



RELATÓRIO TÉCNICO:
**TOMOGRAFIA DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA (ERT),
POLARIZAÇÃO INDUZIDA (IP) E POTENCIAL
ESPONTÂNEO (SP)**

LOCAL: CAMPUS UEPG UVARANAS – AVENIDA GENERAL CARLOS
CAVALCANTI, 4748 –
UVARANAS – CEP: 84.030-900 – PONTA GROSSA – PR

DATA: 21/10/2025

Elaborado por: Celso J. Costa-Junior (Bacharel em Geofísica)

GeoBack – Soluções Geofísicas para Engenharia e Meio Ambiente

Rua Desembargador Lauro Lopes, 177, Sobrado 1, Sala 1, Jardim Carvalho – CEP 84015-710 –
Ponta Grossa – PR
site: <https://geoback.com.br/>
E-mail: contato@geoback.com.br
Fone/whatsapp: (42) 99833-1242

Resumo Técnico

O presente relatório técnico apresenta os resultados do levantamento geométrico realizado no **Campo Experimental de Geotecnia (CEEG)** da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), utilizando os métodos de Tomografia Elétrica de Resistividade (ERT), Polarização Induzida (IP) e Potencial Espontâneo (SP). O estudo foi conduzido em área previamente investigada por sondagens à percussão (SPT), permitindo a integração entre informações geofísicas e geotécnicas para a caracterização do subsolo.

As seções de resistividade indicaram três unidades principais:

- Uma camada superficial argilo-silto-arenosa, de baixa resistividade e alta cargaabilidade, até cerca de 4 m de profundidade;
- Uma zona intermediária silto-arenosa, com resistividade moderada (20–80 Ωm) entre 4 e 10 m, associada a solos de consistência média a rija;
- Uma transição para meio mais condutivo e saturado a partir de 10–12 m, compatível com o nível freático identificado nas sondagens SPT.

Além das inversões diretas, foi elaborada a **modelagem de resistividade aparente** a partir do modelo estratigráfico, cuja inversão resultou em uma seção sintética comparável à obtida em campo. A correspondência entre ambas validou o modelo geométrico proposto e confirmou a coerência entre as principais feições estratigráficas. A concordância espacial entre os resultados de ERT, IP, SP e K demonstra a consistência do modelo hidrogeológico proposto, validado tanto em campo quanto por modelagem sintética.

Com base na relação empírica de Henriot (1975) e Griffiths (1976), foi estimada a condutividade hidráulica (K) do subsolo a partir dos valores de resistividade. O modelo de K revelou zonas de maior permeabilidade entre 65 m e 105 m ao longo da linha A–B, coincidindo com o gradiente de fluxo observado no SP e reforçando a interpretação hidrogeológica integrada.

Assim, o trecho entre aproximadamente 70 m e 85 m a partir do ponto A – região próxima ao furo SPT-02 – sugere as condições mais favoráveis para implantação de um poço de captação de água subterrânea.

Introdução

O presente estudo geofísico foi realizado no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos (CEEG) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), localizado no bairro de Uvaranas, município de Ponta Grossa, Paraná (figuras 1.1 e 1.2). A área integra as instalações do Departamento de Engenharia Civil e atua como um laboratório a céu aberto para o desenvolvimento de pesquisas em mecânica dos solos, fundações e geotecnia ambiental. O CEEG encontra-se em uma região caracterizada por relevo suavemente ondulado e presença de solos residuais de arenito da Formação Furnas, pertencente ao Grupo Paraná.

O objetivo geral deste estudo foi realizar três métodos geoeletricos complementares: Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT), Polarização Induzida (IP) e Potencial Espontâneo (SP), para obter uma caracterização detalhada das propriedades elétricas do subsolo, correlacionando-as com as informações geotécnicas previamente existentes no local, derivadas de ensaios de Sondagem à Percussão (SPT). Esses ensaios foram executados em campanhas anteriores e encontram-se descritos em laudos técnicos do CEEG (GAIOSKI, 2018; GAIOSKI, 2019; e GAIOSKI, 2021), cobrindo os furos SP01 a SP05 localizados ao longo do perfil investigado.

O método de Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT) permite identificar variações laterais e verticais de resistividade elétrica associadas a mudanças de litologia, grau de saturação e presença de argilas ou materiais mais arenosos. O método de Polarização Induzida (IP) complementa essa análise ao indicar o grau de cargabilidade elétrica dos diferentes tipos de solos, frequentemente relacionado à presença de minerais condutores ou de argila. Por sua vez, o levantamento de Potencial Espontâneo (SP) possibilita a observação de gradientes naturais de potencial elétrico no terreno, associados a fluxos de água subterrânea e processos eletroquímicos em subsuperfície.

O presente estudo incluiu, além da inversão convencional dos dados geoeletricos, a elaboração de um modelo sintético de resistividade para validação do modelo estratigráfico obtido e a estimativa da condutividade hidráulica (K) com base nas relações empíricas de Henriot (1975) e Griffiths (1976). Essa abordagem integrada permitiu não apenas caracterizar a distribuição litológica do subsolo, mas também inferir suas propriedades hidráulicas, ampliando o potencial de aplicação dos métodos geoeletricos em estudos hidrogeológicos e de fundações.



Figura 1.1: Vista geral do Campo Experimental de Geotecnia (CEEG) da UEPG. Fonte: Fonte: GAIOSKI (2021).

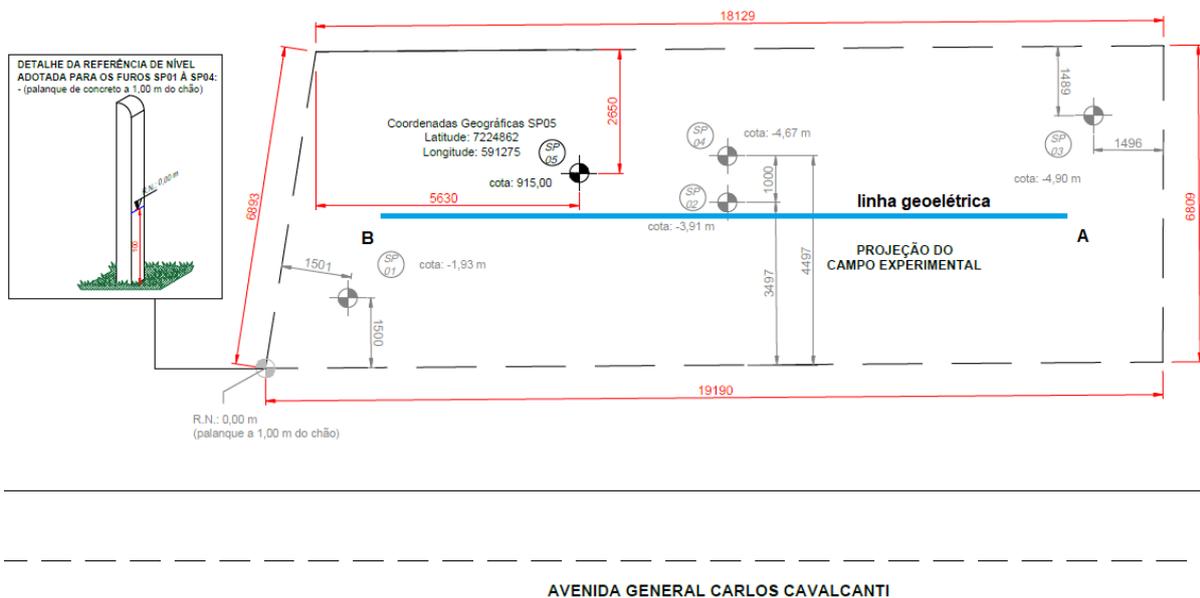


Figura 1.2: Mapa de localização do Campo Experimental de Geotecnia (CEEG) e posicionamento das sondagens SPT. Fonte: GAIOSKI (2021).

Metodologia

Foram empregados três métodos geoeletricos complementares: (i) Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT), (ii) Polarização Induzida (IP) e (iii) Potencial Espontâneo (SP). A configuração utilizada foi o arranjo dipolo-dipolo (figura 2.1), com espaçamento entre eletrodos de 10 metros e seis níveis de investigação ($n=1$ a 6), totalizando um caminhamento de 150 metros. Os dados de SP foram obtidos ao longo da mesma linha A-B, com medições realizadas ponto a ponto entre eletrodos de potencial.

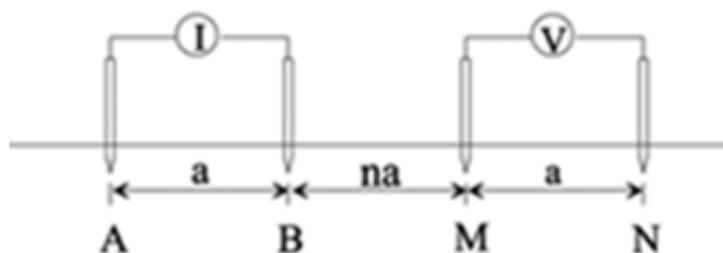


Figura 2.1: Arranjo dipolo-dipolo, onde: a é a distância entre os eletrodos AB e entre os eletrodos MN e n é o nível de profundidade. Fonte: Elaborada pelo autor.

Equipamentos Utilizados

As aquisições dos dados de resistividade e polarização induzida foram realizadas com o eletrorresistivímetro multifuncional modelo ADMT-6B, que integra os módulos de emissão e recepção em corrente contínua, permitindo medições de resistividade aparente, IP no domínio do tempo e potencial espontâneo. O equipamento possui faixa de tensão de entrada de -2500 mV a $+2500$ mV, corrente máxima de 6 A e supressão de interferência de 50 Hz superior a 80 dB (fotos no Anexo D).

Para o chaveamento automático e ordenado dos pontos de injeção e recepção nos arranjos de ERT, utilizou-se um Comutador CME-32, capaz de gerenciar até 32 eletrodos distribuídos em dois blocos de 16 canais. O equipamento permite a conexão direta às portas A, B, M e N do eletrorresistivímetro, garantindo agilidade e precisão no chaveamento. Os eletrodos utilizados foram de aço inoxidável.

Processamento e Inversão dos Dados

Os dados de resistividade aparente e cargabilidade foram processados e invertidos no software RES2DINV, empregando o método de inversão suavizada (smooth model inversion) com norma L2 e até 5 iterações. Os dados de SP foram tratados e interpolados no software Surfer, utilizando krigagem como método de interpolação e normalização em milivolts (mV), seguindo a tendência geométrica observada no perfil A–B. A etapa de interpretação baseou-se na integração dos resultados geofísicos com os dados de sondagens SPT já existentes no local.

Referências de Interpretação

A interpretação dos resultados geoeletricos baseou-se em faixas típicas de resistividade aparente (ρ_a) e de polarização induzida (IP) reportadas na literatura e ajustadas a partir da experiência acumulada em levantamentos realizados no Estado do Paraná. A Tabela 3.1 apresenta valores indicativos para diferentes tipos de solos e estados de saturação, servindo como referência para a análise integrada dos dados de ERT e IP obtidos no Campo Experimental de Geotecnia (CEEG). Com base nas sondagens disponíveis no local, destaca-se o furo SPT-05, cuja descrição estratigráfica serve de referência para correlação geológica com os perfis geoeletricos. As profundidades são medidas a partir da superfície natural:

- (i) 0–1,5 m: argila siltosa arenosa, fofa a pouco compacta;
- (ii) 1,5–3,5 m: argila siltosa arenosa, consistência média;
- (iii) 3,5–6,0 m: silte argilo-arenoso, consistência média;
- (iv) 6,0–8,0 m: silte argilo-arenoso, médio a rijo;
- (v) 8,0–10,0 m: argila siltosa arenosa, consistência média;
- (vi) 10,0–12,0 m: argila siltosa arenosa, média a mais compacta.

O nível d'água medido durante a sondagem situa-se em aproximadamente 12 m, indicando que a transição entre zonas de menor e maior resistividade nos perfis de ERT/IP pode estar associada à variação de saturação do solo e à presença da zona freática. A correlação entre as faixas de resistividade e cargabilidade apresentadas na Tabela 3.1 e a estratigrafia do SPT-05 fornece suporte para a interpretação das seções geoeletricas do CEEG, permitindo distinguir camadas predominantemente argilosas (valores baixos de ρ_a e IP elevados) de camadas mais arenosas e compactas (valores mais altos de ρ_a e IP reduzidos).

Tabela 3.1: Faixas indicativas usadas como guia de interpretação (ρ_a e IP).

Material / Estado	ρ_a (Ω m)	IP (ms)
Solo argiloso úmido–molhado	1–10	5–30
Solo silto-argiloso úmido	10–100	2–15
Areias com camadas de silte	30–150	0.5–5
Areia grossa mais seca/compacta	100–300	< 2

Interpretação dos Resultados

Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT)

A figura 4.1 apresenta a seção de resistividade aparente e cargabilidade obtida ao longo da linha A–B, no Campo Experimental de Geotecnia da UEPG (CEEG)¹.

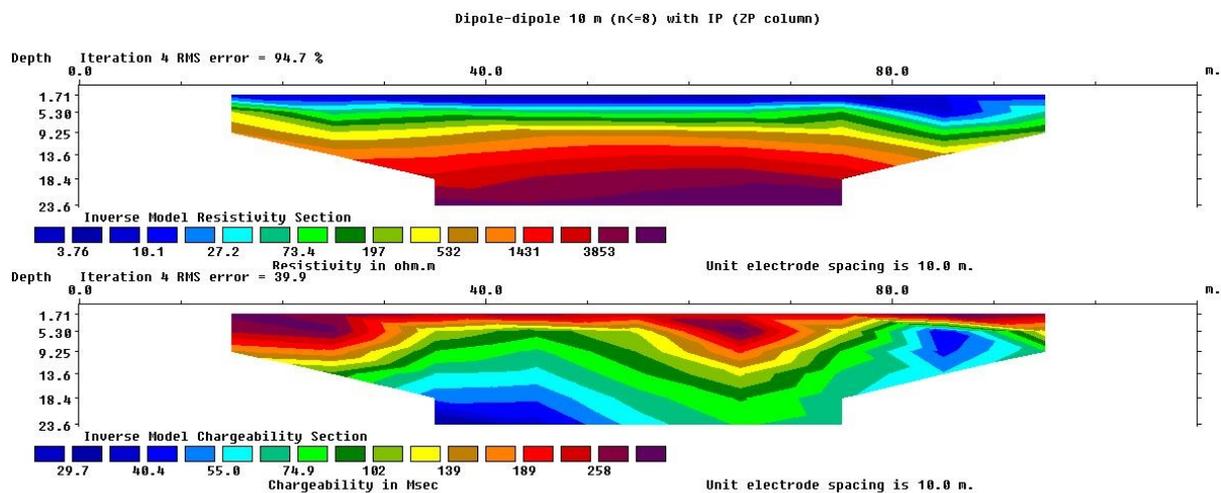


Figura 4.1: Seção de resistividade aparente e cargabilidade aparente obtida no perfil A–B do Campo Experimental de Geotecnia (CEEG). Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se um comportamento típico de solo residual da Formação Furnas, com valores de resistividade inferiores a $10 \Omega\text{m}$ predominando nos primeiros 3 a 4 m de profundidade, compatíveis com uma camada argilo-silto-arenosa úmida a saturada, identificada também nos furos SPT-03 e SPT-05. Essa faixa representa o horizonte superficial mais intemperizado e plástico, de coloração marrom-avermelhada e consistência mole a média.

Entre 4 e 10 m de profundidade, a resistividade aumenta gradualmente para valores na faixa de 20 a $80 \Omega\text{m}$, refletindo a transição para materiais silto-arenosos e silte argilo-arenosos de consistência média a rija. Essa zona intermediária corresponde ao horizonte identificado nas sondagens como silte argilo-arenoso de coloração marrom-claro, com presença de veios e manchas esbranquiçadas.

¹Optou-se por excluir da inversão os dados correspondentes ao trecho final da linha geofísica (acima de 110 m), uma vez que apresentavam respostas inconsistentes com o comportamento esperado do subsolo da área. Assim, recomenda-se que essa porção seja objeto de uma investigação complementar em etapa posterior, a fim de esclarecer as possíveis causas dessa anomalia observada.

Abaixo de aproximadamente 10 a 12 m, a resistividade passa para valores mais elevados, indicando o provável nível de saturação permanente, coerente com a profundidade do nível d'água medido em $z \approx 12$ m. Essa transição marca o topo da zona freática e coincide com o início do contato entre o solo residual e o saprolito derivado do arenito da Formação Furnas.

Polarização Induzida (IP)

Pela figura 4.1, os maiores valores de cargabilidade ocorrem predominantemente na porção esquerda (próxima ao ponto A) e central do perfil – entre profundidades de 2 a 8 m. Essa zona coincide espacialmente com as resistividades mais baixas e corresponde a materiais argilosos e silte-argilosos úmidos. O alto valor de IP reflete a maior capacidade de polarização das partículas finas e a presença de água adsorvida.

Valores intermediários de IP dominam o setor inferior do perfil (entre 8 e 14 m), onde também ocorrem resistividades na faixa de 50 a 100 Ω m. Essa relação indica materiais de textura mais grossa (silte-arenosos), com menor proporção de argila e menor capacidade de polarização.

Na porção direita do perfil (próxima ao ponto B), observa-se um contraste marcado com valores reduzidos de IP, o que sugere a presença de um horizonte mais arenoso e parcialmente drenado. Essa feição está de acordo com a topografia local e o sentido preferencial de escoamento superficial e subterrâneo em direção ao setor B, apontado também pelo perfil de Potencial Espontâneo (figura 4.2).

De modo geral, a seção de IP confirma a interpretação obtida com a ERT, reforçando a distinção entre camadas argilosas superficiais polarizáveis e horizontes mais arenosos em profundidade. A integração dessas informações, juntamente com o perfil SPT-05, permitiu delinear um modelo conceitual coerente do subsolo do CEEG, representado por uma sequência de solos residuais argilosos sobre siltes arenosos de transição, assentados sobre saprolito saturado.

Potencial Espontâneo (SP)

A figura 4.2 apresenta o perfil de Potencial Espontâneo (SP) medido ao longo da mesma linha A–B do levantamento ERT/IP. Os valores de potencial foram normalizados em milivolts (mV) e interpolados ao longo do comprimento total de 140 m, e a profundidade estimada foi obtida considerando 20% do comprimento de cada medida para o arranjo dipolo-dipolo.

A distribuição dos potenciais revela um comportamento coerente com o padrão hidráulico e litológico do local. Observa-se um gradiente geral crescente de potencial do ponto A para o ponto B. Essa tendência indica o sentido preferencial de fluxo de água subterrânea em direção ao ponto B.

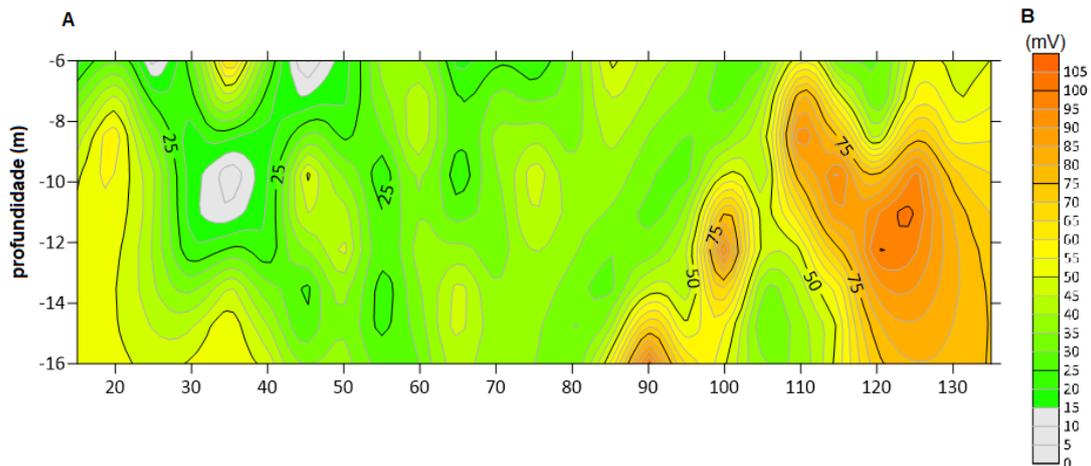


Figura 4.2: Distribuição do Potencial Espontâneo (SP) ao longo da linha A–B no Campo Experimental de Geotecnia (CEEG). Fonte: Elaborada pelo autor.

Entre as abscissas de 90 a 130 m, registra-se uma anomalia positiva acentuada, possivelmente associada a zonas de recarga ou maior condutividade hidráulica no subsolo. Essa feição coincide espacialmente com a região de resistividades intermediárias e baixa cargabilidade, interpretada como uma camada silto-arenosa parcialmente saturada. Tal comportamento é típico de zonas onde o fluxo ascendente de água causa a migração de íons e o desenvolvimento de potenciais eletrocinéticos.

No trecho entre 20 e 60 m, predominam potenciais mais baixos, correspondendo a regiões de maior teor de argila, como indicado pelos baixos valores de resistividade e altos valores de IP. Essa correlação sugere que o SP responde de forma inversa à condutividade elétrica, sendo mais atenuado em meios de elevada condutividade e elevado conteúdo de finos.

Em conjunto, os três métodos (ERT, IP e SP) delineiam um modelo coerente de subsolo para o CEEG, no qual as zonas argilosas superficiais, altamente polarizáveis e condutivas, atuam como níveis de retenção de umidade, enquanto as camadas subjacentes de silte arenoso, menos polarizáveis, apresentam gradientes de SP mais elevados e drenagem preferencial em direção ao setor B da linha.

Estimativa da Condutividade Hidráulica (K)

Com base na relação empírica proposta por Henriot (1975) e Griffiths (1976), é possível estimar a condutividade hidráulica (K) a partir da resistividade elétrica (ρ) de sedimentos arenosos e argilosos saturados. Esses autores demonstraram que existe uma correlação direta entre a resistividade e a condutividade hidráulica (figura ??), descrita genericamente por uma lei potencial do tipo:

$$K = 9 \times 10^{-10} \rho^{4.585}$$

onde K é a condutividade hidráulica (m/s) e ρ é a resistividade elétrica (Ωm). Essa

relação foi validada posteriormente em diferentes contextos sedimentares e é amplamente empregada em estudos hidrogeofísicos para estimar a transmissividade de camadas saturadas.

A Figura 4.3 apresenta o modelo espacial de condutividade hidráulica calculado a partir dos valores de resistividade obtidos na Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT). A distribuição mostra duas zonas principais de maior condutividade hidráulica, localizadas aproximadamente entre as abscissas de 65–75 m e 95–105 m ao longo da linha A–B. Essas regiões coincidem com as faixas de resistividade intermediária (30–80 Ωm) e baixa cargabilidade identificadas nas seções de ERT e IP, indicando camadas silto-arenosas de maior permeabilidade.

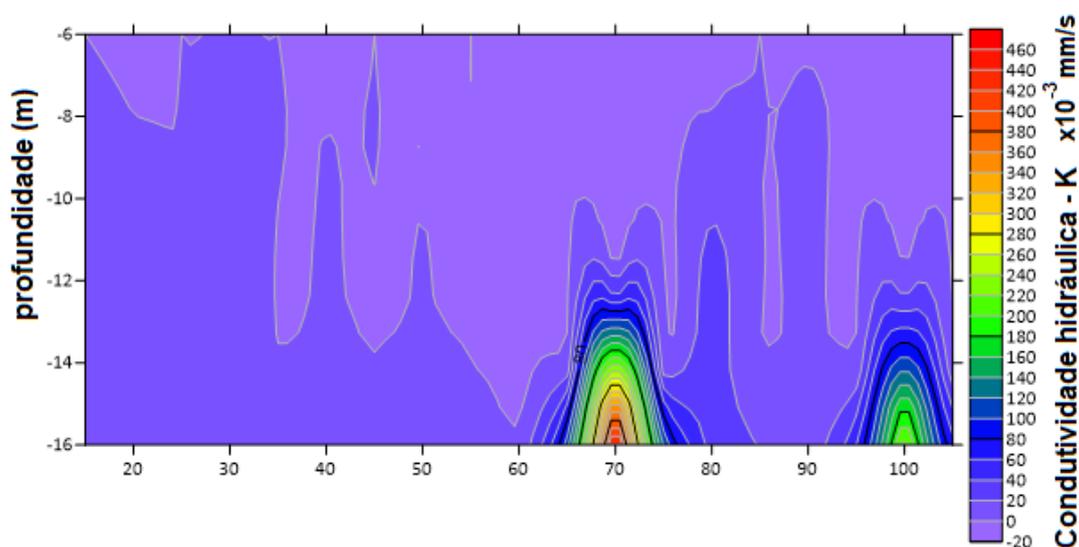


Figura 4.3: Modelo de condutividade hidráulica (K) estimado a partir da resistividade elétrica (método de Henriot e Griffiths). As maiores condutividades ocorrem nas regiões entre 65–75 m e 95–105 m, associadas a materiais silto-arenosos. Fonte: Elaborada pelo autor.

A coerência entre o modelo de condutividade hidráulica (K) e os resultados dos métodos de Polarização Induzida (IP) e Potencial Espontâneo (SP) reforça a interpretação hidrogeológica proposta. As zonas de maior K coincidem com regiões de resistividade intermediária e baixa cargabilidade, típicas de materiais silto-arenosos parcialmente saturados, que funcionam como condutos preferenciais de drenagem subterrânea. O gradiente positivo de SP em direção ao ponto B confirma a direção de fluxo e a conectividade hidráulica nesse setor. Assim, o intervalo entre aproximadamente 70 m e 85 m a partir do ponto A configura-se como o trecho mais promissor para eventual captação de água subterrânea ou monitoramento hidrogeotécnico.

Coluna estratigráfica interpretada

A Figura 4.4 sintetiza o modelo estratigráfico conceitual interpretado a partir da integração dos métodos ERT, IP e SP, associado às descrições do SPT-05. Observam-se três

horizontes principais:

(i) uma camada superficial argilo-silto-arenosa, com resistividade reduzida ($\rho < 10\text{--}20 \Omega\text{m}$) e alta cargabilidade, representando um solo residual intemperizado e úmido até aproximadamente 4 m;

(ii) uma zona intermediária silto-arenosa de resistividade moderada ($20 < \rho < 80 \Omega\text{m}$) e cargabilidade intermediária, entre 4 e 10 m de profundidade, associada a solos de consistência média a rija; e

(iii) uma transição para um meio mais saturado a partir de aproximadamente 10–12 m, coerente com o nível freático registrado nos ensaios SPT.

Esse perfil conceitual embasa as recomendações hidrogeológicas apresentadas nas Considerações Finais, notadamente a definição da faixa preferencial de instalação de tela para eventual captação de água subterrânea.

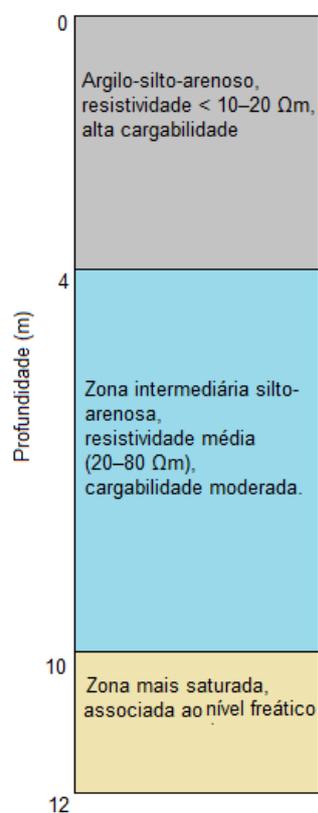


Figura 4.4: Coluna estratigráfica interpretada a partir da integração dos métodos ERT, IP, SP e correlação com dados SPT. Observa-se a evolução vertical de resistividade, IP e SP, com zona preferencial de saturação hídrica a partir de aproximadamente 10 m. Fonte: Elaborada pelo autor.

Validação do modelo estratigráfico

A figura 4.4 serviu de base para a elaboração do modelo conceitual de resistividade aparente mostrado na figura 4.5 – com RMS de 10%. Esse modelo foi posteriormente utilizado como condição inicial no processo de inversão, permitindo gerar uma seção sintética (figura 4.6) comparável à obtida diretamente a partir dos dados de campo (figura 4.1). A

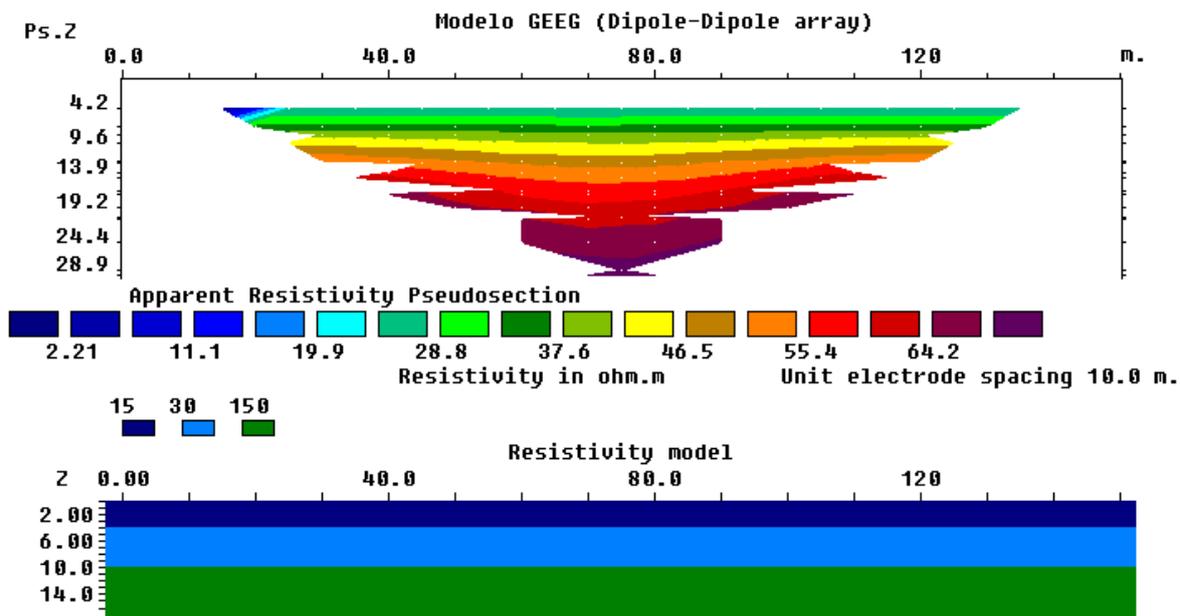


Figura 4.5: Modelo de resistividade aparente. Fonte: Elaborada pelo autor.

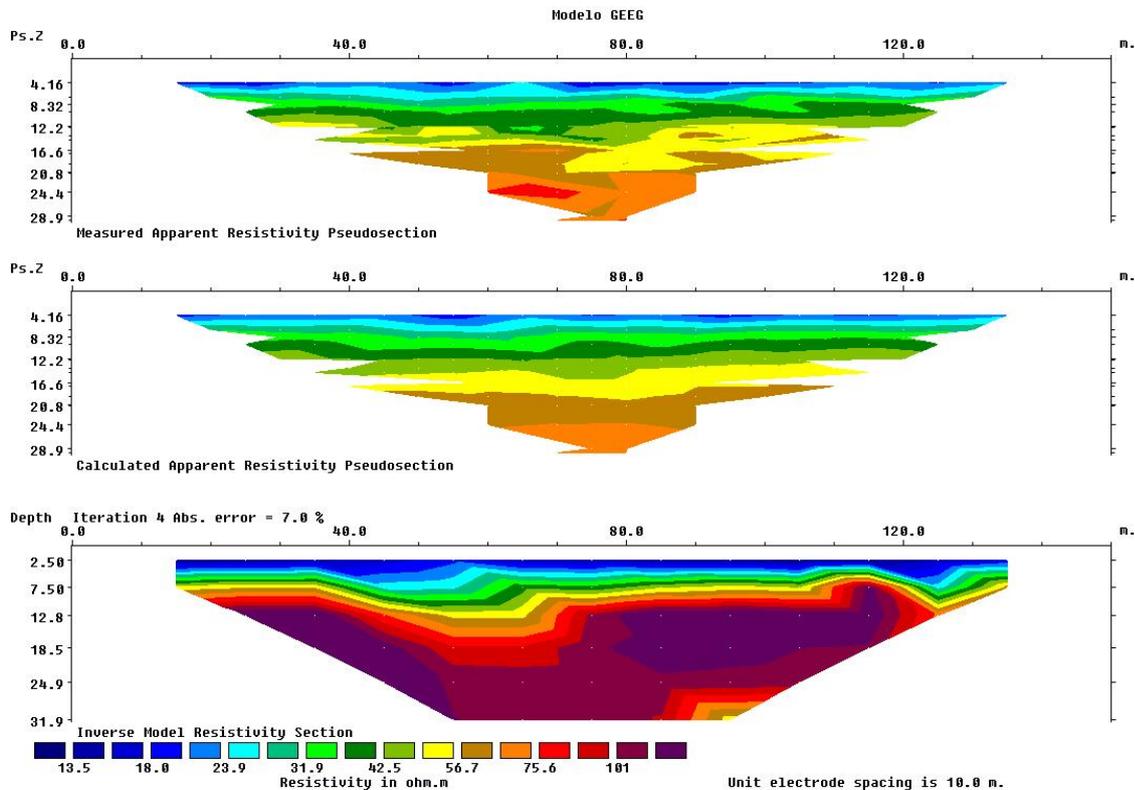


Figura 4.6: Inversão do modelo de resistividade aparente. Fonte: Elaborada pelo autor.

ER, IP e SP

comparação entre ambas revela boa correspondência entre os principais horizontes geoeletricos, com zonas de baixa resistividade e alta cargabilidade nas porções superficiais (0–4 m), uma faixa intermediária de resistividade moderada (4–10 m) e a transição para o nível mais saturado a partir de 10–12 m. Essas semelhanças confirmam a consistência do modelo estratigráfico adotado e reforçam a interpretação integrada proposta a partir dos métodos ERT, IP e SP.

Considerações finais

A comparação entre o modelo sintético de resistividade e a seção invertida obtida a partir dos dados de campo confirmou a consistência do modelo estratigráfico proposto, evidenciando boa correspondência entre as principais feições geoeletricas e os horizontes identificados nas sondagens SPT.

A estimativa de condutividade hidráulica (K), derivada da relação empírica entre resistividade e permeabilidade, reforçou a interpretação anterior, destacando zonas de maior condutividade entre 65 m e 105 m ao longo da linha A–B. Essas regiões coincidem com as anomalias positivas de Potencial Espontâneo (SP) e com o gradiente de fluxo subterrâneo em direção ao ponto B.

De modo integrado, os métodos ERT, IP e SP, associados às informações geotécnicas de SPT e ao modelo de K , permitiram construir um modelo conceitual robusto do subsolo do CEEG. O conjunto dos resultados confirma que a faixa compreendida entre 70 m e 85 m a partir do ponto A constitui o setor mais promissor para futura captação de água subterrânea ou para estudos complementares de permeabilidade local, validando a aplicabilidade da abordagem geoeletrica integrada adotada neste trabalho.

As anomalias de condutividade hidráulica apresentaram coerência física e hidrogeológica com os dados de resistividade, polarização e potencial espontâneo, caracterizando zonas de maior permeabilidade associadas a solos silto-arenosos parcialmente saturados, compatíveis com o padrão de fluxo sub-superficial do CEEG.

Referências

GAIOSKI SONDAGENS E PERFURAÇÕES LTDA. Relatório de Sondagem SPT – CPS 246/18 – Laudo nº 118/18. Obra: Campo Experimental de Geotecnia – SP01 a SP03. Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa – PR, 2018.

GAIOSKI SONDAGENS E PERFURAÇÕES LTDA. Relatório de Sondagem SPT – CPS 246/19 – Laudo nº 105/19. Obra: CEEG – Campo Experimental de Estudos Geotécnicos – SP04. Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa – PR, 2019.

GAIOSKI SONDAGENS E PERFURAÇÕES LTDA. Relatório de Sondagem SPT – CPS 379/21 – Laudo nº 167/21. Obra: CEEG – Campo Experimental de Estudos Geotécnicos – SP05. Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa – PR, 2021.

GRIFFITHS, D.H. (1976). Application of electrical resistivity methods for groundwater investigation in sedimentary basins. *Geophysical Prospecting*, 24(1), 68–82.

HENRIET, J.P. (1975). Direct application of the Dar Zarrouk parameters in groundwater surveys. *Geophysical Prospecting*, 23(2), 344–353.

Anexo A – Dados de campo ERT/IP

O levantamento geolétrico foi realizado com o arranjo dipolo–dipolo com espaçamento $a = 10$ m e fator geométrico até $n \leq 6$, com aquisição simultânea de resistividade aparente, cargabilidade (em milissegundos) e ZP (polarização combinada).

Tabela 1: Dados de posição (X), fator de espaçamento (a), nível n , resistividade aparente e cargabilidade.

X (m)	a (m)	n	Resistividade aparente	Cargabilidade
15	10	1	3.456880734	379.57
20	10	2	15.33379653	286.68
25	10	3	9.7968	323.85
30	10	4	52.72098765	133.26
35	10	5	148.1005348	361.84
40	10	6	145.696	243.35
25	10	1	3.303116883	311.84
30	10	2	15.39612903	324.22
35	10	3	30.01978022	213.13
40	10	4	58.94078212	197.93
45	10	5	104.9791045	290.61
50	10	6	141.020198	217.3
35	10	1	4.011096774	230.51
40	10	2	17.427	186.14
45	10	3	34.67484663	286.04
50	10	4	66.25054945	225.95
55	10	5	101.4461538	256.18
60	10	6	156.9033846	229.63
45	10	1	3.434917127	234.1
50	10	2	11.14792899	209.89
55	10	3	34.16580311	189.65
60	10	4	62.4746114	238.04
65	10	5	81.20689655	258.16
70	10	6	127.0467016	187.14
55	10	1	4.508717949	207.23
60	10	2	21.03069767	230.68
65	10	3	36.13150685	255.87
70	10	4	78.61294964	227.39
75	10	5	120.3666667	290.17

Continua na próxima página

X (m)	a (m)	n	Resistividade aparente	Cargabilidade
80	10	6	464.5325373	189.32
65	10	1	5.507076923	292.13
70	10	2	10.76571429	268.7
75	10	3	33.912	179.45
80	10	4	77.57647059	220.95
85	10	5	264.7226277	232.2
90	10	6	256.4333333	260.69
75	10	1	2.934874372	242.93
80	10	2	13.20175182	170.54
85	10	3	51.38181818	203.92
90	10	4	144.6912	236.65
95	10	5	186.9165354	237.85
100	10	6	164.1173333	257.26
85	10	1	3.106595745	177.31
90	10	2	16.10748092	218.41
95	10	3	55.93125	314.79
100	10	4	118.5096774	227.85
105	10	5	120.89	248.63
110	10	6	399.8941935	299.27
95	10	1	4.632786885	251.68
100	10	2	31.18344828	241.74
105	10	3	66.10526316	229.97
110	10	4	67.05762712	227.05
115	10	5	264.7984252	294.09
105	10	1	6.485901639	288.52
110	10	2	20.93333333	264.4
115	10	3	34.6656	280.03
120	10	4	145.8580645	303.38
115	10	1	5.340472441	273.23
120	10	2	11.27433071	263.05
125	10	3	81.1804878	285.83
125	10	1	4.102258065	190.74
130	10	2	29.30666667	300.76
135	10	1	7.536	331.85

Anexo B – Dados de Potencial Espontâneo (SP)

Os valores de Potencial Espontâneo (SP) foram obtidos ao longo da mesma linha de aquisição ERT/IP, com pares de eletrodos fixos e referência comum, seguindo interpolação vertical para diferentes níveis aparentes de profundidade representados por cota relativa (Z). Os valores estão expressos em milivolts (mV).

Tabela 2: Dados medidos de Potencial Espontâneo (SP).

X (m)	Z (m)	SP (μ V)
15	-6	17.69
20	-8	60.32
25	-6	6.44
25	-10	42.59
30	-8	16.00
30	-12	18.21
35	-6	70.28
35	-10	2.65
35	-14	54.26
40	-8	18.51
40	-12	17.67
40	-16	48.70
45	-6	3.53
45	-10	55.32
45	-14	18.54
50	-8	18.42
50	-12	49.42
50	-16	37.84
55	-6	37.30
55	-10	18.19
55	-14	19.48
60	-8	49.68
60	-12	38.80
60	-16	29.84
65	-6	17.39
65	-10	19.43
65	-14	51.26
70	-8	37.72

Continua na próxima página

\bar{X} (m)	\bar{Z} (m)	SP (μ V)
70	-12	28.33
70	-16	36.47
75	-6	19.40
75	-10	50.98
75	-14	37.68
80	-8	28.82
80	-12	36.92
80	-16	29.66
85	-6	51.93
85	-10	38.77
85	-14	28.55
90	-8	36.37
90	-12	29.16
90	-16	102.70
95	-6	39.51
95	-10	27.89
95	-14	36.28
100	-8	28.84
100	-12	102.47
100	-16	50.62
105	-6	28.20
105	-10	36.30
105	-14	28.50
110	-8	102.37
110	-12	51.30
110	-16	36.01
115	-6	28.29
115	-10	102.47
115	-14	50.78
120	-8	27.00
120	-12	102.35
125	-6	51.42
125	-10	102.31
130	-8	50.93
135	-6	50.21

Anexo C – Introdução aos Principais Conceitos

Resistividade Aparente

A resistividade aparente é calculada considerando que o terreno seja homogêneo, plano e isotrópico. Suponha que A e B sejam dois eletrodos de fornecimento de energia, injetando uma corrente contínua I_P no solo. Os eletrodos M e N são responsáveis pela detecção da diferença de potencial V_P . A resistividade aparente ρ_s é calculada utilizando-se a seguinte equação:

$$\rho_s = K \cdot \frac{V_P}{I_P}, \quad (1)$$

onde:

- K é a constante geométrica do arranjo de eletrodos;
- V_P é a diferença de potencial medida entre os eletrodos M e N ;
- I_P é a corrente que flui através dos eletrodos A e B .

Potencial Espontâneo

Em condições normais, sem injeção de corrente, existe um pequeno potencial detectável no solo, conhecido como potencial espontâneo. Na prática, esse potencial é influenciado por materiais condutores presentes no terreno e deve ser eliminado durante a medição para garantir maior precisão. A unidade do potencial espontâneo é expressa em microvolts (μV).

Potencial Induzido

A potencial induzido ocorre quando o material do solo apresenta propriedades eletroquímicas que geram variações de potencial ao longo do tempo após o corte da corrente. Define-se a taxa de polarização $n(T, t)$ como:

$$n(T, t) = \frac{\Delta V_2(t)}{\Delta V_1(t)} \times 100, \quad (2)$$

onde:

- $\Delta V_1(t)$ é a diferença de potencial inicial;
- $\Delta V_2(t)$ é a diferença de potencial no instante t .

Parâmetro Combinado ZP

O parâmetro combinado ZP é definido pela fórmula:

$$ZP = 0.75 \times M1 \times \frac{TH}{1000}. \quad (3)$$

Amplitude de Amostragem D

A amplitude de amostragem refere-se à média da diferença de potencial entre dois instantes de tempo ($t_2 - t_1$), subtraindo os valores de ruído. É expressa pela seguinte equação:

$$D = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \Delta V_2(t) dt}{\Delta V_2(t)}. \quad (4)$$

Esse parâmetro é frequentemente elevado em corpos rochosos saturados por água. Para valores de $D > 0.4$, geralmente indica-se a presença de água.

Meia-Vida (TH)

A meia-vida (TH) é definida como o tempo necessário para que o valor do potencial secundário ΔV_2 decaia para metade de seu valor inicial. O decaimento pode ser descrito por:

$$\Delta V_2(t) = \Delta V_2(0) \cdot e^{-t/r}. \quad (5)$$

Em corpos rochosos saturados, a meia-vida frequentemente apresenta valores anormalmente elevados. A Figura 1 ilustra o decaimento exponencial do potencial secundário.

Tempo de Retardo de Corte

O tempo de retardo de corte é o intervalo entre o instante do corte da corrente ($M1$) e o início da medição do potencial secundário. Para minimizar os efeitos de interferência eletromagnética, é necessário aguardar um curto período antes de realizar as medições.

Curva de Decaimento

Quando a corrente de fornecimento é interrompida, a diferença de potencial entre os eletrodos diminui de forma exponencial ao longo do tempo. Esse comportamento é representado por uma *curva de decaimento*, conforme ilustrado na Figura 1.

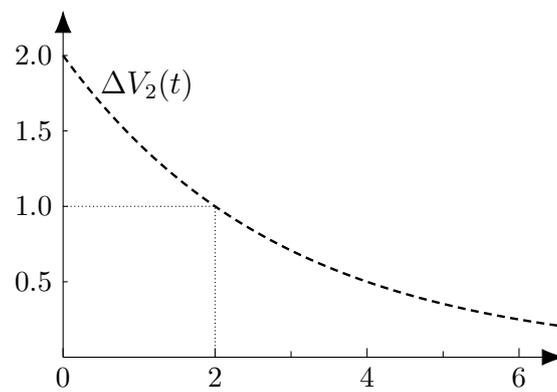
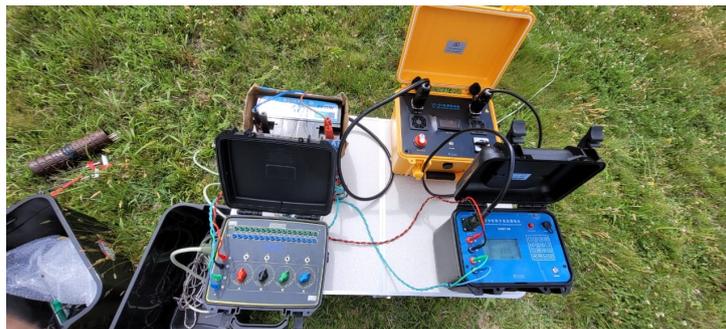


Figura 1: Decaimento exponencial do potencial secundário: $\Delta V_2(t) = \Delta V_2(0) e^{-t/\tau}$, com meia-vida em $t = 2$.

Anexo D – Fotos da aquisição



a)



b)



c)

Figura 2: Fotos: a) equipamento; b) conexão dos eletrodos; e c) montagem da linha.
Fonte: Elaborada pelo autor.

Anexo E – Resistividade aparente e cargabilidade aparente

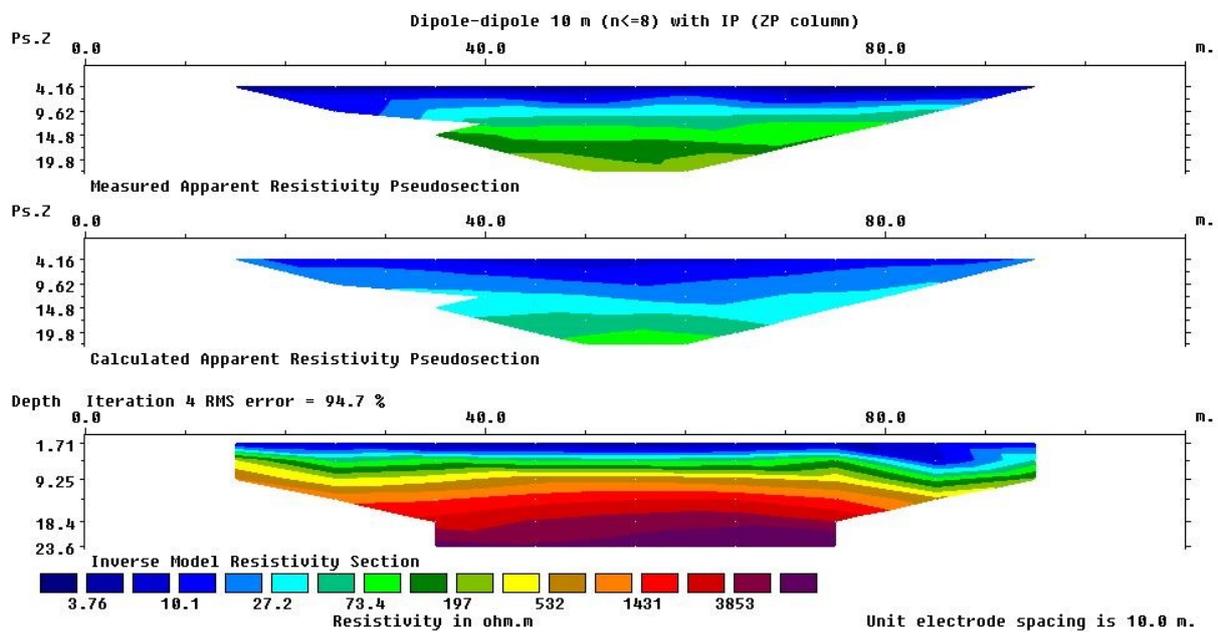


Figura 3: Resistividade aparente e modelo de Resistividade. Fonte: Elaborada pelo autor.

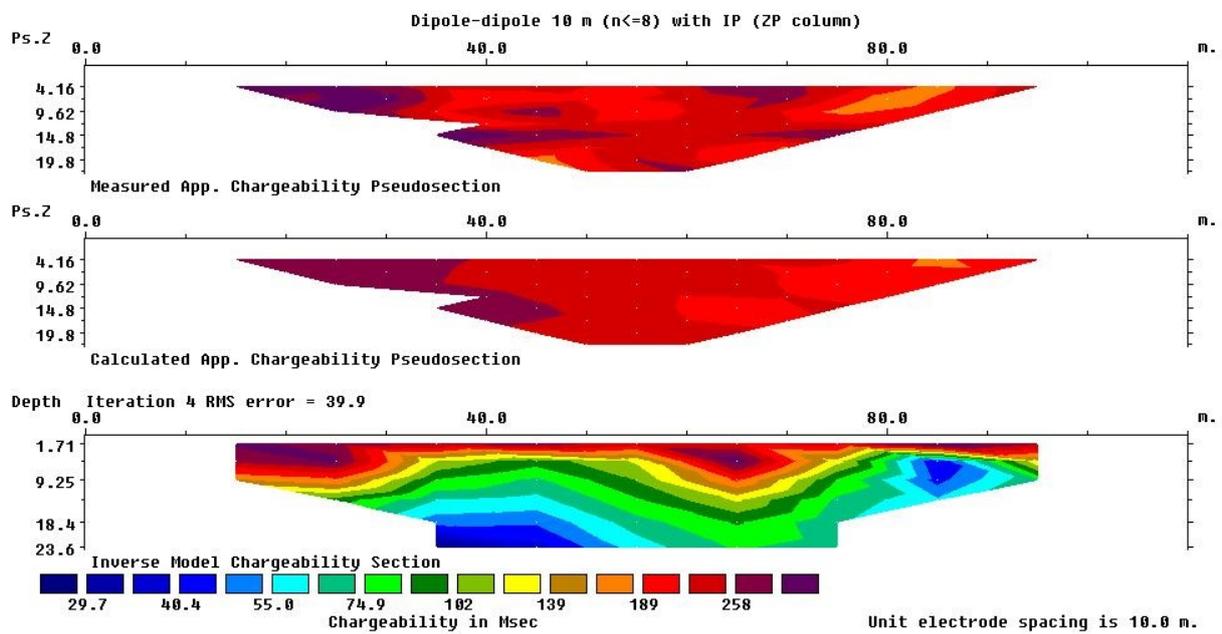


Figura 4: Cargabilidade aparente e modelo de cargabilidade. Fonte: Elaborada pelo autor.