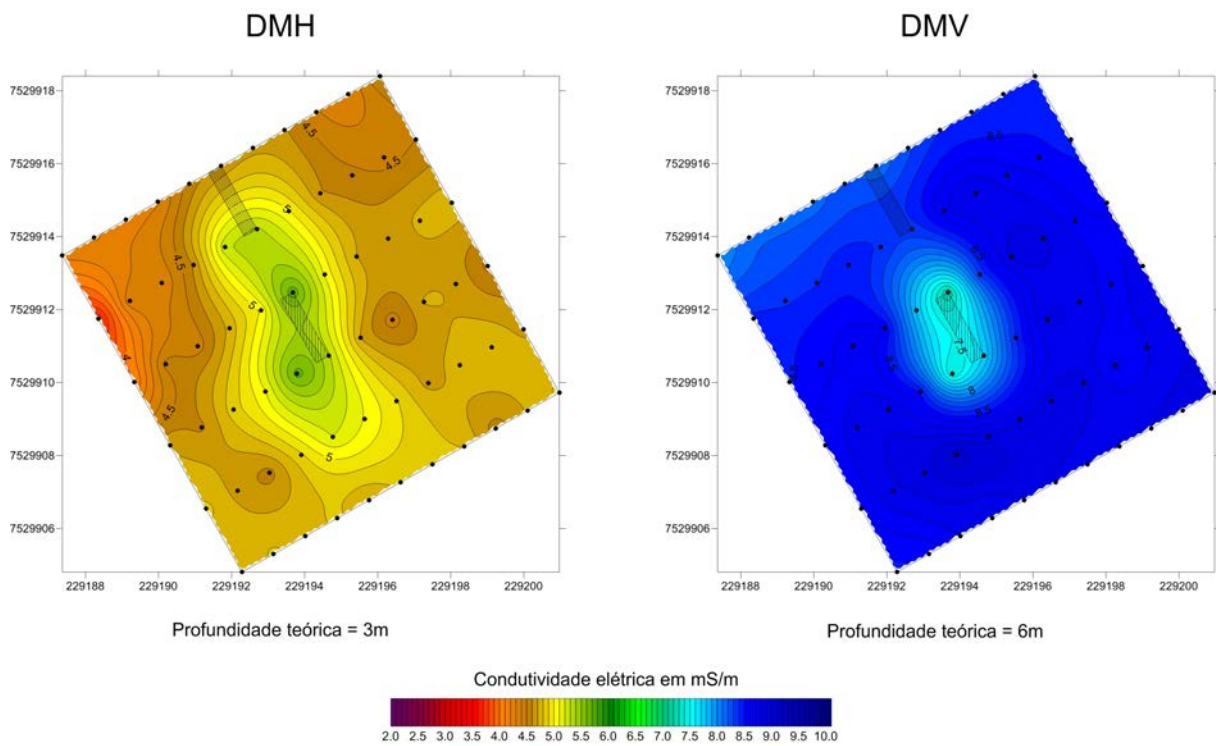
**Figura 9.33:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 1 dia após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).



**Figura 9.34:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 3 dias após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).



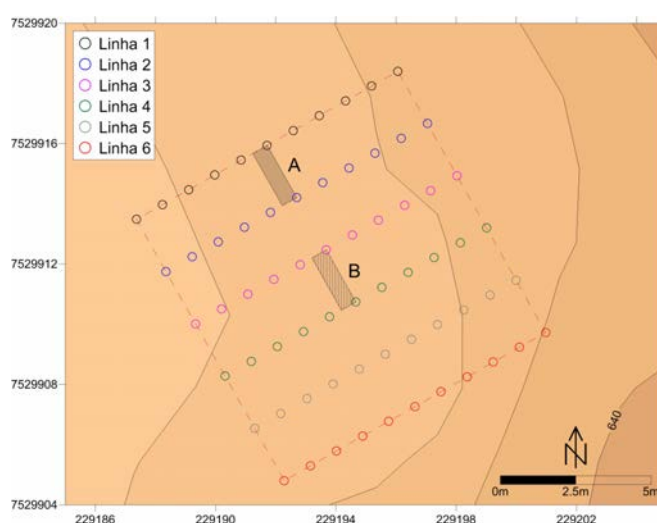
**Figura 9.35:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 6 dias após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).



**Figura 9.36:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 8 dias após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro).

### 9.5.3 Potencial Elétrico Natural

A aquisição dos dados do método SP sofreu algumas alterações na fase atual do projeto relativamente à fase pré-infiltração. Em busca de maior precisão nas leituras do potencial natural, utilizou-se o resistímetro ABEM TERRAMETER SAS 4000 ao invés do BISON 2390. A redução da distância entre duas estações de medidas consecutivas (2m anteriores contra 1m atual) permitiu maior adensamento da malha de *datum points* (Figura 9.37), que passou a ser coincidente com a malha do método EM (item 9.5.2). A disposição das linhas na área de estudos não sofreu alterações.



**Figura 9.37:** Mapa de localização dos ensaios de SP pós-infiltração executados na Área 2.

A Figura 9.38 exibe os mapas de potencial elétrico confeccionados com os dados coletados após a primeira infiltração (60 litros na vala A e 300 litros na vala B). No Apêndice D são apresentadas as respectivas curvas de potencial elétrico natural.

Em relação à fase pré-infiltração, agora verifica-se um cenário de menor amplitude do potencial natural e a totalidade de valores negativos em todas as curvas apresentadas.

No dia posterior à infiltração, os potenciais elétricos medidos oscilaram entre -1,08 e -1,63mV ( $\Delta V = 0,55\text{mV}$ ). Três dias após a infiltração, observou-se redução da amplitude do potencial natural ( $\Delta V = 0,38\text{mV}$ ), com os valores variando entre -0,68 e -1,06mV. Decorridos 8 dias após a infiltração, as leituras efetuadas indicaram potenciais entre -0,56 e -0,85mV, resultando em amplitude  $\Delta V = 0,29$ . No último dia desta etapa, registrou-se máximo de -0,53mV e mínimo de -1,06mV, decorrendo em  $\Delta V = 0,53\text{mV}$ .

Entretanto, todos estes valores refletem a variação global da área de estudos a cada dia de coleta de dados. Nas adjacências das valas não foi identificada nenhuma flutuação anormal que pudesse ser correlacionada à presença da vinhaça no solo. Nota-se, na Figura 9.38 (ver



também Apêndice D, Figura D.9), a ausência de anomalias registradas na altura da estação de medida n.º 5 ou em qualquer proximidade das valas.

A flutuação de valores registrada sugere apenas a variação do teor de água intersticial no solo, influenciada pelas condições climáticas do período. O potencial espontâneo pode oscilar temporalmente no decorrer de um levantamento (GALLAS, 2005, p.138), sobretudo se considerada a influência do fluxo subterrâneo, agente mais importante da geração do SP.

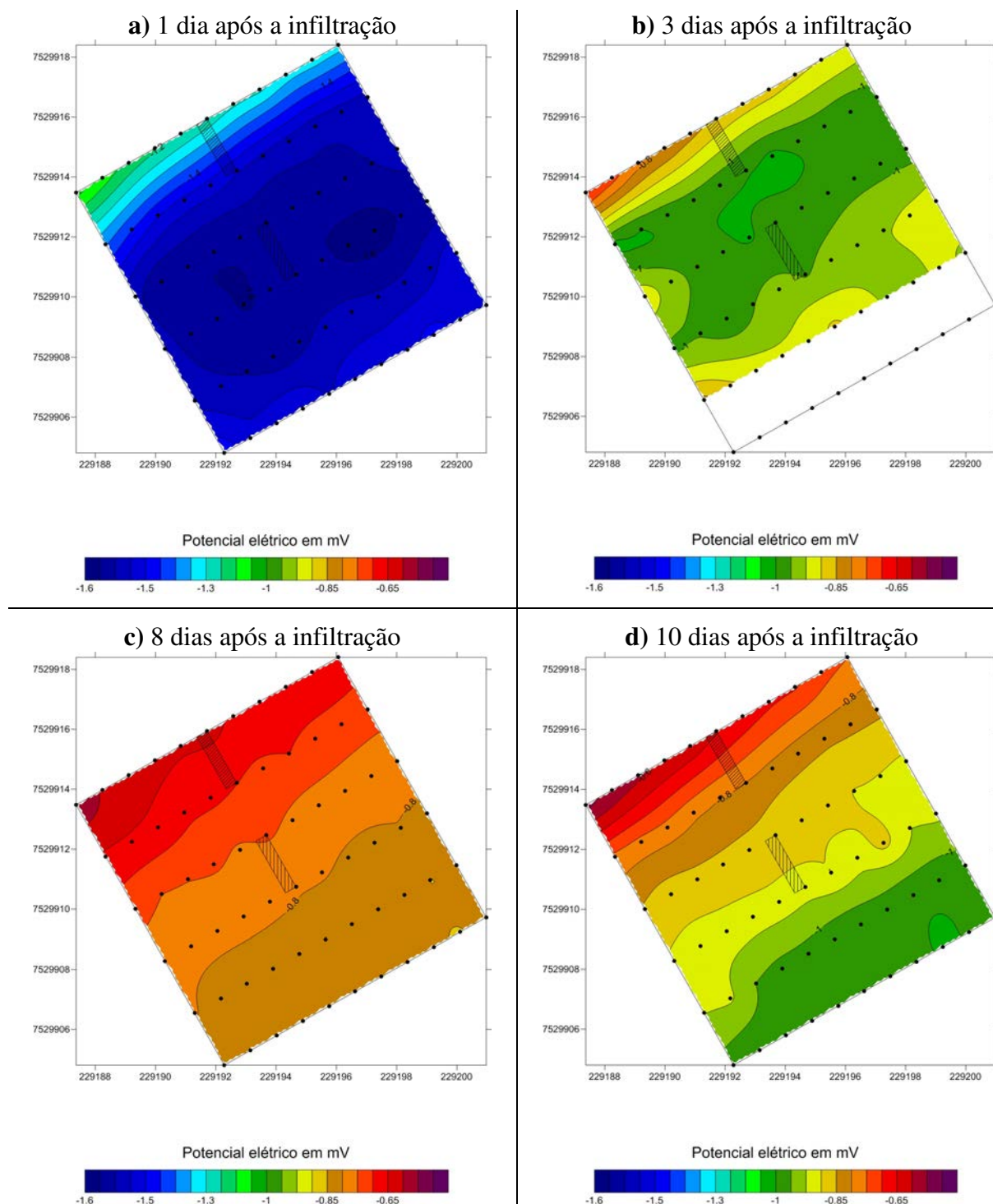
Na segunda etapa de infiltração (900 litros somente na vala B), registraram-se variações de potenciais naturais entre -0,55 e -0,82mV ( $\Delta V = 0,27\text{mV}$ ) no primeiro dia; entre -0,49 e -0,99mV ( $\Delta V = 0,50\text{mV}$ ) no segundo dia; entre -0,64 e -1,66mV ( $\Delta V = 1,02\text{mV}$ ) no terceiro dia e, por fim, entre -0,77 a -1,35mV ( $\Delta V = 0,58\text{mV}$ ) no quarto dia de monitoramento. Os dados coletados foram empregados na elaboração dos mapas de SP (Figura 9.39) e das curvas de potencial natural (Figura D.10).

Decorridos 1 e 3 dias após a segunda infiltração, observa-se reduzida variação dos valores de potencial elétrico, sem contudo, estarem associadas a qualquer possível influência da vinhaça infiltrada. As linhas de principal interesse (3 e 4) aparentemente retratam o comportamento natural da área de estudo.

Somente no 6º dia é que se observa um pico negativo na Linha 3, com valor de -1,66mV e localizado na estação de medida n.º 7 (ou seja, 2m à jusante da vala B). Outro pico, com menor intensidade, foi observado na Linha 4 no 8º dia, quando o potencial medido foi de -1,35mV, desta vez na estação de medida n.º 6.

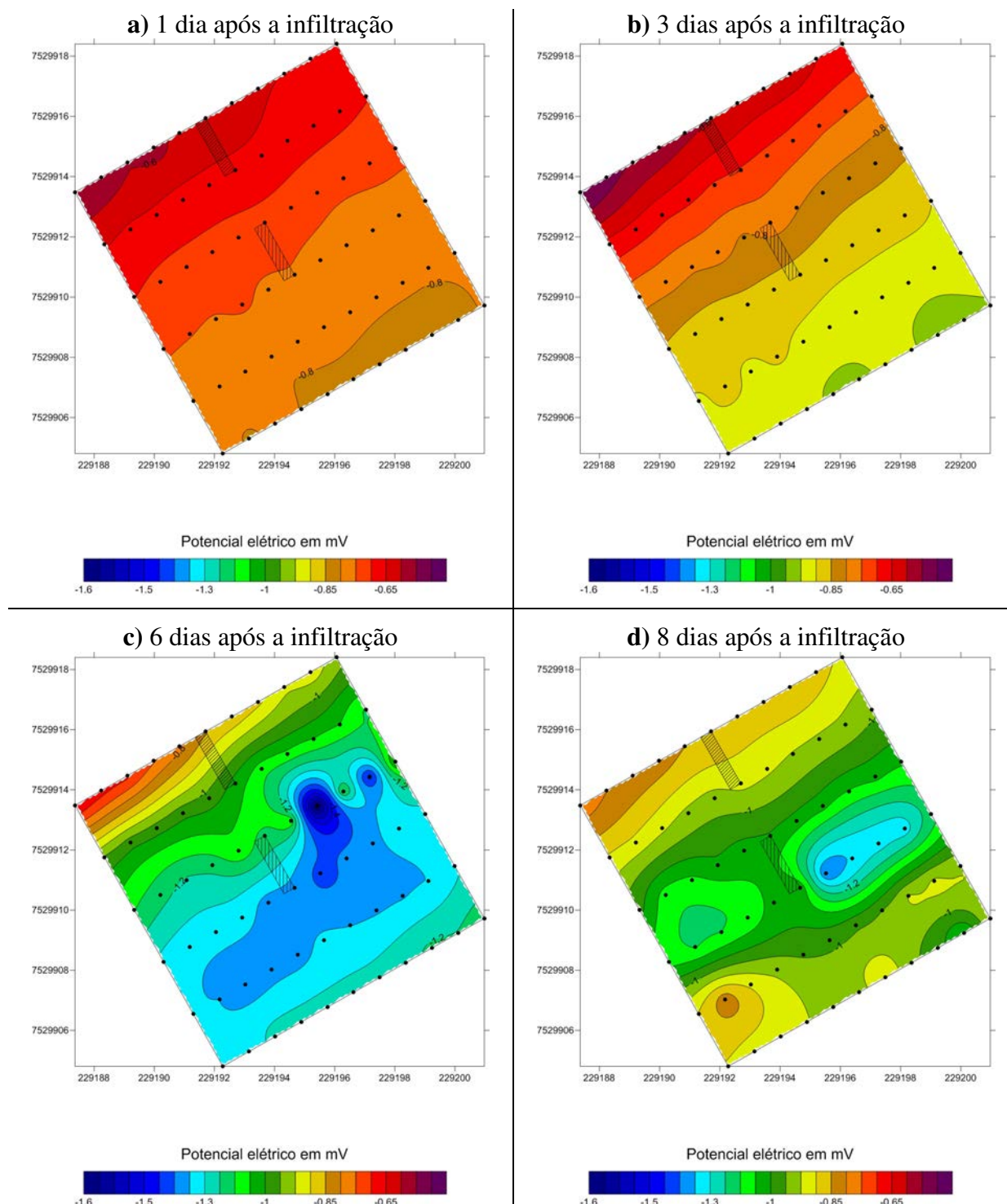
Dada a posição da anomalia e o tempo decorrido desde a infiltração até sua detecção, é possível que estes picos estejam relacionados à degradação da matéria orgânica da vinhaça por ação de microorganismos presentes no solo. Mas, a ausência de contrastes de valores na região das valas e que sejam plenamente correlacionáveis à infiltração de vinhaça, impossibilita uma afirmação concreta.

Neste momento, vale ressaltar uma observação de campo. O resistivímetro ABEM TERRAMETER SAS 4000 pode ser programado para efetuar medidas de ER, IP e SP repetidamente por um determinado período de tempo. No caso específico deste trabalho, o equipamento efetuava 4 ciclos de medição de SP, com duração de 8 segundos cada um. O valor final de cada medida é exibido após um breve tratamento estatístico executado pelo próprio aparelho. No caso do SP, além do potencial natural propriamente dito, o SAS 4000 fornece o desvio padrão calculado entre as medidas efetuada em cada ciclo, e que costuma ser adotado como um controle de qualidade das medidas de campo.



**Figura 9.38:** Mapas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 60 litros na vala A (à esquerda) e 300 litros na vala B (ao centro).

Observou-se que, nas leituras efetuadas próximas à vala B a partir do 6º dia após a segunda infiltração, o desvio padrão tornava-se demasiadamente elevado, enquanto que no restante da área este índice era sempre inferior a 0,2%. Assim, especificamente para o ABEM TERRAMETER SAS 4000, as leituras do desvio padrão podem auxiliar na demarcação da área de influência da vinhaça. Novos ensaios devem ser realizados para a confirmação (ou não) desta hipótese.



**Figura 9.39:** Mapas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 900 litros na vala B (ao centro)

Por fim, dadas as condições em que o experimento foi realizado, considerando as condicionantes envolvidas e, principalmente, a ausência de contraste de valores entre regiões “anômalas” e o meio natural, pode-se concluir que o método do potencial espontâneo não foi capaz de detectar a presença de vinhaça no solo da área de estudos.

## Capítulo 10 – Discussão integrada dos resultados, considerações finais e conclusões

### 10.1 Discussão integrada dos resultados

O presente trabalho foi desenvolvido em duas distintas litologias e, no decorrer do projeto, ficou evidente a diferença dos resultados obtidos em cada uma delas.

Os principais resultados obtidos na fase pós-infiltração no Sítio Altarugio (Área 1) – onde ocorrem os sedimentos predominantemente silto-argilosos da Formação Corumbataí – sugerem que o comportamento da vinhaça infiltrada é regido majoritariamente pela capacidade de troca catiônica (CTC) dos argilominerais do solo. Secundariamente, atuam a condutividade hidráulica da zona não-saturada e as condições climáticas, com destaque para a precipitação pluviométrica.

Por outro lado, na Chácara Santana (Área 2), local de ocorrência dos sedimentos de predominância arenosa da Formação Pirambóia, o fator natural de maior influência sobre a vinhaça infiltrada é a condutividade hidráulica da zona não-saturada. Em seguida, têm-se as condições climáticas e, por fim, a capacidade de troca catiônica.

Em ambos os casos, a profundidade máxima alcançada pela anomalia – considerando a profundidade de investigação proposta por Edwards (1977) – foi de, aproximadamente, 2,0m, corroborando Cunha et al. (1986). Assim, pode-se concluir que o lençol freático sob as duas áreas não foi impactado, pois este situa-se em profundidades superiores a 8,0m.

Num caso real de vazamento ou mesmo de infiltração de um maior volume na Área 1, é provável que a vinhaça fosse totalmente retida na zona não-saturada, não atingindo o lençol freático. Porém, na Área 2, as chances do contaminante alcançar a zona saturada são maiores, pois o solo permite maior mobilidade do contaminante (devido à maior condutividade hidráulica) e menor retenção de macrocomponentes da vinhaça (devido à menor capacidade de troca catiônica).

A visualização de anomalias inerentes à vinhaça no solo da Área 1 é dificultada pelo reduzido contraste entre o meio natural e o meio impactado. Esta constatação é atribuída, principalmente, à elevada CTC do solo da área, responsável pela adsorção de grande parte dos cátions da vinhaça. Deste modo, o caminho preferencial das correntes elétricas (injetadas ou induzidas) corresponde à água e aos eletrólitos intraporos.

No solo da Área 2, os fenômenos de troca iônica exibem menor intensidade e, conseqüentemente, a quantidade de íons adsorvidos também é menor. O elevado número de

cátions em dissolução favorece o fluxo de correntes elétricas (caminho preferencial), originando uma região anômala em subsuperfície.

Por estes motivos é que menores de volumes de vinhaça puderam ser detectados com maior facilidade na Área 2 em comparação à Área 1.

Os resultados dos métodos ER e EM obtidos em ambas as áreas corroboram trabalhos de cunho semelhante encontrados na bibliografia específica: Mendes (1987), Gloeden et al. (1991) e Cruz (2008). Em todos os casos, verificou-se a diminuição da resistividade elétrica (método ER) e/ou a elevação da condutividade elétrica (método EM). Os resultados obtidos com os métodos IP e SP creditam o ineditismo científico a este trabalho.

Ainda em relação às similaridades entre as duas áreas de estudos, pode-se elencar o comportamento dos parâmetros naturais, investigados na fase pré-infiltração. Em ambas, a resistividade elétrica diminui e a condutividade elétrica aumenta com a proximidade do nível freático, observa-se o incremento da cargabilidade com o aumento da profundidade e o potencial elétrico natural revela a direção do fluxo d'água subterrâneo à medida que os valores tornam-se menos negativos.

## **10.2 Conclusões**

Em relação à hipótese apresentada no item 1.9, os resultados obtidos permitem afirmar que os métodos empregados neste trabalho (talvez, com exceção do potencial espontâneo) podem ser empregados conjuntamente na detecção e no monitoramento de anomalias, em subsuperfície, oriundas da infiltração de vinhaça em um ambiente geológico. Mas, cabe a ressalva de que os resultados estão condicionados a diversos fatores relativos ao meio natural, aos métodos em questão e à ação antrópica.

Mediante as condições em que foram realizados os ensaios geofísicos desta obra, extensamente discutida nos capítulos anteriores, a caracterização do tipo de anomalia geofísica inerente à infiltração controlada de vinhaça em cada contexto geológico pode ser resumida conforme a Tabela 10.1.

Portanto, entende-se que o principal objetivo desta pesquisa foi parcialmente atingido.

Quanto aos limites de detecção de cada método, estes apresentaram elevada variação em função do método empregado, do volume infiltrado e do arcabouço geológico (Tabela 10.2):

**Tabela 10.1:** Tipos de anomalias identificadas em cada litologia estudada.

<b>Método</b>	<b>Litologia siltosa/argilosa (Fm. Corumbataí)</b>	<b>Litologia arenosa (Fm. Pirambóia)</b>
Eletrorresistividade (ER)	Anomalia de baixa resistividade elétrica	Anomalia de baixa resistividade elétrica
Polarização induzida (IP) – domínio do tempo	Anomalia de baixa cargabilidade	O método mostrou-se inconclusivo
Eletromagnético (EM) – domínio da frequência	O método mostrou-se inconclusivo	Anomalia de elevada condutividade elétrica
Potencial espontâneo (SP)	O método mostrou-se inconclusivo	O método mostrou-se inconclusivo

**Tabela 10.2:** Limites de detecção dos métodos empregados, para cada litologia estudada.

<b>Método/técnica</b>	<b>Litologia siltosa/argilosa (Fm. Corumbataí)</b>			<b>Litologia arenosa (Fm. Pirambóia)</b>		
	60 litros	300 litros	900 litros	60 litros	300 litros	900 litros
Eletrorresistividade (ER)/Imageamento Elétrico	N.D.	N.D.	D	N.D.	D	D
Polarização induzida (IP) – domínio do tempo/Imageamento Elétrico	N.D.	N.D.	D	I	I	I
Eletromagnético (EM) – domínio da frequência/Imageamento Eletromagnético	I	I	I	D	D	D
Potencial espontâneo (SP)/Técnica dos Potenciais	I	I	I	I	I	I

Legenda: D = detectado; N.D. = não detectado; I = inconclusivo.

Além dos fatores elencados na Tabela 10.2, deve-se levar em consideração também as condições climáticas vigentes na ocasião dos ensaios, visto que os resultados são influenciáveis principalmente pela ocorrência de chuvas.

Dentre os métodos empregados, o que mostrou maior eficiência foi o método da eletrorresistividade, seguido pelo eletromagnético, polarização induzida e potencial espontâneo.

Os ensaios geofísicos executados em ambas as áreas, principalmente os da fase pré-infiltração, contribuíram com a caracterização geofísica/geométrica dos domínios geológicos sobre os quais estão assentadas as área de estudo.

### 10.3 Considerações finais

Tal como mencionado no Capítulo 1, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, maior produtor mundial de açúcar obtido a partir da cana e maior exportador mundial de açúcar, além de ocupar posição no topo do *ranking* dos produtores mundiais de etanol. Com uma indústria sucroalcooleira tão importante para o país, e mesmo com legislação vigente, a contaminação de solos e águas subterrâneas por vinhaça ainda representa um grave problema de abrangência nacional e que deve receber as devidas atenções da comunidade científica.

Entretanto, o levantamento bibliográfico – constantemente executado durante todo o desenvolvimento do projeto – com ênfase nos trabalhos que relatam o uso de métodos geofísicos no estudo de áreas impactadas por vinhaça revelou a escassez destas obras, fato que se torna contraditório diante de tão grande número de possibilidades de áreas de estudo.

A maior causa disto, aparentemente, são impedimentos colocados pelos proprietários/administradores das áreas investigadas. Contatos efetuados com alguns pesquisadores da área revelaram que diversos outros trabalhos de investigação ambiental semelhantes foram executados em todo o país. Entretanto, os resultados finais foram apresentados somente ao solicitante do estudo. A publicação destes em meios de divulgação científica (periódicos especializados, simpósios, congressos,...) muitas vezes é proibida por cláusula em contrato, levando a supor o temor de autuação por órgãos ambientais.

Infelizmente, é uma situação que propicia elevados riscos de desastres ambientais e que deve ser revertida por cientistas, pesquisadores e comunidade em geral.

### 10.4 Recomendações

A adequação de uma metodologia de monitoramento de áreas impactadas por vinhaça empregando-se os métodos em questão não se concretizou, mas a realização deste trabalho abre precedentes para o surgimento de novos projetos de pesquisa que possam elucidar as inconclusões elencadas. Entre os pontos a serem aprimorados, estão:

- Novos ensaios de SP, variando as técnicas e outros procedimentos de aquisição dos dados, inclusive testando a proposição ao final do Capítulo 9 a respeito das informações de desvio padrão, para que seja possível afirmar se o método é ou não adequado para esta finalidade

- Novos ensaios de IE com menor abertura de dipolos e posicionados transversalmente à direção do fluxo do contaminante, visando maior detalhamento na aquisição dos dados
- Redução do intervalo de repetição dos ensaios, independentemente do arcabouço geológico (diariamente, se possível). Isto ajudaria a identificar e entender possíveis padrões de comportamento do contaminante em subsuperfície
- A execução de análises físico-químicas em amostras de sedimentos impactados, coletadas periodicamente após a infiltração da vinhaça, deve auxiliar na interpretação mais precisa das anomalias geofísicas
- No caso de novos experimentos de infiltração controlada, sugere-se a redução da área de estudos e o adensamento do número de ensaios e das respectivas estações de medida, inclusive com aquisições de dados em 3D, o que possibilitaria maior detalhamento da região da(s) vala(s)
- Localizar e estudar casos reais de áreas impactadas por vinhaça, situadas em diferentes litologias, de modo a se compreender plenamente a influência dos fatores naturais sobre os resultados obtidos



## Referências bibliográficas

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: define os termos relativos aos materiais da crosta terrestre, rochas e solos, para fins de engenharia geotécnica de fundações e obras de terra. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

AITTONIEMI, K.; HIRVONEN, M. T.; RAJALA, J.; SARVAS, J.; SOIKKELI, J. Multifrequency EM measurements near conductive orebodies. In: HJELT, S. E.; FOKIN, A. **Electrical prospecting for ore deposits in the Baltic shield** – part 2: electromagnetic methods. Espoo: Geological Survey of Finland, 1990. 143p.

ALABI, A. A; OGUNGBE, A. S.; ADEBO, B.; LAMINA, O. Induced polarization interpretation for subsurface characterisation: a case study of Obadore, Lagos State. **Archives of Physics Research**, v. 1, n. 3, p. 34-43, 2010.

ALBERS, M. **Tratamento da vinhaça**: concentração e outros. In: WORKSHOP TECNOLÓGICO SOBRE VINHAÇA. Jaboticabal, 2007. Disponível em: <[http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/Position\\_paper\\_sessao4\\_monica\\_VS.pdf](http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/Position_paper_sessao4_monica_VS.pdf)>. Acesso em: 27 set. 2010.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS; FIESP – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR; CTC – CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Manual de conservação e reuso de água na indústria sucroenergética**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2009. 288p. Disponível em: <[http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/CatalogoPublicacoes\\_2009.asp](http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/CatalogoPublicacoes_2009.asp)>. Acesso em: 15 set. 2009.

ANDERSON, L. A.; JOHNSON, G. R. Application of the self-potential method to geothermal exploration in Long Valley, California. **Journal of Geophysical Research**, v. 81, n. 8, p. 1527-1532, 1976.

AUBERT, M.; ATANGANA, Q. Y. Self-potential method in hydrogeological exploration of volcanic areas. **Ground Water**, v. 34, n. 6, p. 1010-1016, 1996

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 332p.

BITENCOURT, J. C.; LIMA, J. P. R.; HANSEN, M. A. F.; LUSA, M. Aplicação do método eletromagnético FDEM-GCM para caracterização geoeétrica de uma ocorrência cuprífera. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 13, Rio de Janeiro, 2013. **Anais...** Rio de JaneiroBrasília: SBGf, 2013.

BRAGA, A. C. O. **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP**. 169f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 1997.

BRAGA, A. C. O.; CARDINALI, M. T. Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de hidrocarbonetos. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 181-190, 2005.

BRAGA, A. C. O.; MALAGUTTI FILHO, W.; DOURADO, J. C.; CHANG, H. K. Correlation of electrical resistivity and induced polarization data with geotechnical survey standard penetration test measurements. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 4, n. 2, p. 123-130, jun. 1999.

BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo agropecuário 2006**: resultados preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2006/agropecuariaio.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2012.

\_\_\_\_\_. **Área Territorial Brasileira**. 2010. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default\\_territ\\_area.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm)>. Acesso em: 03 dez. 2012.

\_\_\_\_\_. **Decreto n. 76.593, de 14 de novembro de 1975**. Institui o Programa Nacional do Álcool e dá outras Providências. Diário Oficial da União, Seção 1, v.113, n.219, p. 15.257, 14 nov. 1975.

BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R. Concentração de cátions presentes no lixiviado de solos tratados com vinhaça. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 773-781, 2007.

BROWN, W. A.; STAFFORD, K. W.; SHAW-FAULKNER, M.; GRUBBS, A. A comparative integrated geophysical study of Horseshoe Chimney Cave, Colorado Bend State Park, Texas. **International Journal of Speleology**, v. 40, n. 1, p. 9-16, 2011.

BURTON, B. L.; BALL, L. B. **Geophysical investigation of Red Devil mine using direct-current resistivity and electromagnetic induction, Red Devil, Alaska, August 2010**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2011. 53 p.

BUTLER, D. K.; LLOPIS, J. L. Assessment of anomalous seepage conditions. In: In: WARD, S. H. **Geotechnical and environmental geophysics**. Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 153-173. v. 2.

CALHEIROS, R. O. **Reuso da água na indústria canavieira (Vinhaça)**. 2008. Disponível em: <<http://www.artedeproduziragua.com.br/10.htm>>. Acesso em: 8 out. 2009.

CASTRO, D. L. Caracterização geofísica e hidrogeológica do cemitério Bom Jardim, Fortaleza - CE. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 3, p. 251-271, 2008.

CAVALCANTI, S. S.; SATO, H. K.; LIMA, O. A. L. Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Bahia. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 19, n. 2, p. 155-168, 2001.

CEPAGRI – CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA. **Clima dos municípios paulistas**: Rio Claro. [20--a].

Disponível em: <[http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_494.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_494.html)>. Acesso em: 22 out. 2012.

\_\_\_\_\_. **Clima dos municípios paulistas:** Corumbataí. [20--b]. Disponível em: <[http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_143.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_143.html)>. Acesso em: 22 out. 2012.

CETEC – CENTRO TECNOLÓGICO DA FUNDAÇÃO PAULISTA DE TECNOLOGIA E EDUCAÇÃO. **Situação dos recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá:** UGRHI 5. São Paulo: CETEC, 2001. 501p. Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/RS/Rsituacao-PCJ-Vol-1.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2012.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **A Produção mais Limpa (P+L) no setor sucroalcooleiro:** informações gerais. CETESB, São Paulo, 2002. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/texto\\_ca/documentos/procao\\_mais\\_limpa\\_sucroalcooleiro.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/texto_ca/documentos/procao_mais_limpa_sucroalcooleiro.pdf)>. Acesso em: 09 mar. 2008.

\_\_\_\_\_. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas:** métodos físicos. 1999. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/manual-de-gerenciamento-de-ACs/7-manual>>. Acesso em: 6 dez. 2006.

\_\_\_\_\_. **P4.321.** Vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. 2006. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4\\_231.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4_231.pdf)>. Acesso em: 22 set. 2010.

COLLETT, L. S. History of Induced-Polarization Method. In: FINK, J. B. *et al.* **Induced Polarization:** applications and case histories. Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 5-21.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Indicadores da Agropecuária.** 2014. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=538&t=2>>. Acessado em: 24 fev. 2014.

\_\_\_\_\_. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos.** 2013. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13\\_12\\_20\\_10\\_56\\_08\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_dez\\_2013\\_3o\\_lev\\_-\\_original.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_12_20_10_56_08_boletim_cana_portugues_-_dez_2013_3o_lev_-_original.pdf)>. Acessado em: 24 fev. 2014.

CONSÓRCIO PCJ. **Diagnóstico regional informativo:** abastecimento de água – diagnóstico dos municípios. Americana: Consórcio PCJ, 2007. Disponível em: <[http://www.agua.org.br/editor/file/Diagnostico%20dos%20municipios\\_agua.pdf](http://www.agua.org.br/editor/file/Diagnostico%20dos%20municipios_agua.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2013.

CONYERS, L. B.; ERNENWEIN, E. G.; GREALY, M.; LOWE, K. M. Electromagnetic conductivity mapping for site prediction in meandering river floodplains. **Archaeological Prospection**, v. 15, n. 2, p. 81-91, 2008.

CORAZZA, R. I. **Reflexões sobre o papel das políticas ambientais e de ciência e tecnologia na modelagem de opções produtivas ‘mais limpas’ numa perspectiva**

**evolucionista:** um estudo sobre o problema da disposição da vinhaça. 1996. Disponível em: <[http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/i\\_en/mesa3/6.pdf](http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/i_en/mesa3/6.pdf)>. Acesso em: 23 ago. 2010.

\_\_\_\_\_. **Impactos ambientais da vinhaça:** controvérsias científicas e lock-in na fertirrigação? In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 44, Fortaleza, 2006.

CORRY, C. E. Spontaneous polarization associated with porphyry sulfide mineralization. **Geophysics**, v. 50, n. 6, p. 1020-1034, 1985.

CORWIN, R. F. The self-potential method for environmental and engineering applications. In: WARD, S. H. **Geotechnical and environmental geophysics**. Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 127-145. v. 1.

CRONQUIST, A. **The evolution and classification of flowering plants**. 2. ed. New York: The New York Botanical Garden, 1988. 555p.

CRUZ, J. I. **Detecção da influência da vinhaça na resistividade do solo através da análise de dados geofísicos:** um estudo de caso no assentamento Sepé – Tiarajú – SP. 165f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2008.

CRUZ, J. I. et al. Detecção de contaminação de solo por vinhaça através de análise de dados de eletrorresistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.26, n.4, p.481-492, out/dez. 2008.

CUNHA, L. F. J.; SHIRAIWA, S. Aplicação do método eletromagnético indutivo na investigação da pluma de contaminação da água subterrânea por resíduos de cromo de curtume. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 127-134, 2011.

CUTRIM, A. O.; RUIZ, A. S.; LIPORONI, L. M.; MEDEIROS, F. A.; BARROSO, U. C.; NASCIMENTO, A. L. Sondagem elétrica vertical aplicada em pesquisa hidrogeológica na bacia do Parecis, MT. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 2, p. 131-140, abr/jun. 2007.

CUTRIM, A. O.; SHIRAIWA, S.; BARROS, A. P.; MIRANDA, G. T.; WALLAU, P. I. R.; GRILLAUD, R. A. S.; SIQUEIRA NETO, A. C. Aplicação de magnetometria, polarização induzida e caminhamento elétrico na prospecção mineral no município de Novo Mundo (MT). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 4, Brasília, 2010. **Anais...** Brasília: SBGf, 2010.

DAAE – DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE RIO CLARO (SP). **Sistema de tratamento de água. Rio Claro (SP):** DAAE, [20--]. Disponível em: <<http://www.daaeriolclaro.sp.gov.br/trata-agua-sistema.php>>. Acesso em: 24 out. 2012.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de dados pluviométricos do Estado de São Paulo.** São Paulo: DAEE, 2011. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhm.exe/plu?lig=podfp>>. Acesso em: 23 out. 2012.

\_\_\_\_\_. **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo.** São Paulo: DAEE/IG/IPT/CPRM, 2007. Escala 1:1.000.000. Versão 2.0.

DE DOMENICO, D.; GIANNINO, F.; LEUCCI, G.; BOTTARI, C. Integrated geophysical surveys at the archaeological site of Tindari (Sicily, Italy). **Journal of Archaeological Science**, v. 33, n. 7, p. 961-970, 2006.

EDWARDS, L. S. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. **Geophysics**, v. 42, n. 5, p. 1020-1036, 1977.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Uso e cobertura das terras na região nordeste do Estado de São Paulo: Agricultura e Pecuária – Cana-de-açúcar**. 2006a. Disponível em: <[http://www.nordestesp.cnpem.br/conteudo/AgriculturaPecuaria\\_CanaDeAcucar.htm](http://www.nordestesp.cnpem.br/conteudo/AgriculturaPecuaria_CanaDeAcucar.htm)>. Acesso em: 8 out. 2009.

\_\_\_\_\_. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006b.

\_\_\_\_\_. ALCARDE, A. R. **Processamento da cana-de-açúcar**. 2007c. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_102\\_22122006154841.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_102_22122006154841.html)>. Acesso em: 16 set. 2010.

\_\_\_\_\_. ROSSETTO, R. **Maturação**. 2007a. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_90\\_22122006154841.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_90_22122006154841.html)>. Acesso em: 16 set. 2010.

\_\_\_\_\_. ROSSETTO, R. **Colheita**. 2007b. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_12\\_711200516716.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_12_711200516716.html)>. Acesso em: 16 set. 2010.

EPPELBAUM, L. V. Archaeological geophysics in Israel: past, present and future. **Advances in Geosciences**, v. 24, p. 45-68, 2010.

EPPELBAUM, L. V.; BEN-AVRAHAM, Z.; ITKIS, S. E. Integrated geophysical investigations at the Halutza archaeological site (southern Israel). In: EAGE CONFERENCE & EXHIBITION, 64., Florença (Itália). **Proceedings...** Netherlands: European Association of Geoscientists & Engineers, 2002. P151, p. 1-4.

ERCHUL, R. A.; SLIFER, D. W. **Geotechnical applications of the self potential (SP) method: report 2: the use of self-potential to detect ground-water flow in karst**. Vicksburg (Mississippi): US Army Corps of Engineers, 1989. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a209339.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2013.

EVE, A. S.; KEYS, D. A. **Applied geophysics in the search for minerals**. Cambridge: Cambridge University Press, 1954. 382p.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT**. 2014. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>>. Acessado em: 24 fev. 2014.

FACHIN, S. J. S.; HUBER, F.; SHIRAIWA, S.; BORGES, W. R.; MIGLIORINI, R. B. Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curtime. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p.129-138, jan/mar. 2006.

FROHLICH, B.; LANCASTER, W. J. Electromagnetic surveying in current Middle Eastern archaeology: application and evaluation. **Geophysics**, v. 51, n. 7, p.1414-1425, 1986.

GABER, S; EL-FIKY, A. A.; ABOU SHAGAR, S.; MOHAMADEN, M. Electrical resistivity exploration of the Royal Ptolemaic Necropolis in the Royal Quarter of Ancient Alexandria, Egypt. **Archaeological Prospection**, v. 6, n. 1, p. 1-10, mar. 1999.

GALLAS, J. D. F. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental**. 2000. 174f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2000.

\_\_\_\_\_. O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 133-144, 2005.

GALLAS, J. D. F.; TAIOLI, F.; MALAGUTTI FILHO, W. Induced polarization, resistivity, and self-potential: a case history of contamination evaluation due to landfill leakage. **Environmental Earth Sciences**, v. 63, n. 2, p. 251-261, 2011.

GALLAS, J. D. F.; TAIOLI, F.; MALAGUTTI FILHO, W.; PRADO, R. L.; DOURADO, J. C. Métodos e técnicas geoeletricas rasas na delimitação de área afetada por ruptura em teto de túnel urbano. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 1, p. 33-46, 2001.

GALLAS, J. D. F.; TAIOLI, F.; SILVA, S. M. C. P.; COELHO, O. G. W.; PAIM, P. S. G. Contaminação por choro e sua detecção por resistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p. 51-59, jan/mar. 2005.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa**. 2007. 215f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2007.

GAZOTY, A.; FIANDACA, G.; PEDERSEN, J.; AUKEN, E.; CHRISTIANSEN, A. V.; PEDERSEN, J. K. Application of time domain induced polarization to the mapping of lithotypes in a landfill site. **Hydrology Earth System Science**, v. 16, n. 6, p. 1793-1804, 2012.

GEOTOMO SOFTWARE. **RES2DINV ver. 3.53**: 2D Resistivity and IP Inversion. Geotomo Software, 2003.

\_\_\_\_\_. **RES2DINV ver. 3.53 for Windows 98/Me/2000/NT/XP**: User's Manual. Penang, Malaysia: Geotomo Software, 2003. 125p.

GLOEDEN, E.; CUNHA, R. C. A.; FRACCAROLI, M. J. B.; CLEARY, R. W. The behaviour of vinasse constituents in the unsaturated and saturated zones in the Botucatu aquifer recharge area. **Water Science Technology**, v. 24, n. 11, p. 147-157, 1991.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer v. 9.11**. Golden Software, 2010.

GONZÁLEZ, R. G.; GARLOBO, C. M. S. Vinhaça. In: ICIDCA – Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. **Manual dos derivados da cana-de-açúcar**. Brasília: ABIPTI, 1999. p. 435-438.

GOOGLE. **Google Earth**: 23K, 226800 m E, 7514800 m S. Santa Clara (CA, EUA): Google, 2012a. Escala 1:4000. Acesso em: 03 ago. 2012.

\_\_\_\_\_. **Google Earth**: 23K, 229125 m E, 7529950 m S. Santa Clara (CA, EUA): Google, 2012b. Escala 1:2000. Acesso em: 07 nov. 2012.

GRIFFITHS, D. H.; KING, R. F. **Applied geophysics for engineers and geologists**. London: Pergamon Press, 1965. 223p.

GUNKEL, G.; KOSMOL, J.; SOBRAL, M.; ROHN, H.; MONTENEGRO, S.; AURELIANO, J. Sugar cane industry as a source of water pollution – case study on the situation in Ipojuca River, Pernambuco, Brazil. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 180, n. 1, p. 261–269. 2007.

HASHIMOTO, T.; TANAKA, Y. A large self-potential anomaly on Unzen volcano, Shimabara peninsula, Kyushu island, Japan. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 3, p. 191-194, 1995.

HASSUDA, S. **Impactos da infiltração da vinhaça de cana no Aquífero Bauru**. 92f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1989.

HASSUDA, S.; REBOUÇAS, A. C.; CUNHA, R. C. A. Aspectos qualitativos da infiltração da vinhaça de cana no aquífero Bauru. **Revista do Instituto Geológico**, v. 11, n. 2, p. 5-20, 1990.

\_\_\_\_\_. Impactos da infiltração da vinhaça de cana no Aquífero Bauru. **Boletim IG-USP**, São Paulo, v. 9, n. Especial, p. 169-171, 1991.

HALLOF, P. G.; YAMASHITA, M. The use of the IP method to locate gold-bearing sulfide mineralization. In: FINK, J. B. *et al.* **Induced Polarization**: applications and case histories. Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 227-279.

HAZELL, J. R. T.; CRATCHLEY, C. R.; PRESTON, A. M. The location of aquifers in crystalline rocks and alluvium in Northern Nigeria using combined electromagnetic and resistivity techniques. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v. 21, n. 2, p. 159-175, 1988.

HOHMANN, G. W.; WARD, S. H. **Electrical methods in mining geophysics**. [1981]. Disponível em: <<http://download.egi.utah.edu/geothermal/GL04049/GL04049.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2013.

IBRAHIM, L. **Argilominerais da porção basal da Formação Corumbataí (Bacia do Paraná) na região de Rio Claro/SP**. 2008. 136f. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

ICIDCA – INSTITUTO CUBANO DE INVESTIGACIONES DE LOS DERIVADOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR. **Manual dos derivados da cana-de-açúcar**. Brasília: ABIPTI, 1999. 474p.

INMAN, J. R. Resistivity inversion with ridge regression. **Geophysics**, v. 40, n. 5, p.789-817. 1975.

INSTITUTO GEOLÓGICO. **Formações geológicas de superfície**: folha geológica de Rio Claro. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986. 1 mapa, color., 56 cm x 52 cm. Escala 1:50.000.

INTERPEX LIMITED. **IX1D v. 2.18**. Interpex Limited, 2009.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: SMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2008. 104p.

IRRIGART. **Bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá**: situação dos recursos hídricos 2002/2003 (relatório síntese). Piracicaba: IRRIGART, 2005. 103p. Disponível em: <[http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/RS/RS-02-03\\_Relatorio-Sintese.pdf](http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/RS/RS-02-03_Relatorio-Sintese.pdf)>. Acesso em: 24 out. 2012.

ISLER, E. A.; OLIVEIRA, J. C. V. **O agronegócio de Rio Claro**. Rio Claro: SEMAAS; Piracicaba: IGEAgro, 2005. 199p.

ISO – INTERNATIONAL SUGAR ORGANIZATION. **Sugar Year Book 2009**. 2009. Disponível em: <<http://www.isosugar.org/PDF%20files/SUGAR%20YEAR%20BOOK%20-%20sample.pdf>>. Acessado em 24 fev. 2014.

JENKINS, G. H. **Introduction to cane sugar technology**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1966. 478p.

JONGMANS, D.; BIÈVRE, G.; RENALIER, F.; SCHWARTZ, S.; BEAUREZ, N.; ORENGO, Y. Geophysical investigation of a large landslide in glaciolacustrine clays in the Trièves area (French Alps). **Engineering Geology**, v. 109, n. 1 e 2, p. 45-56, out. 2009.

KEAREY, P., BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to geophysical exploration**. 3. ed. Oxford: Blackwell Science, 2002. 262p.

LAGO, A. L.; ELIS, V. R.; GIACHETI, H. L. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, p. 357-374, 2006.



LANDIM, P. M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Rio Claro: Lab. Geomatemática, DGA, IGCE, UNESP, 2000. 20p. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/textodi.html>>. Acesso em: 18 fev. 2013.

\_\_\_\_\_. **O grupo Passa Dois (P) na bacia do Rio Corumbataí (SP)**. 98f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo: 1967.

LOPES, R. J. Bactérias eletrizantes. **Revista Pesquisa Fapesp**, ed. 167, p. 44-47, jan. 2010.

LODDO, M.; QUARTO, R.; SCHIAVONE, D. Integrated geophysical survey for the geological structural and hydrogeothermal study of the North-western Gargano promontory (Southern Italy). **Annali di Geofisica**, v. 39, n. 1, p. 201-219, 1996.

LOPES, R. C. P3T1c – Formação Corumbataí – Grupo Passa Dois. In: MARCONATO, A.; TURRA, B. B.; SALVADOR, E. D.; CHIEREGATI, L. A.; D'AGOSTINO, L. Z.; PERROTA, M. M.; LOPES, R. C. **Mapa geológico do Estado de São Paulo: escala 1:750.000: breve descrição da unidades litoestratigráficas aflorantes no Estado de São Paulo**. São Paulo: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2005. p. 143.

LOPES, R. C.; MARCONATO, A. P3T1p – Formação Pirambóia. In: MARCONATO, A.; TURRA, B. B.; SALVADOR, E. D.; CHIEREGATI, L. A.; D'AGOSTINO, L. Z.; PERROTA, M. M.; LOPES, R. C. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo: escala 1:750.000: breve descrição das unidades litoestratigráficas aflorantes no Estado de São Paulo**. São Paulo: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2005. p. 144.

LOPES, R. C.; SALVADOR, E. D. K1βsg – Formação Serra Geral – Grupo São Bento. In: MARCONATO, A.; TURRA, B. B.; SALVADOR, E. D.; CHIEREGATI, L. A.; D'AGOSTINO, L. Z.; PERROTA, M. M.; LOPES, R. C. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo: escala 1:750.000: breve descrição das unidades litoestratigráficas aflorantes no Estado de São Paulo**. São Paulo: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2005. p. 146.

LOWRIE, W. **Fundamentals of geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 354p.

LUDOVICE, M. T. F. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre lençol freático**. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1997.

LYRA, M. R. C. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A.. Topossequência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 525-532, 2003.

MALAGUTTI FILHO, W.; BRAGA, A. C. O.; ELIS, V. R.; DOURADO, J. C. Estudos de minibarragens: exemplo de aplicação de técnicas geofísicas. **Revista Geociências**, v. 18, n. 1; p. 53-67, 1999.

MARGIOTTA, S.; NEGRI, S. Stratigraphic and geophysical integrated methodologies for the interpretation of sulphur water formational environment in Salento (Italy). **International Journal of Coal Geology**, v. 75, n. 1, p. 27-39, 2008.

MARTINHO, E.; ALMEIDA, F.; SENOS MATIAS, M. J. Time-domain induced polarization in the determination of the salt/freshwater interface (Aveiro - Portugal). In: SALT WATER INTRUSION MEETING, 1, Cartagena, 2004. **Proceedings...**

MCNEILL, J. D. **Technical notes TN-6:** electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers. Mississauga: Geonics Limited, 1980. 15p.

MCT – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – República de Moçambique. **Museu virtual do açúcar.** 2005. Disponível em: <<http://museu.mct.gov.mz/acucar/>>. Acesso em: 13 ago. 2010.

MEDEIROS, W. E.; LIMA, O. A. L. Origem do potencial elétrico espontâneo em rochas cristalinas fraturadas e sua utilização na locação de poços. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2,3, p. 103-116, 1999.

MELLO, V. F. B.; TEIXEIRA, A. H. **Mecânica dos solos.** Universidade de São Paulo: São Carlos, 1967. 205p.

MENDES, J. M. B. **Técnicas geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas.** 196f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

MENEZES, A. M.; MOREIRA, C. A.; ILHA, L. M.; SCHWEIG, C. Estudo geofísico de vazamento de combustíveis em posto de abastecimento. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 601-609, 2011.

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, out/dez. 2007.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O. Aplicação do método de polarização induzida em aterro controlado. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 219-227, 2008.

\_\_\_\_\_. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p.257-264, abr/jun. 2009.

MOREIRA, C. A.; CAVALHEIRO, M. L. D.; PEREIRA, A. M.; SARDINHA, D. S. Análise das relações entre parâmetros geoeletricos e vazões para o aquífero livre de Caçapava do Sul (RS). **Águas Subterrâneas**, v. 27, n. 3, p. 45-59, 2013.

MOREIRA, C. A.; ILHA, L. M. Prospecção geofísica em ocorrência de cobre localizada na bacia sedimentar do Camaquã (RS). **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 64, n. 3, p. 305-311, jul/set. 2011.

MOURA, H. P.; MALAGUTTI FILHO, W. Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro-SP. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 22, n. Especial, p.129-139, 2003.

MOURA, H. P.; MALAGUTTI FILHO, W. Métodos da eletrorresistividade e da polarização induzida aplicados no estudo do aterro controlado de Piracicaba-SP. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 26, n. 1, p.35-43, jan/mar. 2007.

MUZTAZA, N. B. M.; SAIDIN, M. M.; SAAD, R.; NORDIANA, M. M. 2D resistivity method to investigate an archaeological structure in Jeniang, Kedah. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 17, n. C, p. 353-360, 2012.

NAUDET, V; REVIL, A; BOTTERO, J. Y. Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 21, paginação inexistente, 2003.

NUNES, L. P. M.; LUIZ, J. G. Caracterização geoelétrica de área de curtume localizada no distrito industrial de Icoaraci, Belém-Pará. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, p. 467-481, 2006.

OLIVEIRA, M. T.; MOREIRA, C. A.; MENEZES, A. M. C. Aplicação do método de Polarização Induzida em área de disposição de resíduos sólidos no município de Caçapava do Sul - RS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 2, p. 377-384, 2011.

OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H; ALMEIDA, C. L. F. **Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo**: quadrícula de São Carlos. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1981. 1 mapa, color., 56 cm x 52 cm. Escala 1:100.000.

ONG, J. B.; LANE JR., J. W.; ZLOTNIK, V. A.; HALIHAN, T.; WHITE, E. A. Combined use of frequency-domain electromagnetic and electrical resistivity surveys to delineate near-lake groundwater flow in the semi-arid Nebraska Sand Hills, USA. **Hydrogeology Journal**, v. 18, n. 6, p. 1539-1545, 2010.

ORELLANA, E. **Prospeccion geoelectrica en corriente continua**. Madrid, España: Paraninfo, 1972. 523p.

PARASNIS, D. S. **Principles of applied geophysics**. London: Methuen & Co. Ltd., 1962. 176p.

\_\_\_\_\_. A geophysical case history with correctly negative results. **Geoexploration**, v. 5, n. 1, p. 21-29, 1967.

PATTANTYUS-ABRAHAM, M. Geophysical results in archaeology in Hungary. **Geophysics**, v. 51, n. 3, p. 561-567, mar. 1986.

PIRO, S.; MAURIELLO, P.; CAMMARANO, D. F. Quantitative integration of geophysical methods for archaeological prospection. **Archaeological Prospection**, v. 7, n. 4, p. 203-213, dez. 2000.

POISSON, J.; CHOUTEAU, M.; AUBERTIN, M.; CAMPOS, D. Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile. **Journal of Applied Geophysics**, v. 67, n. 2, p. 179-192, fev. 2009.

PROAMB – ENGENHARIA QUÍMICA S/C LTDA. **Estudo de impacto ambiental – EIA:** Baldin Bioenergia AS. Piracicaba: PROAMB, 2009. Disponível em: <[http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/sigrh\\_home\\_colegiado.exe?TEMA=RELATORIO&COLEGIADO=CRH/CBH-MOGI&lwgactw=447405](http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/sigrh_home_colegiado.exe?TEMA=RELATORIO&COLEGIADO=CRH/CBH-MOGI&lwgactw=447405)>. Acesso em: 05 dez. 2012.

PURSEGLOVE, J. W. **Tropical crops:** monocotyledons. London: Longman Group Limited. 1979. 607p.

REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. **Fundamentos da teoria eletromagnética.** 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 516p.

REVIL, A; MENDONÇA, C. A.; ATEKWANA, E. A.; KULESSA, B; HUBBARD, S. S.; BOHLEN, K. J. Understanding biogeobatteries: where geophysics meets microbiology. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 115, n. 1, paginação inexistente, 2010.

RFA – RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **World Fuel Ethanol Production.** 2014. Disponível em: <<http://ethanolrfa.org/pages/World-Fuel-Ethanol-Production>>. Acessado em: 24 fev. 2014.

ROBINSON, E. S.; ÇORUH, C. **Basic exploration geophysics.** New York: John Wiley & Sons, 1988. 562p.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais.** Embrapa Monitoramento por Satélite: Campinas, 2010. 26p.

SALVADOR, E. D. K1δsg - Formação Serra Geral, intrusivas básicas - Grupo São Bento. In: MARCONATO, A.; TURRA, B. B.; SALVADOR, E. D.; CHIEREGATI, L. A.; D'AGOSTINO, L. Z.; PERROTA, M. M.; LOPES, R. C. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo:** escala 1:750.000: breve descrição das unidades litoestratigráficas aflorantes no Estado de São Paulo. São Paulo: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2005. p. 147.

SANTOS, F. M. **Aplicação de métodos geofísicos no estudo da contaminação de águas subterrâneas no lixão de Cuiabá-MT.** 88f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá. 2005.

SÃO PAULO. (Estado). **Lei n. 7.663, de 30 de dezembro de 1991.** Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial do Estado de São Paulo: Poder Legislativo, São Paulo, v. 101, n. 247, 31 dez. 1991.

\_\_\_\_\_. **Lei n. 11.241, de 19 de setembro de 2002.** Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. Diário Oficial do Estado de São Paulo: Poder Legislativo, São Paulo, v. 112, n. 180, 20 set. 2002.

SATO, M; MOONEY, H. M. The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials. **Geophysics**, v. 25, n. 1, p. 226-249, 1960.

SCHIAVONE, D.; QUARTO, R. Self-potential prospecting in the study of water movements. **Geoexploration**, v. 22, n. 1, p. 47-58, 1984.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, 1974. **Anais...** Porto Alegre: SBG, 1974. v. 1, p. 41-65.

SEIGEL, H.; NABIGHIAN, M.; PARASNIS, D. S.; VOZOFF, K. The early history of the induced polarization method. **The Leading Edge**, v. 26, n. 3, p. 312-321, 2007.

SENGUPTA, S. N.; BOSE, R. N.; MITRA, S. K. Geophysical investigations for copper in the Singhana-Gotro área, Khetri Copper Belt, Rajasthan (India). **Geoexploration**, v. 7, n. 2, p. 73-82, 1969.

SEPE, P. M. **Comportamento do Aquífero Itararé no município de Piracicaba e áreas vizinhas**. 182f. Dissertação (Mestrado em Análise Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1990.

SHARPE, P. **Sugar cane: past and present**. 1998. Disponível em: <<http://www.ethnoleaflets.com//leaflets/sugar.htm>>. Acesso em: 13 ago. 2010.

SHERIFF, R. E. **Geophysical Methods**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1989. 605p.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G.; LIMA, J. F. W. F.. Alterações físicas e químicas de um Argissolo amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 76-83, 2006.

SILVA, R. W. C.; MALAGUTTI FILHO, W.; MOREIRA, C. A. Emprego do método da eletrorresistividade no estudo da contaminação subterrânea do cemitério municipal de Vila Rezende, Piracicaba - SP. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 3, p. 389-399, 2009.

SINGARIMBUN, A.; DJAMAL, M.; MEILAWATI, F. Self-potential methods on geothermal exploration (case study: Mount Patuha, West Java, Indonesia). In: MASTORAKIS, N. et al. **Recent Researches in Geography, Geology, Energy, Environment and Biomedicine**. Corfu Island, Greece: WSEAS Press, 2011. p. 86-90.

SINGH, C. L.; RAM, A. Location of graphite deposits by self-potential method around Persia and Mahugain, Palamau district (Bihar). **Proceedings of Indian National Science Academy**, v. 37A, n. 5, p. 338-348, 1971. Disponível em: <[http://www.new.dli.ernet.in/rawdataupload/upload/insa/INSA\\_2/20005ad1\\_338.pdf](http://www.new.dli.ernet.in/rawdataupload/upload/insa/INSA_2/20005ad1_338.pdf)>. Acesso em: 01 abr. 2013.

SOUPIOS, P. M.; KOULI, M.; VALLIANATOS, F.; VAFIDIS, A.; STAVROULAKIS, G. Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: a case study of Keritis Basin in Chania (Crete – Greece). **Journal of Hydrology**, v. 338, n. 1 e 2, p. 122-131, 2007.

SOUSA, G. B.; LUIZ, J. G. Groundwater prospection in the municipality of Piçarra-PA using very low frequency and resistivity. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 3, p. 361-372, jul/set. 2012.

SOUZA, L. A. P.; SILVA, R. F.; IYOMASA, W. S. Métodos de Investigação. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 163-196.

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

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 744p.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.; KEYS, D. A. **Applied geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1976. 860p.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Mecánica de suelos en la ingeniería práctica**. 2. ed. El Ateneo: Barcelona, 1973. 722p.

TRIMBLE NAVIGATION LIMITED. **GPS Pathfinder Office v. 3.10**. Trimble Navigation Limited, 2005.

TSOKAS, G. N.; TSOURLOS, P. I.; VARGEMEZIS, G.; NOVACK, M. Non-destructive electrical resistivity tomography for indoor investigation: the case of Kapnikarea church in Athens. **Archaeological Prospection**, v. 15, n. 1, p. 47-61, jan/mar. 2008.

VICHABIAN, Y. **An environmental application of self potential geophysics**. 98f. (Mestrado em Engenharia Civil e Engenharia Ambiental) – Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1997. Disponível em: <[dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/46086/37764379.pdf](https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/46086/37764379.pdf)>. Acesso em: 01 abr. 2013.

VICHABIAN, Y; MORGAN, F. D. Self potentials in cave detection. **The Leading Edge**, v. 21, n. 9, p. 866-871, 2002.

WITHERLY, K. E.; VYSELAAR, J. A geophysical case history of the Poplar Lake copper-molybdenum deposit, Houston area, British Columbia. In: FINK, J. B. *et al.* **Induced Polarization: applications and case histories**. Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 304-324.

WYNN, J. C.; GROSZ, A. E.; CARLSON-FOSCZ, V. L. Induced-polarization response of some titanium-bearing placer deposits in the southeastern United States. In: FINK, J. B. *et al.* **Induced Polarization: applications and case histories**. Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 280-303.

WYNN, J. C.; SHERWOOD, S. I. The self-potential (SP) method: an inexpensive reconnaissance and archaeological mapping tool. **Journal of Field Archaeology**, v. 11, n. 2, p. 195-204, 1984.

XAVIER, F. F. Aplicação da sondagem geofísica – método eletrorresistividade - na locação de poços tubulares profundos. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 13, 2004, Cuiabá (MT). **Livro de resumos**. São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2004.

\_\_\_\_\_. Geofísica elétrica aplicada a geotecnia para investigação de estabilidade de taludes. In: Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, 7, 2010, Foz do Iguaçu (PR). **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010.

YANG, J.; LIU, Z.; WANG, L. Effectiveness of natural field induced polarization for detecting polymetallic deposits. **Earth Science Frontiers**, v. 15, n. 4, p. 217-221, 2008.

YLMAZ, S. Investigation of Gürbulak landslide using 2D electrical resistivity image profiling method (Trabzon, Northeastern Turkey). **Journal of Environmental & Engineering Geophysics**, v. 12, n. 2, p. 199-205, 2007.

## **Anexo I**

Resultados das análises físico-químicas em amostras de solo das  
Áreas 1 e 2





Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"  
Departamento de Ciência do Solo



### RESULTADO DE ANÁLISE - CETESB P4.231

Interessado: **8505 Jose Ricardo Melges Bortolin**  
Endereço: AV 18 777  
Centro Rio Claro / SP CEP 13500490

Tipo de Análise: **SQ5.1**  
Requisição: **3890/1**  
Data de Emissão: 29/4/2013  
Material analisado: Terra  
Análises concluídas em: 26/4/2013

Amostra	pH	M. O.	P	S	Na	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	PST
AREA 1	6,0	52	47	9	0,3	3,3	36	16	<1	25	54,8	79,8	69	0	0
AREA 2	4,8	16	3	<4	<0,2	2,2	4	3	<1	22	9,5	32,0	30	9	1

Unidades: P e S-SO<sub>4</sub> (mg dm<sup>-3</sup>); Na, K, Ca, Mg, Al, H+Al, SB e CTC (mmolc.dm<sup>-3</sup>); V, m e PST(%).

Métodos:

Fósforo (P) por colorimetria extraído com resina trocadora de íons, pH CaCl<sub>2</sub>, potássio (K) em espectrofotômetro de emissão atômica extraído com resina trocadora de íons, cálcio (Ca) e magnésio (Mg) em espectrofotômetro de absorção atômica extraído com resina trocadora de íons, alumínio trocável (Al) por colorimetria extraído com cloreto de potássio, acidez potencial (H+Al) extraído com tampão SMP, enxofre (S - sulfato) por turbidimetria extraído com fosfato de cálcio, matéria orgânica (MO) por colorimetria (Manual de análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. IAC, 2001). Sódio (Na) em fotômetro de chama extraído com Mehlich 1 (Manual de análises químicas

de solo, planta e fertilizantes. EMBRAPA. 1999).

SB: Soma de bases trocáveis; CTC: Capacidade de troca de cátions; V: Saturação da CTC por bases; m: Saturação por Alumínio;

PST: Ponto de saturação total.

Observações:

Amostra coletada pelo interessado; (#) elemento não determinado;

Este documento pode ser reproduzido somente por completo.

Os resultados deste relatório se referem somente às amostras enviadas ao laboratório.

(<) menor que o Limite de Quantificação (LQ).

  
Luis Antonio Silva Junior  
Signatário Autorizado

## **Anexo II**

Resultados das análises físico-químicas em amostras de vinhaça



**RESUMO DOS RESULTADOS DA AMOSTRA N° 7025/2013-0**  
Processo Comercial N° 600/2013-1

**DADOS REFERENTES AO CLIENTE**

<b>Empresa solicitante:</b>	José Granelli & Filhos Ltda
<b>Endereço:</b>	Fazenda São Benedito, s/n - - Paraisolândia - Charqucada - SP - CEP: 13.515-000 .
<b>Nome do Solicitante:</b>	Aline Granelli

**DADOS REFERENTES A AMOSTRA**

<b>Identificação do Cliente:</b>	Vinhaça		
<b>Amostra Rotulada como:</b>	Vinhaça		
<b>Coletor:</b>	Thiago	<b>Data da coleta:</b>	10/01/2013 16:20:00
<b>Data da entrada no laboratório:</b>	11/01/2013 17:16	<b>Data de Elaboração do BA:</b>	18/01/2013

**RESULTADOS PARA A AMOSTRA**

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
pH (a 25°C)	---	0 - 14	3,37
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	25	3960
Dureza Calculada	mg/L	30	1148
Condutividade	µS/cm	1	1769
Nitrato (como N)	mg/L	10	< 10
Nitrito (como N)	mg/L	2	< 2
Nitrogênio Amomiacal	mg/L	0,1	2,1
Nitrogênio Total Kjeldahl	mg/L	10	144
Sódio	mg/L	5	14,5
Cálcio	mg/L	5	287
Potássio	mg/L	5	739
Magnésio	mg/L	5	105
Sulfato	mg/L	50	188
Fósforo Total	µg/L	100	164022
DBO	mg/L	5450	22436
DQO	mg/L	10000	64310

**Notas**

LQ = Limite de Quantificação

**Abrangência**

Os resultados referem-se somente à(s) amostra(s) analisada(s)

Este Resumo de Resultados só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.

**Dados de Origem**

Resumo dos resultados da amostra n° 7025/2013-0 preparado com os dados dos relatórios de ensaio: 7025/2013-0 - Piracicaba anexados a este documento.

Chave de Validação: f00265dd8dc6e6821de1fb4c5e94944

 Milena Fulqueto Controle de Qualidade CRBio 46737101 D - 1ª Região	 Valéria D. Cyrillo Coordenadora do Controle de Qualidade CRQ 0455607 - 4ª Região
--	--



**RELATÓRIO DE ENSAIO N° 7025/2013-0 - Complemento**  
**Processo Comercial N° 600/2013-1**

**DADOS REFERENTES AO CLIENTE**

<b>Empresa solicitante:</b>	José Granelli & Filhos Ltda
<b>Endereço:</b>	Fazenda São Benedito, s/n - - Paraisolândia - Charqueada - SP - CEP: 13.515-000 .
<b>Nome do Solicitante:</b>	Aline Granelli

**DADOS REFERENTES A AMOSTRA**

<b>Identificação do Cliente:</b>	Vinhaça		
<b>Amostra Rotulada como:</b>	Vinhaça		
<b>Coletor:</b>	Thiago	<b>Data da coleta:</b>	10/01/2013 16:20:00
<b>Data da entrada no laboratório:</b>	11/01/2013 17:16	<b>Data de Elaboração do BA:</b>	18/01/2013

**RESULTADOS PARA A AMOSTRA**

Parâmetros	CAS	Unidade	LQ	Resultados analíticos	Data do Ensaio
Fósforo Total	14596-37-3	µg/L	100	164022	12/01/2013 06:44

**Notas**

LQ = Limite de Quantificação.

**Abrangência**

O(s) resultado(s) referem-se somente à(s) amostra(s) analisada(s).

Este Relatório de Ensaio só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.

**Plano de Amostragem**

Local da Coleta:

Tipo de Amostragem:

Ocorrência de chuvas nas últimas 24h: Sim

Outras informações:

**Referências Metodológicas**

Análises foram realizadas conforme a última versão do Standard Methods

Metais (ICP-OES): POP PA 035 / SMWW 3120 B, USEPA 6010 C

**Revisores**

Rogério Caldorin

Chave de Validação: f00265dd86dc6e821de1fb4c5e949d4

  
 Milena Folquetto  
 Controle de Qualidade  
 CRBio 46737101 D - 1ª Região

  
 Valéria D. Castilho  
 Coordenadora do Controle de Qualidade  
 CRQ 04456607 - 4ª Região

**RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 7025/2013-0 - Piracicaba**  
 Processo Comercial Nº 600/2013-1

**DADOS REFERENTES AO CLIENTE**

<b>Empresa solicitante:</b>	José Granelli & Filhos Ltda
<b>Endereço:</b>	Fazenda São Benedito, s/n - - Paraisolândia - Charqueada - SP - CEP: 13.515-000 .
<b>Nome do Solicitante:</b>	Aline Granelli

**DADOS REFERENTES A AMOSTRA**

<b>Identificação do Cliente:</b>	Vinhaça		
<b>Amostra Rotulada como:</b>	Vinhaça		
<b>Coletor:</b>	Thiago	<b>Data da coleta:</b>	10/01/2013 16:20:00
<b>Data da entrada no laboratório:</b>	11/01/2013 17:16	<b>Data de Elaboração do BA:</b>	18/01/2013

**RESULTADOS PARA A AMOSTRA**

Parâmetros	CAS	Unidade	LQ	Resultados analíticos	Data do Ensaio
pH (a 25°C)	---	---	0 - 14	3,37	11/01/2013 16:20
Sólidos Suspensos Totais	---	mg/L	25	3960	15/01/2013 16:31
Dureza Calculada	---	mg/L	30	1148	12/01/2013 06:44
Condutividade	---	µS/cm	1	1769	11/01/2013 16:20
Nitrito (como N)	14797-55-8	mg/L	10	< 10	11/01/2013 19:00
Nitrato (como N)	14797-65-0	mg/L	2	< 2	11/01/2013 19:00
Nitrogênio Amoniacal	7664-41-7	mg/L	0,1	2,1	12/01/2013 16:41
Nitrogênio Total Kjeldahl	---	mg/L	10	144	15/01/2013 08:46
Sódio	7440-23-5	mg/L	5	14,5	12/01/2013 06:44
Cálcio	7440-70-2	mg/L	5	287	12/01/2013 06:44
Potássio	7440-09-7	mg/L	5	739	12/01/2013 06:44
Magnésio	7439-95-4	mg/L	5	105	12/01/2013 06:44
Sulfato	14808-79-8	mg/L	50	188	14/01/2013 07:35
DBO	---	mg/L	5450	22436	11/01/2013 19:00
DQO	---	mg/L	10000	64310	12/01/2013 10:00

**CONTROLE DE Q QUALIDADE DO LABORATÓRIO**
**Controle de Q qualidade - Metais Totais - Água**

7477/2013-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água	Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
	Cálcio	µg/L	500	< 500
	Potássio	µg/L	500	< 500
	Magnésio	µg/L	500	< 500
	Sódio	µg/L	500	< 500
	Fósforo Total	µg/L	10	< 10

**Ensaio de Recuperação**

Parâmetros	Q quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
<b>7478/2013-0 - Amostra Controle - Metais Totais - Água</b>				
Arsênio	0,1	mg/L	103	80 - 120
Cromo	0,1	mg/L	102	80 - 120
Cobalto	0,1	mg/L	109	80 - 120
Lítio	0,1	mg/L	101	80 - 120
Manganês	0,1	mg/L	110	80 - 120
Estrôncio	0,1	mg/L	103	80 - 120
<b>Surrogates</b>				
<b>7477/2013-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água</b>				
Írio (Metais Totais)	100	%	99	70 - 130
<b>7478/2013-0 - Amostra Controle - Metais Totais - Água</b>				
Írio (Metais Totais)	100	%	101	70 - 130
<b>7025/2013-0 - Vinhaça</b>				
Írio (Metais Totais)	100	%	118	70 - 130

**Notas**

LQ = Limite de Quantificação.

**Abstração**

O(s) resultado(s) referem-se somente à(s) amostra(s) analisada(s).

Este Relatório de Ensaio só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.

**Plano de Amostragem**

Local da Coleta:

Tipo de Amostragem:

Ocorrência de chuva nas últimas 24h: Sim

Outras informações:

**Responsabilidade Técnica**

Os ensaios foram realizados na unidade da Bioagri Ambiental Ltda. - Matriz, situada na Rua Ajuvivil Martini, 177/201, Bairro Dois Córregos, Cep. 14420-833, Piracicaba/SP, registrada no CRQ 4ª Região sob nº 16082-F e responsabilidade técnica do profissional José Carlos Moretti, CRQ nº 04107238, 4ª Região.

**Declaração da Incerteza de Medição**

Nos arquivos da Unidade da Garantia da Qualidade constam a incerteza expandida (U), que é baseada na incerteza padrão combinada, com um nível de confiança de 95% (k=2), que será disponibilizada sempre que solicitado pelo cliente.

**Referências Metodológicas**

Análises foram realizadas conforme a última versão do Standard Methods

Condutividade: POP PA 014 / SMWW 2510 B

Nitrogênio Total Kjeldahl: POP PA 007 / SMWW 4500 Norg C, NH3 E

DBO: POP PA 001 / SMWW 5210 B

DQO: POP PA 002 / SMWW 5220 D

pH: POP PA 011 / SMWW 4500 - H+ B

Ânions: POP PA 032 / USEPA 300 e 300.1

Nitrogênio Amônio: POP PA 005 / SMWW 4500 NH3 E

Metais (ICP-OES): POP PA 035 / SMWW 3120 B, USEPA 6010 C

Sólidos Suspensos: POP 009 / SMWW 2540 D e E

**Revisores**

Rogério Calderin

Sérgio Stenico Junior

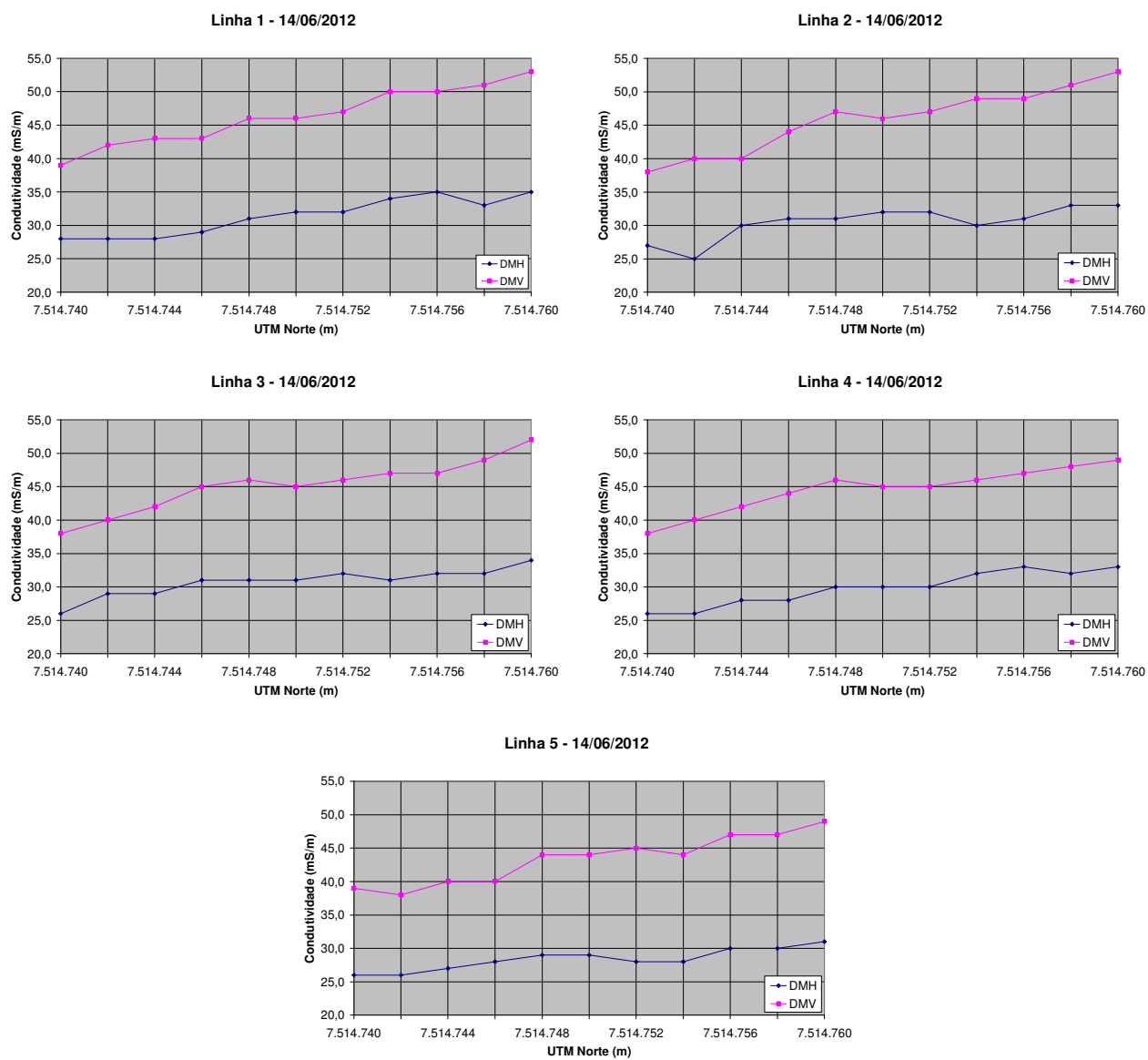
Chave de Validação: f00265d88de6e821de1fb4e949d4

  
 Milena Falquetto  
 Controle de Qualidade  
 CRBio 46737101 D - 1ª Região

  
 Valéria D. Castilho  
 Coordenadora do Controle de Qualidade  
 CRQ 04456607 - 4ª Região

## **Apêndice A**

Resultados de ensaios geofísicos pré-infiltração da Área 1

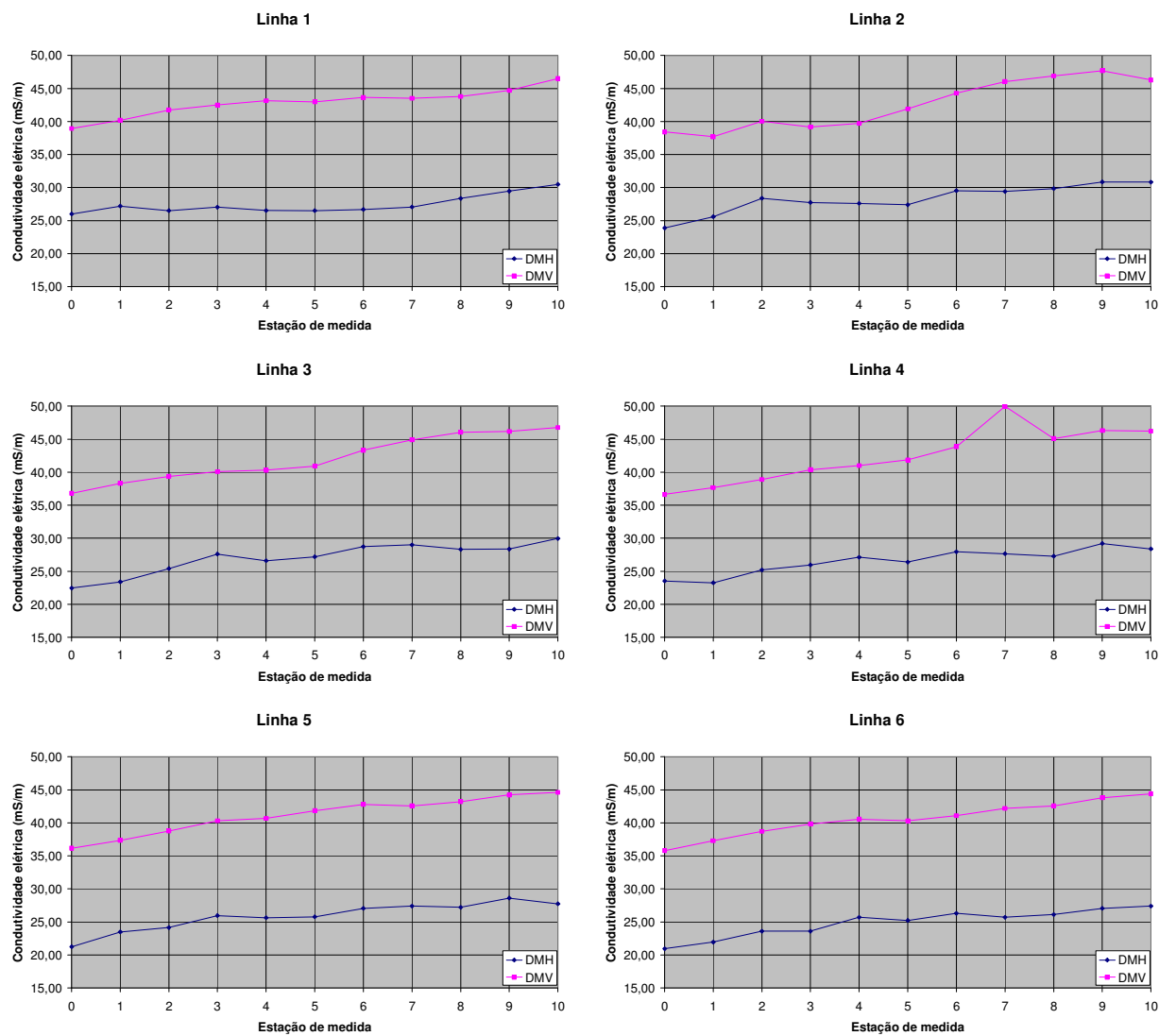


**Figura A.1:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM pré-infiltração executados na Área 1.

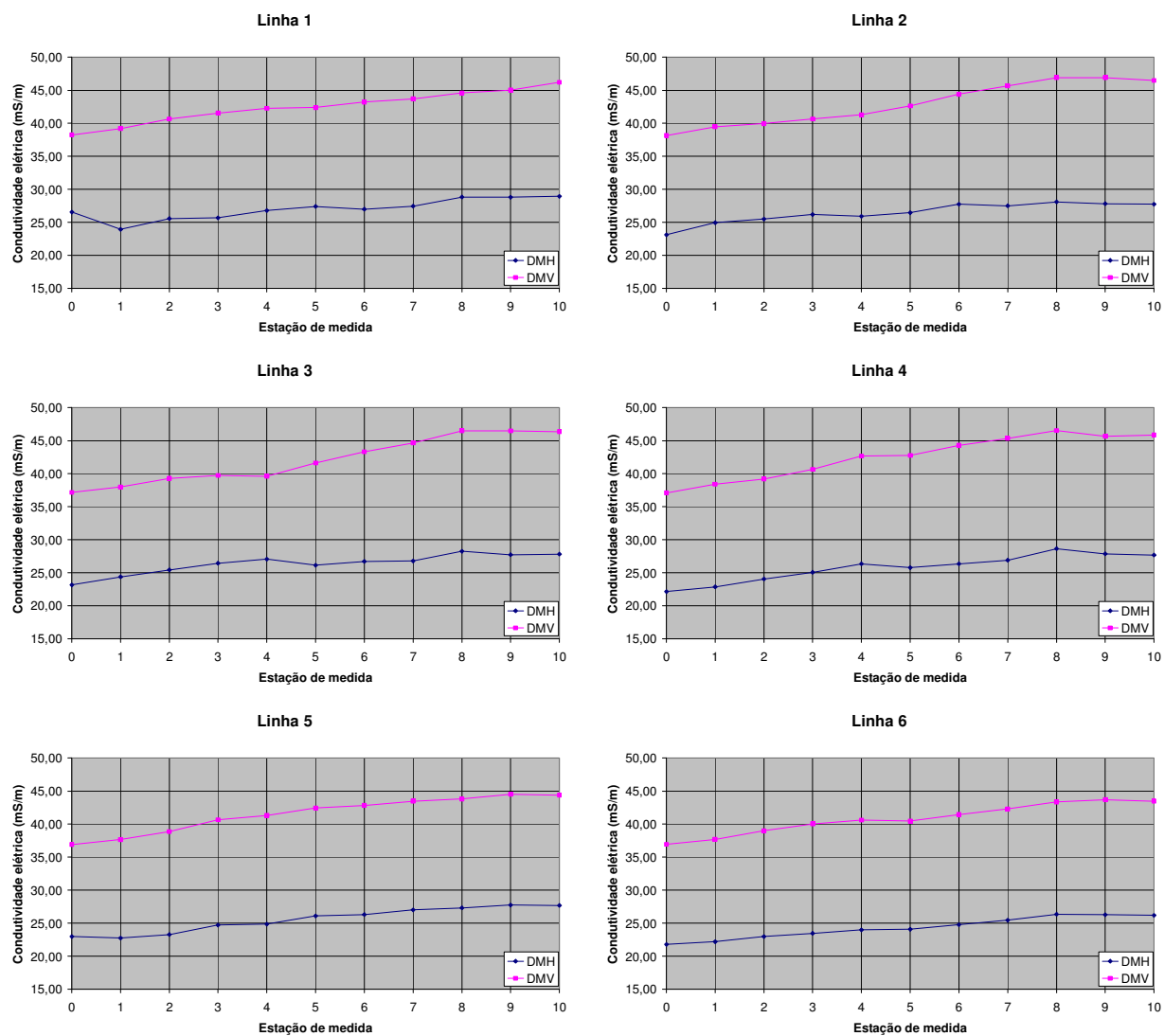


## **Apêndice B**

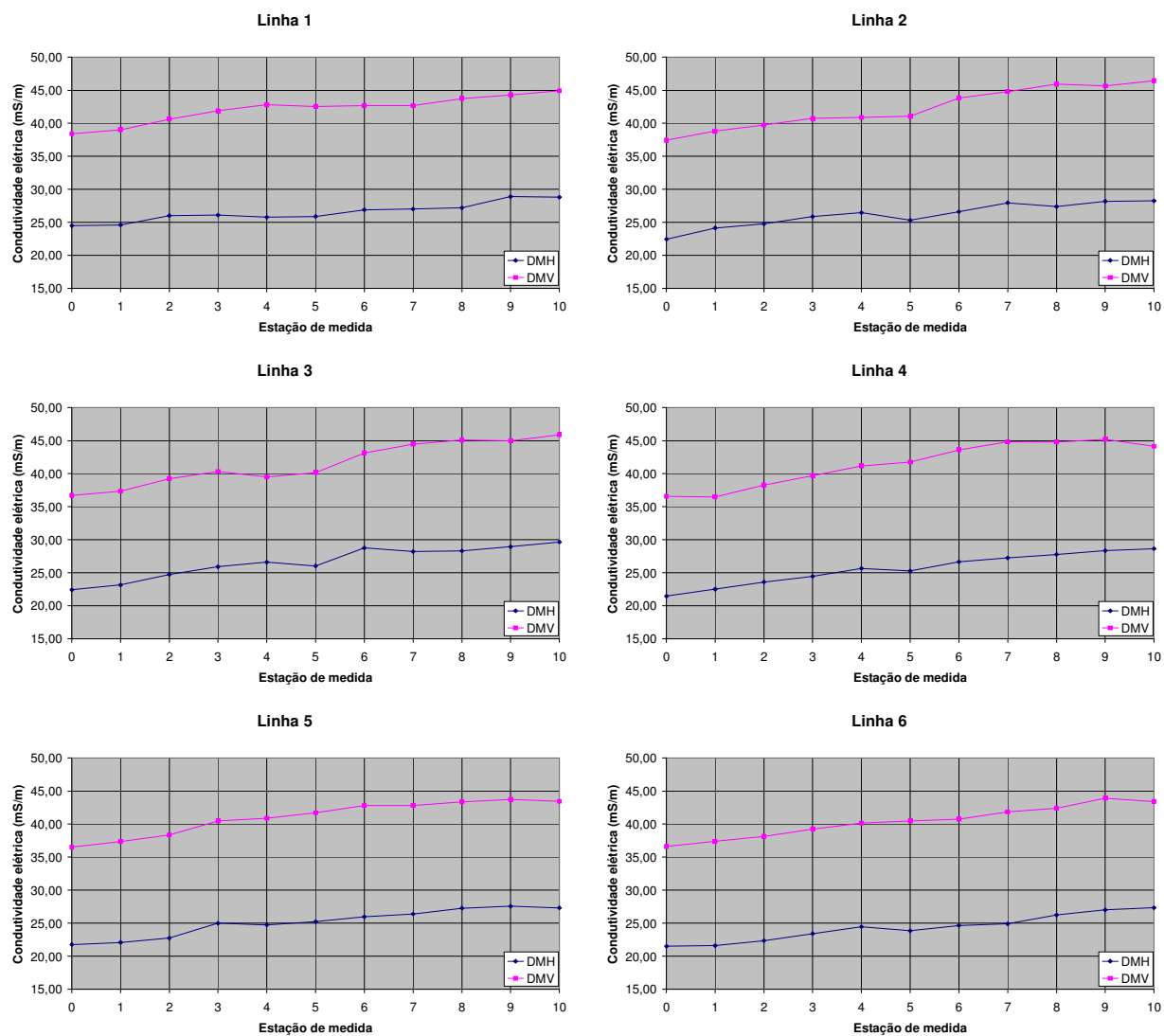
Resultados de ensaios geofísicos pós-infiltração da Área 1



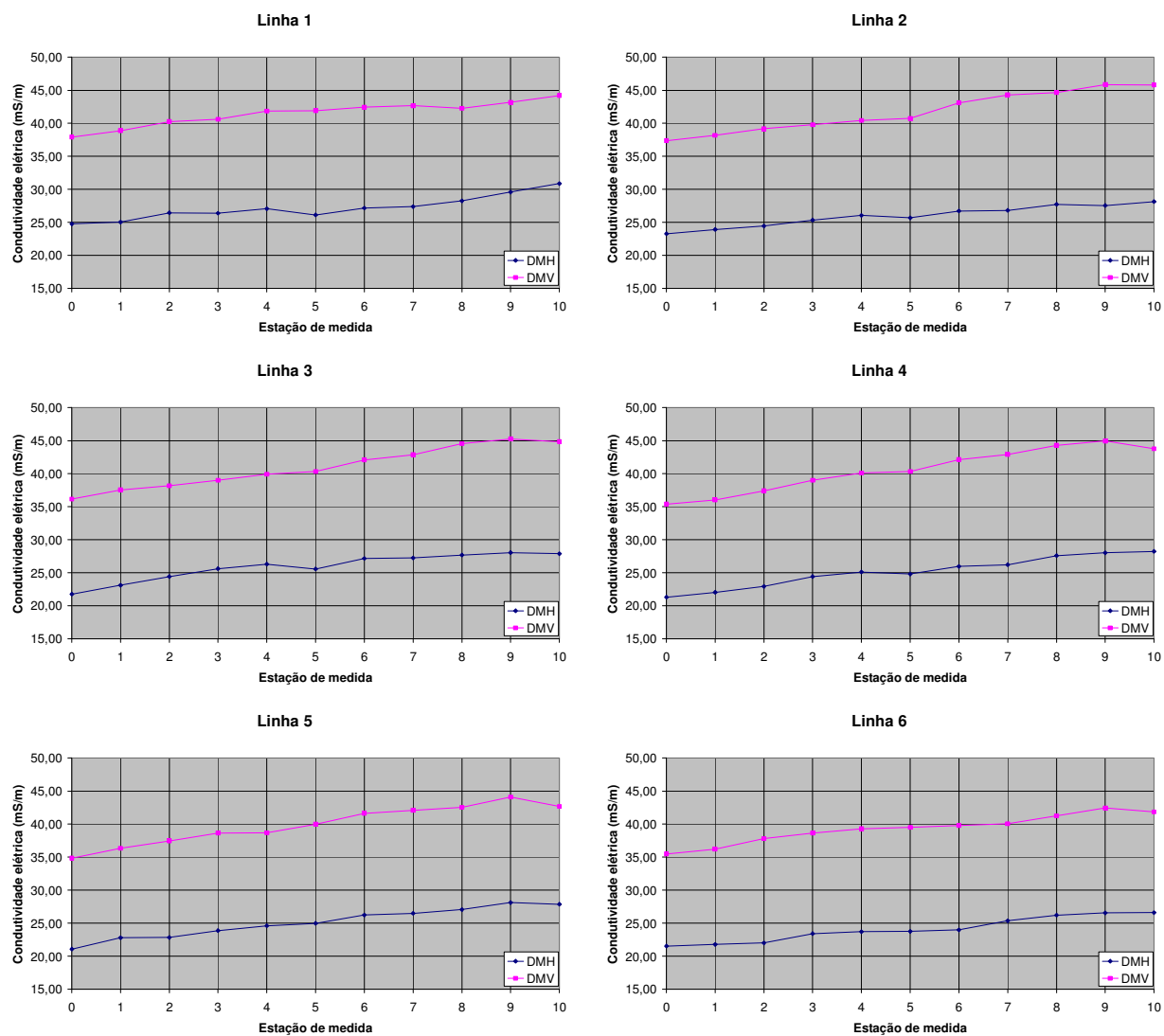
**Figura B.1:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 1 dia após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B



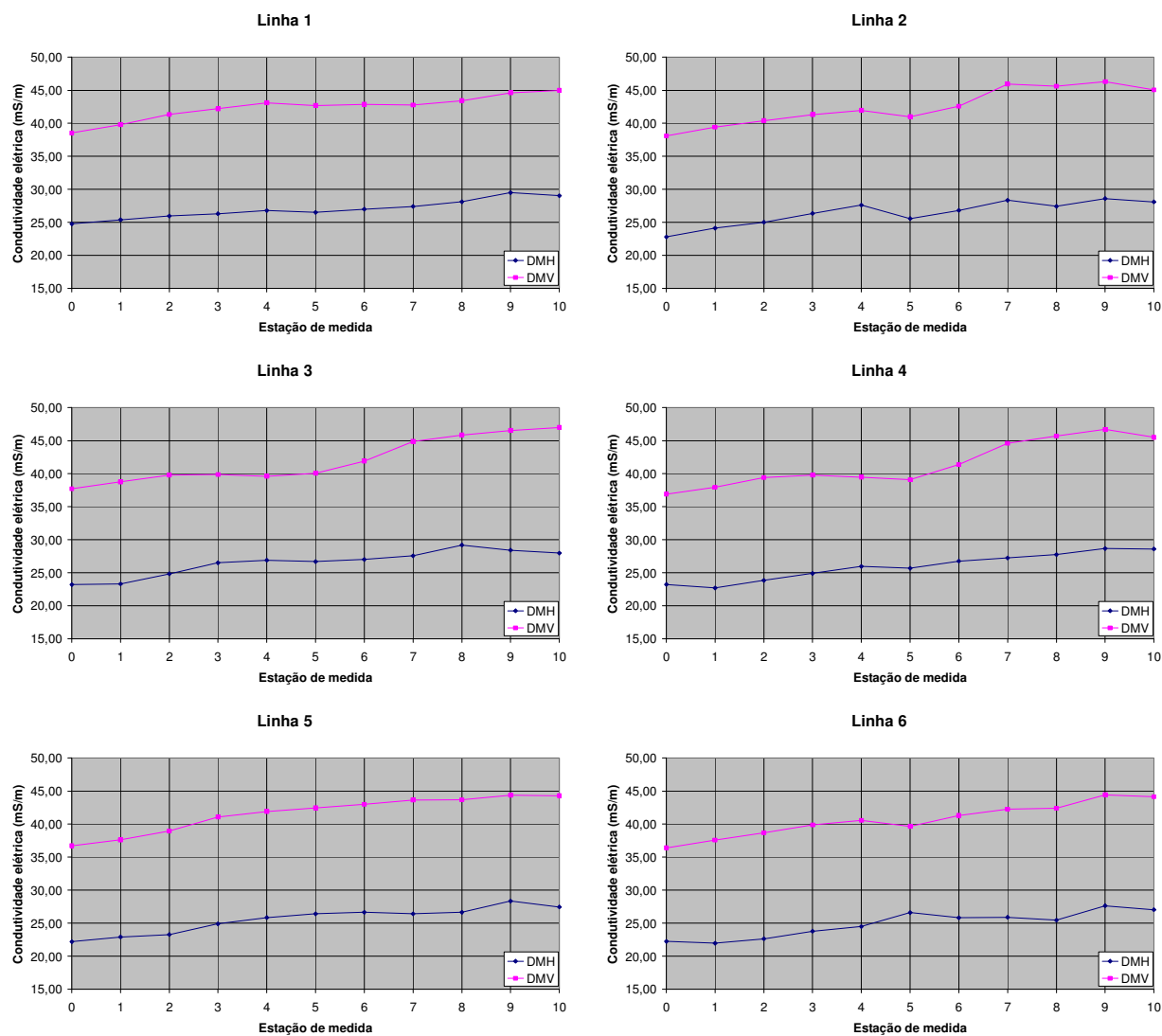
**Figura B.2:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 8 dias após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B



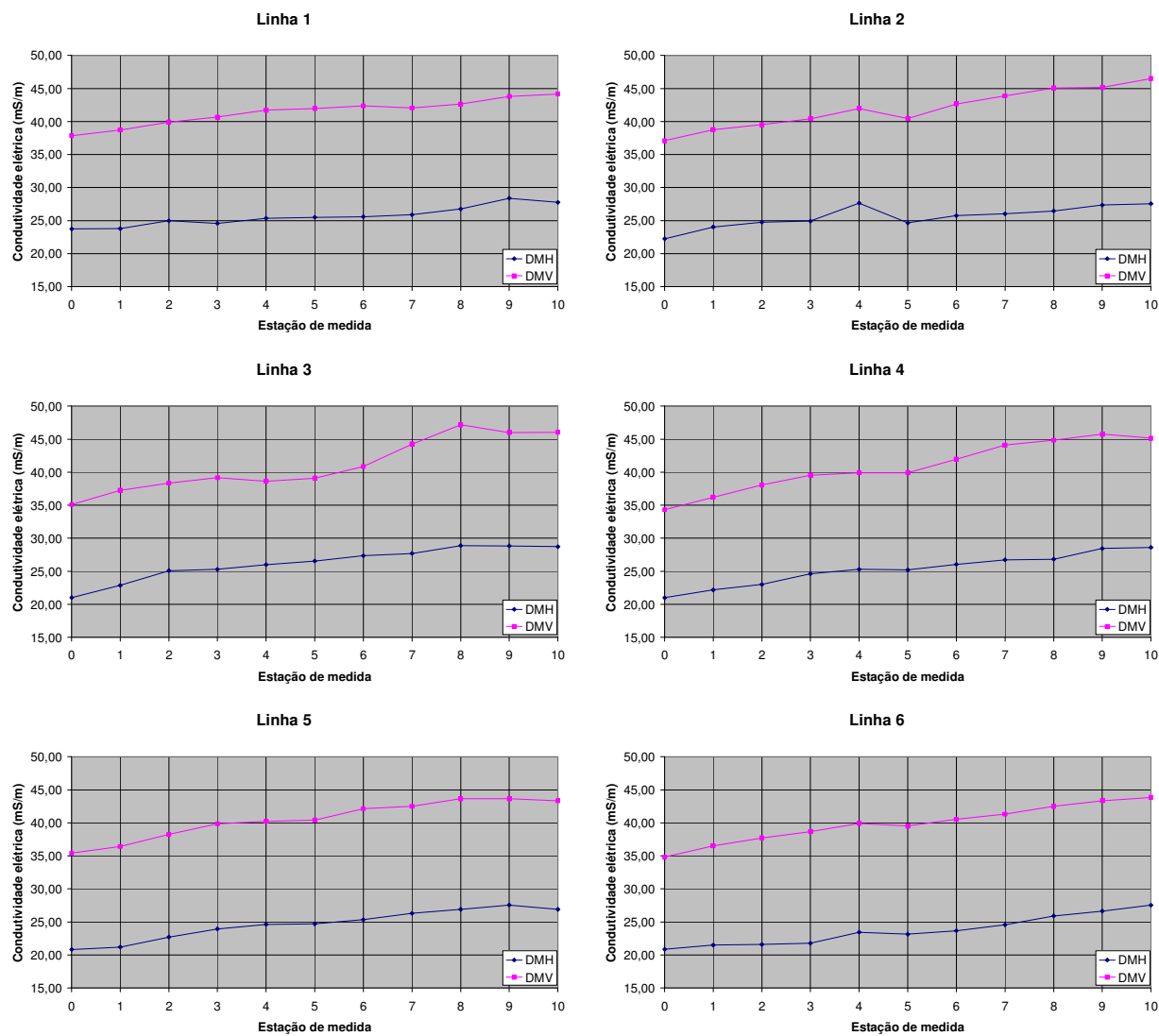
**Figura B.3:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 15 dias após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B



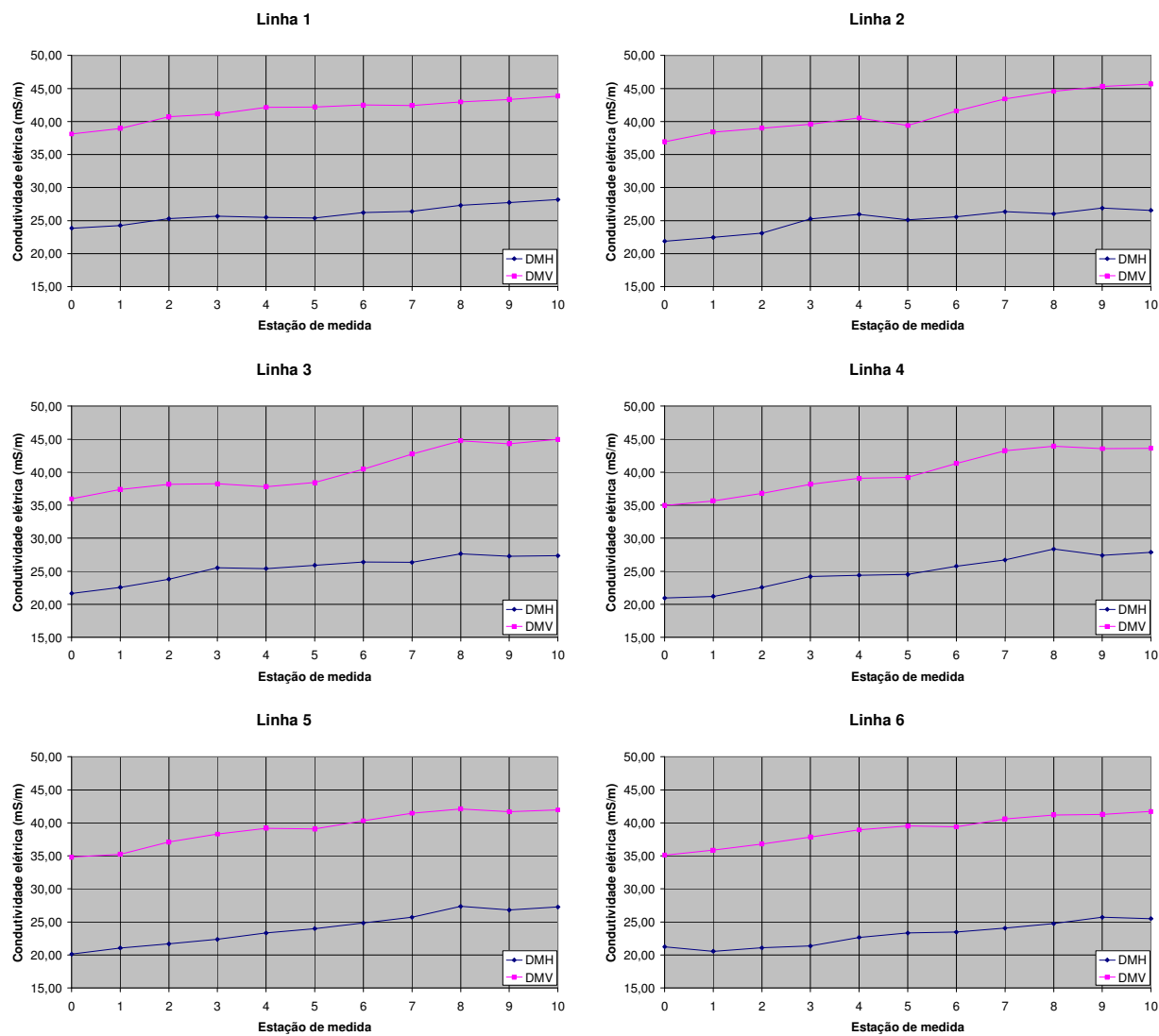
**Figura B.4:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 22 dias após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B



**Figura B.5:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 1 dia após a infiltração de 900 litros na vala B

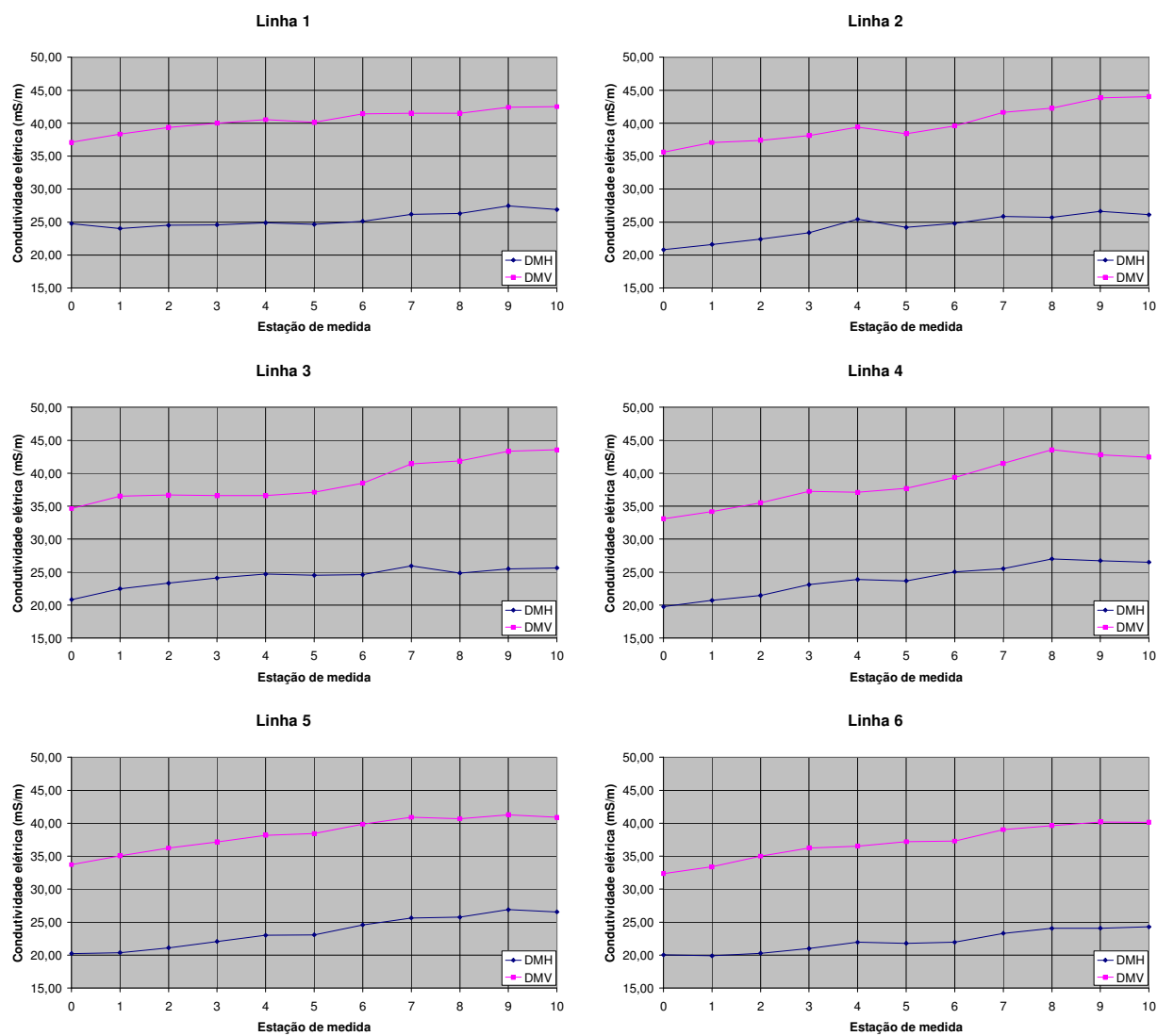


**Figura B.6:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 8 dias após a infiltração de 900 litros na vala B



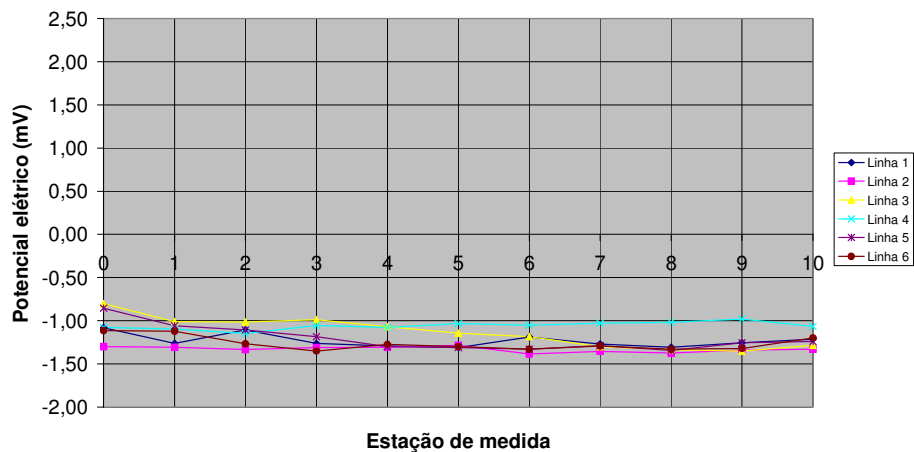
**Figura B.7:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 15 dias após a infiltração de 900 litros na vala B



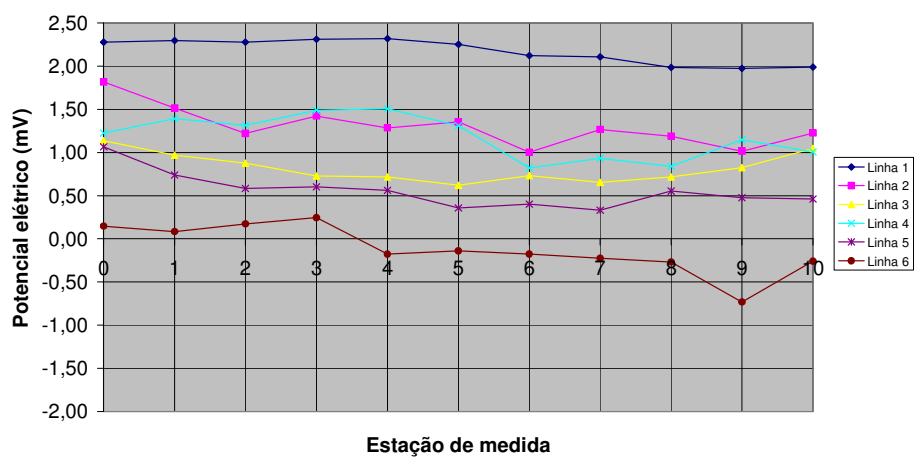


**Figura B.8:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 22 dias após a infiltração de 900 litros na vala B

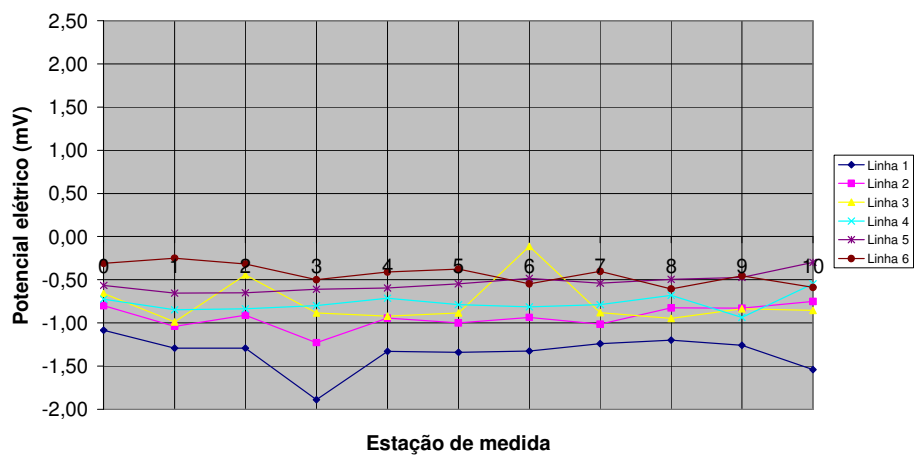
a) 8 dias após a infiltração



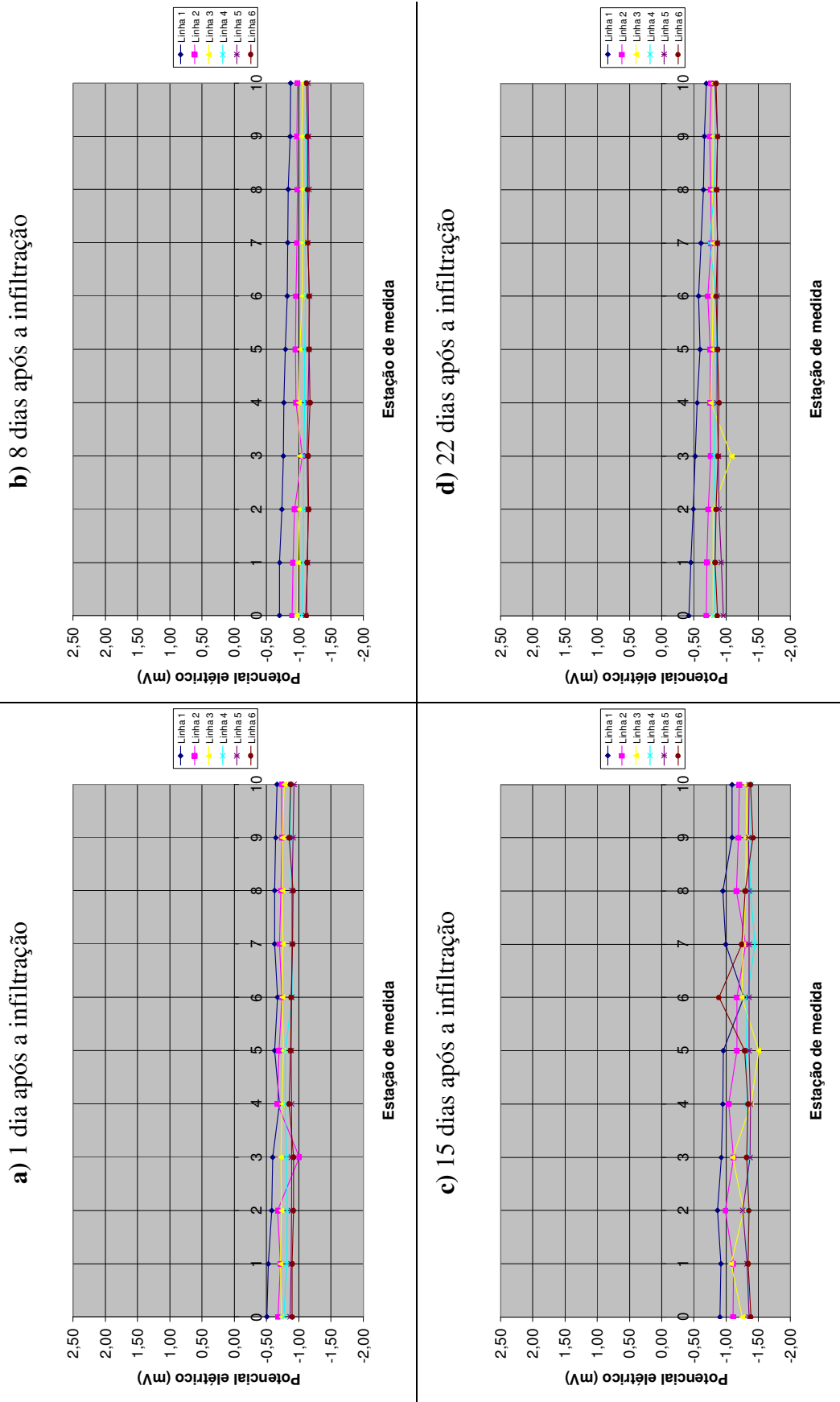
b) 15 dias após a infiltração



c) 23 dias após a infiltração



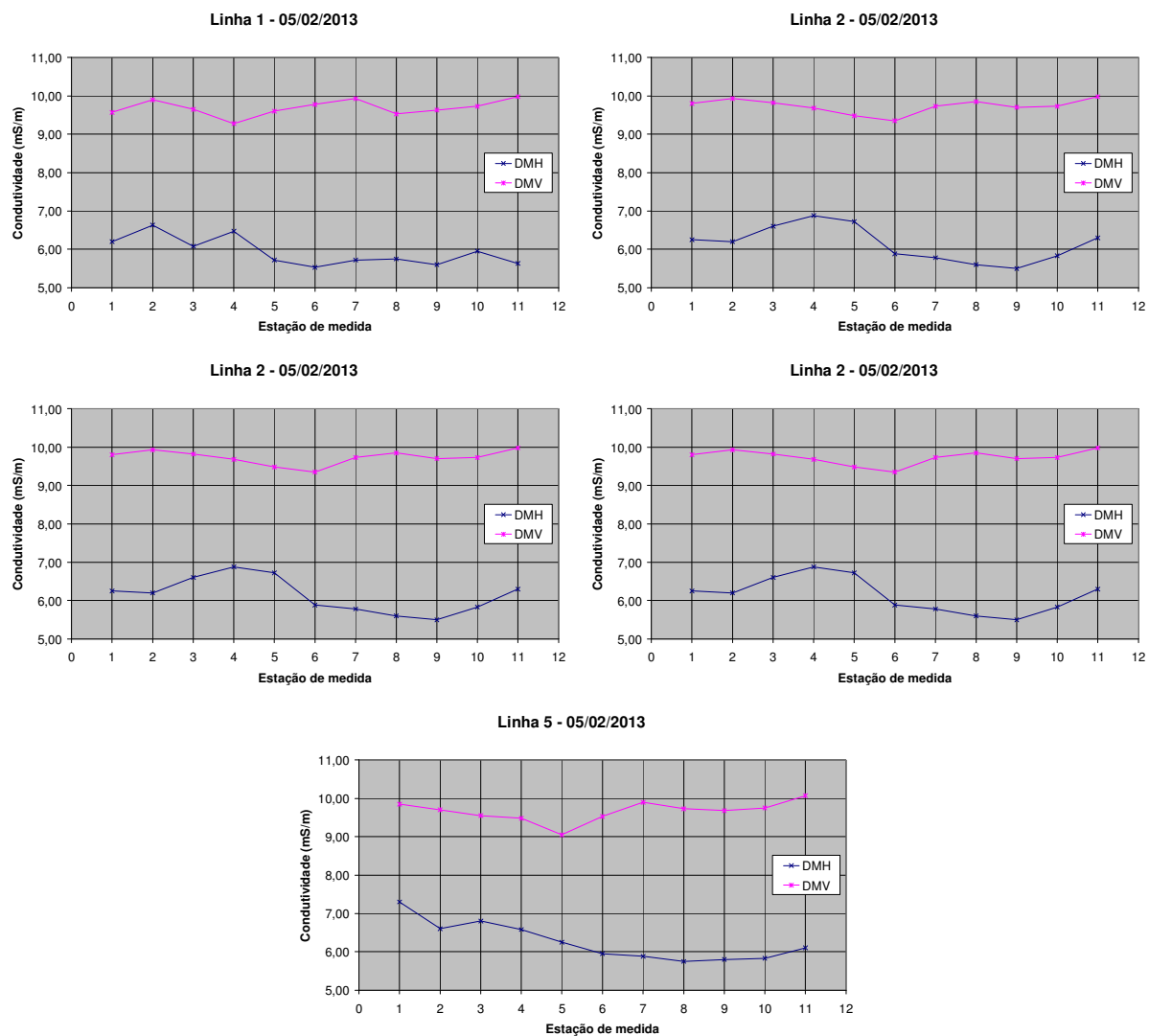
**Figura B.9:** Curvas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.



**Figura B.10:** Curvas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 900 litros na vala B.

## **Apêndice C**

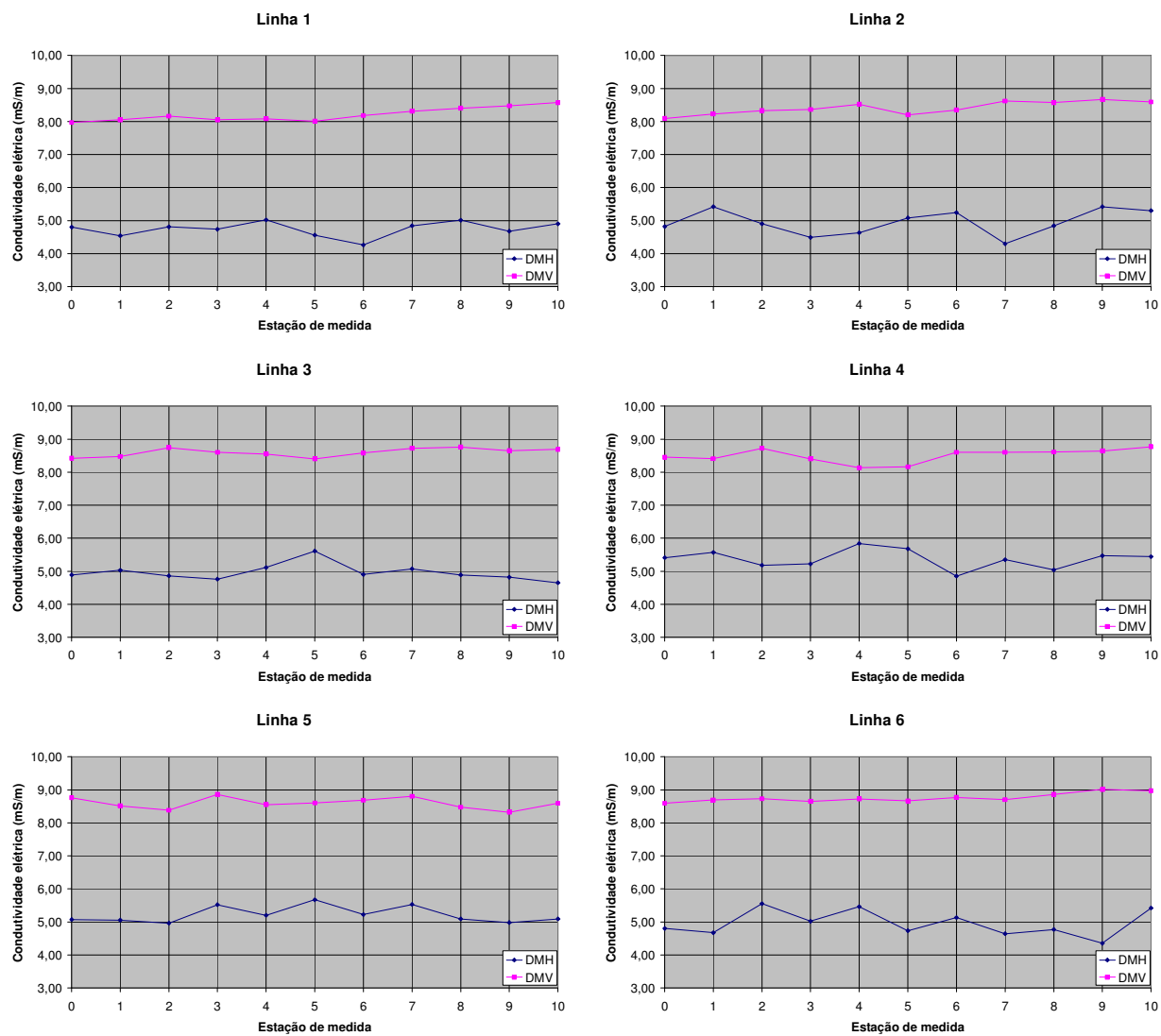
Resultados de ensaios geofísicos pré-infiltração da Área 2



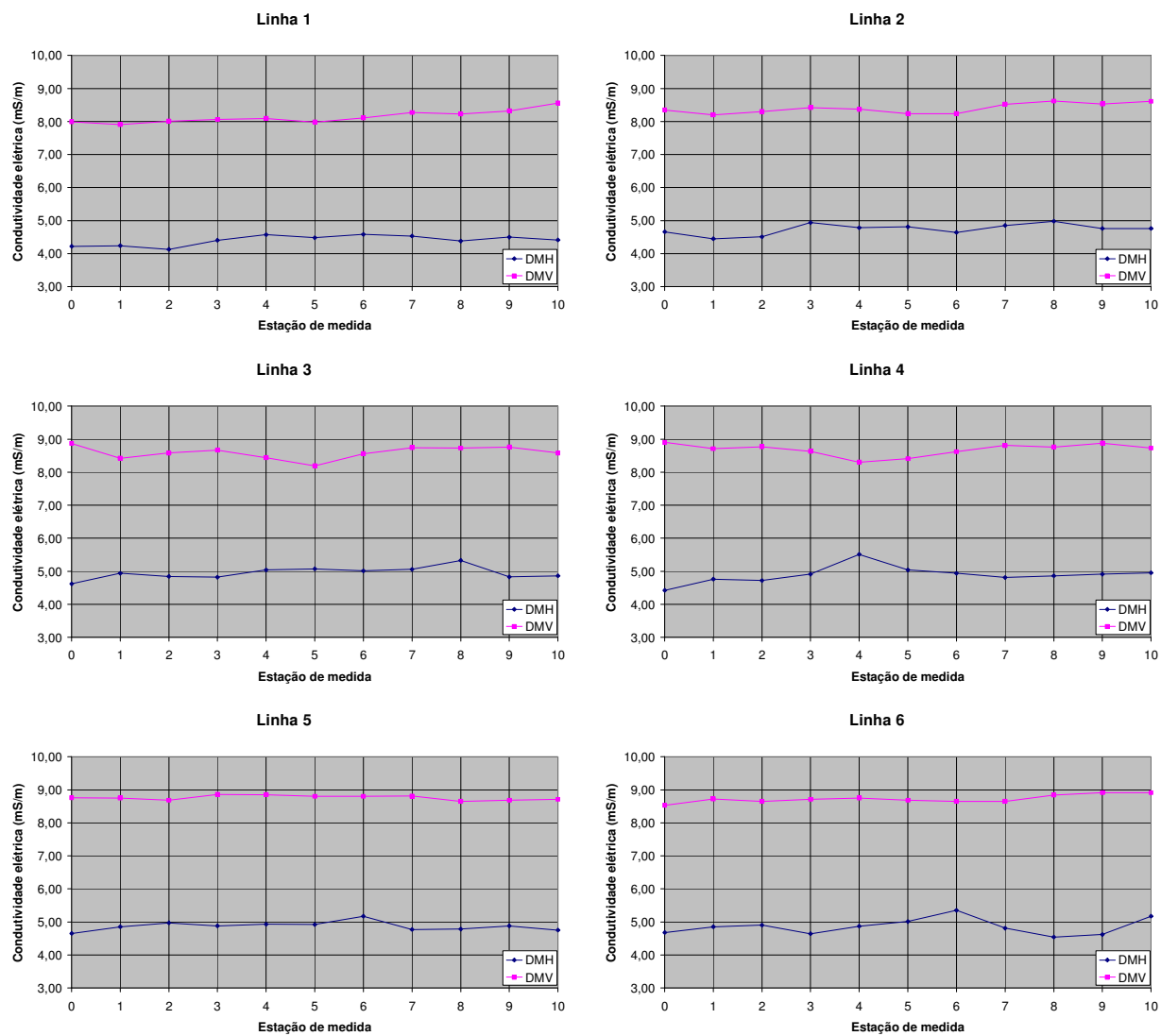
**Figura C.1:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM pré-infiltração executados na Área 2.

## **Apêndice D**

Resultados de ensaios geofísicos pós-infiltração da Área 2

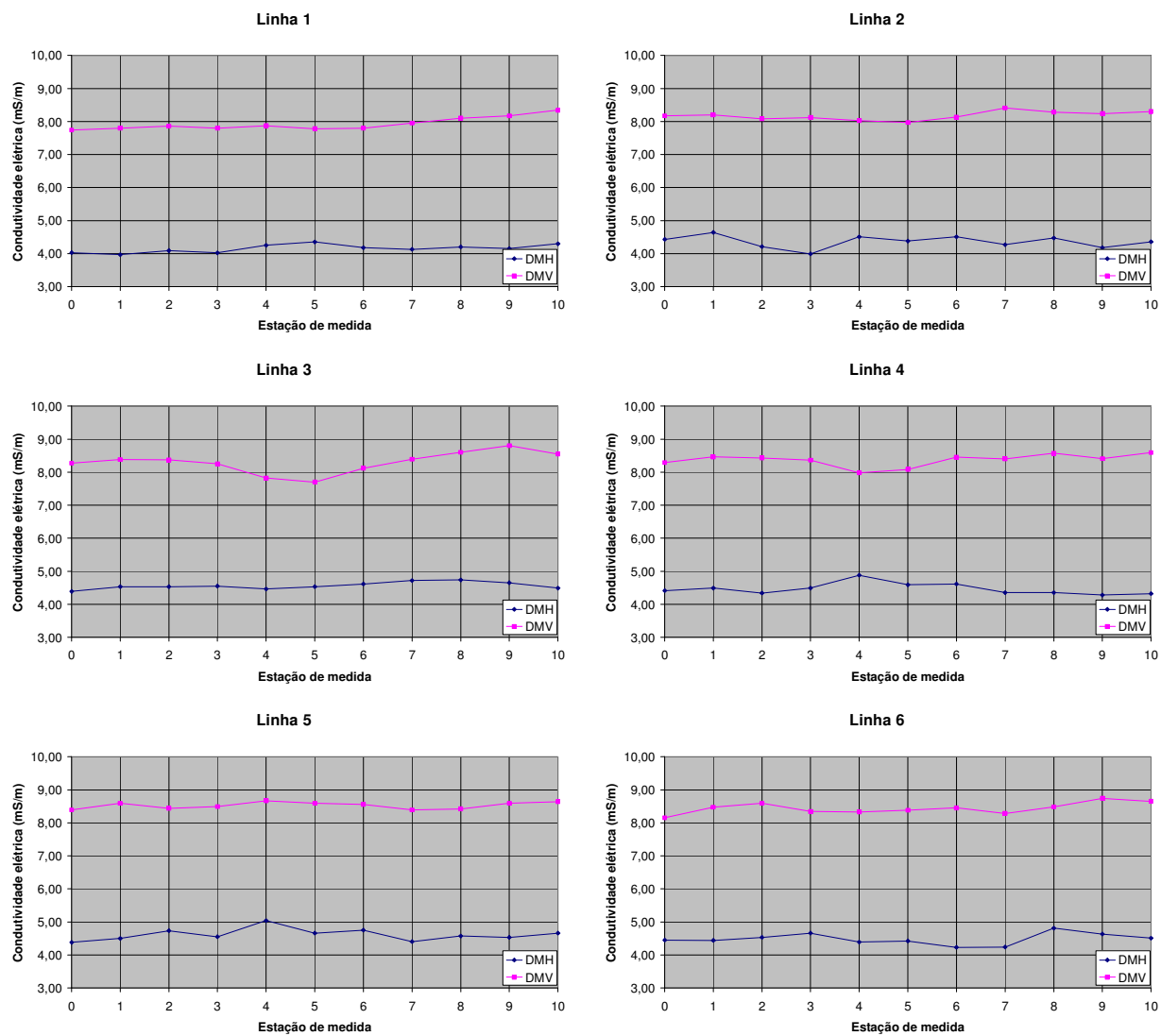


**Figura D.1:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 1 dia após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B

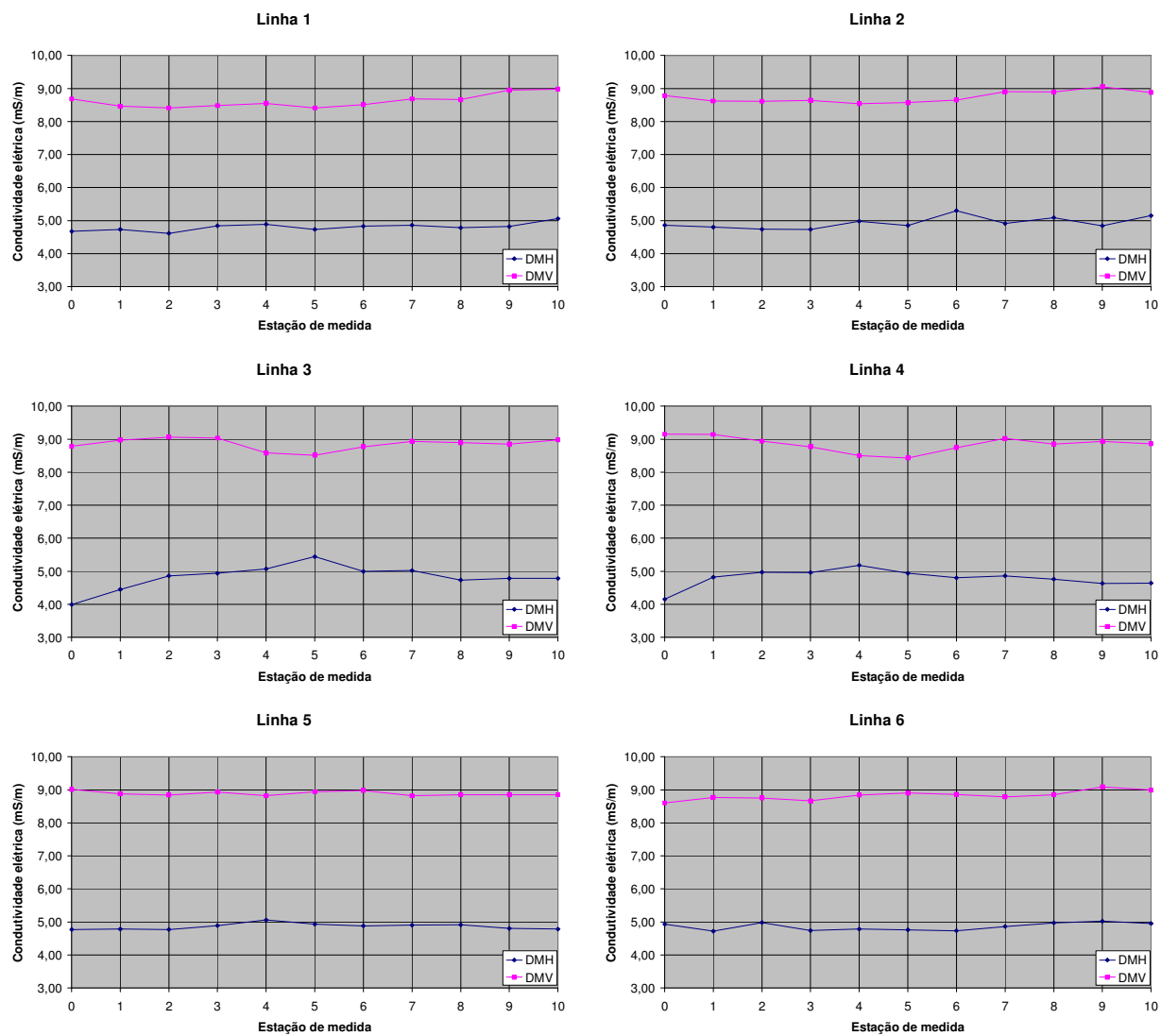


**Figura D.2:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 3 dias após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B

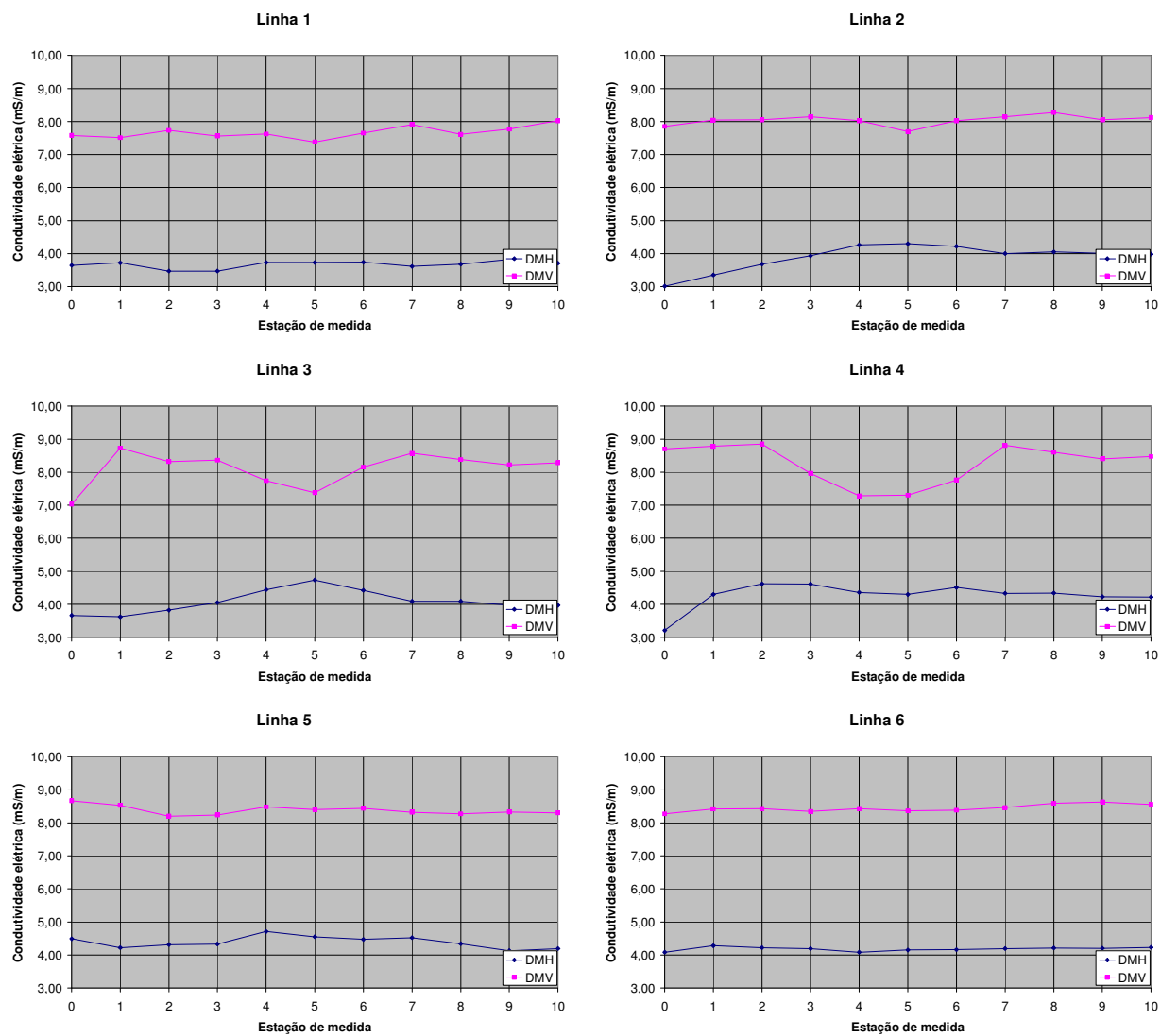




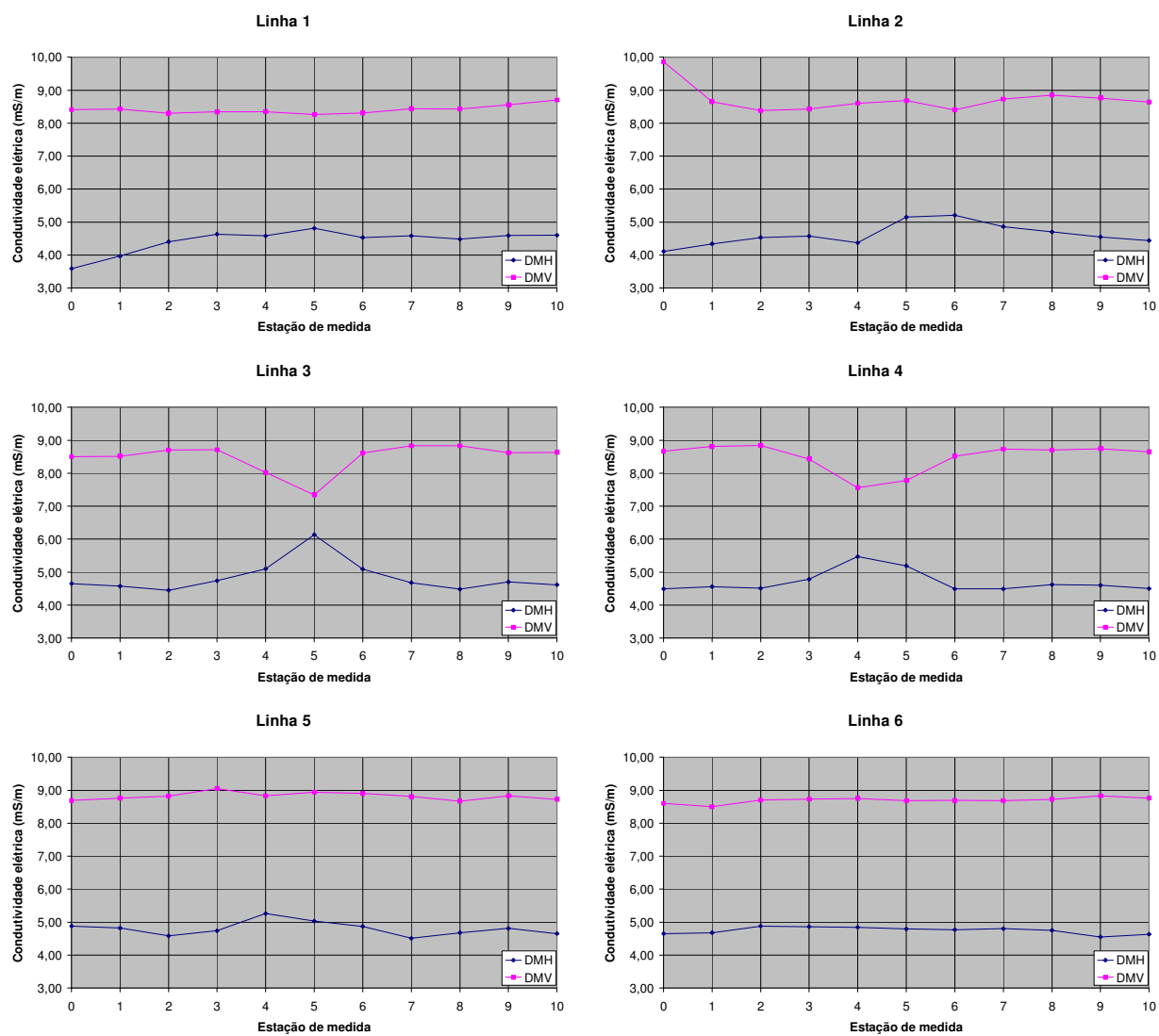
**Figura D.3:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 8 dias após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B



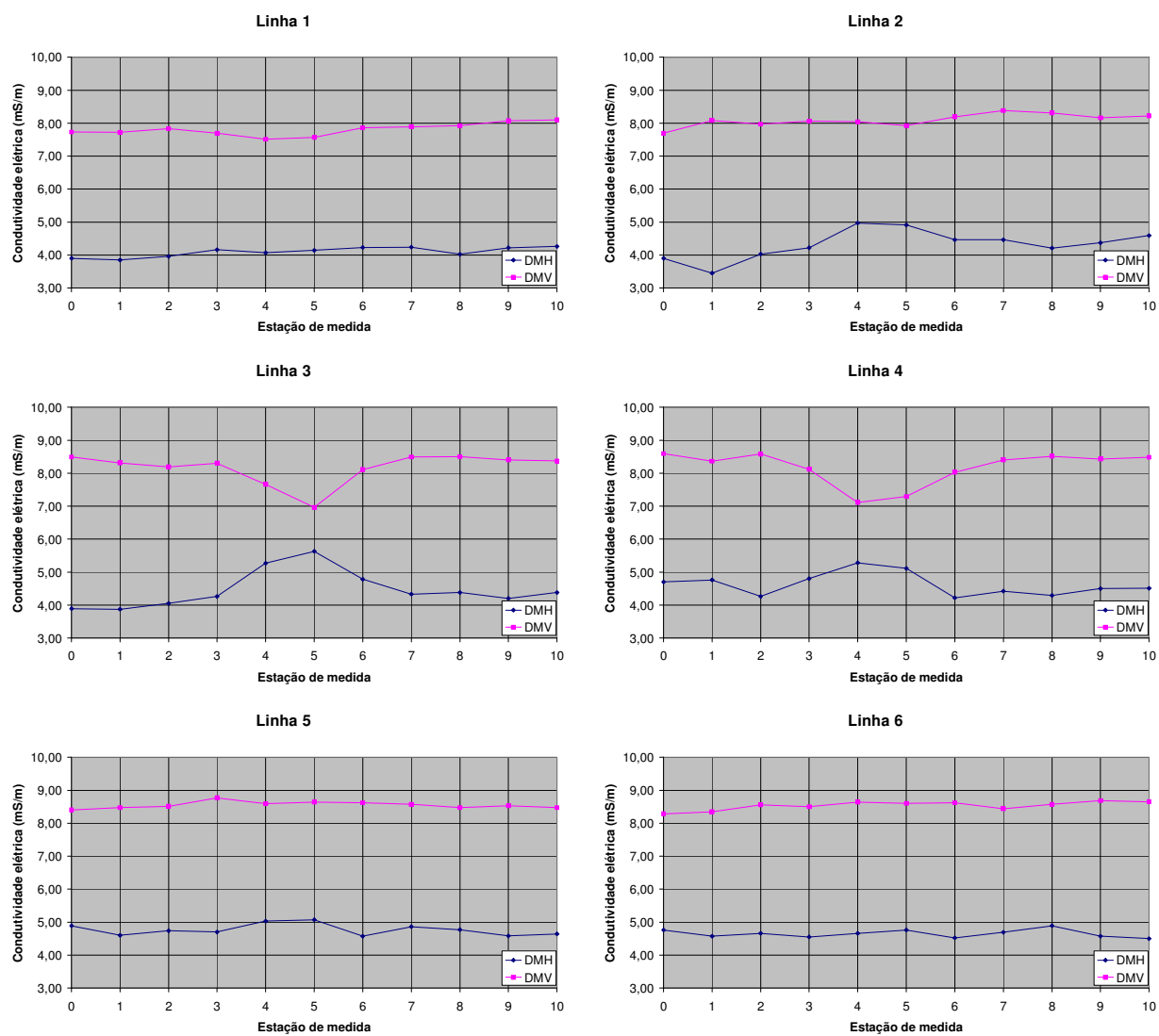
**Figura D.4:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 10 dia após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B



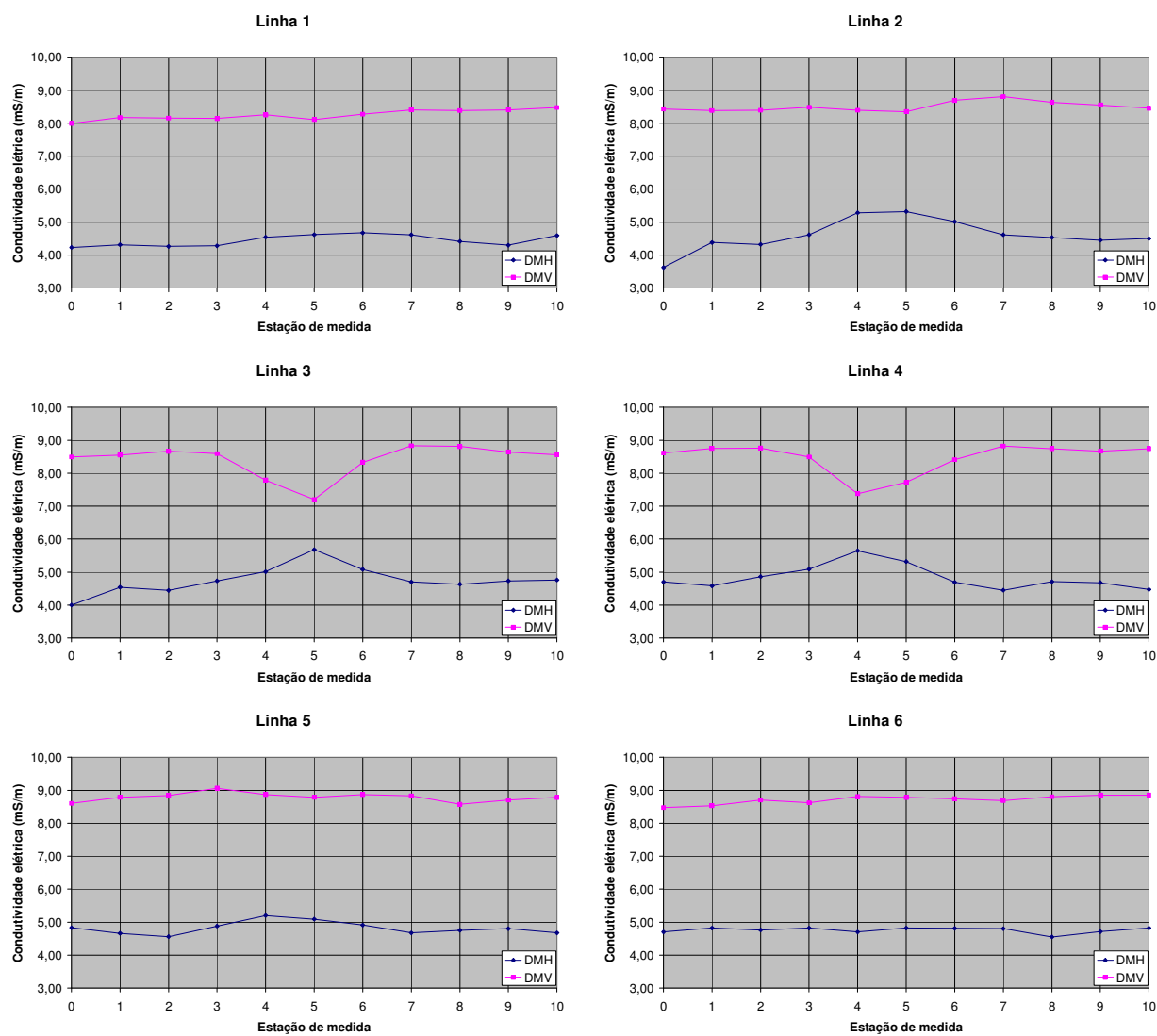
**Figura D.5:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 1 dia após a infiltração de 900 litros na vala B



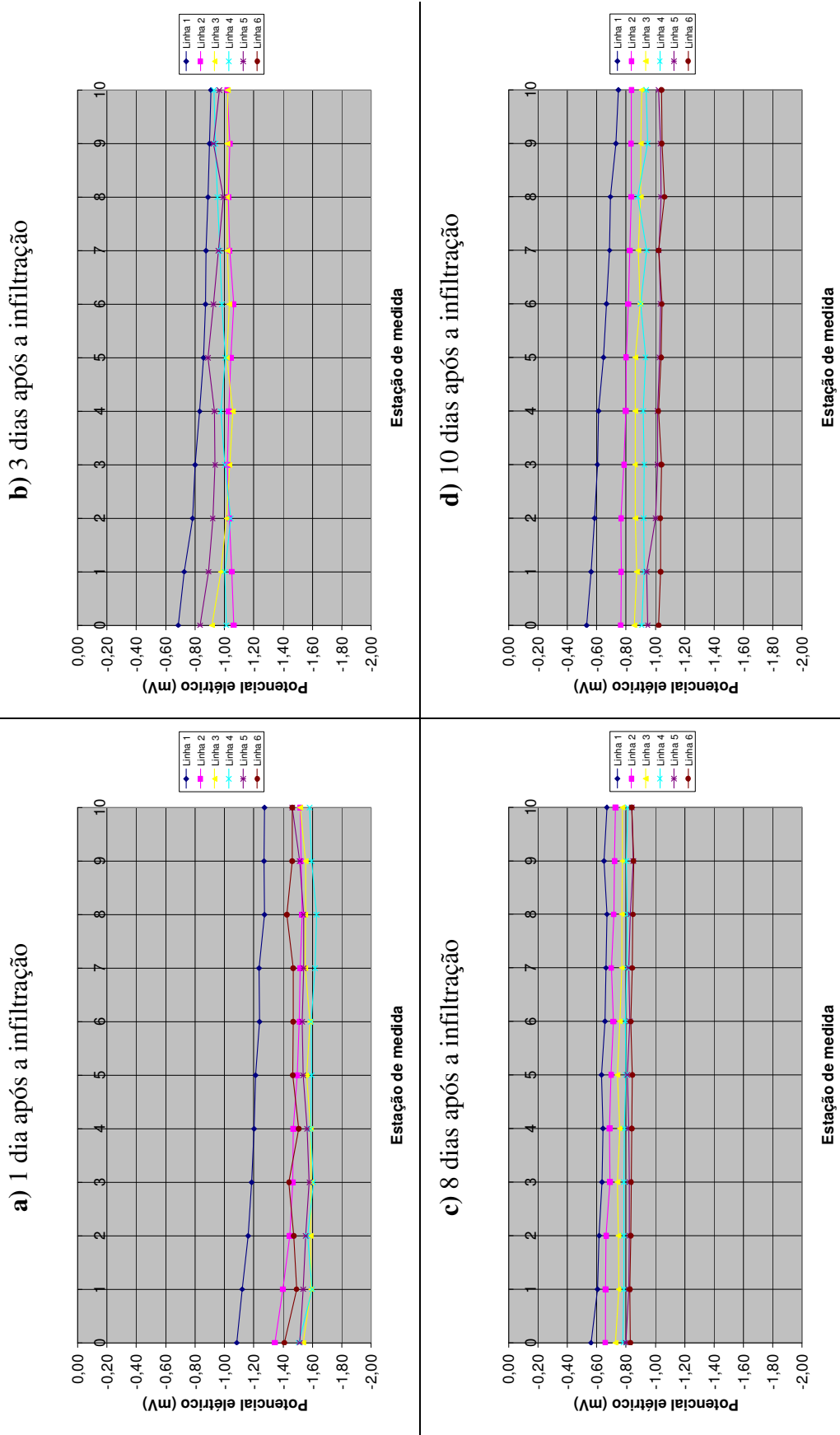
**Figura D.6:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 3 dias após a infiltração de 900 litros na vala B



**Figura D.7:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 6 dias após a infiltração de 900 litros na vala B



**Figura D.8:** Curvas de condutividade elétrica dos IEM executados 8 dias após a infiltração de 900 litros na vala B



**Figura D.9:** Curvas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.

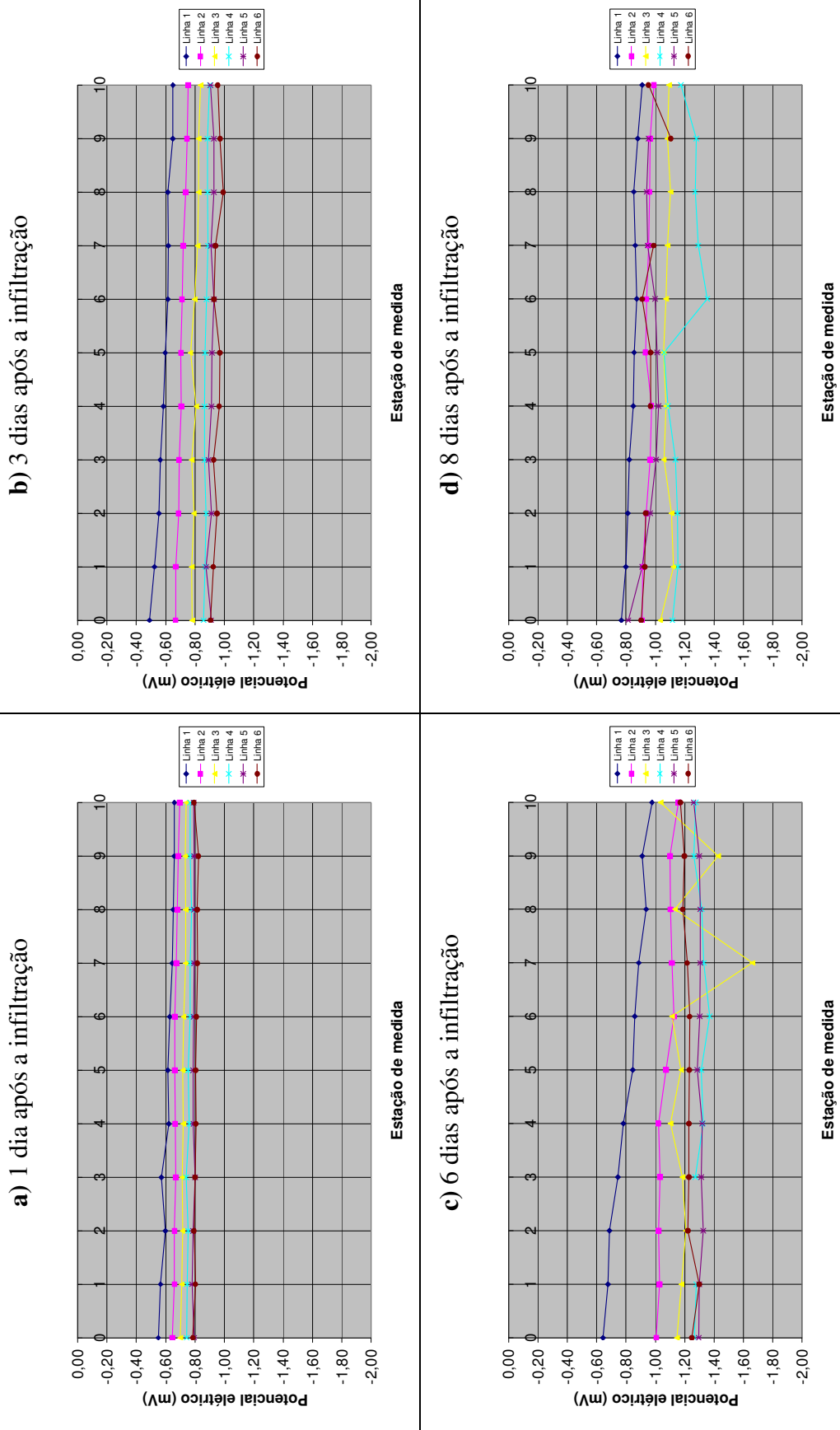


Figura D.10: Curvas de potencial elétrico dos ensaios de SP executados após a infiltração de 900 litros na vala B.